

Auteur ou collectivité : Pacoret, Etienne

Auteur : Pacoret, Etienne

Titre : La technique de la houille blanche. Usines hydroélectriques. Transport de l'énergie électrique. Electrométallurgie - Electrochimie.

Auteur : Pacoret, Etienne

Titre du volume : La technique de la houille blanche. Tome III. Utilisation de l'énergie des chutes d'eau. M...

Adresse : Paris : H. Dunod et E. Pinat, 1920

Collation : 2663f p. : pl. et fig. ; 24 cm

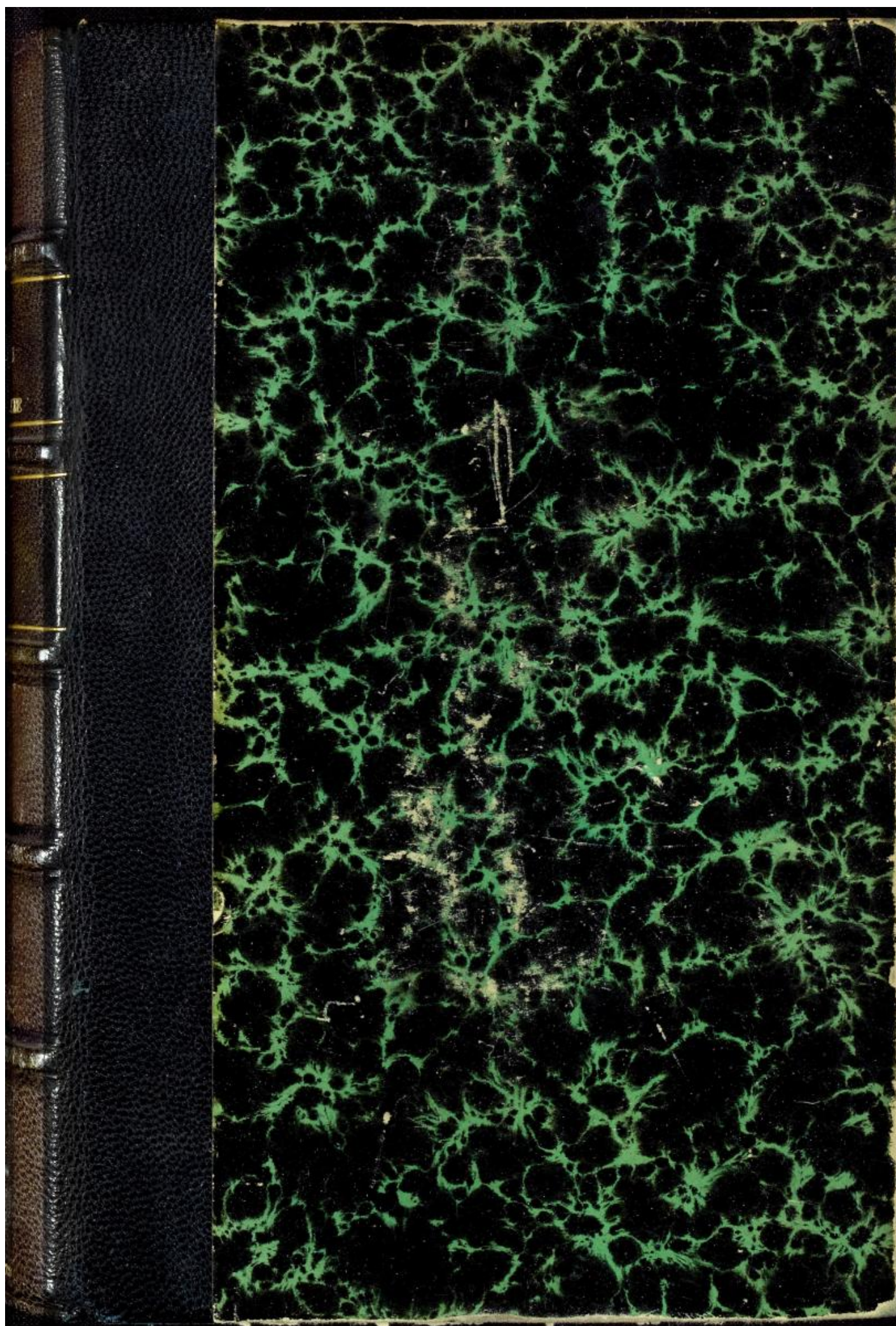
Cote : CNAM-BIB 8 Di 68 II (3)

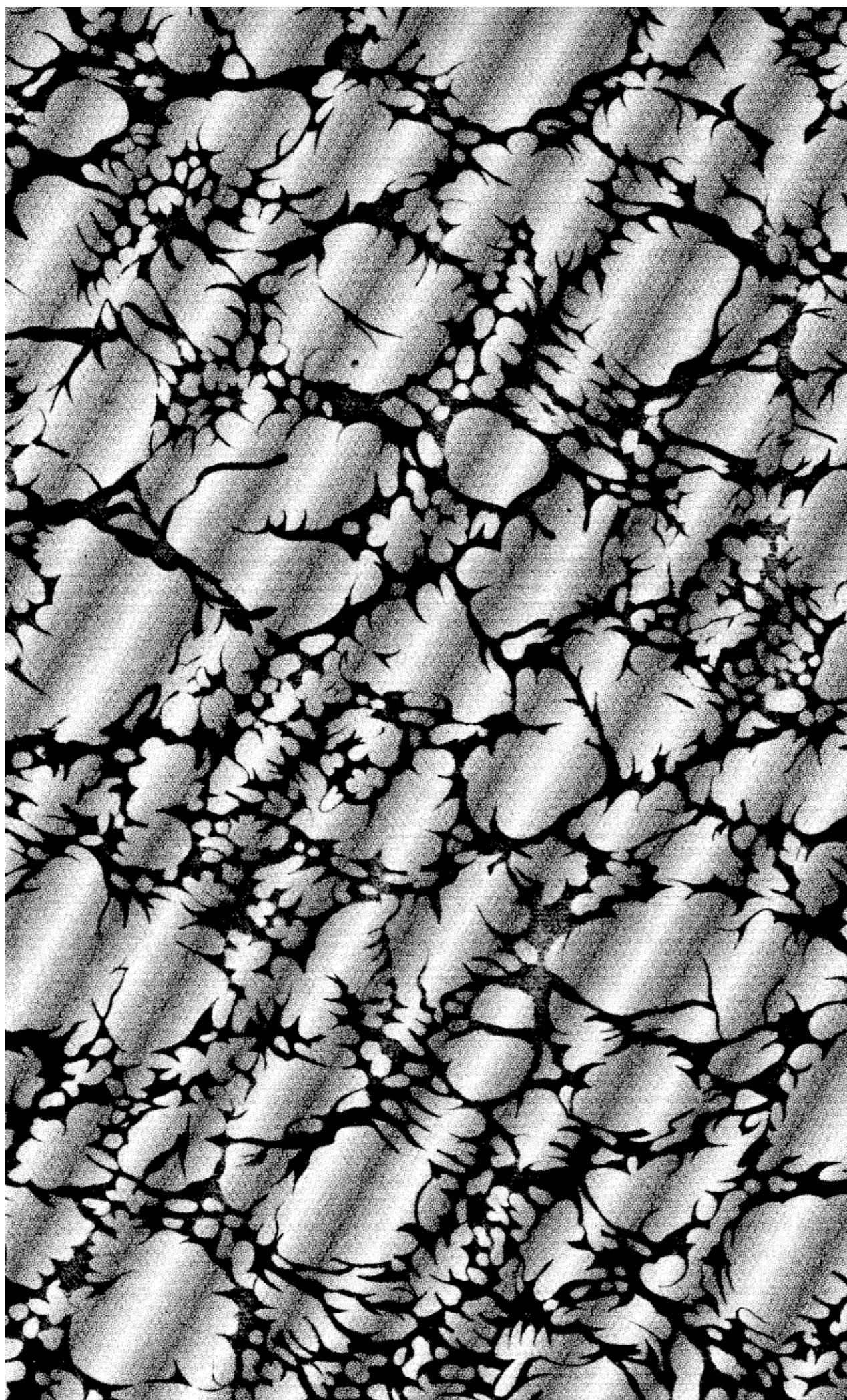
Sujet(s) : Centrales hydroélectriques

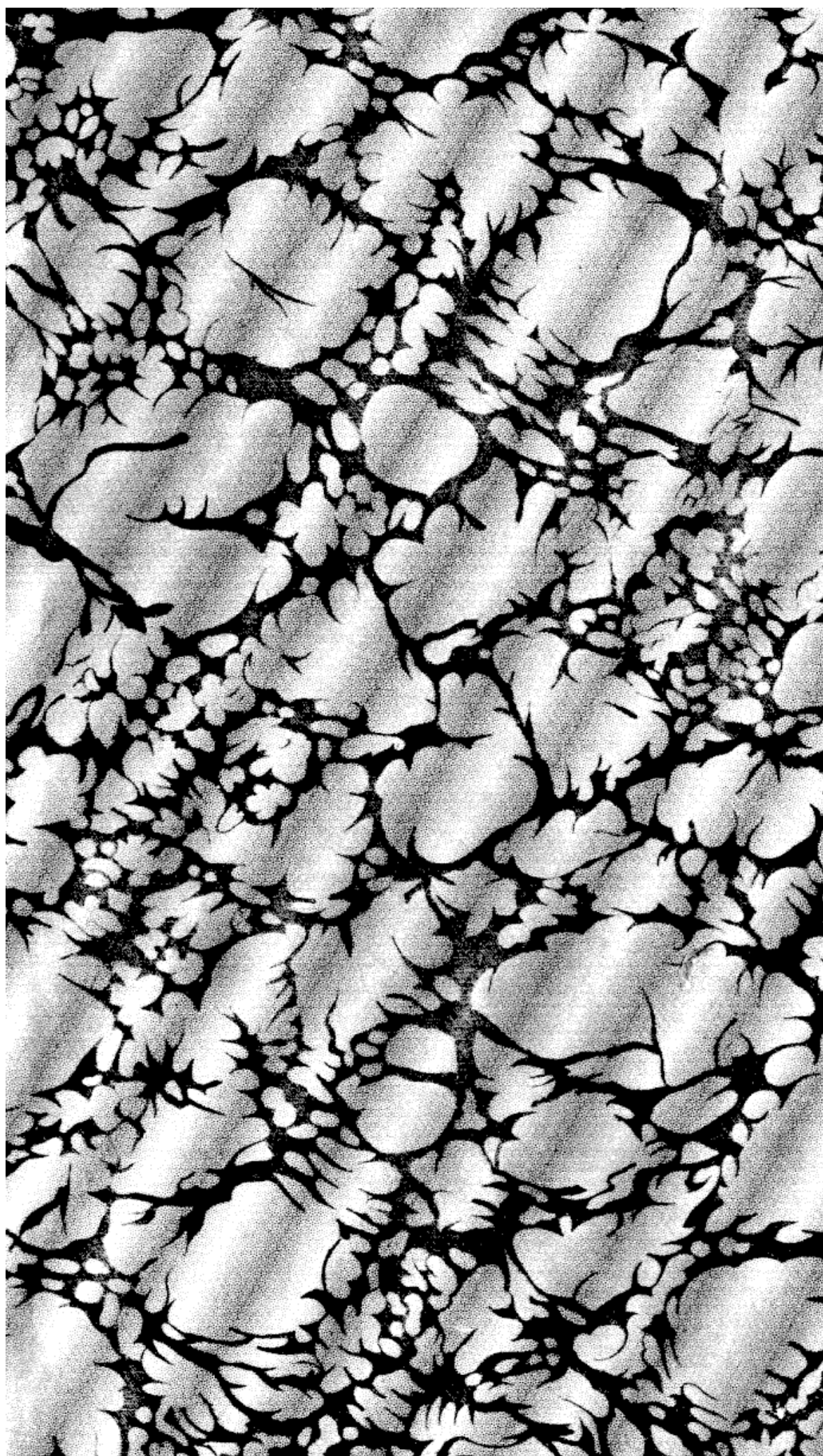
Date de mise en ligne : 08/11/2016

Langue : Français

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?8DI68II.3>

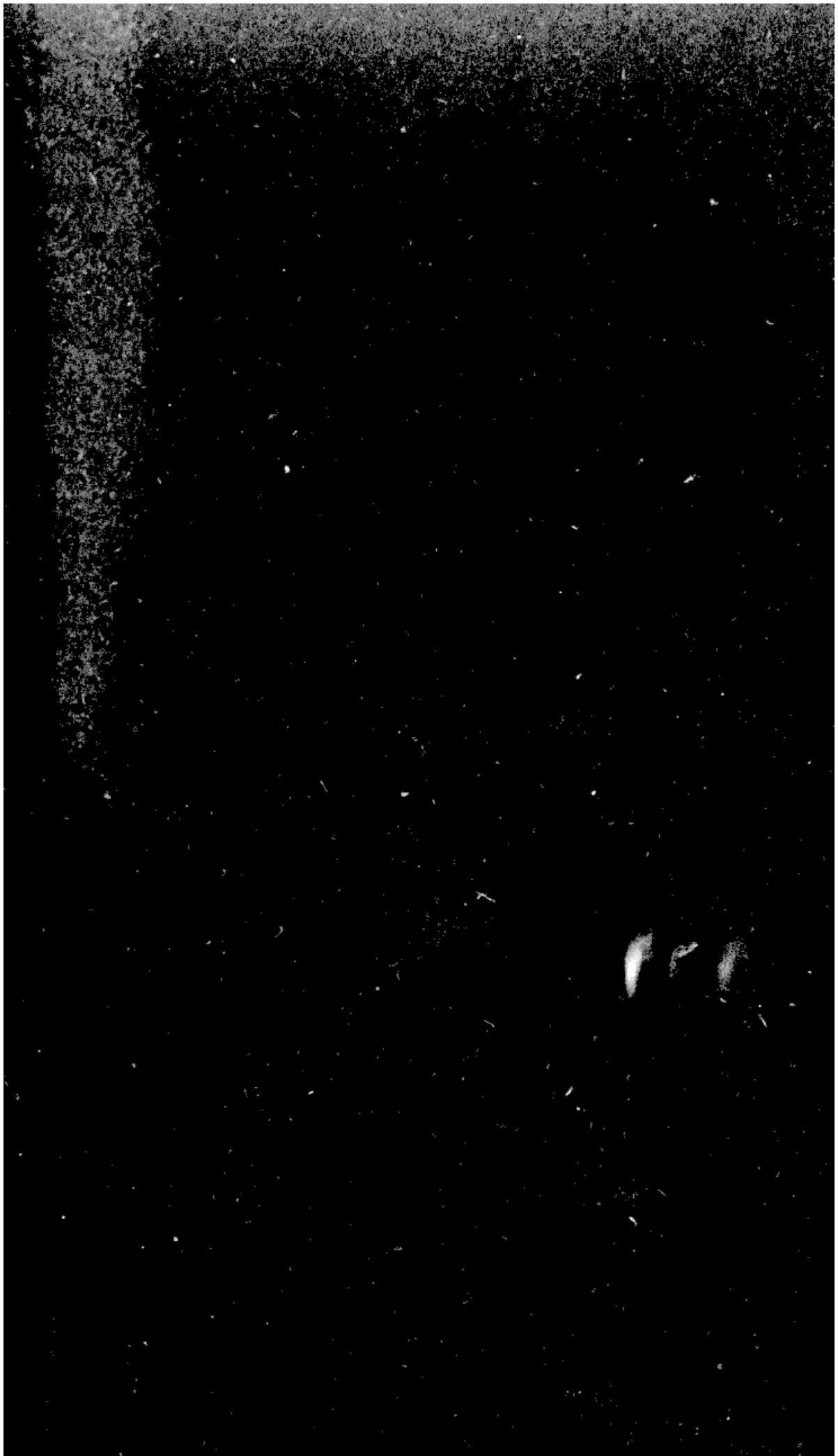






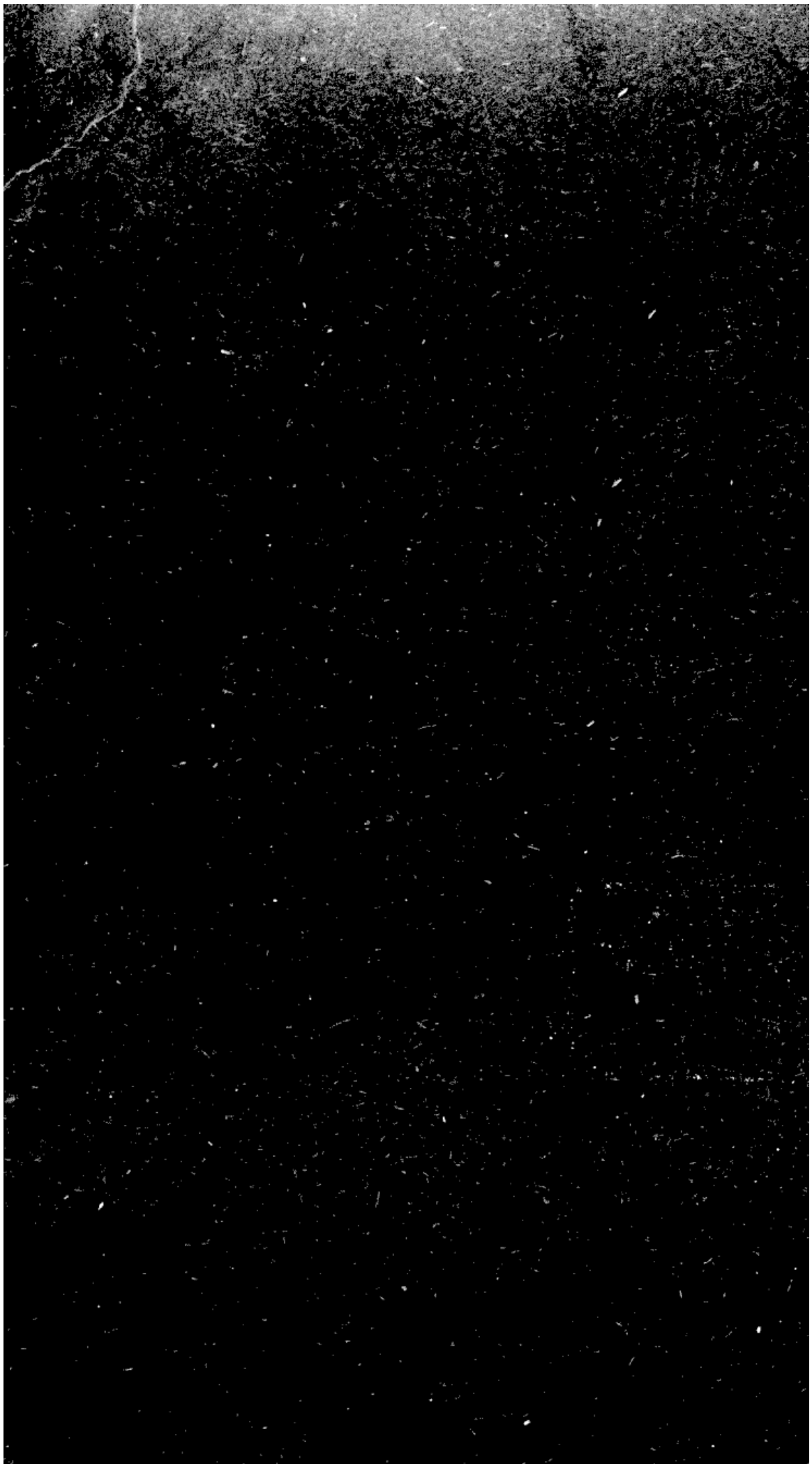
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires





LA TECHNIQUE
DE LA
HOUILLE BLANCHE

TOME III



8^o Di. 68

8^o Di. 68 (2)

LA TECHNIQUE

DE LA

HOUILLE BLANCHE

TOME III

UTILISATION DE L'ÉNERGIE DES CHUTES D'EAU

MATÉRIEL DE PRODUCTION ET DE TRANSFORMATION

DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A HAUTE TENSION

DYNAMOS ALTERNATEURS

MOTEURS A COURANT CONTINU ET A COURANT ALTERNATIF

COMMUTATRICES CONVERTISSEURS - TRANSFORMATEURS STATIQUES

ÉTABLISSEMENT ET CALCUL

DES LIGNES & RÉSEAUX DE TRANSPORT DE FORCE A HAUTE TENSION

APPAREILLAGE ET MATÉRIEL DES LIGNES ET DES USINES

TURBINES A VAPEUR

OUVRAGE COURONNÉ PAR LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE
PAR LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE D'AMIENS ET PAR LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DE ROUEN

PAR

ÉTIENNE PACORET

INGÉNIEUR CIVIL

PRÉFACE DE M. A. BLONDEL

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES

PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

TROISIÈME ÉDITION COMPLÈTEMENT REFONDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

PARIS

DUNOD, EDITEUR

Successeur de H. DUNOD et E. PINAT

47 ET 49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS (VI^e)

1920

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

SYMBOLES

A la suite d'un accord international intervenu en 1913, où vingt-quatre pays étaient représentés, les symboles suivants ont été adoptés pour les unités électrotechniques.

I. — Grandeurs

Longueur	l	Résistance	R
Masse	m	Résistivité	ρ
Temps	t	Conductance	G
Angles	α, β, γ	Quantité d'électricité	Q
Accélération de pesanteur	g	Induction électrostatique	D
Travail	A	Capacité	C
Énergie	W	Constante diélectrique	ϵ
Puissance	P	Self-inductance	L
Rendement	η	Inductance mutuelle	M
Nombre de tours	n	Réactance	X
Températures centigrades	t	Impédance	Z
Température absolue	T	Réluctance	S
Période	T	Flux magnétique	Φ
Pulsation $\left(\frac{2\pi}{T}\right)$	ω	Induction magnétique	B
Fréquence	f	Champ magnétique	H
Déphasage	φ	Intensité d'aimantation	J
Force électromotrice	E	Perméabilité	μ
Courant	I	Susceptibilité	K

II. — Signes pour les noms des unités électriques à employer seulement après des valeurs numériques

Ampère	A	Volt-coulomb	VC
Volt	V	Watt-heure	Wh
Ohm	O ou Ω	Volt-ampère	VA
Coulomb	C	Ampère-heure	Ah
Joule	J	Milliampère	mA
Watt	W	Kilowatt	KW
Farad	F	Kilovolt-ampère	K. V. A.
Henry	H	Kilowatt-heure	KWh
m, signe pour milli		μ , signe pour micro	
K, signe pour kilo		M, signe pour méga	

PRIX DES MATÉRIAUX

ANNÉE 1920

Coefficients moyens par lesquels il faut multiplier les prix pratiqués en 1914 pour avoir les prix actuels.

	francs
Mortier de ciment.....	3 50
Béton de cailloux.....	2 50
Briques hourdées au plâtre.....	4 »
— — au mortier.....	4 »
Chape en mortier.....	3 50
Ciment métallique.....	4 »
Enduit au mortier.....	3 50
Jointoiements au mortier.....	3 50
Joints apparents.....	3 »
Légers ouvrages au plâtre.....	4 »
Meulière hourdée au mortier.....	3 50
Moellons.....	3 50
Main-d'œuvre, maçons.....	3 20
Pierre de taille, mètre cube.....	3 »
Plus value de taille.....	3 »
Pavage.....	3 50
Enduit au ciment.....	3 30
Menuiserie.....	4 80
Parquets.....	4 80
Peinture.....	3 50
Vitrerie.....	7 »
Terrasse, main-d'œuvre.....	3 50
— transport.....	4 30
— travaux.....	4 »
Serrurerie.....	4 »

PREMIÈRE PARTIE

PRODUCTION ET TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XXI

MACHINES GÉNÉRATRICES

429. Caractères généraux des machines modernes. — Pour la dynamo et pour des puissances de quelque importance, la forme multipolaire avec pôles inducteurs extérieurs fixes et induit intérieur mobile est presque exclusivement employée de nos jours. L'armature est à rainures ou encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs induits, à l'abri des efforts radiaux de la force centrifuge et des efforts tangentiels des forces électromagnétiques. Ces induits, à l'effet d'éviter toute élévation de température anormale, sont munis de canaux de ventilation. D'autre part, la force électromotrice d'une machine, toutes choses égales d'ailleurs, croissant avec son rayon et sa profondeur (parallèlement à l'axe) et l'élévation des tensions s'imposant du fait du transport de l'électricité aux grandes distances, le diamètre des machines a considérablement augmenté, et du même coup les génératrices ont pris une allure lente, afin de réduire les effets de la force centrifuge à la périphérie de l'organe tournant.

On sait que la commutation dans les machines à courant continu domine de toute son importance le problème de leur bon fonctionnement et que la machine moderne a profité dans une large mesure des nombreuses recherches faites dans cette voie.

La possibilité de caler les balais d'une façon immuable dans la ligne neutre théorique a permis d'éviter une surveillance fastidieuse et coûteuse, ainsi qu'une chute de tension qui augmentait rapidement avec le courant dans les anciennes machines.

La vitesse et la puissance des dynamos n'ont pas cru aussi rapidement que celles des alternateurs (cependant, l'unité de puissance a monté de 1.000 kilowatts à 10.000 kilowatts). C'est que l'action du système compensateur est influencée par des phénomènes secondaires : oscillation et distorsion du champ dans la zone de commutation, oscillation et asymétrie du champ inducteur, répartition inégale des courants induits dans les circuits en parallèle. Malgré tous les perfectionnements apportés au collecteur, au porte-balai, la vitesse et la puissance des dynamos sont limitées par la surface et la vitesse périphérique du collecteur.

Pour profiter des avantages qu'offrent les moteurs à grande vitesse, il faut donc répartir la puissance du moteur sur deux ou plusieurs dynamos, soit réduire la vitesse au moyen de transmissions. La construction d'engrenages pour grandes vitesses et pour grandes puissances a tellement progressé que l'emploi des génératrices à engrenages se généralise d'une façon très appréciable.

Les pôles de commutation et les enroulements compensateurs sont d'usage courant. L'enroulement le plus fréquent est l'enroulement imbriqué en parallèle avec deux conducteurs par encoche et par lamelle. La tension lamellaire peut atteindre 25 volts et la vitesse à la périphérie du collecteur 35 à 45 mètres à la seconde.

L'application des pôles de commutation a permis de combattre la tension de commutation, devenue cinq à six fois plus grande par suite de l'adoption des grandes vitesses de rotation (turbo-dynamos).

Il n'est pas rare de trouver actuellement des induits dont le fer travaille de 15.000 à 20.000 gauss et plus sans que la fréquence ait été diminuée. L'emploi de ces hautes saturations a eu pour résultat une économie de matière importante et naturellement un bon fonctionnement des balais, la tension de réactance étant notablement diminuée de ce fait. Il est vrai que, par contre, les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont devenues plus importantes, ce qui a conduit à une distribution judicieuse de canaux de ventilation, à l'effet d'augmenter la surface de refroidissement.

L'expérience a montré, quel que soit le type de porte-balai, qu'il est préférable de ne pas supporter les balais par le palier. Au point de vue des progrès à réaliser, nous citerons la diminution de la portée des paliers, l'emploi de pressions aux balais plus élevées, de plus grandes densités de courant et de plus grandes vitesses périphériques.

La traction électrique bénéficie avec avantage d'une nouvelle classe de machines génératrices dites « dynamos bimorphiques ». On réalise avec leur emploi une distribution particulièrement simple et un dispositif très rationnel dont l'usage devient de plus en plus fréquent.

En fait de dynamos homopolaires dont nous parlons plus loin, l'électrotechnique vient de s'enrichir d'une nouvelle conception de machines élec-

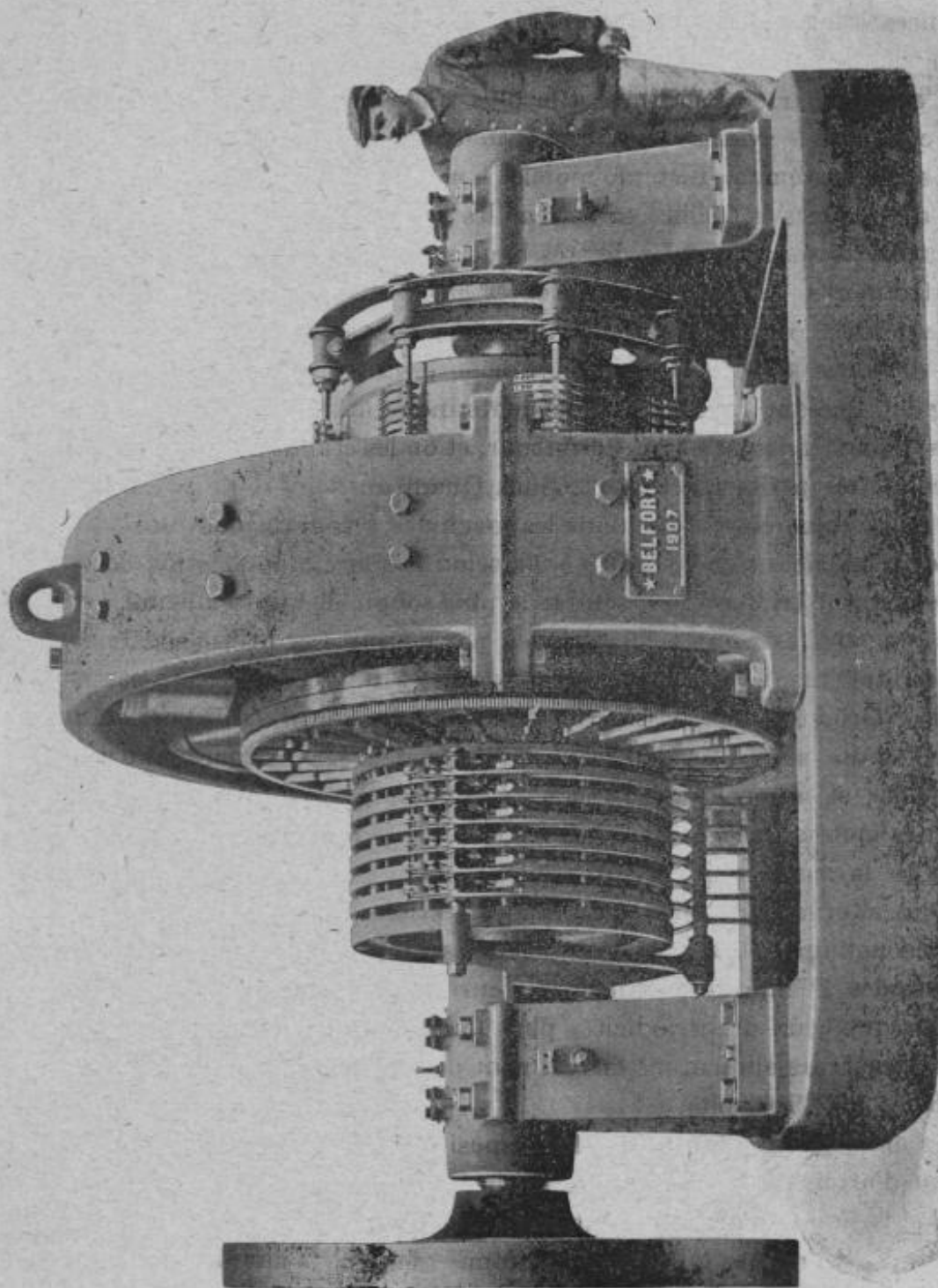


FIG. 1020. — Génératrice bimorphique de 1.000 kw., 375 tours. (Société Alsacienne de Constructions Mécaniques.)

triques dont l'idée est due à un de nos meilleurs ingénieurs électriciens M. R.-V. Picou. Ce sont les dynamos à excitation interne. Dans ce cas, la même partie, fixe ou mobile, porte les bobinages inducteur et induit,

et on peut même superposer dans les mêmes fils, les courants inducteur et induit.

On peut aussi introduire dans le fil induit, au moyen de bagues reliées à des points équidistants, des courants polyphasés de phases et de fréquences appropriées pour produire le champ fixe d'excitation, et cela avec des conditions d'autoexcitation extrêmement favorables.

L'alternateur, aujourd'hui, a le plus souvent sa couronne extérieure, qui constitue le système induit de la machine fixe, et sa partie intérieure, qui est le système inducteur, mobile. Une telle disposition trouve sa raison d'être dans la facilité qu'offrent les parties fixes de se prêter à une isolation convenable, pour de très hautes tensions, et dans le grand moment d'inertie des inducteurs, propres à jouer le rôle de volant. Le système induit, comme dans la dynamo, est composé de conducteurs encastés dans des alvéoles ou encoches disposées suivant les génératrices de l'organe. Presque tous les enroulements modernes des machines alternatives appartiennent au type à tambour, et on les établit avec faible inductance et très petite réaction d'induit. Quant au nombre de pôles, il y a une marge plus élevée que dans les machines à courant continu.

Les fréquences varient de 10 à 80, selon le genre d'application en vue.

Le courant triphasé, qui semble le plus souple et qui, d'ailleurs, est le plus répandu, est celui à 50 périodes, car il peut être utilisé séparément et simultanément pour l'arc, l'incandescence, la force et les sous-stations de transformation pour la traction. Cependant, comme on dispose actuellement d'une solution très pratique pour engendrer les courants à basse fréquence et alimenter les réseaux secondaires par l'intermédiaire des groupes moteurs-générateurs, on reconnaît à peu près partout les avantages de la basse fréquence et principalement pour la marche en parallèle des alternateurs. Dans les grandes stations centrales, la solution la plus économique et la plus avantageuse semble être de ne pas dépasser 25 périodes. D'ailleurs les transformateurs et les moteurs sont plus économiques que ceux de périodicités plus faibles. Aujourd'hui on construit des alternateurs alimentant directement des réseaux distribuant l'énergie de 13.000 à 15.000 volts.

Les amortisseurs Leblanc et les dispositions préconisées en vue d'éviter ou d'atténuer la production des harmoniques ont aidé fortement à assurer la bonne marche des alternateurs. Enfin le compoundage de ces machines est aujourd'hui très perfectionné ; lorsque la charge ne présente pas de self-induction, elles fonctionnent à une tension pratiquement constante.

En Amérique, pour les très grosses machines, la partie tournante est divisée en deux ou plusieurs pièces, les lignes de division perpendiculaires à l'arbre.

On préfère les machines à forte réactance intérieure et on tend à aller jusqu'à 20 0/0 de réactance, ce qui permet un entrefer plus large, un rendement supérieur aux faibles charges, des paliers plus faibles, des pertes de frottement inférieures, malgré leur moins bonne régulation. La tension de plus en plus employée se canalise vers 11.000 volts.

La gamme des moteurs électriques se présente aussi dans les meilleures conditions, tant pour ceux qui fournissent la force motrice à demeure que pour ceux qui donnent l'élan aux véhicules de toutes sortes. Les bons moteurs modernes à courant continu sont caractérisés par l'absence absolue d'étincelles au collecteur et par un calage invariable des balais en tous points, aussi satisfaisant que celui des bagues des moteurs d'induction. Le moteur asynchrone à courants alternatifs continue sa lutte avec le moteur à courant continu et le moteur synchrone tend à multiplier ses applications dans le champ où ses avantages le font employer. Comme formes caractéristiques du moteur asynchrone, on peut citer ceux à allure lente (60 à 100 tours) de 1.000 à 3.000 chevaux. Le problème de la régulation économique de la vitesse de ces moteurs a été résolu d'une façon satisfaisante par les moteurs à collecteurs (procédés Scherbius et Heyland) et par le montage dit en cascade. Par le jeu de la diminution des pertes constantes dans les moteurs fermés, on est arrivé à leur faire produire à très peu près une puissance normale égale à celle des moteurs ouverts de même force. En particulier, la régulation des moteurs de traction a été assurée par des combinaisons à la fois savantes et ingénieuses. Le courant alternatif simple, qui semblait moins apte que le courant continu et le courant triphasé à la production de la force motrice pour la traction, a reçu ces derniers temps le bénéfice de conceptions nouvelles, dont les applications pratiques faites à ce jour se présentent sous les plus heureux auspices.

La perfection actuelle atteinte dans la construction du matériel électrique demande de la part des constructeurs, en dehors de grandes connaissances théoriques, une solide expérience acquise dans la fabrication, qui décèle l'étude de détails très importants parmi lesquels le choix des matériaux et leur essai préalable par des moyens pratiques jouent un des premiers rôles.

Les groupes électrogènes mus par turbines à vapeur prennent une importance de plus en plus grande, et il existe déjà beaucoup d'installations de ce genre dans les usines hydroélectriques, où elles rendent de grands services, utilisées comme machines auxiliaires ou de secours. Les turbines de Laval, Parsons, Ratou, Curtiss et Zoelly ont permis de réaliser des unités de 6.000 à 30.000 kilowatts, mais en donnant lieu à certaines modifications dans l'établissement des machines électriques qu'elles conduisent, en raison de leur vitesse de rotation élevée. D'après M. Hillairet,

les recherches dans cette voie seraient orientées du côté des machines dites unipolaires qui semblaient à jamais ensevelies dans le domaine de l'oubli.

En effet les machines unipolaires constitueraient mieux qu'une source élégante du problème de la commutation ; elles le supprimeraient totalement. Leur emploi devient possible dans le cas des turbines en raison des grandes vitesses superficielles qui permettent aujourd'hui d'obtenir 4 volts par centimètre de conducteur tournant, au lieu de un demi-volt seulement par centimètre dans les machines établies précédemment sur ce principe.

Nous ajouterons qu'on peut obtenir avec les turbines à vapeur une surchauffe plus considérable qu'avec les machines ordinaires, et que la consommation de vapeur ne dépasse pas 6 kilogrammes par kilowatt-heure à pleine charge ⁽¹⁾.

Si nous passons dans le camp des machines transformatrices de courants, on constate que la commutatrice moderne n'a qu'un seul enroulement induit traversé par le courant alternatif et le courant continu. L'induit et le collecteur forment un système redresseur. Avec les groupes convertisseurs on peut obtenir, automatiquement, un réglage de la tension secondaire aussi parfait qu'on le désire ; ils donnent la possibilité de transformer non seulement la tension, mais encore la fréquence et la nature du courant.

Les perfectionnements dans les transformateurs statiques ont suivi une marche parallèle à ceux réalisés dans l'établissement des alternateurs. Partant de cette considération qu'une exploitation n'est réellement économique que si les pertes à vide dans les transformateurs sont peu élevées, les constructeurs ont apporté toute leur attention à la résolution de cet important problème ; aussi, aujourd'hui, l'industrie électrique livre des appareils qui ont un rendement de 0,75 avec une charge seulement de 5 0/0, et de 0,975 en pleine charge.

Enfin, si nous jetons un regard sur les appareils destinés à la mise en marche et à la régulation des machines électriques, on voit que là aussi l'appareillage moderne a subi des transformations au fur et à mesure de l'adoption des hautes tensions. Tous les appareils à haut voltage et les conducteurs sont logés dans des cases en ciment armé ou en maçonnerie ordinaire, où chaque phase a son conduit propre et chaque appareil son alvéole correspondante (système cellulaire). Les tableaux modernes des grandes usines hydroélectriques sont souvent à trois ou quatre étages.

⁽¹⁾ Les usines modernes importantes emploient des machines à surchauffe, à multiples expansions, compound en général et d'une puissance de 1.000 à 10.000 HP. Elles sont le plus souvent horizontales, en tandem ou cress compound. Mais leur encombrement énorme et leur poids élevé ont amené peu à peu l'usage des turbines à vapeur, qui conviennent particulièrement bien pour la commande des alternateurs.

Le chef électricien commande de sa place, près du tableau, toute l'usine, au moyen d'un clavier de boutons électriques correspondant aux manœuvres à effectuer, lesquels allument pour chaque machine des lampes

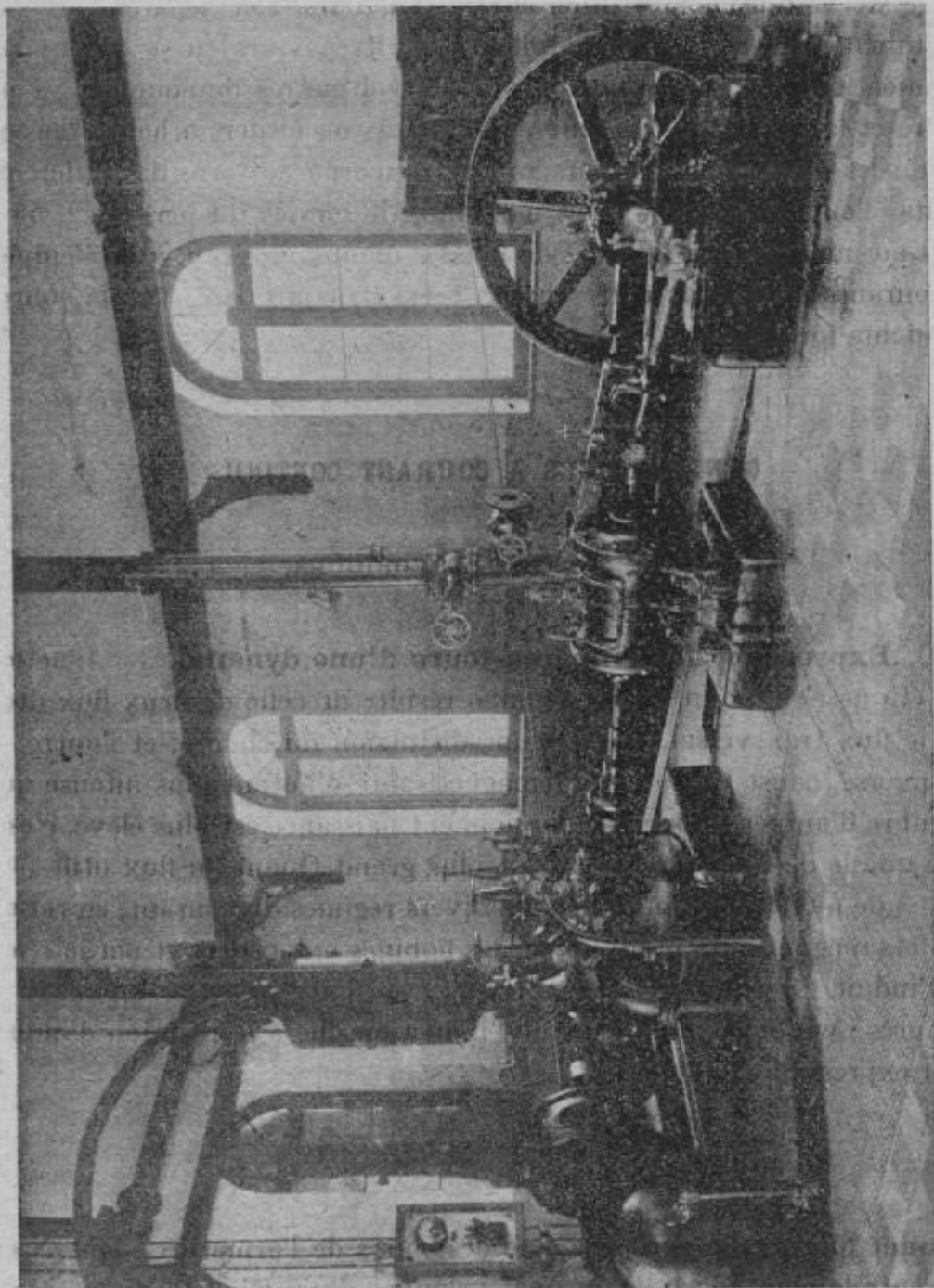


FIG. 1021. — Salle d'une station de pompage électrique.

où commandent des signaux optiques colorés pour la transmission des ordres aux mécaniciens.

D'autres boutons actionnent les servo-moteurs des interrupteurs principaux. Puis des lampes, placées sur le tableau, avertissent du fonctionnement régulier des appareils.

Ainsi, avec les pupitres de manœuvre des stations centrales hydro-électriques actuelles, où sont rassemblés tous les appareils de commande à distance et les appareils de contrôle, on obtient : la régulation de la vitesse des turbines par commande électrique du ou des régulateurs ; le réglage de la tension des différents alternateurs, soit séparément, soit simultanément ; la mise en parallèle des alternateurs en se basant sur les indications de synchronoscopes et de voltmètres de couplage ; l'ouverture et la fermeture des différents circuits ou feeders à haute tension et enfin les indications d'isolement par rapport à la terre des différents circuits. Tout en simplifiant au maximum le service du personnel, on a réduit au minimum les chances de fausses manœuvres qui, avec l'emploi des courants alternatifs à très haute tension, pourraient être la source d'accidents fort graves.

GÉNÉRATRICES A COURANT CONTINU

I. — NOTIONS THÉORIQUES

430. Expression des ampères-tours d'une dynamo. — L'action magnétique de l'induit d'une dynamo résulte de celle de deux flux dont l'un, le flux transversal, produit une distorsion du champ, et l'autre, le flux inverse, cause une action démagnétisante d'autant plus intense que le nombre d'ampères-tours qui lui donnent naissance est plus élevé, c'est-à-dire que le décalage des balais est plus grand. Quant au flux utile (Φ), il demande à être déterminé sous les divers régimes du courant, en raison des effets magnétiques produits par les bobines inductrices et par la réaction d'induit.

D'après Swinburne, la valeur de l'induction due à la réaction d'induit a pour expression :

$$\mathfrak{B}_i = \frac{0,4Ni}{2\delta D} ;$$

i , courant qui circule dans chacune des spires de l'armature, dont N en représente le nombre ; l , longueur développée d'un pôle ; D , diamètre de l'induit, et δ l'entrefer simple.

Si nous appelons \mathfrak{B}_e l'induction due au flux inducteur, la condition nécessaire pour obtenir d'une dynamo un fonctionnement satisfaisant est donnée par la relation : $\mathfrak{B}_e > \mathfrak{B}_i$.

Pour réduire la réaction d'induit, on peut diminuer le flux transversal en augmentant la réluctance du circuit magnétique qui lui est offert, c.

qui explique la présence des fentes profondes dont quelques constructeurs munissent les pôles inducteurs. On arrive aussi au même résultat en obligeant le flux de réaction d'induit à traverser différents entrefers. Parfois on adapte aux dynamos des pôles auxiliaires placés dans les lignes neutres et recevant un enroulement dont le courant d'induit qui le parcourt crée le champ nécessaire à la commutation et qui dispense de décaler les balais. Il est indiqué aussi de renforcer le champ sous les cornes polaires d'entrée, où le flux diminue d'intensité par suite de la réaction d'induit. Les extrémités des pièces polaires vont en diminuant d'épaisseur du côté de la sortie du flux, et parfois on allonge une des extrémités dans le sens du mouvement pour la meilleure distribution du flux principal dans l'entrefer.

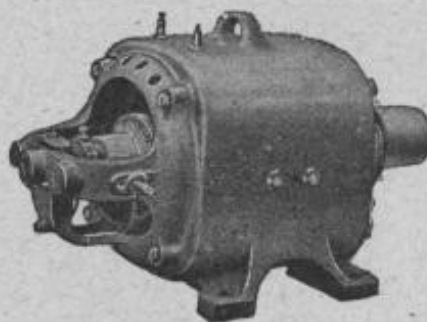


FIG. 102. — Dynamo bipolaire.
(Société l'Éclairage électrique).

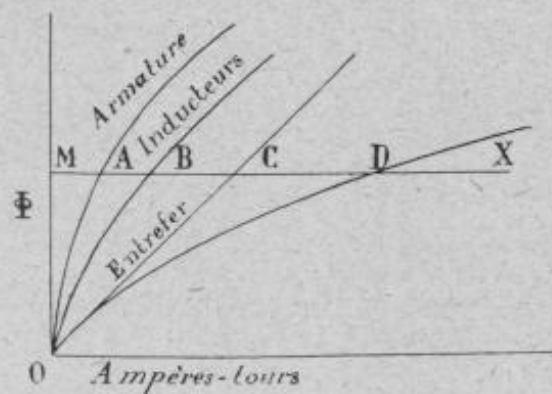


FIG. 1023.

Le nombre d'ampères-tours exigé pour la production d'un flux dans un circuit non homogène est la somme des ampères-tours de chaque partie hétérogène de ce circuit. Par suite, pour obtenir le nombre d'ampères-tours total nécessaire pour produire un flux Φ dans l'induit d'une dynamo, il suffit (*fig. 1023*) de mener par le point M (OM représentant le flux cherché) une ligne parallèle à l'axe des abscisses et de longueur telle que :

$$MD = MC + MB + MA.$$

En procédant de même pour un certain nombre de valeurs différentes du flux, on obtient

ainsi la courbe de magnétisme de la dynamo. Avec la connaissance des courbes d'aimantation des différents métaux dont sont constituées les diverses parties du circuit magnétique, courbes que l'on trouve dans les traités spéciaux ou qui sont fournies par les forges ou usines métallurgiques, on déduit les valeurs de l'induction ($\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{S}$) et des forces magnétiques ($\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{B}}{\mu}$).

Si l_a , l_c et l_i représentent les longueurs moyennes et respectives des

lignes de force dans l'anneau, dans l'entrefer et dans les inducteurs, on aura pour la valeur de la force magnétomotrice totale :

$$\mathcal{F} = \mathcal{H}_a l_a + \mathcal{H}_e l_e + \mathcal{H}_i l_i = 0,4\pi NI ;$$

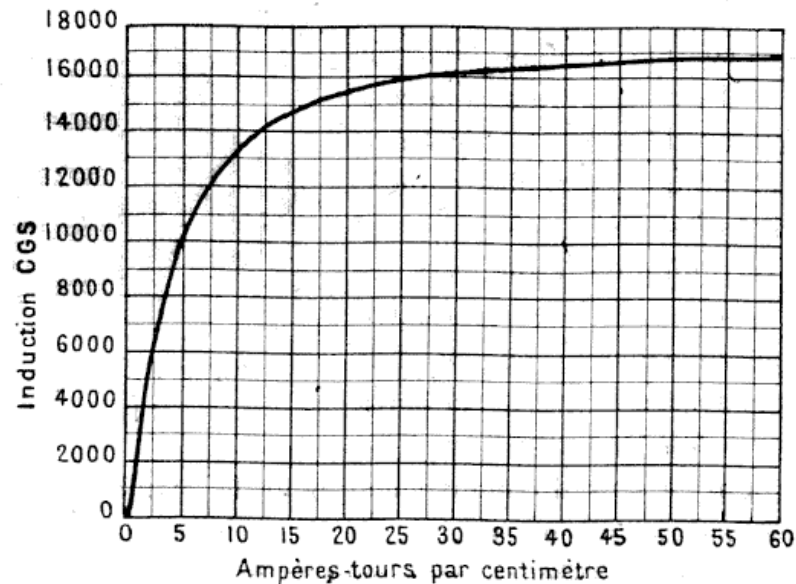


FIG. 1024. — Courbe d'induction pour la tôle et le fer forgé.

par suite :

$$NI = \frac{\mathcal{H}_a l_a + \mathcal{H}_e l_e + \mathcal{H}_i l_i}{0,4\pi} ;$$

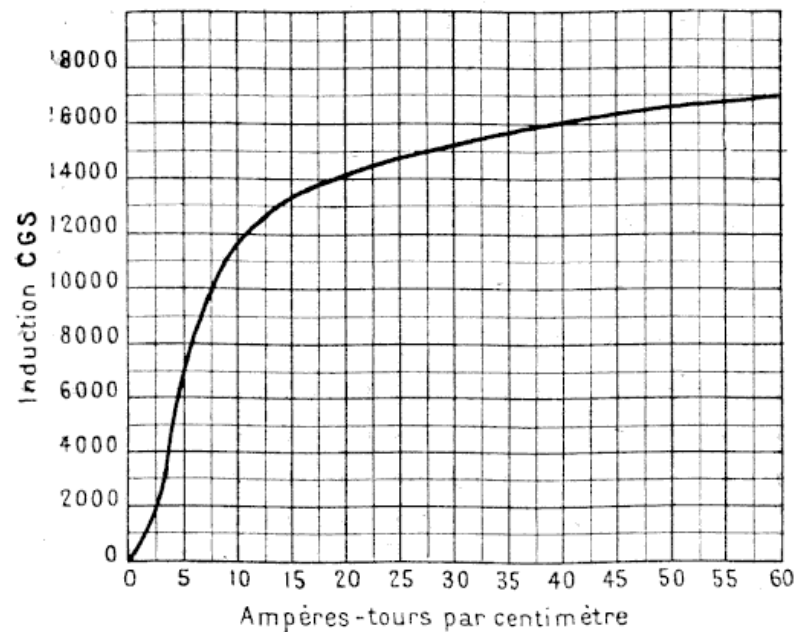


FIG. 1025. — Courbe d'induction pour l'acier.

NI, nombre d'ampères-tours.

Lorsque, à l'effet d'améliorer la commutation, on munit une dynamo de pôles auxiliaires, les ampères-tours à produire sur chacun d'eux représentent la somme des ampères-tours de l'induit par pôle et des ampères-tours pour faire passer le flux dans le circuit magnétique auxiliaire, c'est-à-dire traverser l'entrefer auxiliaire, la couronne de l'induit et les dents situées sous la pièce polaire. D'après Hobart, on détermine la longueur de l'arc polaire du pôle auxiliaire de manière à ce que, pendant la durée totale de la commutation, la bobine commutée se déplace dans l'étendue du champ auxiliaire et couvre un nombre d'entailles un peu plus grand que celui des entailles où sont réparties les bobines simultanément court-circuitées sous un balai.

Le tableau suivant indique sur les ampères-tours par centimètre pour obtenir des inductions différentes :

INDUCTION EN GAUSS	AMPÈRES-TOURS PAR CENTIMÈTRE				INDUCTION EN GAUSS	AMPÈRES-TOURS PAR CENTIMÈTRE		
	AIR	FORGE	FER FORGÉ	Tôles et acier coulé		FER FORGÉ	Tôles et acier coulé	DENTS
4.000	3.200	17	—	—	14.000	12	18	—
5.000	4.000	23,5	—	—	15.000	16	27,5	—
6.000	4.800	32	—	—	16.000	27	40	—
7.000	5.600	43	—	—	17.000	60	60	—
8.000	6.400	61	—	—	18.000	—	—	100
9.000	7.200	90	3,5	6,5	19.000	—	—	210
10.000	8.000	—	5	7,5	20.000	—	—	340
11.000	8.900	—	6	8,5	21.000	—	—	500
12.000	9.600	—	7,5	11	22.000	—	—	700
13.000	—	—	9,5	14	23.000	—	—	1.000

431. Exposé de la commutation.— La connaissance des phénomènes qui se produisent pendant la commutation offre le plus grand intérêt, car la formation des étincelles au collecteur et l'échauffement sont les points principaux à considérer dans le fonctionnement des dynamos. La (fig. 1026) montre le collecteur d'un induit développé avec balai ou frotteur de largeur égale à celle d'un segment ou lame de collecteur.

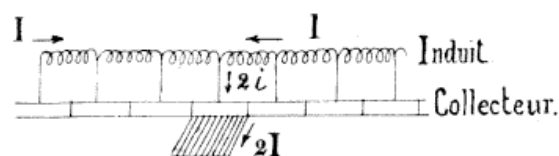


FIG. 1026.

Lorsque ce frotteur appuie sur deux lames voisines, la section d'induit qui correspond est soumise à l'action d'un flux variable, qui a pour effet d'introduire dans la section une force électromotrice de self-induction tendant à s'opposer à la diminution du courant i dont la section envisagée est le siège. Au moment de la suppression du court-circuit, la section

commutée, parcourue par un courant de sens inverse au courant primitif (parce qu'elle est placée de l'autre côté des balais), devient à nouveau le

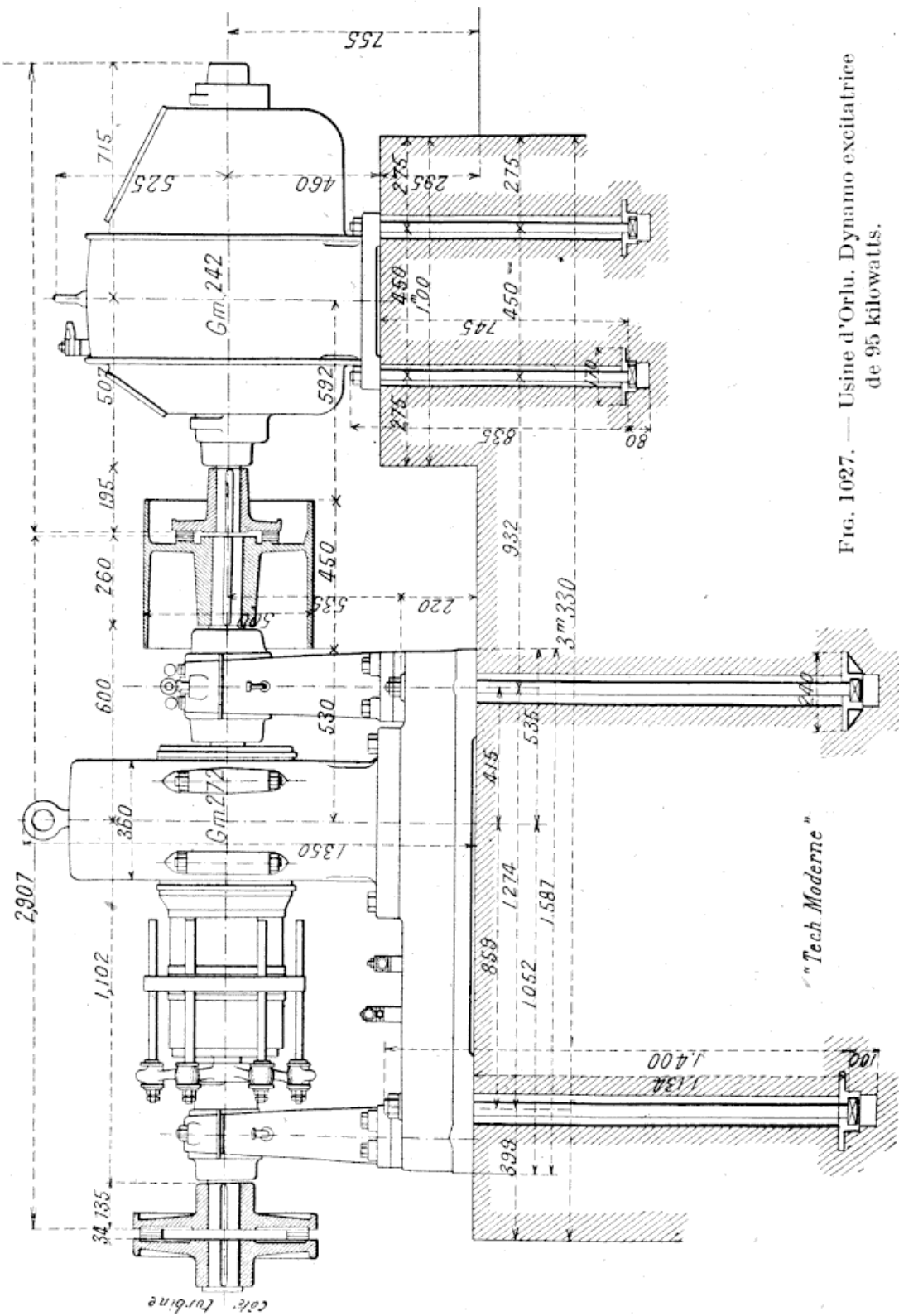


Fig. 1027. — Usine d'Orlu. Dynamo excitatrice de 95 kilowatts.

siège d'une force électromotrice de self-induction qui a pour effet de retarder l'inversion du courant. Or, si au moment où le balai n'appuie plus que

par une arête sur la lame du collecteur qu'il va quitter, le courant n'a pas une valeur nulle, la densité de courant sous cette arête devient très grande, et il y a formation d'étincelles et, par suite, échauffement des balais. Il y a bonne commutation toutes les fois que la densité du courant à la rupture n'est pas exagérée.

Dans ces conditions, pour éviter la production des étincelles, il faut que la section en court-circuit se trouve dans un champ magnétique tel qu'elle ait une force électromotrice qui facilite le renversement du courant et qu'on appelle force électromotrice de renversement.

Certaines formules, découlant de la théorie de la commutation

et faisant intervenir la connaissance du coefficient de self-induction de la bobine commutée, sont d'une application laborieuse, d'autant plus que, lorsque les balais mettent simultanément *plusieurs sections* en court-circuit, il y a lieu de tenir compte des effets d'induction mutuelle des bobines court-circuitées. Mais les constructeurs préfèrent l'usage de formules empiriques, d'un emploi plus commode pour la détermination du nombre de spires par section et, par suite, du nombre de lames du collecteur.

MM. Hobart et Parschall admettent que la variation du courant a une forme sinusoïdale, et ils appellent « tension de réactance » la force électromotrice engendrée par cette variation de courant. D'après ces auteurs, c'est cette tension qui caractérise la production d'étincelles au collecteur ; ils indiquent que, pour les machines à dents et à plusieurs bobines par dent, le nombre de lignes de force engendrées par ampère-tour et par centimètre de longueur est de 4 pour le fer et de 0,8 dans l'air.

M. Rothert, au lieu de considérer la tension de réactance, fait intervenir la tension engendrée dans la section court-circuitée au moment où le balai quitte la lame correspondante (tension d'étincelles). Néanmoins Rothert a donné la formule pratique suivante pour la tension de réactance :

$$E_r = 1,5 \times 10^{-9} \lambda (l + 0,4l') \frac{NnI}{N_z} ;$$

λ , coefficient qui dépend du nombre de lames recouvertes par un balai et du nombre de lames du collecteur par encoche, lequel coefficient varie de 0,45 à 1 ; l , longueur de fil par spire dans le fer ; l' , longueur de fil par spire en dehors des encoches ; N , nombre total de fils périphériques ;



FIG. 1028. — Induit de dynamo avec ventilateur. (C^{on} Bréguet).

n , nombre de tours de l'induit par minute ; I , courant circulant dans chaque fil, et N_z , nombre de lames du collecteur.

Pour les machines génératrices, E_c est de 0,3 volt pour des dynamos avec balais métalliques et de 1,2 volt pour machines munies de balais de charbon.

Si nous appelons E_c la force électromotrice de commutation à opposer à la tension de réactance, il faut, pour obtenir une commutation convenable, que

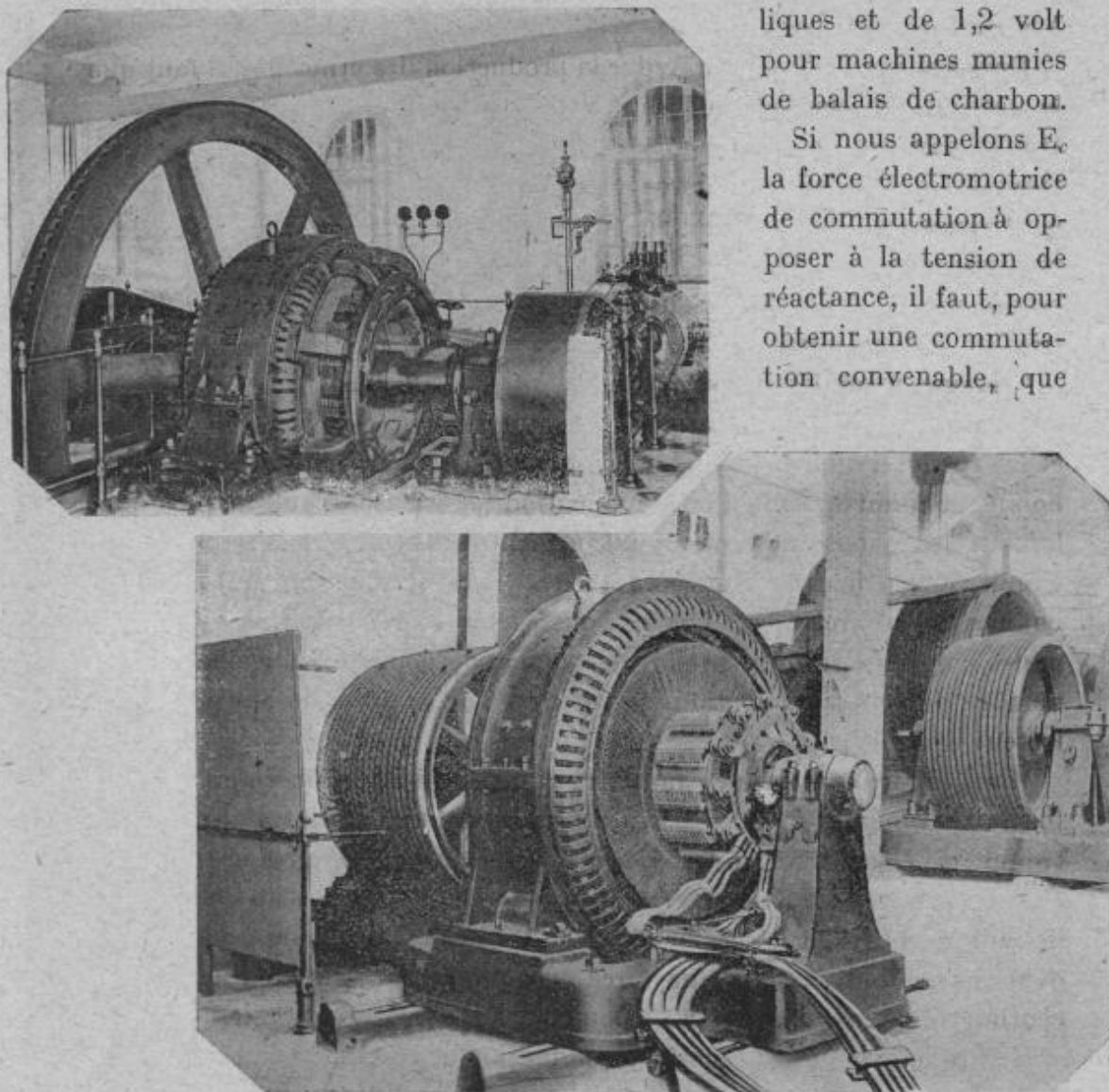


FIG. 1029. — Dynamo volant Bréguet accouplée sur arbre d'une machine à vapeur 300 kw 225 volts. Dynamo de 400 kw compound conduite par transmission par câbles.

la somme des deux termes E_c et E_r soit petite et la chute ohmique E_h aux balais suffisamment forte.

Rothert, à tort selon nous, n'attache aucune importance à la valeur du champ de commutation, qu'il néglige de faire intervenir dans sa formule. Or, le décalage des balais est fonction du champ dans l'entrefer, et l'on sait que l'on peut améliorer la marche d'une dynamo dans le sens

qui nous occupe en agissant soit sur l'excitation, soit sur la forme et l'écartement des épanouissements polaires, ce qui démontre bien l'influence de la valeur du champ dans l'entrefer sur la commutation.

On verra plus loin, au sujet du bobinage des induits à haute tension, que certaines combinaisons d'enroulements permettent d'éviter la production des étincelles. Comme cas particulier, M. Swinburne a montré qu'en raccourcissant le pas d'enroulement du côté collecteur, on diminue notablement les effets de réaction d'induit.

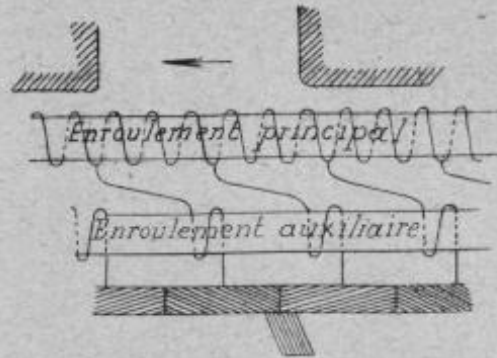


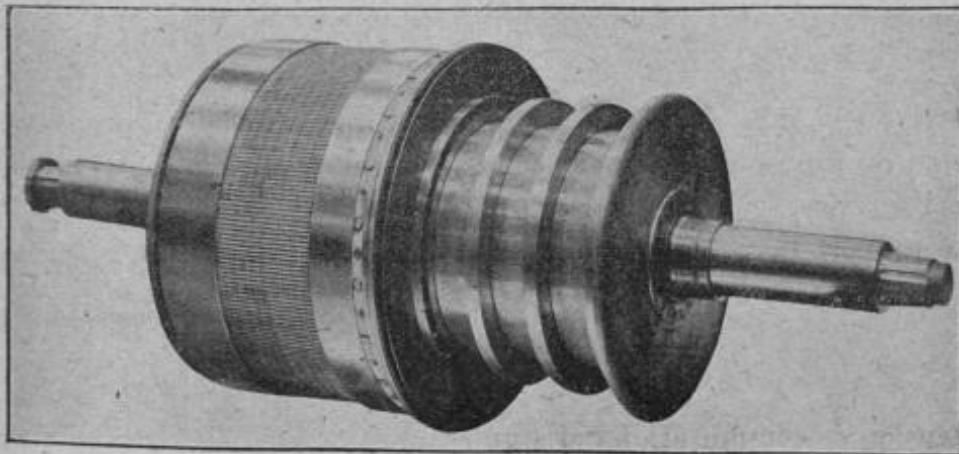
FIG. 1030.

Sayers a imaginé un enroulement auto-compensateur, dans lequel la force électromotrice de renversement est empruntée à un enroulement auxiliaire décalé en arrière par rapport à l'enroulement principal et bobiné en sens inverse (fig. 1030).

La formule empirique ci-après est assez souvent employée pour le calcul de la tension de réactance :

$$e_r = 2n_c z_k^2 (c_1 l_e + c_2 l_f) I_2 10^{-8};$$

n_c , fréquence de la commutation ; I_2 , courant par branche ; z_k , nombre de tours d'enroulement en court-circuit ; l_e , longueur du conducteur dans le fer ; l_f , longueur libre du conducteur ; c_1 et c_2 , constantes.

FIG. 1031. — Rotor d'une dynamo de 2.000 kw., 1.600 tours (C¹⁶ Electro-Mécanique).

La commutation est d'autant meilleure que le nombre de sections du collecteur est plus considérable et qu'en même temps la tension de réactance et la tension moyenne par section sont plus faibles. Par suite, il y a

avantage à admettre une vitesse périphérique élevée du collecteur (grand diamètre et faible longueur).

La résistance entre enroulements de l'induit et celle entre les segments collecteurs étant loin d'être négligeable, la première, pendant la première demi-période, facilite la commutation ; mais, pendant la seconde la contraire, ce qui a conduit M. S.-P. Thompson à critiquer l'habitude des constructeurs allemands d'établir des connexions entre segments, collecteurs et enroulements, au moyen d'un métal à grande résistance, argent ou autre. D'autre part, la résistance d'un élément induit a un effet prédominant sur la commutation ; par elle le courant d'induit diminue plus rapidement pendant la première partie du phénomène, et le courant redressé croît plus rapidement pendant la seconde. Il en résulte qu'au moment où la commutation devrait être complète, le courant n'a pas encore atteint sa valeur normale correspondant à la charge.

Au cas où on produit la commutation forcée en décalant les balais, ce qui est le mode de production le plus simple du champ de commutation, \mathfrak{B}_c doit satisfaire à la relation :

$$\mathfrak{B}_c = \frac{\mathfrak{B}_e (N - N_1)}{N};$$

\mathfrak{B}_c , flux dans l'entrefer ; N , ampères-tours nécessaires pour faire passer le flux dans le double entrefer ; N_1 , contre-ampères-tours ou ampères-tours antagonistes par pôle.

Appelons n le nombre de spires sous un pôle, le régime de stabilité est caractérisé par la relation :

$$80 < \frac{\mathfrak{B}_c}{n} < 100;$$

en fait, les valeurs élevées de n impliquent une tendance à une forte distorsion du flux, qu'on ne peut compenser qu'en augmentant l'induction dans l'entrefer.

Le rapport de commutation ρ est fourni par l'expression :

$$\rho = \frac{\mathfrak{B}_c}{n \times I_s};$$

I_s , tension de commutation par segment.

Ce rapport varie de 27 à 33 pour les machines à 100 volts et de 12 à 16 pour celles à 500 volts.

La *General Electric Co* préconise la formule suivante :

$$\frac{N + N_2}{n_p};$$

n_p , nombre des ampères-tours qui se trouvent à chaque instant sous un pôle ; N_2 , nombre des ampères-tours correspondant aux deux dents voisines. La valeur fournie par cette formule doit varier entre 1,3 et 1,5, c'est-à-dire que les ampères-tours d'excitation nécessités par l'entrefer et les dents voisines doivent être supérieurs de 30 à 50 0/0 au nombre d'ampères-tours démagnétisants.

Si l'on désigne par \mathfrak{B}_a le champ dû au pôle auxiliaire, l la longueur du fer de l'induit parallèle à l'axe, ρ_1 , le rapport entre le nombre des conducteurs de l'induit et le nombre des segments collecteurs, le rapport par l'expression :

$$\rho_1 = \frac{\mathfrak{B}_a}{n \times l \times 2},$$

doit atteindre au moins la valeur 3.

Enfin nous donnons la formule du professeur Arnold pour les tensions de la commutation, avec les notations suivantes : E_0 , tension moyenne se produisant dans le nombre maximum de spires en court-circuit qui se trouvent sous le balai ; E_s , tension produite par son champ propre, au moment de sa sortie du court-circuit dans la spire entrée la dernière dans le court-circuit.

On a :

$$E_0 = 2S_k \left(V \times \frac{N}{K} \cdot l_i \cdot O_i \right) \left(\frac{l \times \lambda_N}{Z} + \lambda_g \right) 10^{-6};$$

$$E_s = \frac{\mathfrak{B}}{C} \left(\frac{N}{K} \cdot l_i \cdot O_i \cdot V \right) \lambda_L \cdot 10^{-6}.$$

Z est la longueur de la zone de commutation pour le pas d'enroulement non raccourci

$$l + \frac{D_i}{D_c} \cdot b - \frac{a}{p} \cdot \frac{D_i}{D_c} \mathfrak{B};$$

l le pas dentaire ; S_k le nombre de spires en court-circuit $= \frac{b}{\mathfrak{B}} \times \frac{p}{a}$; \mathfrak{B} le pas de lames, b la largeur du balai ; O_i les ampères-fils par centimètre de périphérie de l'induit $= \frac{N \times I}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_i}$ où I est le courant total dans l'induit ; D_i diamètre d'induit, D_c diamètre du collecteur, l_i longueur idéale d'induit, $2p$ le nombre de pôles, $2a$ le nombre de voies d'enroulement, N le nombre total de barres, K le nombre de lames au collecteur, V la vitesse périphérique d'induit en mètres par seconde, λ_N la perméance du champ de fuite produite par le courant d'une encoche par centimètre de longueur d'induit, λ_L la perméance du champ total propre produit par

le courant d'une bobine par centimètre de longueur d'induit, λ_q la perméance du champ d'induit dans la zone neutre.

Pour l'enroulement parallèle $a = p$ et pour l'enroulement série $a = 1$ ⁽¹⁾.

Les moyens actuels utilisés pour obtenir une commutation parfaite consistent dans l'emploi de pôles auxiliaires ⁽²⁾ parcourus par le courant total de la machine et situés sur les lignes neutres, dans celui de cornes polaires dissymétriques à l'entrée et à la sortie, enfin dans les modes d'enroulement de l'induit. La première solution, emploi de pôles ou de dents de commutation excités par le courant principal, est excellente. Dans ce cas, la tension de réactance peut être, théoriquement, aussi grande que l'on veut ; mais sa valeur doit être connue aussi exactement que possible pour pouvoir déterminer les ampères-tours à placer sur les pôles de commutation. Ces derniers sont alors établis de façon à produire une induction \mathcal{B} dans l'air capable d'induire à toutes les charges dans la bobine court-circuitée une force électromotrice :

$$e_a = \mathcal{B}vlz_k = er;$$

l , longueur du fer ; z_k , nombre de conducteurs, et v , vitesse périphérique.

Les pôles auxiliaires n'agissent que très peu sur la distorsion du champ résultant en dehors de la zone neutre, mais ils modifient dans une certaine mesure la répartition du flux dans les tôles de l'inducteur et de l'induit.

Dans les dynamos multipolaires à enroulement parallèle, on met généralement autant de pôles auxiliaires que de pôles principaux ; dans celles dont l'induit porte un enroulement série et qui ont deux lignes de balais, deux pôles auxiliaires en regard des balais sont suffisants.

L'exécution des machines avec un nombre de pôles auxiliaires égal à la moitié des pôles principaux donne une diminution de moitié du prix d'établissement des pôles. Pour fabriquer de petites machines jusqu'à 30 chevaux on conserve même nombre de lames de collecteurs pour 110, 220, 440 et même 500 volts ; la tension de réactance croît avec la tension, d'où l'avantage des pôles auxiliaires pour permettre la même puissance, quelle que soit la tension. Pour une machine de 6 HP, 440 volts à

⁽¹⁾ Comme formules récentes, nous avons à signaler celle de V. Veiler et celle de F. Niethammer [voir *Revue Électrique*, 12 juillet 1912].

⁽²⁾ Si e_s est la force électromotrice de self-induction et induction mutuelle, e_a la force électromotrice induite par le déplacement de la section dans le champ créé sous les pôles auxiliaires par les forces magnétomotrices des pôles principaux, des pôles auxiliaires et de l'induit, et e_r la chute de potentiel due aux résistances de la section, des connexions et du contact des balais ; pour être dans une condition favorable à une bonne commutation, il faut régler le flux du pôle auxiliaire de façon à avoir :

$$e_s + e_a = 0, \text{ dans quel cas } e_r = 0.$$

1.000 tours avec une perte de 1 0/0 dans les pôles auxiliaires, on trouve que le poids de cuivre pour des échauffements de 19°, 32° ou 50° sont respectivement de 12^{kg},8, 5^{kg},4 et 3^{kg},500 avec une densité de courant de 3,4 ampères par millimètre carré.

Quant au décalage des balais, il est d'autant plus petit que la tension de réactance est plus faible, que le rapport des ampères-tours pour l'air et les dents aux ampères-tours sous un pôle est plus petit, que la résis-

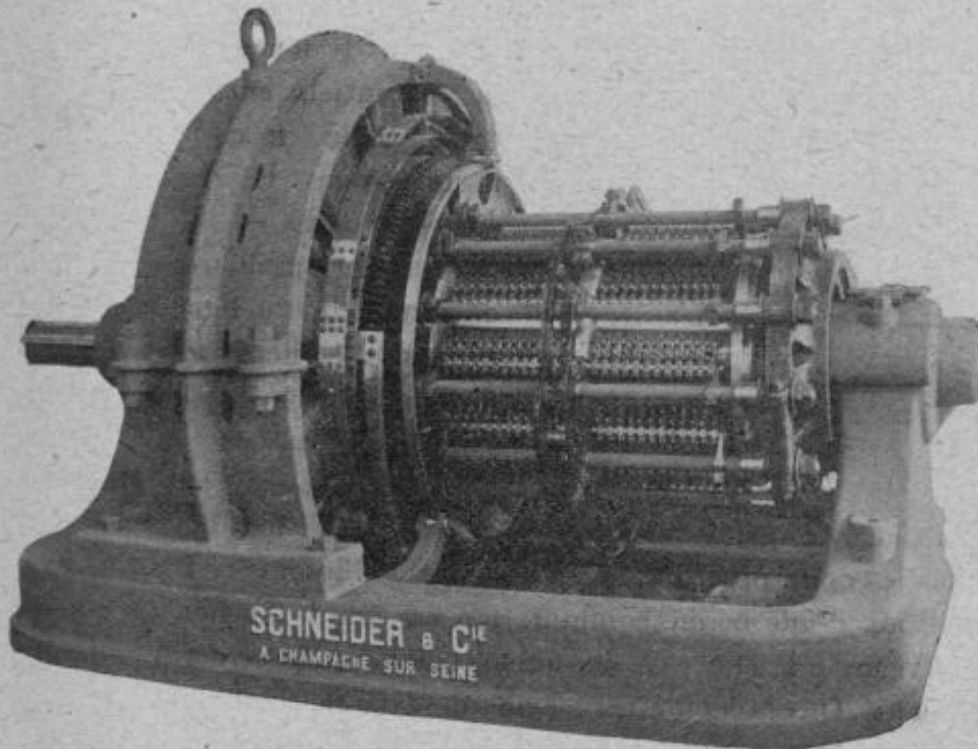


FIG. 1032. — Usine d'Auzat. Dynamo de 1.000 kilowatts, 200 volts, 5.000 ampères, 350 tours.

tance des balais est plus considérable, que ceux-ci sont plus larges et que le rapport de l'arc polaire au pas polaire est plus grand.

Le décalage des balais en avant dans le sens du mouvement dans les dynamôs génératrices donne une bonne commutation. Cela tient à ce que le champ de l'induit n'est pas purement transversal ; il contient un certain nombre de lignes de force longitudinales. Pendant la rotation de l'induit, tant qu'on n'est pas trop près des cornes polaires et que l'inducteur est fermé, on peut admettre que la partie transversale n'a pas de déplacement relatif par rapport à la section du fait de la rotation et que la partie longitudinale reste constante et égale à sa valeur moyenne, les oscillations en plus ou en moins étant étouffées complètement par le circuit fermé de l'inducteur.

Le seul changement consiste en ce que le champ de l'inducteur n'est pas

nul à la dent de commutation et que la variation de flux dans la section en dépend. En particulier, si le champ dû à l'inducteur est sensiblement égal et opposé au champ dû à l'induit, la commutation se fera sans force électromotrice et sera parfaite.

Parmi les moyens classiques employés pour l'amélioration de la commutation, l'enroulement de compensation (*fig. 1033*), constitué par un bobinage formé de spires dont les plans sont parallèles à la ligne des pôles,

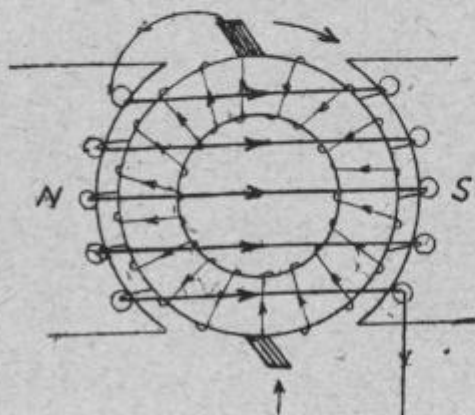


FIG. 1033.

offre l'avantage de conserver à la ligne neutre une direction invariable et de fournir une différence de potentiel, entre deux lames, égale à la force électromotrice induite dans la section d'induit correspondante.

Les pôles auxiliaires ont pour but de produire sur la ligne neutre le flux nécessaire à l'obtention de la tension de commutation. Le flux et la tension de commutation croissent avec l'intensité du courant et assurent

sans décalage des balais la commutation sans étincelles. Parfois on utilise à la fois les deux procédés que nous venons d'indiquer. D'après Arnold la condition d'une bonne commutation est que la tension de réactance soit inférieure à la chute de tension au balai, quand ce dernier ne touche qu'une lame. On obtenait ainsi à l'aide d'un faible coefficient d'induction et en augmentant le nombre de lames ou d'une faible tension de réactance et d'une forte chute ohmique aux balais ou forte résistance de contact le calage de balais fixe dans la ligne neutre théorique. Cette théorie repose sur la considération que la densité de courant et la tension entre lame et balai deviennent infinies en fin de commutation.

Sur l'observation que la résistance de contact diminue quand la densité de courant augmente, Arnold a basé ses plus récentes théories de commutation mais les lois du contact dans la commutation elle-même n'ont encore pu être définies. M. A. Mauduit, à la suite de laborieuses recherches expérimentales et théoriques, a pu démontrer que le rôle des contacts est beaucoup moins important, que celui qu'on lui donne dans la théorie d'Arnold et que les tensions de contact permettent seulement un écart de quelques dixièmes de volt entre les valeurs théorique et effective de la force électromotrice de commutation.

La question principale reposerait donc sur l'étude des champs divers existant dans la section et surtout du flux résultant à travers cette section, pendant le temps du court-circuit.

M. A. Mauduit, parmi nombre de remarques du plus haut intérêt a observé que la force électromotrice moyenne produite dans la section, à la fin de la commutation, est indépendante sensiblement du nombre de lames couvertes par le balai, tant qu'on reste dans la zone centrale interpolaire où le champ d'induit est sensiblement constant et que \mathcal{L}' et T augmentent proportionnellement à ce nombre (T durée de la commutation et \mathcal{L}' coefficient d'induction apparente).

M. Mauduit a donné à cette tension le nom de tension caractéristique de la commutation et il en a établi le calcul.

Soient : N_3 le nombre de spires par section, N_1 le nombre de sections et de lames au collecteur, \mathcal{B}' le nombre entier de lames couvertes par le balai, K le nombre d'ampères-fils par centimètre, D le diamètre de l'induit en centimètres, l la longueur axiale de l'induit, $2p$ le nombre de pôles, n la vitesse angulaire en tours par minute, φ le flux qui s'échappe des dents de la zone de commutation, ε_y la tension caractéristique cherchée.

On a d'abord, en volts :

$$\varepsilon_y = \frac{2\varphi}{T} N_3 10^{-8}. \quad (1)$$

Soit ξ le flux qui s'échappe de 1 centimètre carré de surface périphérique de dent pour 1 ampère-tour agissant sur le tube de force passant en ce point et admettons que la constante ξ est invariable dans la zone de commutation et que le flux ne passe que par le plein des dents, et soit \mathcal{B}'' le rapport du plein de la dent au pas de la denture, le nombre d'ampères-tours agissant est :

$$\frac{K\pi D}{2p}$$

et, par suite, le flux φ est donné par la relation :

$$\varphi = \frac{K\pi D}{2p} \xi \mathcal{B}' \mathcal{B}'' \frac{\pi D}{N_1} l. \quad (2)$$

Comme, d'autre part, on a :

$$T = \frac{60 \mathcal{B}'}{n N_1}.$$

En portant dans (1) il vient :

$$\varepsilon_y = 2 \frac{K\pi D}{2p} \xi \mathcal{B}' \mathcal{B}'' \frac{\pi D}{N_1} l N_3 \frac{n N_1}{60 \mathcal{B}_1} \times 10^{-8} \quad (3)$$

expression dans laquelle N_1 et \mathfrak{B}' disparaissent. En séparant les facteurs constants on a :

$$\varepsilon_y = 1,645 \frac{\mathfrak{B}'' \xi K D^2 / N_3 n}{p} \quad (3 \text{ bis})$$

avec l et D en mètres et n en milliers de tours-minute.

Pour se rendre compte de la signification de la formule (3), appelons ξ la valeur de ξ correspondant à un pas de 50 centimètres, soit $\frac{2D}{p} = 100$;

On aura, pour un pas quelconque :

$$\xi = 2 \frac{100p}{\pi D}$$

et la formule (3) devient :

$$\varepsilon_y = \frac{\pi}{60 \times 10^6} \mathfrak{B}'' \xi K D / N_3 n,$$

ou, en remplaçant $\frac{\pi D n}{60}$ par v , vitesse périphérique en centimètres par seconde :

$$\varepsilon_y = \frac{\mathfrak{B}'' \xi K / N_3 v}{40_6}$$

Cette formule montre que les difficultés de la commutation dépendent proportionnellement du nombre d'ampères-fils par centimètre, de la longueur d'induit, du nombre de spires par section et de la vitesse périphérique. Il y a lieu de limiter K et N_3 . Les difficultés de la commutation dépendent de KN_3 et non de N_3^2 comme on le croit souvent.

Toujours d'après M. A. Mauduit les propriétés de la commutation à la ligne neutre théorique ne diffèrent pas sensiblement de celles de l'enroulement diamétral.

Au point de vue de la commutation, les enroulements ondulés conduisent à une valeur plus faible de la tension de réactance, mais tout le phénomène de la commutation est plus compliqué et plus délicat. Toutes les fortes machines sont établies avec des enroulements imbriqués.

Des machines bien étudiées ne doivent pas donner d'étincelles sans décalage des balais sous une charge quelconque jusqu'à une surcharge de 50 0/0 au-dessus de la normale, ni s'échauffer d'une façon anormale, ni être trop lourdes ou trop coûteuses.

432. Enroulements des induits. — Suivant le mode de bobinage, les enroulements se divisent comme suit : 1° *couplages en parallèle*, comportant des enroulements imbriqués (en tambour ou cylindriques) et des en-

roulements en anneaux ou annulaires ; 2° *couplages en série et série-parallèle* comprenant des enroulements ondulés (en tambour ou cylindriques) et des enroulements annulaires en série. Ces enroulements sont simples ou multiples.

Pour le couplage des bobines préparées sur formes, on emploie aussi un enroulement mixte (imbriqué et ondulé à la fois).

Quand on utilise le groupement en quantité avec enroulement imbriqué, le bobinage peut se composer d'un nombre de bobines moitié de celui des pôles ou d'un nombre de bobines non divisible par la moitié des pôles. Avec la disposition à « pas raccourcis » (qui consiste à placer les bobines non sur un diamètre, mais sur une corde), on peut diminuer le nombre de croisements des bobines entre elles. Alors on arrive à faire varier le nombre de conducteurs par encoche dans le rapport de 1 : 1,3 jusqu'à 1,4 sans changer le flux. On a aussi la possibilité d'employer un type donné pour une échelle beaucoup plus étendue du nombre de pôles. Pour obtenir tous les bons effets de ce genre d'enroulement, on doit éviter que les bobines en commutation viennent à se trouver sous l'arc polaire.

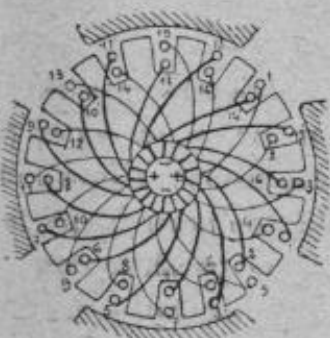


FIG. 1034.

Les tambours imbriqués se font avec bobines superposées (*fig. 1034*) et au moyen soit de bobines moulées sur gabarits, soit de barres disposées dans les entailles des tôles du noyau et repliées à l'extérieur les unes vers les autres, ou reliées entre elles à l'aide de fourches de connexion.



FIG. 1035.

Dans les induits rainés, à tambour, où l'enroulement est fait à l'aide de barres, l'un des côtés de la spire est placé à la partie supérieure de l'encoche ou niche, où les deux côtés sont disposés côte à côte (*fig. 1035*).

Les enroulements multiples groupés en quantité ne sont pas à conseiller, car ils déterminent de forts courants internes. Il est préférable, dans ce cas, d'adopter l'enroulement « série parallèle d'Arnold », quand cela est conciliable avec le but poursuivi.

Les enroulements « série-ondulé » sont utilisés dans les induits rainés. On peut faire des tracés dans lesquels le nombre des pôles et celui des conducteurs sont constants, quoique les bobines aient, dans chacun, des largeurs différentes. Lorsque l'enroulement se compose de barres, on peut obtenir des constructions symétriques en employant des enroulements semi-ondulés et semi-imbriqués qui ont pour effet de réduire la différence de potentiel entre deux conducteurs ou bobines consécutives et, par suite, de donner moins d'importance à l'isolement ; enfin on effectue des grou-

pements en série comportant un nombre de barres multiple de celui des pôles, ou avec des bobines doubles. Les couplages en série offrent l'inconvénient de recourir à un nombre impair d'encoches, d'où une certaine difficulté de construction et une moins bonne commutation que dans les machines à enroulement parallèle.

Dans les machines de grande puissance, la construction des enroulements série-parallèle avec barres est tout indiquée, leur réalisation offrant plus de simplicité et de commodité que ceux avec bobines.

Les enroulements ondulés, qui permettent d'aborder les couplages en série, en série-parallèle et mixte, permettent d'avoir des enroulements donnant un nombre désiré quelconque de circuits dans les machines ayant un nombre quelconque de pôles.

L'enroulement imbriqué en forme de « manteau », imaginé par Brown, qui donne une grande surface de refroidissement, les conducteurs étant montés en deux couches, à raison de 2, 4 ou 6 conducteurs par rainure, a été aussitôt utilisé par un grand nombre de constructeurs.

Le choix entre l'enroulement série et l'enroulement parallèle imbriqué est dicté par la valeur de l'intensité dans l'induit et par les conditions de la commutation.

Au point de vue de la grandeur du courant, on ne dépasse pas généralement 250 à 300 ampères par conducteur. Pour éviter les pertes par courants de Foucault dans les barres de grandes dimensions on prend plusieurs barres en parallèle ou on emploie des câbles composés de fils fins. Au point de vue du nombre de barres, l'enroulement parallèle donnant p fois plus de sections ($2p$ = nombre de pôles de la machine) amène à avoir p fois plus de lames. Pour éviter ce grand nombre de sections, on est obligé de prendre plusieurs spires par section et, de ce fait, les conditions de la commutation deviennent plus difficiles.

En général, dans les cas de machines avec commutation difficile, il est préférable de prendre un enroulement parallèle avec une spire par section. Si cela n'est pas possible on recourra à l'emploi de plusieurs spires par section. On est donc obligé de choisir entre un enroulement parallèle avec beaucoup de spires par section et un enroulement série avec une, deux ou plusieurs spires par section.

Il faut calculer les tensions (E_0) et (E_s) pour savoir lequel des enroulements permettra de rester dans les limites permises qui varient pour E_0 de 10 à 20 volts et pour E_s de 0,5 à 1 volt pour les machines avec pôles auxiliaires.

On peut réduire ces tensions en diminuant les perméances du champ de fuite et du champ total en cherchant à faire peu d'encoches avec la largeur d'encoche la plus grande possible, en mettant beaucoup de conducteurs dans une encoche, mais on peut aller au-dessous de trois à quatre

encoches entre les becs des pièces polaires pour ne pas avoir de fluctuations brusques dans la zone de commutation.

Il n'est pas toujours avantageux de mettre deux barres par encoche, comme cela se fait assez souvent. Enfin la répartition égale du courant dans les voies d'enroulement dépend de l'égalité de résistance des bobines court-circuitées entre les balais de même polarité. Avec le nombre de pôles augmente la possibilité de charge inégale de balais de la même polarité pour l'enroulement série.

D'après Arnold, pour profiter pleinement des avantages des enroulements en série-parallèle, le constructeur doit s'efforcer de réaliser autant que possible des enroulements en barres, dont la main-d'œuvre est plus simple, moins coûteuse et l'exécution plus parfaite. A cet égard, l'intensité par voie doit être prise de préférence égale à 100 ampères, afin de pouvoir donner aux barres des dimensions avantageuses ; d'autant plus que la faculté de choisir presque arbitrairement le nombre des voies d'enroulement permet de satisfaire à cette condition. Il faut, en outre, obtenir la symétrie des voies d'enroulement, que l'on produit en disposant sur le collecteur deux lignes de balais et en réduisant au minimum le nombre d'entrées de l'enroulement.

L'application des connexions équipotentielle est presque toujours suffisante dans les enroulements en série-parallèle pour corriger les défauts de la commutation.

Les enroulements série sont rarement employés dans la construction des armatures à cause de la haute valeur de l'intensité du courant par conducteur.

Les connexions équipotentielles sont absolument nécessaires dans les machines multipolaires, elles doivent être bien isolées et ne pas présenter de conducteurs nus à cause des poussières, et être fixées et supportées de façon rigide. Leur meilleure position est à l'extrémité arrière, opposée au collecteur, sous le frettage.

Le frettage des enroulements d'extrémité au moyen du fil d'acier est à tout égard préférable au frettage par bague métallique.

Enroulement en parallèle double avec connexions équipotentielles. — L'enroulement imaginé par F. Punga a pour but de réduire de moitié la tension par section de l'induit et par suite la tension entre les lames du collecteur. Cette solution est particulièrement intéressante pour les moteurs à courant continu à grande vitesse.

Si l'on considère une section formée de deux conducteurs, la tension aux bornes de cette section sera, en désignant par B_{\max} l'induction maxima dans l'entrefer, par v la vitesse périphérique en centimètres par seconde, et par l la largeur du fer de l'induit :

$$e_{\max} = B_{\max} v \cdot 2l \cdot 10^{-8} \text{ volts.}$$

Si $B_{\text{max}} = 7.000$; $v = 6.000$ centimètres par seconde ; $l = 50$ centimètres, la valeur de la tension par section sera :

$$e_{\text{max}} = 42 \text{ volts.}$$

Or, la puissance maxima de la machine est intimement liée à la valeur de la tension moyenne par section, ainsi que l'a démontré M. Pohl.

En outre, dans une machine non pourvue d'un enroulement compensateur, les ampères-tours de l'induit produisent une déformation du champ qui a pour résultat d'augmenter de 20 à 30 0/0, entre la marche à vide et la pleine charge, la tension maxima par section pour une même valeur de la tension aux bornes de l'induit.

Dans les moteurs à vitesse variable, par exemple les moteurs de trains de laminoirs, cette augmentation est encore bien plus sensible. Si la vitesse varie, par exemple, dans le rapport de 1 à 2, la tension maxima par section dépasse souvent à pleine vitesse le double de sa valeur à vide.

La (fig. 1036) représente l'enroulement F. Punga en parallèle double où tous les points équipotentiels sont réunis par des connexions m et n situées de part et d'autre de l'induit. Toutes les connexions équipoten-

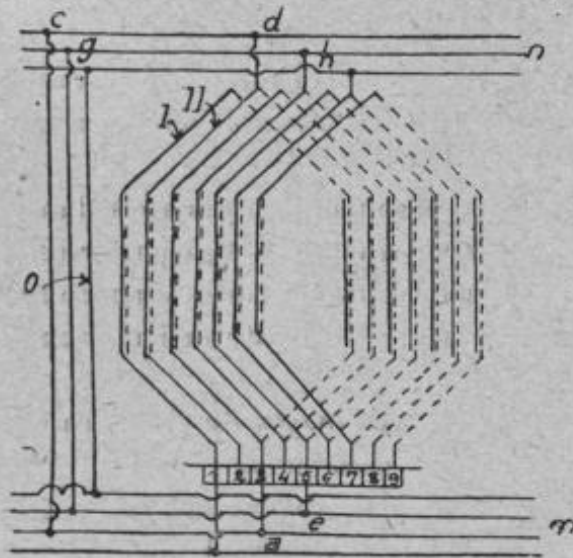


FIG. 1036.

tielles, situées d'un côté de l'induit, ou quelques-unes d'entre elles seulement, sont réunies aux connexions correspondantes de l'autre côté par des conducteurs inactifs O traversant l'induit, ce qui permet de réduire exactement de moitié la tension maxima par section ; ces conducteurs inactifs, servant simplement à l'égalisation des potentiels, ne sont parcourus normalement par aucun courant, ce qui permet de leur donner une section très

réduite ; en outre le nombre de ces conducteurs peut être très restreint.

Les conducteurs ne sont plus disposés comme d'habitude mais de manière que, dans un faisceau de plusieurs conducteurs appartenant respectivement aux deux enroulements en parallèle, l'un de ceux-ci ne se trouve pas dans la même encoche que les autres.

Cet enroulement s'applique, d'après l'auteur, particulièrement bien aux

commutatrices de grande puissance, les bagues jouant elles-mêmes le rôle de connexions équipotentielles.

Enfin, M. Punga estime que, dans de nombreux cas, cet enroulement permet d'obtenir une commutation satisfaisante, sans qu'il soit nécessaire de recourir à l'emploi de pôles auxiliaires de commutation.

Le bobinage des induits à haute tension est généralement du type à enroulement en série, mais avec combinaison à l'effet d'augmenter le nombre de lames au collecteur, indépendamment du nombre de faisceaux. On emploie quelquefois des induits à enroulements multiples, qui consistent en des bobinages avec collecteur pour chacun d'eux, collecteur dont les lames sont intercalées de façon à ce que les divers enroulements soient montés en quantité par les frotteurs. En raison de cette disposition, lorsque le balai quitte une lame du collecteur, une partie seulement du courant total est inversée et, par suite, la formation d'étincelles au collecteur et l'échauffement des lames dû aux courants de Foucault sont considérablement réduits.

Le nombre de lignes de balais avec les enroulements ondulés en série-parallèle est de deux, quel que soit le nombre de pôles ; dans les enroulements imbriqués et dans les enroulements annulaires parallèles, il y a autant de lignes de balais que de pôles, et leur espacement est égal au pas polaire. On peut, à l'aide d'artifices spéciaux, tel que celui bien connu de Mordey, réduire le nombre de lignes de balais, comme cela se pratique pour les moteurs de traction. Avec les enroulements ondulés, on augmente au contraire parfois le nombre de lignes de balais (qui est de deux normalement), lorsque le courant de la machine a une grande valeur.

Enfin, on peut égaliser les courants recueillis aux lignes des balais, pour les induits à enroulement en quantité, au moyen de connexions transversales supplémentaires reliant les parties de l'enroulement qui doivent être au même potentiel.

Avec les induits dentés ou rainés, il passe très peu de lignes de force dans les encoches. Sur la (fig. 1037), qui a trait à un enroulement où les conducteurs sont logés chacun dans trois paires d'entailles, les lignes de force en traits pleins indiquent le chemin parcouru par le flux principal, et les lignes pointillées sont les fuites magnétiques. Les conducteurs engendrent, en plus des fuites signalées, des dériviations le long de l'entrefer à travers les encoches de l'induit, sur les deux faces latérales et tout le long des bobines. La grande induction dont les dents sont le siège amène une distorsion du champ principal, qui produit une obliquité des lignes de force dans l'entrefer.

La considération des dimensions des rainures, de l'entrefer, de la lar-



FIG. 1037.

geur des pôles inducteurs est très complexe, ainsi qu'il est expliqué plus loin. Le rapport du champ de fuites au champ principal varie en raison inverse de la largeur du pôle pour le même nombre d'ampères; par suite, le coefficient de fuites ou coefficient de Hopkinson est inversement proportionnel à la largeur du pôle et directement proportionnel au nombre de pôles.

Enfin la conductibilité magnétique dépend à la fois de la forme des dents et de la position des conducteurs dans les entailles.

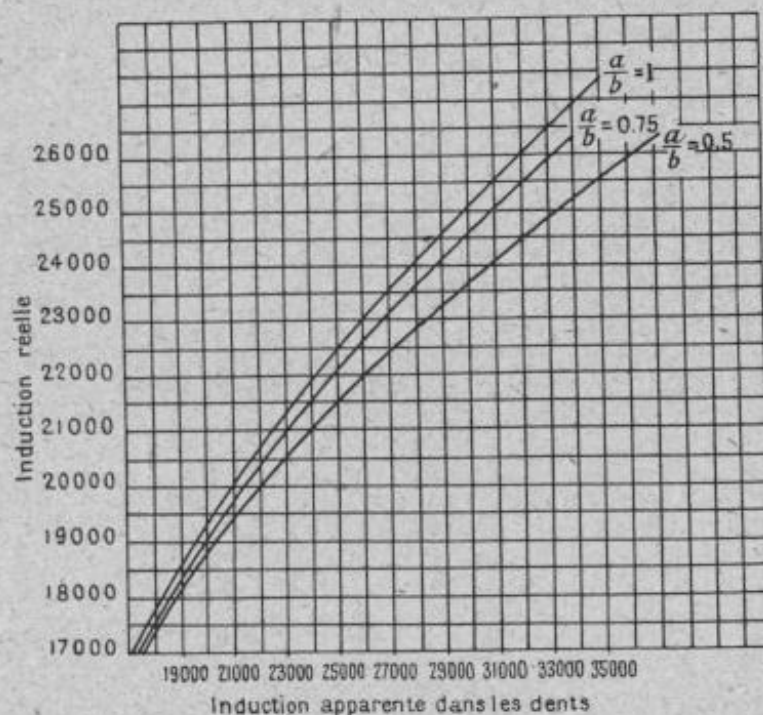


FIG. 1038. — Courbes pour le calcul de l'induction réelle dans les dents (Hobart).

Le tableau suivant, dressé par M. Smoot, indique les rapports de la longueur (e) d'encoche à la largeur (d) de la dent (colonne A), de (e) à la largeur de l'entrefer (δ) (colonne B) et de la réluctance dans le cas d'un induit denté à la réluctance dans le cas d'un induit lisse.

A	B	RAPPORT DES RÉLUCTANCES POUR INDUITS DENTÉ ET LISSE				
$\frac{e}{d}$	$\frac{e}{\delta}$	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5
0,500	3,42	1,17	1,18	1,16	1,17	1,21
0,515	6,65	1,24	1,26	1,24	1,24	1,28
0,530	1,68	1,11	1,10	1,09	1,11	1,14
0,770	2,27	1,17	1,22	1,16	1,17	1,29
0,940	9,60	1,51	1,52	1,48	1,50	1,53
1,000	4,00	1,30	1,25	1,29	1,35	1,98
1,02	4,45	1,35	1,35	1,32	1,34	1,41
1,28	3,90	1,36	1,33	1,34	1,37	1,44
1,94	3,86	1,45	1,37	1,40	1,47	1,55
1,98	3,34	1,37	1,39	1,36	1,41	1,51

Pour que les courants de Foucault soient évités le plus possible dans les pièces polaires, il faut employer un entrefer plus grand que la moitié de la largeur d'une rainure.

Si nous appelons N le nombre total de conducteurs à la périphérie de l'enroulement induit, $2p$ le nombre de pôles, $2a$ le nombre de chemins ouverts au courant total dans le bobinage, b le nombre de conducteurs (spires ou bobines) entre deux lames successives du collecteur, c le nombre de conducteurs induits compris dans la spire ($c = 1$ pour l'anneau et $c = 2$ pour le tambour), y_1 et y_2 les pas composants (y_1 , pas avant, et y_2 , pas arrière), y le pas résultant, f le pas dans le champ et m le pas polaire, les divers enroulements signalés plus haut se définissent comme suit :

1° *Enroulement en quantité.*

Pour l'enroulement en anneau :

$$c = 1; \quad b = N \quad \text{et} \quad y = \pm 1.$$

Pour l'enroulement imbriqué :

$$\begin{aligned} c &= 2; & b &= 2; & y &= \pm 1; \\ y_1 - y_2 &= \pm 2; & y_1 &= \frac{N \pm q}{2p} + 1; & y_2 &= \frac{N \pm q}{2p}; \end{aligned}$$

q est une quantité qu'il faut ajouter à y_1 et à y_2 pour qu'ils forment des nombres entiers.

2° *Enroulement multiple en quantité.*

Pour l'enroulement en anneau :

$$c = 1; \quad b = N \quad \text{et} \quad y = \pm n; \quad (a = np, \text{ nombre entier } > 1).$$

Pour l'enroulement en tambour, bouclé ou imbriqué :

$$\begin{aligned} c &= 2; & b &= \frac{N}{2}; & y_1 - y_2 &= \pm 2n; \\ y &= \pm 2n; & y_1 &= \frac{N \pm q}{2p} + n; & y_2 &= \frac{N \pm q}{2p} - n. \end{aligned}$$

Pour réaliser un enroulement fermé sur lui-même, y_1 et y_2 doivent être impairs, et y et b ne doivent avoir aucun commun diviseur.

3° *Enroulement série.*

Pour l'enroulement en anneau :

$$c = 1; \quad b = N; \quad y = \frac{b \pm 1}{p}.$$

Pour l'enroulement en tambour :

$$c = 2; \quad b = \frac{N}{2}; \quad y = \frac{b \pm 1}{p}; \quad y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p};$$

y_1 et y_2 sont impairs, $\frac{y_1 + y_2}{2}$ et $\frac{N}{2}$ n'ont aucun commun diviseur.

4° *Enroulement série-parallèle.*

Pour l'enroulement en anneau :

$$c = 1; \quad b = N; \quad y = \frac{b \pm a}{p}.$$

Pour l'enroulement en tambour :

$$c = 2; \quad b = \frac{N}{2}; \quad y = \frac{b \pm a}{p}; \quad y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2a}{p}.$$

Pour obtenir un enroulement simple, y_1 et y_2 doivent être impairs et y et b ne pas avoir de commun diviseur.

433. Puissance limite d'une dynamo ⁽¹⁾. — Si une dynamo bobinée à 110 volts commute bien pour une puissance et une vitesse données, avec des balais doux, elle commutera bien à 220 et 440 volts pour la même puissance et la même vitesse avec le même collecteur, si on emploie respectivement des balais moyens et des balais durs, puisque le nombre de tours par circuit commuté (T) et la résistance au contact (r) ⁽²⁾ resteront proportionnels.

La puissance limite est proportionnelle à $\sqrt{B^2 \times a \times p}$; B , induction périphérique ou induction moyenne supposée répartie sur toute la circonférence; a , la différence en degrés entre le pas de bobinage et l'arc polaire; p , le nombre de paires de pôles.

Si B_1 est l'induction moyenne dans l'entrefer et m l'arc polaire (en degrés), on a :

$$B = B_1 \times \frac{mp}{180}.$$

⁽¹⁾ D'après M. Voisin, à qui nous empruntons cette étude, la condition de commutation dans une dynamo est donnée par l'expression :

$$\frac{3TW}{10DBr} \leq \sqrt{\frac{5ap}{le}},$$

les lettres ayant les significations données ci-après.

⁽²⁾ Les valeurs de r sont : pour balais durs, 0,1 ; pour balais moyens, 0,05, et pour balais doux, 0,025.

D'autre part la valeur maximum de $a \times p$ est égale, à une demi-encoche près, à $(180 - mp)$. Donc :

$$B^2ap = \left(\frac{B_1}{180}\right)^2 (mp^2) (180 - mp).$$

Cette fonction et par suite la puissance limite sont maxima lorsque $(mp) = 120$, c'est-à-dire lorsque les épanouissements polaires occupent les deux tiers de la circonférence, phénomène constaté empiriquement depuis longtemps.

Il s'ensuit que la valeur optima de $(a \times p)$ est égale à 60, à une demi-encoche près. D'ailleurs on ne peut guère abaisser la self au-dessous de 25 et l'épaisseur des lames au-dessous de $0^{\text{cm}},4$.

Par conséquent, avec les balais actuels, on ne peut en aucun cas dépasser la puissance limite donnée par la formule :

$$W = \frac{1,83DB}{T} = \frac{1,22DB_1}{T};$$

D, diamètre d'induit en centimètres.

Soit dans les plus grosses machines où B_1 peut dépasser 12.000 et où $T = 1$, une puissance maximum de 1.500 kilowatts par mètre de diamètre d'induit.

Dans ce cas extrême, on peut remarquer que :

$$\frac{apv}{75} = \frac{nscT^2LI}{40^3p} \leq \sqrt{12},$$

où $v \leq 4,32$ et où $c \leq \frac{43,2}{d}$;

v , voltage transversal ; n , vitesse en tours par minute ; s , nombre d'encoches ; c , nombre de sections par encoche ; L , longueur totale du noyau en centimètres ; I , intensité totale dans l'induit ; C , coefficient caractéristique de la commutation $\left(= \frac{v}{rd}\right)$, et d , densité de courant par centimètre carré dans les balais.

Il suffit donc d'admettre une densité en charge de plus de 9 ampères par centimètre carré, pour que c ne dépasse pas la valeur de 5 (dans presque tous les cas de la pratique, la valeur de c est comprise entre 0,6 et 4).

On peut, par conséquent, sans pôles supplémentaires ni aucun autre artifice, atteindre avec une bonne commutation une puissance de 1.500 kilowatts par mètre de diamètre d'induit, c'est-à-dire une puissance au moins égale aux plus fortes puissances obtenues avec les turbines à vapeur.

434. Rendement des dynamos. — Pertes d'énergie. — Une dynamo a une valeur économique d'autant plus caractérisé qu'elle donne lieu à moins d'échauffement, c'est-à-dire à un plus grand rendement. D'autre part, les isolants qui protègent les conducteurs ne pouvant résister longtemps à une température anormale, on prend des précautions propres à obtenir des surfaces de rayonnement suffisantes pour une facile dispersion de la chaleur engendrée.

Les pertes dans le cuivre d'une dynamo ont lieu par effet Joule dans l'induit et les bobines en série.

Si p est la perte en watts dans le cuivre, r_a la résistance en ohms de l'induit à chaud, r_s la résistance des bobines inductrices, en ohms, I_a l'intensité de pleine charge et I_s celle parcourant les inducteurs, on a :

$$p \text{ watts} = (I_a^2 r_a) + (I_s^2 r_s).$$

Les pertes dans le fer dépendent des courants parasites et de l'hystérésis.

On peut évaluer cette dernière à l'aide de la formule de Steinmetz ci-après :

$$p_i \text{ watts} = \frac{V \eta \mathfrak{B}_{\max}^{1.4} \times \omega}{10^7};$$

ω , nombre de cycles d'aimantation par seconde, où la fréquence de déplacement est égale à $\frac{n+p}{60}$ (n nombre de tours par minute, et p , nombre de paires de pôles); η , coefficient de Steinmetz, variant de 0,003 (bonne tôle de fer mince) à 0,025 (acier coulé trempé); \mathfrak{B}_{\max} , induction totale, et V , volume du noyau en centimètres cubes.

La perte d'énergie entraînée par les courants parasites est proportionnelle aux carrés de l'induction maxima, de l'épaisseur du métal, et à la vitesse de déplacement.

Si e est l'épaisseur des tôles en centimètres, on aura :

$$p_2 \text{ watts} = \frac{16 (e \omega \mathfrak{B}_{\max})^2 V}{10^{12}}.$$

Mais nous devons faire remarquer que cette formule donne des résultats notablement inférieurs à ceux de la pratique, par la raison que les disques de tôles ne sont pas toujours soigneusement isolés; tel est le cas des induits dentés dont les encoches sont poinçonnées d'une façon défectueuse.

Les tôles, dont les rainures sont obtenues par fraisage, donnent lieu à des pertes assez fortes, par ce motif que la fraise produit des bavures qui diminuent sensiblement l'isolement des paquets de tôles.

Enfin, les courants parasites se produisent non seulement dans les tôles, mais aussi dans les conducteurs induits quand ils atteignent de grandes dimensions, ainsi que dans les lames des collecteurs, alors que le débit de la machine est très intense. Ce sont là toutes considérations d'ordre matériel dont la formule ci-dessus ne tient pas compte et qui en limite singulièrement l'importance.

Connaissant la différence de potentiel E_1 aux bornes de la dynamo, à pleine charge, et la résistance r' (à chaud) de l'enroulement en dérivation, on a pour la valeur de la puissance absorbée :

$$p_3 = \left(\frac{E_1}{r'} \right)^2.$$

Les pertes par résistance de contact des balais sur le commutateur sont d'ordre assez complexe. On peut prendre, d'après Arnold, comme valeur extrême de la résistance superficielle de contact : par balai en charbon, 0,25 ohm : cm², et par balai métallique, 0,02 ohm : cm². Quant à la perte provenant du frottement des balais, il faut compter comme coefficient de frottement 0,3 à 0,2, le premier s'appliquant à des balais de charbon, et le second à des balais métalliques ; en ce qui concerne l'effort du balai ou la pression qu'il exerce sur le commutateur, il oscille entre 90 et 100 grammes par centimètre carré pour les balais de cuivre et 100 à 150 grammes pour les balais de charbon.

Il nous reste à examiner les pertes par frottement et par ventilation, dont l'importance dépend surtout du plus ou moins de soins apportés dans la construction des organes mobiles de la machine. Comme il est à peu près impossible de s'en rendre un compte exact par le calcul, on s'en tient aux résultats de l'expérience.

Appelons :

f coefficient de frottement (0,2 environ dans le cas de balais en charbon) ;

p pression des balais sur le collecteur (100 à 150 grammes par centimètre carré) ;

v vitesse tangentielle en centimètres-seconde ;

s surface de contact des balais en centimètres carrés ;

On aura pour les pertes par frottement des balais :

$$p' \text{ watts} = f p v s \times 981 \times 10^{-7}.$$

* Les pertes par frottement de l'arbre sur les coussinets se calculeront par l'expression :

$$p'' \text{ watts} = F f 9,81 ;$$

F effort en kilogrammes que supporte la fusée.

Pour les machines à inducteurs tournants et placés à l'intérieur de l'induit fixe, qui présentent plus de sécurité que celles à l'induit mobile, il y a lieu de remarquer que cette disposition conduit à de très grandes dimensions pour l'induit, dont le noyau ne peut plus être exécuté avec des tôles d'une seule pièce, mais avec des segments dont l'isolement devient plus difficile et la main-d'œuvre sensiblement plus élevée.

Pratiquement on attribue aux pertes les chiffres suivants pour des machines dont les puissances vont de 50 à 500 kilowatts :

Dans l'inducteur (RI^2).....	1,5	0/0 à 0,5 0/0
Dans l'induit (RI^2).....	4,5	1,5
Hystérésis.....	3,0	1,0
Courants de Foucault.....	0,6	0,4
Frottements.....	1,5	1,0

Le rendement diffère suivant la charge, quelques-unes des pertes que nous venons d'étudier variant selon la puissance demandée ; les pertes dans le noyau et celles de l'excitation shunt sont sensiblement constantes à toutes charges. Le rendement, nul à vide, atteint son maximum à la pleine charge, mais il peut aussi être d'un ordre élevé à demi-charge et même à quart de charge, si la machine est bien étudiée et soigneusement construite.

La forme générale de la courbe de rendement est telle que celle que montre la (fig. 1039), qui représente également les caractéristiques interne

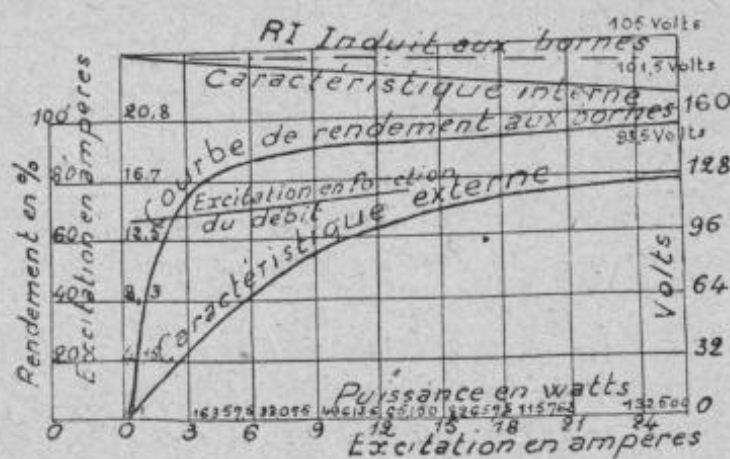


FIG. 1039.

et externe d'une machine de 138 kilowatts sous 105 volts. Le rendement à pleine charge est de 93,4 ; à demi-charge de 91,7, et à quart de charge, de 87,7.

Le poids spécifique des dynamos varie de 55 kilogrammes par kilowatt pour les faibles puissances à 35 kilogrammes pour les machines de

50 kilowatts, à 30 kilogrammes pour celles de 100 kilowatts, à 28 kilogrammes pour celles de 500 kilowatts, et enfin à 25 kilogrammes pour les machines de 1.000 à 2.000 kilowatts.

S. P. Thomson donne la formule suivante, concernant l'*utilisation spécifique* des machines à courant continu :

$$\omega = \frac{EI}{ndts} = V\alpha\beta 10^{-8},$$

où on voit le rôle des trois facteurs limites V , α et β .

V , vitesse périphérique de l'induit, qui varie de 1.000 à 2.300 centimètres par seconde ; α densité du courant, variable de 40 à 100 ampères par centimètre carré, et β , densité du flux, variable de 4.000 à 6.000 lignes de force par centimètre carré.

Pour les alternateurs, V varie de 2.500 à 3.500, $\alpha = 35$ à 40 ampères et $\beta = 4.000$.

435. Du refroidissement dans les machines électriques. — La diminution de l'échauffement dans les machines améliorant le rendement, il semble que ce point a été, à tort, quelque peu négligé par les constructeurs de machines.

Il apparaît donc utile de signaler les perfectionnements apportés dans ce but par quelques maisons de construction. Ainsi l'A. E. G., pour obtenir un meilleur contact entre la couronne du bâti et les tôles et par suite pour mieux évacuer la chaleur de la machine vers l'extérieur, soigne tout particulièrement le travail de tour de ces deux parties, pour assurer un contact intime entre tous les points.

Pour les machines à marche lente, donnant par suite un déplacement d'air très faible, la maison Siemens-Schuckert dispose, sur l'arbre de la machine à refroidir, un ventilateur de telle manière qu'il puisse tourner librement sur l'arbre moteur. La commande du ventilateur peut avoir lieu par un moteur installé librement, au moyen d'une courroie, ou bien on donne au moyen du ventilateur la forme d'un induit, tandis que le champ extérieur correspondant est adapté librement ou directement sur l'induit de la machine qui doit être refroidie. On peut faire tourner le ventilateur à un nombre de tours quelconque indépendamment de la machine et obtenir ainsi un refroidissement intense et largement suffisant.

Une construction également brevetée consiste en un ventilateur vissé sur la machine électrique, dans quel cas la commande est assurée par l'arbre de la machine qui est relié à l'arbre du ventilateur.

L'on sait que l'on emploie fréquemment des canaux longitudinaux et transversaux dans l'induit pour le refroidissement. Tandis qu'on obtient les canaux longitudinaux, en pratiquant des trous dans les différentes

tôles de l'induit, les canaux transversaux sont établis en interposant des pièces en forme d'anneaux, d'ailettes, etc., en un certain nombre de tôles. La société l'A. E. G. a modifié cette dernière construction, en combinant ces pièces auxiliaires de façon à éviter que l'air chaud qui sort de la machine ne soit aspiré à nouveau. De cette manière l'air frais pénètre d'une part par le dispositif d'entrée d'air adapté à l'une ou aux deux extrémités du rotor ; de ce dispositif (ventilateur) l'air arrive dans l'espace qui se trouve entre le stator et le rotor, en passant par les canaux transversaux du stator, d'où il s'échappe à l'extérieur d'autre part, en traversant le même intervalle entre le stator et le rotor, pour aboutir dans une chambre fermée d'où l'air frais s'échappe à travers les canaux longitudinaux qui débouchent dans cette chambre et à travers l'espace circulaire qui se trouve entre le stator et la carcasse extérieure, fermée elle-même, pour arriver dans une deuxième chambre en communication avec l'air extérieur.

Les *dynamos fermées* sont le plus souvent des machines normales que l'on enferme dans une enveloppe appropriée mais, comme cette disposition entraîne une diminution de puissance de 30 à 40 0/0 de leur force en machine ouverte, on a recours à un type d'une puissance correspondant à cette différence; de là un poids et un prix très élevés.

Certains constructeurs ont cherché à parer à cet inconvénient en disposant sur la machine même un ventilateur calé sur l'arbre même du rotor qui aspire l'air frais dans un canal d'amenée et le chasse à travers toutes les parties de la machine susceptibles d'échauffement. Alors on peut leur faire donner leur pleine puissance comme des machines ouvertes à la condition que les canaux d'air soient judicieusement établis. Dans d'autres cas on munit simplement la carcasse de nervures, auquel cas l'effet n'est que très relatif.

Pour les types à courant d'air, on peut recourir à une conception plus efficace, en mettant l'air enfermé dans celle-ci en circulation constante et en augmentant le refroidissement par une circulation d'eau, permettant d'augmenter la chute de température.

La machine Amsler, basée sur ces données, est disposée de façon que la condensation se fait uniquement dans la plaque de base qui sert de réfrigérant d'air et non pas dans la machine, si bien qu'il ne peut en résulter aucun inconvénient pour l'isolement.

II. — CONSTRUCTION DES DYNAMOS

436. Établissement des inducteurs. — Pour obtenir des effets d'induction aussi élevés que possible, on constitue le circuit magnétique du

système inducteur d'une machine électrique en métal très perméable et en prenant le soin de réduire, d'autre part, au minimum, la longueur du circuit. De plus, on cherche à limiter au strict indispensable les joints que font entre elles les parties traversées par les lignes de force ; en tout cas, on doit, par un montage très soigné, rendre aussi faible que possible la réluctance offerte par les dits joints.

C'est au moyen des courbes magnétiques que l'on se rend compte de la perméabilité des divers métaux employés pour la construction des inducteurs ; mais le métal le plus homogène magnétiquement est l'acier coulé recuit. Pour réduire au minimum la production des courants parasites, on constitue les noyaux des inducteurs au moyen de feuilles minces de tôles de fer ou d'acier, de 0^{mm},4 d'épaisseur à 1 millimètre au plus.

Lorsque les épanouissements polaires sont en fonte et rapportés sur les noyaux, on les ajuste à frottement doux et de façon à pouvoir facilement les enlever pour mettre en place les bobines ou les retirer au besoin. Ce genre de montage permet, en outre, d'employer les bobines inductrices cylindriques, d'un facile enroulement et présentant le minimum d'encombrement.

Les bobinages des inducteurs se font à même les noyaux ou sur gabarits disposés à part. Dans le premier cas, les conducteurs à section carrée sont préférables aux fils de forme ronde, et, pour les grosses machines, l'enroulement en bandes sur champ convient parfaitement. Avec les enroulements à bandes, le facteur d'utilisation est d'ordinaire plus élevé qu'avec les bobines.

Les dispositions d'enroulements avec bobines sur formes sont d'une

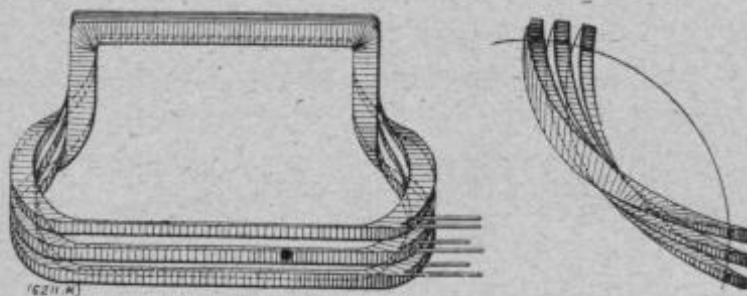


FIG. 1040. — Enroulement Alioth.

grande variété. L'étude et la fabrication de ces bobines constituent un point très important de la construction des machines électriques.

Un des premiers types a été celui d'Alioth (1885) (*fig.* 1040), puis celui d'Eickemer (1888), qui est le plus connu et est aussi très employé.

Nous citerons aussi les enroulements Rothert, Person et Thomson, Mallet, Batchelder et l'enroulement Hobart (*fig. 1041*).

Les ateliers d'Oerlikon, d'après leur nouvelle méthode, donnent d'emblée, sur des gabarits, aux bandes de cuivre nu et plat leur forme définitive. L'enroulement le plus pratique a lieu en superposant les bandes à

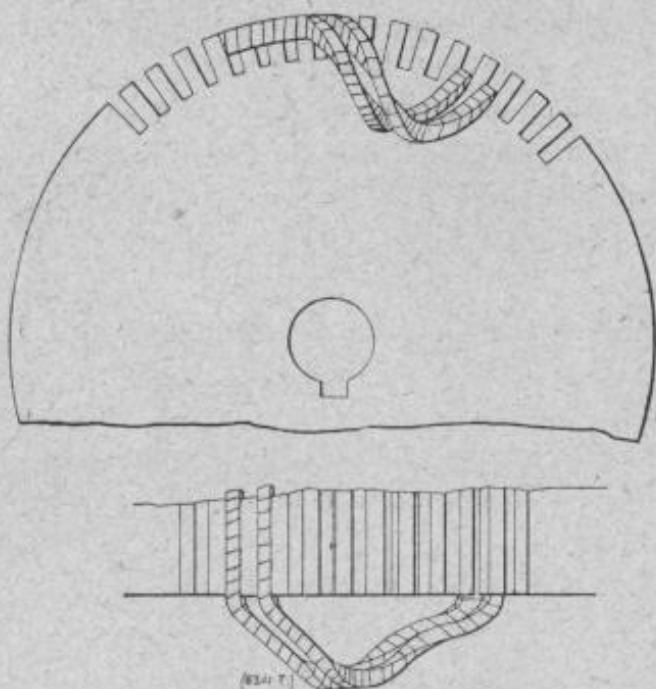


FIG. 1041. — Enroulement Hobart.

plat dans les encoches. Seulement, une fois que le cuivre nu a reçu sa forme définitive, on isole les bandes dans toute leur longueur avec des rubans de toile ou avec du papier, ou bien, dans les cas particuliers, on les entoure encore de micanite et on les imprègne. Enfin, l'ensemble des spires est encore isolé sur les faces engagées dans les encoches par une gaine parfaite de micanite ou autre isolant. Par cette enveloppe isolante, on obtient d'une façon simple une isolation

sans couture entre l'enroulement et la masse de fer, qui résiste à la triple tension de service, tandis que deux conducteurs contigus dans le voisinage des bornes peuvent, en toute sécurité, être isolés selon la tension de service pour des différences de potentiel allant jusqu'à 10.000 volts.

Une bobine, endommagée par carbonisation, étincelles ou autres accidents, peut être isolée de nouveau à peu de frais, puisque les bandes de cuivre nu conservent d'elles-mêmes leur forme et qu'il suffit donc d'en faire l'isolation.

La section des noyaux doit être telle qu'elle laisse passer le flux correspondant à la marche en pleine charge de la machine et au flux dérivé qui donne naissance aux fuites ou dispersion. Pour le calcul de ces fuites, on a reconnu que la perméance réduite, à l'instar des courants dérivés, est la somme des perméances des branches du flux utile et du flux perdu. Le rapport du flux total émanant d'un flux au pôle utile, ou coefficient de fuites, varie entre 1,15 et 1,7 ; il varie d'ailleurs avec l'excitation.

Dans les machines multipolaires, le noyau n'a à livrer passage qu'à la moitié du flux utile, et, si elles sont à encoches, la longueur magnétique du noyau est représentée par le parcours moyen mesuré entre la base des

dents et la périphérie du vide interne. Avec les grosses unités, le rapport entre la section brute du fer et celle utilisée à la production du champ magnétique est 1,25 à 1,10, en raison de la présence de l'isolant des disques et des conduits de ventilation. Pour les machines en tambour, la section des inducteurs varie entre 1,25 et 2,3 fois celle du noyau de l'induit.

On tolère un accroissement de température de 35° dans les inducteurs, la machine fonctionnant à pleine charge, qui correspond à une surface de refroidissement de 10 à 12 centimètres carrés par watt. Dans les enroulements lisses, à forte épaisseur, dépassant 7 à 8 centimètres, il faut compter sur 15 à 18 centimètres carrés par watt.

Quant à l'induction, elle se tient entre 6.000 et 20.000 gauss pour le fer et l'acier et entre 4.000 et 11.000 gauss pour la fonte.

Nous avons exposé les raisons qui militent, à notre avis, en faveur des noyaux polaires cylindriques. On peut donner à ces derniers, d'après S. Thompson ⁽¹⁾, une longueur égale au diamètre de leur section ; comme valeur d'essai, le savant professeur fixe cette dimension à 20 fois la longueur de l'entrefer (machine shunt) et à 40 fois (machine surcompoundée).

Quant aux dimensions de l'entrefer, sa longueur est prise inférieure à la moitié de la largeur d'une rainure et si celle-ci est fermée aux $3/4$, on la fait égale aux $3/4$ de sa largeur maxima ; pour la section d'entrefer, on peut adopter la moyenne de la surface polaire et de la surface du fer de la périphérie des dents situées sous un pôle.

Un moyen rapide pour la détermination du nombre de pôles consiste à multiplier le nombre de conducteurs (N) à la périphérie de l'armature par l'intensité du courant de pleine charge passant dans chacun d'eux et à diviser le résultat par 14.000. Rothert prend comme base du calcul des dynamos la fréquence, laquelle doit se tenir entre 17 et 20 pour les machines à 500 volts et entre 18,5 et 22 pour les machines surcompoundées pouvant donner jusqu'à 550 volts. Comme induction, il prend 20.000 gauss avec le courant à pleine charge et 2,6 à 2,9 ampères par millimètre carré comme densité.

Pour parer aux différences inévitables des flux magnétiques émanant des divers pôles des machines, par suite de l'inégalité des entrefers et de la dissymétrie des conditions magnétiques du fer, la maison Felten et Guillaume, de Francfort, remédie à cet inconvénient en se servant d'enroulements en court-circuit *b* (fig. 1042) qui ont une action inductive alternée en même temps sur une partie agissant plus faiblement et sur une partie

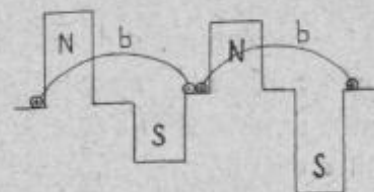


FIG. 1042.

⁽¹⁾ *Calcul et construction des machines dynamo-électriques*, par S. Thompson (traduction de E. Boistel). Ch. Béranger, éditeur, 1905.

agissant plus fortement appartenant à celui des enroulements dont le champ irrégulier doit être compensé.

Avec une excitation à courant continu l'enroulement de court-circuit doit être placé sur la partie de la machine qui ne porte pas l'enroulement d'excitation, c'est-à-dire sur le rotor, lorsque l'excitation se fait sur le stator.

La puissance spécifique des dynamos rapportée au cuivre inducteur, en watts par kilogramme, varie de 60 à 300, et, rapportée au poids total de la machine, de 15 à 40. La dépense d'excitation varie entre $1/2$ et $60/0$ de la puissance totale, et la surface de refroidissement en centimètres carrés par watt absorbé par l'excitation varie de 10 à 20.

437. Établissement des induits. — a) *Enroulement.* — Le bobinage des induits lisses a l'inconvénient de nécessiter de grands entrefers et, par suite, un poids de cuivre inducteur important pour la création du flux. Les induits rainés offrent des avantages très appréciés, tels que rapidité d'exécution des bobinages, facilité de pose et surtout d'enlèvement pour leur remplacement, ou simplement pour la visite de la machine. Ces bobines, préparées à l'avance sur des mandrins ou dans des moules, reçoivent des dispositions appropriées au genre d'enroulement adopté. Les connexions des bobines au collecteur peuvent se faire suivant des développantes de cercle, et parfois elles se raccordent les unes aux autres sur l'about postérieur par un faux collecteur du connecteur.

Le nombre des rainures dépend du type d'enroulement de l'armature et de la quantité de lames du collecteur. Pour les machines à 500 volts et au-dessous, une garniture de papier ou de carton lisse de 0^{mm},5 d'épaisseur, formant revêtement à l'intérieur de la rainure, est suffisante ; pour les machines à voltage plus élevé, on fait usage de micanite en feuilles pouvant avoir une épaisseur de 4 millimètres pour les machines de 3.000 volts et de 6 millimètres pour celles de 10.000 volts.

Le rapport entre la section nette de cuivre et la section brute de la rainure, ou *facteur de plein*, varie de 0,5 à 0,8, étant d'autant plus réduit que la machine est à haute tension.

La longueur totale de dent traversée par le flux est égale à la profondeur d'une encoche multipliée par 2, et la surface magnétique d'une dent est représentée par la largeur moyenne de la dent multipliée par la largeur nette de l'induit. Dans la plupart des cas, les lignes de force ne pénètrent pas dans les rainures au-dessous d'une profondeur égale à environ la largeur de celles-ci. Le rapport du champ dans l'encoche à l'induction dans l'armature, d'une façon approximative, est égal au rapport de l'entrefer à la somme de cet entrefer et de la longueur de la dent.

Les entailles trop larges donnent naissance à des courants de Foucault

dans les pièces polaires, surtout lorsque celles-ci sont massives ; les entailles larges et peu profondes diminuent l'inductance de la partie de l'enroulement logée dans le fer ; mais les entailles étroites et profondes permettent de raccourcir les connexions terminales, ce qui a pour effet de diminuer l'inductance totale de la bobine.

Les encoches ouvertes permettent la mise en place facile des bobines d'induit et donnent un meilleur isolement ; mais le conducteur est le siège de courants de Foucault et la réactance est augmentée. Ces inconvénients peuvent être supprimés si l'on ferme l'encoche avec des bandes de tôle isolées au papier, avec une épaisseur inférieure à 1 millimètre pour que la commutation ne puisse être influencée.

Les dimensions du fer de l'induit d'une dynamo, pour une puissance donnée, deviennent d'autant plus petites que les matériaux électriques et magnétiques sont mieux utilisés. Mais on est limité dans le choix de cette utilisation, en partie par la condition d'une commutation sans étincelles, en partie par la limite d'échauffement ordinairement tolérée.

L'expérience a donné des coefficients permettant de calculer l'échauffement d'un induit quand on connaît la surface de refroidissement et pour être certain de ne pas dépasser la limite d'échauffement, on se sert de valeurs expérimentales moyennes pour l'induction dans le fer et pour la densité de courant dans le cuivre.

L'élévation de température T_a dans l'induit est donnée par la formule (Arnold) :

$$T_a = \frac{W_{ez} + W_{ke}}{\pi D l (1 + 0,4v)} C_a ;$$

où W_{ez} est la perte dans le fer des dents, W_{ke} la perte dans le cuivre placé dans le fer, l la longueur totale de l'induit, v la vitesse à la circonférence de l'induit en mètres-seconde et C_a une constante expérimentale qui devient d'autant plus petite que la machine est mieux ventilée.

Pour bobiner les induits, on utilise généralement des fils de cuivre ronds tant que le diamètre n'excède pas 5 millimètres ; pour les courants plus intenses, on dispose soit plusieurs fils groupés en parallèle, soit des câbles composés de 19 ou 37 torons, ce dernier système étant préférable selon nous.

Le facteur d'utilisation avec des barres est d'ordinaire plus élevé qu'avec des bobines. Quand plusieurs bobines doivent être groupées dans une même entaille, il est en général plus économique de les enrouler en même temps en se servant de plusieurs faisceaux de fils.

Les tôles d'induit, jusqu'au diamètre de 1^m,20 environ, sont découpées d'une seule pièce, isolées d'une manière convenable au moyen de papier ou de vernis et empilées sur le croisillon d'induit dont la circonférence

extérieure est tournée aussi exactement que possible au diamètre de la circonférence intérieure des tôles ; la circonférence extérieure de ces disques est poinçonnée d'un certain nombre d'encoches rectangulaires, ou de forme plus compliquée si cela est nécessaire.

Dans le cas le plus général des machines à courant continu, ces encoches doivent former par l'empilage des tôles un certain nombre de rainures parallèles aux génératrices du cylindre : il est donc indispensable de faire l'empilage suivant un guide qui empêche d'une manière absolue le chevauchement des pleins et des vides des tôles.

Ce résultat est obtenu par l'emploi d'une clavette-guide fixée au croissillon d'induit ; les tôles portent sur leur circonférence intérieure une encoche de la forme de la clavette ; cette encoche sert à fixer les tôles pendant le poinçonnage, de sorte que les disques se présentent de la même manière pendant l'empilage : la coïncidence absolue des différentes encoches est ainsi obtenue de la manière la plus simple.

Les tôles empilées en nombre suffisant sont ensuite serrées entre deux plateaux de fonte ou d'acier à l'aide de boulons qui peuvent être disposés de différentes manières, mais qui, en général, ne traversent pas les tôles.

b) *Noyaux*. — Les disques de tôle dont sont formés les noyaux des machines modernes ont de 0,5 à 1 millimètre d'épaisseur au plus ; ils sont séparés par des feuilles de papier de 0mm,02 à 0mm,06, collées et enduites d'une couche de vernis isolant. Les paquets de tôles sont maintenus par des plateaux d'extrémité, puis fixés

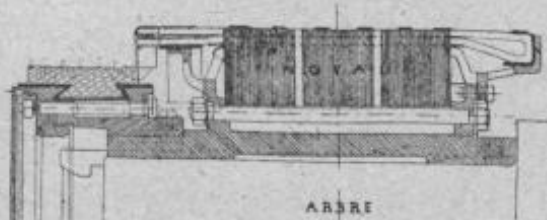


Fig. 1043.

et serrés au moyen de forts boulons isolés électriquement (*fig. 1043*).

Les tôles de fer doux mesurées à l'aide d'un hystérésimètre (hyst. Ewin ou Blondel-Carpentier) ne doivent pas donner un chiffre supérieur à 0,0016. Il convient aussi de faire des essais au perméamètre (perm. Hopkinson ou Picou).

Les noyaux lisses sont isolés du manchon d'entraînement, aussi bien sur leurs bases que sur leur surface cylindrique ; les induits dentés le sont sur toute la surface des rainures ainsi que sur leurs bases. On enduit toutes les parties à préserver avec un vernis à la gomme laque et des toiles de coton ou de soie, de micanite, de mica, etc.

On donne habituellement aux noyaux d'induit en tambour une longueur un peu supérieure à leur diamètre.

c) *Carcasses*. — Dans les gros induits en anneau, les pièces en bronze supportant les disques de tôles sont fixées sur une étoile centrale, en prenant la précaution d'éloigner l'intérieur du noyau de toute pièce métal-

lique. Les disques, de distance en distance, sont maintenus par des plateaux de consolidation et le tout fortement serré par des boulons soigneusement isolés.

Pour les induits en tambour de grande dimension, la carcasse présente soit une partie cylindrique sur laquelle les tôles viennent se reposer, soit un moyeu formé de plusieurs bras ou nervures supportant les disques de tôle.

Le montage du croisillon sur portée conique de l'arbre permet un ajustage plus précis que celui sur portée cylindrique à frottement doux, mais il exige l'emploi d'un écrou pour l'arrêt du croisillon. Quelquefois on utilise un montage cylindro-conique.

Les dynamos dont on monte l'induit par **forcement** ont leur croisillon alésé cylindriquement, et on procède au calage à la presse de l'arbre à froid ou à chaud (montage sans clavettes). A cet effet l'arbre et le croisillon sont respectivement tournés et alésés cylindriquement, et le rayon d'alésage du croisillon est tenu un peu plus petit que celui de la portée de l'arbre.

Le forçement à chaud est très utilisé en raison des simplifications qu'il permet d'introduire dans la construction.

d) *Collecteurs*. — On sait que l'organe le plus important, mais en même temps le plus sensible d'une machine à courant continu, est le collecteur. On pourrait presque dire que c'est le point douloureux de la technique des courants continus, car aussi bien au point de vue thermique qu'à celui mécanique il donne à l'ingénieur, pour le calcul comme pour la construction, les plus grandes difficultés.

Les collecteurs ou commutateurs des dynamos sont formés de segments en cuivre éroui quand on emploie des balais en charbon, et en bronze phosphoreux très dur, lorsque les frotteurs sont métalliques. L'isolement électrique des segments entre eux se fait au moyen de lames de mica ou de micanite de 0^{mm},6 à 0^{mm},8 d'épaisseur pour tension jusqu'à 250 volts, 0,6 à 1 millimètre pour tension jusqu'à 1.000 volts et 1 à 1^{mm},2 pour 1.000 à 2.000 volts. L'isolement du collecteur avec son support se fait à l'aide de carton comprimé (*presspahn*), dont l'épaisseur varie de 1 à 3 millimètres, suivant la tension de la machine. L'épaisseur des lames doit être au minimum de 4 millimètres à la périphérie et ne doit pas dépasser 2 centimètres ; leur hauteur minima est de 8 à 10 centimètres.

Le collecteur à bagues frettées est employé avec succès pour les très longs collecteurs des machines à vitesse normale.

Le collecteur à surface axiale est le plus répandu. On doit employer les lames de micanite isolante avec le moins possible d'excédent de vernis. Les bandes d'isolation placées sous les frettes doivent être de préférence en feuillets de mica pur de 0^{mm},5 à 0^{mm},75 d'épaisseur. Le collecteur le

plus souple est le collecteur à deux frettes, une à chacune des lames mais on les fait jusqu'à quatre frettes.

Dans un collecteur il ne doit se produire aucun jeu pendant la mise en vitesse, ce qui est le critérium d'une bonne construction ; il faut donc que la flèche initiale donnée aux lames soit toujours aussi grande que celle due à la force centrifuge.

Le montage et le serrage des lames s'opèrent de différentes façons. Le procédé le plus généralement usité consiste à serrer au moyen d'une presse hydraulique les segments avec leurs isolants dans une bague ou anneau d'acier, puis ceux-ci, ainsi emmanchés, sont portés sur le tour, ajustés et fortement pressés sur leur monture au moyen d'un écrou à pas fin que l'on fixe d'une façon définitive par une vis calante. On munit en outre le collecteur d'une rondelle de protection contre l'huile des paliers.

Lorsque les collecteurs atteignent de grands diamètres, on emploie, pour fixer les segments, les dispositions indiquées par la (fig. 1044). Pour les collecteurs importants, où les fils induits ne peuvent plus se loger dans les lames, on munit ces dernières d'ailettes flexibles et résistantes que l'on introduit dans une rainure pratiquée dans l'épaisseur de chaque segment et que l'on fixe de préférence au moyen d'une brasure. Lorsque l'induit est bobiné avec des barres et que les connexions de celles-ci sont rabattues sur les faces de l'armature, on brase dans le segment des fourches destinées à relier les barres au collecteur ; sur la face opposée de l'induit, on dispose aussi des fourches semblables pour les connexions des barres du bobinage.

Le refroidissement des collecteurs est un problème qui a appelé beaucoup de solutions. Une des plus efficaces est le système Siemens où l'air froid est amené à travers les lames mêmes du collecteur au moyen de conduits spécialement aménagés dans les lames et aspiré par un ventilateur placé au milieu du collecteur.

Le refroidissement des collecteurs est un problème qui a appelé beaucoup de solutions. Une des plus efficaces est le système Siemens où l'air froid est amené à travers les lames mêmes du collecteur au moyen de conduits spécialement aménagés dans les lames et aspiré par un ventilateur placé au milieu du collecteur.

Pour déterminer le nombre de lames au collecteur, on peut recourir à la formule empirique ci-après due à Arnold :

$$n = c \times N \sqrt{i};$$

c , constante qui dépend du type de la machine et qui varie de 0,037 à 0,04 ; N , nombre de fils à la périphérie de l'armature, et i , courant dans chaque circuit dérivé du bobinage.

Ce qui influe le plus sur la valeur de la résistance ohmique au contact

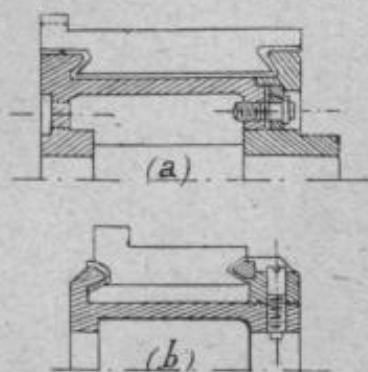


FIG. 1044.

des balais, ce sont la qualité de ceux-ci et la densité de courant dans la surface de contact. Actuellement, pour les machines dont la pression dépasse 80 volts, on emploie presque exclusivement les balais en charbon. Le nombre de balais par ligne dépend de la surface de contact de chacun d'eux et du débit de la machine. Avec des balais métalliques, il faut compter sur une surface de contact de 5 millimètres carrés par ampère et de 12 millimètres carrés pour les balais en charbon. La densité de courant pour ces derniers est de 4 à 7 ampères par centimètre carré et la résistance de contact, 0,2 ohm par centimètre carré de surface frottante. Dans ces conditions, la dynamo tétrapolaire (*fig. 751*), qui fournit 95 ampères par ligne de balais, présenterait (pour des balais en charbon) une surface de contact du collecteur de $95 \times 12 = 1.140$ millimètres carrés ⁽¹⁾.

Si on prend des balais ayant une surface de frottement de 3 centimètres carrés, il faudra donc munir la machine de 4 balais par tige, soit 16 balais au total.

Dans les machines modernes, de 10 à 100 HP, le collecteur a un poids d'environ 3 kilogrammes de cuivre par décimètre carré de surface cylindrique refroidissante, mesurée depuis les connexions de l'induit jusqu'à l'extrémité antérieure du collecteur.

Arbre et paliers. — Les fusées des arbres en acier pour les machines électriques sont cémentées, puis rectifiées. La formule simple ci-après permet de calculer le diamètre de l'arbre, si on ne tient pas compte de l'échauffement et de l'usure, qui peuvent parfois prendre des valeurs considérables :

$$d = c \sqrt{\frac{E \times I}{n}};$$

d , diamètre, en centimètres ; E , tension en volts aux bornes de la machine ; I , intensité en ampères ; n , nombre de tours par minute, et c coefficient qui peut être pris égal à 1,3 pour la fusée « côté collecteur », à 1,8 pour la fusée « côté poulie » et à 2 pour le corps de l'arbre et au milieu de sa longueur.

Arnold donne la relation ci-après, où le facteur a représente la puissance dépensée en kilogrammes-centimètres par seconde et par unité de surface pour que l'échauffement et l'usure restent dans les conditions acceptables, où V est la vitesse périphérique de la fusée de l'arbre, f le coefficient de frottement entre l'arbre et le coussinet et p la pression en kilogrammes par centimètre carré :

$$p \times V \times f \leq a.$$

⁽¹⁾ *Essais des balais de charbon pour dynamos (Bulletin de la Soc. internat. des Electriciens, octobre 1907).*

Or :

$$p = \frac{F}{dl} \quad \text{et} \quad V = \frac{\pi dn}{60};$$

F, effort en kilogrammes sur la fusée ; l , longueur en centimètres du coussinet ; n , nombre de tours par minute, et d , diamètre d'alésage du coussinet en centimètres.

En remplaçant on obtient :

$$\frac{F}{ld} \times \frac{\pi nd}{60} \times l \leq a; \quad \text{d'où :} \quad \frac{Fn}{l} = \frac{60a}{\pi f}.$$

La formule ci-après tient compte de la torsion et de la flexion :

$$d = \sqrt[3]{\frac{10M_c}{R_f}} \text{ centimètres};$$

dans laquelle :

$$M_c = \frac{3}{8} M_f + \frac{5}{8} \sqrt{M_f^2 + (a_0 C_t)^2};$$

M_f , moment de flexion, et C_t , moment de torsion $= \frac{60P}{9,81 \times 2\pi\omega_m}$ (P, puissance développée en watts, en tenant compte du rendement ; ω_m , la vitesse angulaire en tours par minute), et $a_0 = \frac{R_f}{R_c}$ [R_f , résistance pratique à la flexion par centimètre carré (400 à 500 kilogrammes par centimètre carré), et R_c , résistance pratique au cisaillement par centimètre carré (300 à 400 kilogrammes par centimètre carré)].

Nous citerons aussi la formule empirique ci-après préconisée par Fischer-Hinnen :

$$d = 16,25 \sqrt{\frac{P}{\omega_m}} \text{ centimètres};$$

P, puissance en poncelets transmise par l'arbre.

Toutes ces formules donnent la valeur du diamètre du corps de l'arbre ; pour le calcul des tourillons et pivots, on peut employer la formule empirique et rapide suivante :

$$d = \sqrt{\frac{16F}{\pi p}} \left(\frac{l}{d} \right) \text{ centimètres};$$

F, charge en kilogrammes exercée sur le tourillon ; p , pression admissible ($p = 600$ kilogrammes pour le fer par centimètre carré et 1.000 kilogrammes pour l'acier fondu). Les valeurs du rapport de la longueur du tourillon (l) à son diamètre sont données dans les formules usuelles.

Quand on a affaire à des machines marchant à une très grande vitesse angulaire, il convient de faire usage de formules spéciales, telle que celle de M. Delaporte ⁽¹⁾.

Les flux issus des pôles exercent sur l'arbre une attraction magnétique qui s'ajoute au poids propre de l'induit.

Généralement les épaulements des arbres sur les coussinets sont munis de rainures ou « coupe-gouttes » destinées à empêcher l'huile de graissage de filer le long de l'arbre. Ces rainures sont très utiles, car nous avons vu nombre d'induits, avec balais de charbon, détériorés par le fait de l'huile projetée des paliers sur les collecteurs et qui amène la désagrégation du mica des segments.

La généralité des machines électriques sont lubrifiées au moyen de bagues plongeant dans un bassin d'huile et entraînées par le mouvement de rotation de l'arbre, fournissant ainsi un graissage automatique et ne nécessitant, pour ainsi dire, aucune surveillance.

Les coussinets se font en bronze phosphoreux dur et d'une seule pièce, pour en simplifier la construction. La longueur de ces organes est généralement prise égale à trois fois le diamètre de la fusée; mais, pour les très grosses machines (supérieures à 1.000 kilowatts), on la limite à 2,5.

Lorsque les paliers sont rapportés sur le bâti de la machine, il convient de les construire avec un patin circulaire concentrique à l'alésage des coussinets, ce qui permet à l'arbre de tourner librement dans ses supports, quelle que soit la position des paliers.

Pour faciliter le montage de ces derniers, on les munit souvent de coussinets sphériques dits coussinets à rotules (*fig. 1045*).

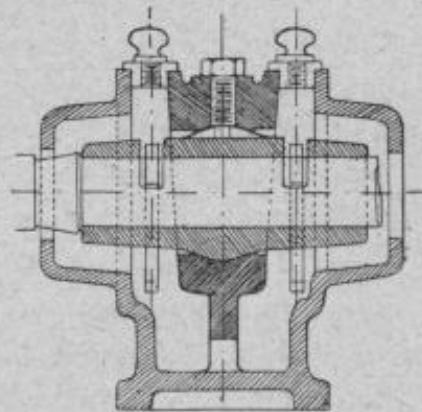


FIG. 1045.

III. — RÉGULATION DES DYNAMOS

438. Couplage et régulation des dynamos. — L'on sait que l'excitation des dynamos se produit sous plusieurs formes : séparée, série, shunt ou compound.

Les dynamos à enroulement en série, de mêmes dimensions, peuvent, sans inconvénient, être couplées en tension; mais, pour pouvoir les grouper en dérivation, on fait traverser les inducteurs des deux machines par

⁽¹⁾ *Revue de Mécanique*, juin 1903.

des courants de même sens, à l'effet d'éviter le renversement de polarité des inducteurs, en réunissant directement par un conducteur les balais auxquels aboutissent les extrémités des bobines inductrices, de manière à coupler celles-ci en parallèle.

L'accouplement en parallèle des machines shunt est une opération des plus faciles. On amène séparément les machines au voltage du réseau de distribution ; puis, une fois couplées, on règle le champ magnétique de chacune des dynamos, au moyen de résistances intercalées en série avec les inducteurs, de telle façon qu'elles débitent un courant proportionnel à leur puissance. Quand on veut retirer une machine du circuit, on affaiblit graduellement l'excitation de ses inducteurs par l'insertion de résistances, dont l'effet est la diminution progressive du courant, laquelle permet de retirer la dynamo sans abaissement sensible de la tension du réseau.

Pour pouvoir grouper en série des machines shunt, on réunit séparément en série les induits et les inducteurs, de manière à ce que ceux-ci constituent une dérivation unique entre les bornes extrêmes. Enfin le couplage des machines compound peut se faire en mettant en communication par un conducteur les balais auxquels aboutissent les bobines en série des machines.

Dans les machines shunt, la régulation se fait soit en modifiant la vitesse angulaire, soit en agissant sur le champ. Pour ce dernier cas, le rhéostat de réglage doit être établi de telle sorte que la machine puisse débiter son courant sous une tension constante aux bornes, étant donné que l'appareil à résistance doit, à pleine charge, se trouver en court-circuit.

Le couplage en parallèle des machines compound est le seul adapté en pratique ; il faut employer un fil d'équilibre comme pour les dynamos série couplées en parallèle. La disposition (fig. 1046) permet d'opérer

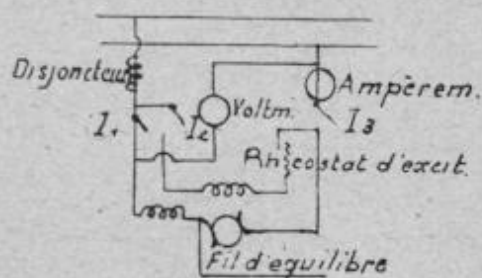


FIG. 1046.

rapidement l'opération et de couper l'excitation shunt sans aucun danger une fois la machine complètement arrêtée.

À la mise en marche : on ferme D, I_1 et I_2 , on règle l'excitation et on ferme I_3 quand la tension voulue est atteinte.

Pour l'arrêt, on agit sur R jusqu'à annuler le champ ; on coupe D et I_2 , puis on arrête le groupe. Après l'arrêt complet on peut ouvrir I_1 et I_2 .

Le couplage d'une dynamo shunt et d'une dynamo série (réseau de traction, charge d'une batterie d'accumulateurs) se fait en branchant l'inducteur de la génératrice shunt sur les bornes extrêmes du groupe de

façon à éviter une inversion de polarité possible pour la machine shunt. La machine série joue ici le rôle de survolteur quand elle est de puissance moins faible que la dynamo shunt.

Lorsque la machine est à intensité constante et si elle fonctionne à vitesse constante, la régulation s'opère en agissant soit sur le champ magnétique, soit sur le calage des balais, ou sur les deux à la fois. A cet effet, M. Thury utilise un appareil composé d'un régulateur à force centrifuge et d'un solénoïde parcouru par le courant principal. Quand le débit varie de la valeur normale jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de cette grandeur, l'excitation se trouve réduite en shuntant progressivement les électros par des résistances. Des $\frac{3}{4}$ de la charge jusqu'à la charge à vide, le réglage a lieu par le décalage des balais sur le collecteur (329).

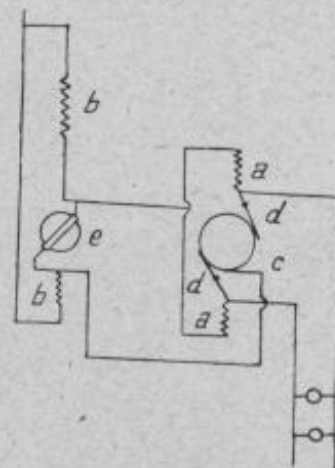


FIG. 1047.

M. Javaux a fait breveter un dispositif où le réglage de la tension est produit par des balais auxiliaires et des balais principaux mobiles. Dans le système inducteur *a* (fig. 1047), un induit tourne avec son collecteur, induit qui est actionné par la machine motrice tournant à vitesse variable. Un second système inducteur *b* fait tourner un cadre galvanométrique parcouru par le courant. Ce cadre est disposé sur un cylindre *e* en métal antimagnétique qui porte un disque sur lequel sont fixés deux balais principaux *d* qui captent le courant principal engendré dans l'induit. Les balais auxiliaires *c* frottent également sur le collecteur.

Quand le voltage aux bornes des enroulements inducteurs des deux systèmes magnétiques *a* et *b* est constant, le cadre galvanométrique ainsi que les balais mobiles *d* sont soumis à une paire de forces proportionnelles à la force électromotrice de l'induit, de telle sorte qu'il se produit un déplacement de balais en avant dans la mesure de l'accroissement de la force électromotrice. De ce fait le voltage de la machine est maintenu constant exactement, lors même que sa vitesse oscillerait rapidement dans des limites étendues.

439. Essais et épreuves des dynamos.—Les méthodes d'essai, selon que l'on se propose le tracé de la caractéristique externe ou l'évaluation du rendement, sont : la méthode directe, la méthode par substitution, la méthode chronométrique ou d'amortissement et la méthode des « pertes séparées » ou de Swinburne, ces deux dernières ne s'appliquant qu'à la recherche du rendement.

La méthode directe ne s'emploie pas, dès que la puissance de la ma-

chine dépasse 100 HP ; d'ailleurs elle se présente avec une précision d'ordre plutôt faible. Elle comporte un dynamomètre de transmission et un tachymètre permettant de mesurer la puissance fournie, et on met la dynamo à expérimenter en marche sur un rhéostat à résistances métalliques ou liquides ; le rapport entre la puissance mécanique à appliquer à la poulie de la dynamo et celle absorbée par les résistances donne la

valeur du rendement ⁽¹⁾. La méthode Swinburne, que nous décrivons au paragraphe (354), offre d'autant plus de précision que la machine a un meilleur rendement ⁽²⁾. Il existe d'autres méthodes, où l'on opère à l'aide de machines couplées mécaniquement ou des machines couplées électriquement et mécaniquement (dans ce dernier cas la méthode est dite d'*opposition*) : ce sont celles de Fontaine-Cardew, de A. Blondel, de Potier, de lord Rayleigh-Kapp, de Hopkinson et de Hutchinson. En principe, elles consistent à relier par accouplement élastique les arbres de deux génératrices identiques, l'une d'elles travaillant en réceptrice, le courant fourni par une source extérieure compensant les pertes.

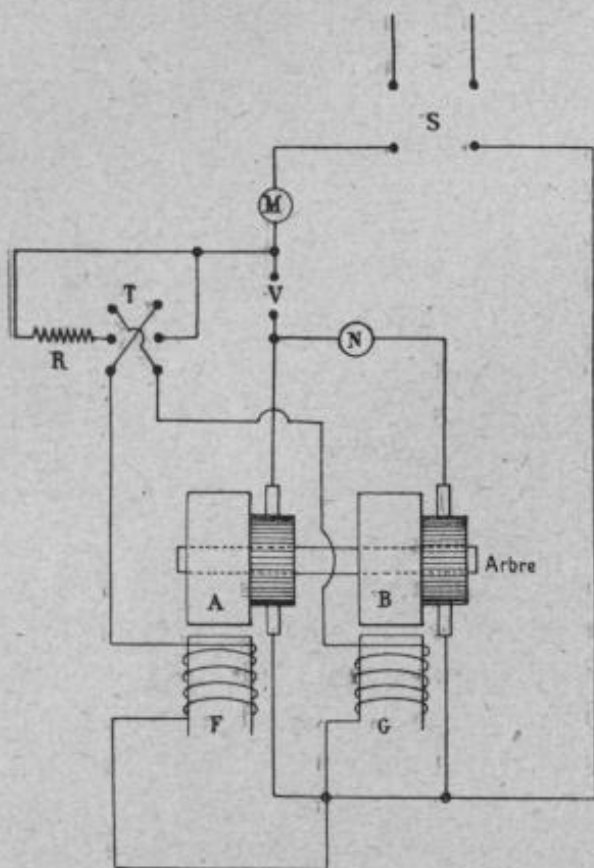


FIG. 1048. — Schéma pour l'essai de deux moteurs par la méthode d'Hopkinson.

La (fig. 1048) montre le dispositif utilisé pour un essai suivant la méthode d'Hopkinson.

Lorsqu'on ferme les interrupteurs S, T et V, la machine dans le circuit

⁽¹⁾ Au point de vue de l'incertitude des mesures électriques, pour ce qui concerne le courant continu, il faut apporter un soin tout spécial pour obtenir l'intensité ou la tension à 0,5 0/0 près. Avec les wattmètres à haute tension, il est très difficile d'obtenir des valeurs à moins de 1 0/0, bien que les lectures puissent se faire avec une approximation de 0,1 0/0. Quant aux mesures d'ordre mécanique, il semble absolument nécessaire de s'accorder une variation d'erreur d'au moins 2 0/0 (Epstein).

⁽²⁾ D'après les règlements relatifs aux essais des machines, le rendement peut être obtenu en mesurant la perte à vide et la résistance de l'induit. Dans ce cas, quand on veut avoir le rendement à pleine charge, il faut déterminer la puissance lors du fonctionnement à vide, en ayant soin de caler les balais suivant la ligne neutre, position qui correspond à la puissance minima absorbée alors.

de laquelle la résistance R est intercalée fonctionne comme moteur, sa force électromotrice étant la plus faible ; l'autre machine entraînée mécaniquement agit comme génératrice par suite de son excitation plus forte. Dans les essais d'échauffement, on inverse d'ordinaire l'interrupteur T toutes les demi-heures de manière à faire fonctionner les machines, chacune pendant une durée égale comme moteur et comme génératrice.

Un ampèremètre M mesure le courant fourni pour compenser les pertes qui interviennent dans le système. L'ampèremètre N mesure le courant d'une des machines suivant la position de T .

On arrive à des résultats très exacts en combinant la méthode des pertes séparées avec celle d'opposition.

On détermine la perte due à la résistance intérieure de la machine du type donné et on trace la courbe donnant la puissance absorbée pour faire fonctionner la machine à vide, en fonction de sa force électromotrice, pour des valeurs de celle-ci voisines de celle de régime.

On couple alors les machines identiques, mécaniquement et électriquement, et on donne au groupe la vitesse normale, les dynamos étant munies d'excitations séparées.

Si U_1 et I_1 sont la tension et l'intensité du courant lors du fonctionnement normal comme moteur ou comme dynamo, U_2 et I_2 les valeurs correspondantes pour la dynamo du groupe fonctionnant comme moteur, et U_g et I_g celles de la dynamo génératrice, on règle les excitations séparées (et la vitesse) de manière à avoir :

$$U_2 = U_1, \quad I_2 = I_1,$$

lorsque l'on veut avoir le rendement de la dynamo comme moteur, ou bien l'on fait :

$$U_g = U_1, \quad I_g = I_1,$$

dans le cas où l'on a en vue le rendement comme génératrice.

Les forces électromotrices sont respectivement pour le moteur :

$$E_2 = U_2 - r_a I_2$$

et pour la génératrice :

$$E_g = U_g + r_a I_g,$$

r_a étant la résistance intérieure (qui varie avec l , à cause de la résistance de contact des balais).

Les pertes dans chacune des dynamos d'après la méthode des pertes séparées sont respectivement :

$$r_a I_2^2 + r_a I_g^2,$$

plus les pertes dans le fonctionnement à vide pour les forces électromotrices E_2 et E_g ; on peut donc facilement faire le total p_s de ces pertes.

La puissance de la (ou des) source auxiliaire donne la puissance totale perdue dans les deux dynamos p_t , de sorte que les pertes non mesurées dans la méthode des pertes séparées sont $p_n = p_t - p_s$.

Pour avoir les pertes exactes dans chacune des dynamos, il faut répartir ces pertes p_n entre les deux machines, et le meilleur moyen est de prendre pour chacune une perte proportionnelle à la puissance absorbée à vide, ces machines fonctionnant respectivement comme moteurs à vide avec les forces électromotrices E_2 et E .

Ayant les pertes totales (en y comprenant celles dues à l'excitation), on obtient facilement le rendement de la machine fonctionnant dans les conditions normales.

On détermine le degré d'approximation de la méthode en répartissant, d'autre part également, la perte p_n entre les deux machines.

Cette manière de procéder peut être employée avec la méthode d'Hopkinson décrite ci-avant et, dans ce cas, on a :

$$I_2 = I_g, \quad U_2 = U_g.$$

Dans le cas d'emploi de la méthode Rayleigh et Kapp avec source auxiliaire électrique, placée aux bornes du moteur et fournissant un courant I_s , on a :

$$I_2 = I_g + I_s, \quad U_2 = U_g = U_s.$$

La puissance fournie par la source auxiliaire est $U_2 I_s$.

Avec la méthode Potier, dans laquelle la source auxiliaire est disposée en série avec la génératrice, on a :

$$I_2 = I_g + I_s, \quad U_2 = U_g = U_s,$$

la puissance fournie par la source auxiliaire étant $U_s I_s$.

Si on fait usage de la méthode Hutchinson (combinaison de la méthode Kapp et de la méthode Potier) avec une source auxiliaire s_1 placée aux bornes du moteur et une source s_2 mise en série dans le circuit commun on a :

$$I_2 = I_g + I_{s1}, \quad U_2 = U_g + U_{s2}$$

et la puissance totale fournie par les sources est :

$$U_2 I_{s1} + U_{s2} I_g.$$

Dans la méthode Blondel (combinaison de la méthode Hopkinson et de la méthode Potier), on a une source auxiliaire mécanique donnant une

puissance P_{s1} et une source auxiliaire électrique s_2 mise en série dans le circuit commun, d'où :

$$I_2 = I_g = I_{s2}, \quad U_2 = U_g + U_{s2}.$$

La puissance totale fournie est alors $P_{s1} + U_{s2} I_{s2}$.

Pour procéder à des essais de température sur une dynamo, on la fait débiter sur un rhéostat à résistance variable et on augmente progressivement le débit de la machine en agissant sur le courant d'excitation jusqu'à ce qu'on obtienne aux bornes la différence de potentiel normale. On relève alors la température, au moyen d'un thermomètre préalablement entouré de papier d'étain, des différentes parties de la machine durant son fonctionnement, qu'il est bon de maintenir sans interruption pendant vingt-quatre heures et à pleine charge. La température relevée ne doit pas dépasser de 40° à 45° C. la température ambiante, supposée de 35° maxima. Il faut remarquer que la température indiquée par un thermomètre posé sur une bobine parcourue par un courant est inférieure à la température réelle. Lorsqu'on connaît la température à froid de la bobine, c'est-à-dire celle avant l'essai, ainsi que la résistance (R) de la bobine à cet instant, on a l'échauffement véritable produit par le passage du courant en mesurant la résistance (R') à la fin de l'essai et en appliquant la formule de correction :

$$\theta \text{ degrés} = \frac{273R' - R}{R}.$$

Pour les circuits inducteurs, les températures sont toujours mesurées par augmentation de résistance.

La comparaison des résistances à chaud et à froid, par mesure des différences de potentiel et des intensités, tend à se substituer à la vérification thermométrique, car cette dernière est plus sujette à caution. La pratique d'ailleurs a montré que les indications fournies par les deux procédés (thermomètre et comparaison des résistances) diffèrent de 30 0/0 et parfois même davantage, pour les inducteurs constitués par un grand nombre de couches de fil superposées.

L'application de la méthode par la comparaison des résistances demande certaines précautions à observer dans l'exécution des mesures ; notamment il est recommandable de prescrire l'usage d'appareils thermiques, d'employer des appareils permettant d'apprécier au moins et franchement le centième de la valeur à mesurer et de proscrire ceux qui donnent lieu à des erreurs de parallaxe.

Il convient d'admettre une marge de 10 0/0 sur les échauffements pour les erreurs de lecture et une marge de même valeur pour l'application des pénalités avant rebut de la machine en essai. Dans ces conditions l'échauf-

fement de 40° ou 45° considéré comme admissible dans la méthode ordinaire devrait être ramené à 35° pour l'application de la méthode par la comparaison des résistances.

Pour les corrections à apporter aux résultats d'expérience lorsque la température ambiante au cours de l'essai diffère de la température dans les locaux où la machine est appelée à fonctionner, parmi les formules proposées, nous signalerons celle de la marine qui impose de réduire l'échauffement admissible dans le rapport :

$$\frac{1}{1 + 0,003 (T - t)}$$

(T, température du milieu de service, et t, celle du local d'essai), formule qui a été établie en tenant principalement compte de la variation de dilatation de l'air avec la température.

Si on envisage la variation de la puissance dissipée, on peut se servir utilement de la formule suivante :

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{250 + t}{250 + T}$$

qui permet de fixer la limite θ admissible dans l'essai en usine, la limite θ' étant imposée. Réciproquement, si l'on admet que l'échauffement observé en usine est θ , on en déduira θ' lorsque la température admissible deviendra T.

Entre temps on procède à des mesures d'isolement des circuits de l'induit et des inducteurs avec les masses métalliques de la machine. Les isolements des diverses pièces, mesurées au double de la tension normale de la machine, ne doivent pas donner des résultats inférieurs à 1 mégohm entre masse et inducteur, entre masse et induit et entre inducteur et induit. Dans les essais de plate-forme, on applique une tension élevée par rapport à celle de la machine en expérience, par exemple au moyen d'un transformateur, et on s'assure si l'isolant y résiste sans être percé ; ces essais de survoltage peuvent être réclamés au moment de la réception. On y procède de la façon suivante : un premier essai (ou tension d'essai à appliquer) a lieu par une source indépendante et autant que possible de même nature que le courant de la machine. Elle est appliquée entre les enroulements et la masse et entre les différents enroulements, en prenant pour base, dans ce dernier cas, la tension la plus élevée des enroulements essayés ensemble. On procède ensuite à un deuxième essai (ou tension d'essai à produire ou à absorber), destiné à éprouver l'isolation intérieure des enroulements. Pour les deux opérations, les tensions d'essai sont amenées progressivement à leur valeur maximum et maintenues à celle-ci pendant cinq minutes ; elles sont définies dans le tableau ci-après, conforme aux

prescriptions des Associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur ayant un service électrique :

Tension normale	Tension d'essai à appliquer	Tension d'essai à produire ou à absorber
Jusqu'à 3.000 volts	2 fois la tension normale	1 fois 1/2 la tension normale
4.000 »	7.500 volts	5.800 volts
5.000 »	8.800 »	8.100 »
6.000 »	10.000 »	8.900 »
7.000 »	11.700 »	9.400 »
8.000 »	13.300 »	10.300 »
9.000 »	14.800 »	11.900 »
10.000 »	16.300 »	13.200 »
12.000 »	19.300 »	15.500 »
15.000 »	24.000 »	19.500 »
20.000 »	31.000 »	25.500 »
25.000 »	38.000 »	31.500 »
30.000 »	45.000 »	37.500 »

Pour se rendre compte de la valeur de la résistance magnétique ou réluctance, on mesure inductivement la proportion des fuites magnétiques ou on relie les bornes de la dynamo par une résistance convenable et connue. Puis on fait tourner la machine à faible vitesse, et on augmente graduellement son allure jusqu'à ce qu'elle s'excite elle-même : la moindre vitesse d'auto-excitation, toutes choses égales d'ailleurs, donne une mesure de la qualité du circuit magnétique.

La dynamo se trouvant, à la fin de l'essai, dans les conditions de température normale, on mesure, la machine étant au repos, les diverses résistances à chaud, sans toucher à la position des balais, pour servir à la détermination ultérieure du rendement. On admet que ces résistances sont les mêmes que celles de la machine en marche.

Lorsque la génératrice est accouplée à une turbine (groupe électrogène), le rendement s'entend entre le distributeur de la turbine et les bornes de la dynamo. L'opération alors consiste, d'une part, à mesurer le volume d'eau débité par seconde et la pression en valeur absolue agissant sur le récepteur (ce qui donne la puissance brute), et, d'autre part, la génératrice débitant à pleine charge sur le circuit extérieur approprié, à mesurer la puissance électrique dépensée aux bornes.

Le quotient de la puissance nette par la puissance brute donne le rendement du groupe.

Si on connaît le rendement de la dynamo (R_d), on peut déterminer celui de la turbine, sans en faire l'objet d'une mesure directe, en le déduisant du rendement global (R_g) ; on a alors pour le rendement de la turbine :

$$R_t = \frac{R_g}{R_d}$$

Quand la dynamo est séparée de la turbine, on ne peut guère en évaluer le rendement que par la méthode des « pertes séparées ». Les pertes dans les enroulements s'évaluent par la mesure des résistances et des constantes de la dynamo.

Dans les essais par « pertes séparées », on peut admettre que la somme des pertes provenant de frottements mécaniques, d'hystérésis et de courants parasites est la même à vide qu'en charge.

Nous avons dit plus haut que l'on mesurait la puissance développée par une dynamo en l'absorbant par l'emploi de dynamomètres de transmission ; mais le meilleur moyen paraît être l'usage, comme frein, d'une dynamo à haut rendement spécifique déterminé, cette machine travaillant sur un circuit de lampes dans lequel on relève l'intensité et le voltage.

On complète les essais ci-dessus par d'autres plus spéciaux tels que ceux d'emballement, de régulation, de mesures du courant, de court-circuit, etc. Il convient aussi de déterminer la relation entre les différences de potentiel au collecteur et l'induction dans l'entrefer, ainsi que les courbes à circuit ouvert et externe.

On doit exiger d'une bonne machine qu'elle présente une stabilité parfaite pendant tout le temps de l'épreuve, qu'elle ne puisse se désamorcer, quel que soit le mode de chargement ou de déchargement du courant extérieur, qu'elle marche seule ou accouplée.

Pour l'évaluation des pertes par frottement et ventilation la méthode Routin ou de ralentissement est, dans la plupart des cas, celle qui donne le résultat le plus précis. Nous rappellerons que cette méthode consiste, en principe, à lancer la dynamo à essayer à une vitesse un peu supérieure à celle normale, puis, après avoir coupé le courant d'alimentation, à relever la courbe de décroissance de la vitesse angulaire en fonction du temps.

Soient : I le moment d'inertie du rotor, ω sa vitesse angulaire à l'instant t et C_r la valeur du couple correspondant aux résistances passives, on a :

$$I \frac{d\omega}{dt} = C_r.$$

Enfin pour la mesure des pertes mécaniques dans une dynamo à courant continu M. F. Hoppe signale une méthode permettant de les déterminer directement.

Si l'on fournit du courant à l'induit d'une dynamo à courant continu, non excitée, elle se met à tourner si les balais sont calés dans une position favorable.

Le couple moteur n'est pas dû, ainsi qu'on pourrait le croire à première

vue, au magnétisme rémanent, mais bien à ce que le champ de l'induit réagit sur les pièces polaires ; on peut du reste annuler le magnétisme rémanent au moyen d'un courant d'excitation négatif, et la dynamo démarre tout de même.

Si les balais sont calés dans la position neutre, la dynamo ne démarre pas ; si l'on décale les balais dans un sens, elle se met à tourner. La vitesse (pour une tension donnée) augmente d'abord avec le décalage, puis passe par un maximum et diminue ensuite, et finalement, pour un décalage donné, elle ne tourne plus. Si l'on décale les balais dans la direction inverse, le sens de rotation de la dynamo change, mais les mêmes variations de vitesses se produisent.

On peut donc faire tourner ainsi la dynamo et l'on n'a évidemment qu'à tenir compte de la puissance perdue par suite de la résistance intérieure, car les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont absolument négligeables. Lors de l'essai, on cale les balais dans la position du maximum de vitesse et on élève peu à peu la tension jusqu'à ce que la vitesse normale soit obtenue ; on note alors la tension aux bornes U et l'intensité I . La puissance totale fournie est $(U - e) I$, e étant la force électromotrice due au magnétisme rémanent, et la perte mécanique $(U - e) I - r_a I^2$, r_a étant la résistance intérieure de l'induit.

M. Hoppe a obtenu les chiffres suivants (avec $e = 0$).

VITESSE N EN T. M	U EN VOLTS	I EN AMPÈRES	UI EN WATTS	$r_a I^2$ EN WATTS	PERTE MÉCANIQUE P EN WATTS	$\frac{P}{N}$
150	5,1	4,4	22,55	7,55	15	0,100
350	8,8	5,4	47,7	11,4	36,3	0,103
650	12,8	6,82	88,1	18,1	70	0,108
850	14,8	7,8	115,7	25,7	92	0,109

M. L. Barbillion, directeur de l'Institut électrotechnique de la Faculté de Grenoble, et M. Cordier, capitaine d'artillerie, alors professeur d'électricité industrielle à l'École d'application, de l'artillerie et du génie à Fontainebleau, ont établi en collaboration un programme remarquable d'essais des machines électriques et d'une valeur pratique des plus sérieuses. Ces essais sont expliqués tout au long dans le cours municipal d'électricité industrielle professé par M. L. Barbillion ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Librairie E. Bernard, éditeur, Paris.

SPÉCIFICATION		BRIGHT	GERALTON	S. A. C. M.	KOLBEN	BRIGHT	BRITISH THOMSON-ROUSTON	SOCIÉTÉ GANZ	S. A. C. M.	UNION	CHARLIER
Nombre de pôles.....		6	6	6	10	14	8	10	20	16	18
Tension aux bornes, à vide, en volts.....		125	120	450	230	425	500	600	2 X 250	500	500
— — — à pleine charge, en volts.....		125	120	450	230	425	550	600	2 X 250	500	500
Courant de pleine charge, en ampères.....		825	1.150	335	1.000	3.500	460	1.200	1.780	2.000	2.500
<i>Rendements à 50° C.</i>											
Pertes dans le fer, <i>a</i>		2.425	3.300	3.350	4.530	11.500	5.750	13.900	15.900	14.400	26.000
— dans le cuivre de l'induit, <i>s</i>		2.680	3.470	1.780	4.550	7.900	3.380	9.150	13.900	24.200	26.200
— par effet Joule au contact des balais, <i>t</i>		1.320	1.840	800	2.000	3.500	1.100	2.880	7.120	4.800	6.000
— par frottement des balais, <i>b</i>		570	755	515	1.000	1.560	775	1.540	6.100	3.120	3.000
— mécaniques dans les paliers et la ventilation, <i>d</i>		700	800	1.100	1.800	1.900	1.925	3.000	5.000	5.000	5.200
— dans l'enroulement shunt, <i>c</i>		618	1.380	945	1.700	2.520	1.420	4.380	10.700	8.250	9.880
— dans l'enroulement série, <i>w</i>		975	530	315	780	470	1.770	375	730	3.680	1.620
— dans le rhéostat de champ, <i>d</i>		237	405	105	105	105	105	375	730	1.290	1.620
— totales.....		9.930	12.075	8.815	16.460	28.650	16.435	35.425	59.450	64.750	77.690
Puissance, utile à pleine charge.....		103.500	140.000	150.000	230.000	450.000	250.000	720.000	890.000	1.000.000	1.250.000
— absorbée à pleine charge.....		113.430	152.075	158.805	246.160	478.650	266.435	755.425	949.450	1.064.750	1.337.690
Rendement à pleine charge.....		91.3	92.0	94.6	93.8	94.3	94.1	95.2	94.0	94.0	94.2
— à 1/4 de surcharge.....		91.4	92.0	94.8	93.6	94.3	94.0	95.3	94.3	94.3	94.0
— à 3/4 de charge.....		91.2	91.4	94.0	92.7	93.5	93.3	94.3	93.0	93.8	93.5
— à 1/2 charge.....		89.8	89.6	91.7	90.9	91.4	91.8	93.2	91.2	92.5	91.8
— à 1/4 de charge.....		81.7	83.4	85.8	84.3	85.5	85.8	88.1	84.8	84.8	86.3
Pertes constantes, $a + b + c + d$		4.550	6.765	6.235	9.910	17.950	10.680	23.395	38.430	32.060	45.490
— variables, $s + t + w + x$		5.380	5.310	2.580	6.550	10.700	6.355	12.030	21.020	32.690	32.200
<i>Constantes diverses</i>											
Dl., en mètres carrés.....		0.237	0.15	0.175	0.403	0.6	0.392	0.655	1.05	1.22	1.33
D ² L., en mètres cubes.....		0.156	0.09	0.123	0.515	0.9	0.415	1.16	3.67	4.27	4.67
Coefficient de Kapp.....		1.66	2.63	1.62	1.94	2.0	1.6	2.3	2.26	2.51	3.22
Ampères-conducteurs par centimètre de périphérie de l'induit, α		297	270	175	260	294	188	237	220	262	240
Flux par centimètre carré à l'entrefer, β		5.140	8.200	4.040	5.420	5.620	5.700	6.200	6.350	6.200	8.820
Ampères-tours de l'induit par pôle.....		2.150	4.220	3.220	4.800	3.750	5.800	6.500	6.050	9.000	7.300

Le *Verband Deutscher Elektrotechniker* a publié une série de règles destinées à normaliser les machines électriques, qui correspondent aux limites entre lesquelles les constructeurs en Allemagne, en Autriche, en Belgique, en Suisse et en Suède acceptent de garantir leur matériel électrique.

L'*American Institute of Electrical Engineers* a aussi établi une série de prescriptions dans le même but ⁽¹⁾.

Nous citerons aussi les prescriptions normales pour la réception des « machines et transformateurs électriques » rédigées par la Chambre syndicale des électriciens de Bruxelles.

Enfin, le lecteur trouvera au (§ 365) les règles et instructions élaborées par les Syndicats d'électricité français concernant la fourniture et la réception des machines électriques et des transformateurs.

Le tableau précédent, tiré du *Formulaire de l'Electricien* (Hospitalier-Roux) résume les principales conditions de construction des dynamos à courant continu modernes (d'après Hobart et Achart).

440. Dynamos homopolaires. — Les premiers essais de dynamos homopolaires ou unipolaires remontent à l'année 1880. Vers 1884, Georges Forbes construisit une machine unipolaire à disques et plus tard une machine à tambour. Arnold, en 1888, établit une machine à tambour. Thury, en 1890, a fait breveter une machine à tambour avec compensation; et une machine à disques dans les mêmes conditions. En 1899, Julius Henbach a fait breveter une machine avec compensation de la réaction d'induit rappelant la machine à tambour de Thury, et en 1900, les ingénieurs suédois Zander et Ingerström ont établi une machine rappelant celle d'Arnold, mais permettant d'obtenir des tensions plus élevées.

Enfin en 1905, Jacob Noegerrath a fait breveter une machine à tam-

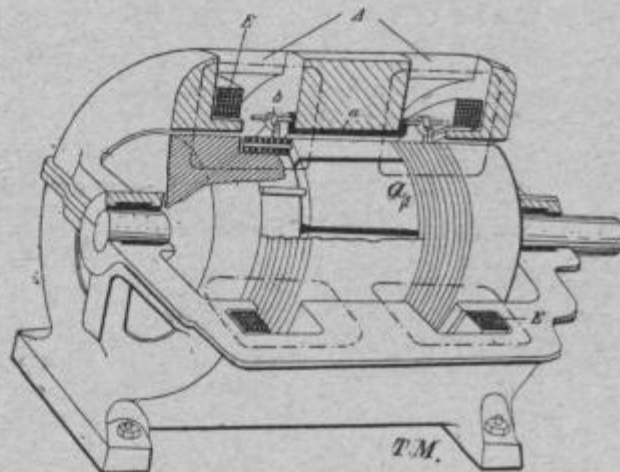


FIG. 1050. — Dynamo homoplaire à tambour, système Noegerrath.

⁽¹⁾ *Les moteurs électriques*, par Hobart, Dunod et Pinat, éditeurs.

bour qui a été réalisée industriellement sous forme d'unités atteignant

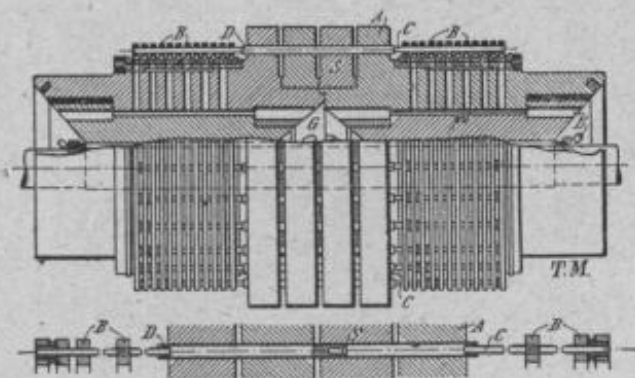


FIG. 1051. — Induit en deux parties d'une dynamo, système Nœgerrath.

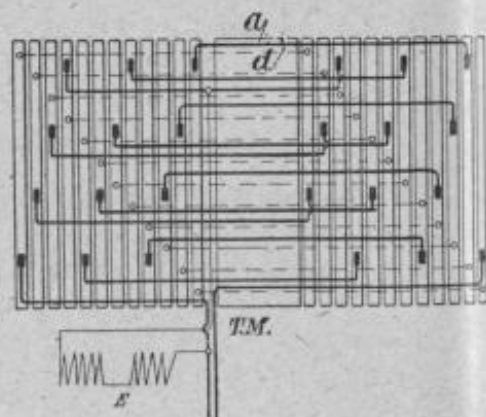


FIG. 1052. — Développement de l'enroulement de la dynamo, système Nœgerrath.

2.000 kilowatts (fig. 1050 à 1052) avec des vitesses périphériques de 125 mètres à la seconde.

La (fig. 1053) donne les résultats obtenus avec une machine de 300 kilowatts.

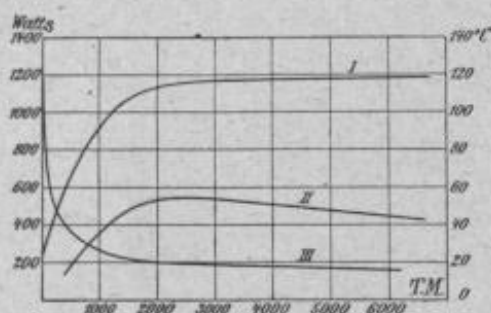


FIG. 1053. — Diagramme d'une dynamo, système Nœgerrath, de 309 kw.

La courbe I montre les variations des pertes totales en fonction du nombre de tours. La courbe II donne les pertes par frottement et la courbe III les variations de température. Le rendement diffère peu de celui des machines ordinaires à collecteurs.

Les dynamos homopolaires sont peu sensibles aux courts-circuits et

elles peuvent supporter une surcharge momentanée de 200 0/0. Une Centrale américaine a été munie de génératrices de 500 kilowatts tournant à 2.000 tours par minute et travaillant en parallèle sur un réseau à trois conducteurs.

La General Electric Co a construit une génératrice de 200 kilowatts pour 200, 300 et 600 volts. Cette génératrice a 96 balais et par conséquent 48 conducteurs soumis à l'induction. Ces derniers sont montés en série pour obtenir la tension de 600 volts.

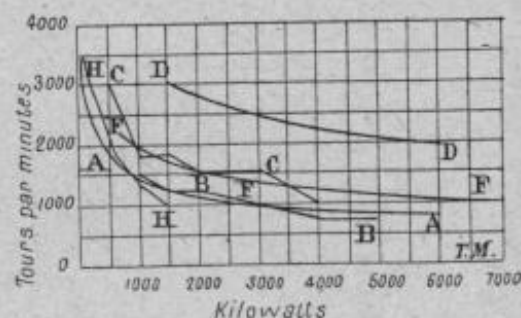


FIG. 1054. — Comparaison des vitesses de rotation des turbines à vapeur et des dynamos homopolaires.

Steinmetz et Elihu Thomson ont, en 1907, établi des projets de machines. Celle de Thomson rappelle celle de Nøggerrath. En 1911, Barbou a créé une dynamo homopolaire à tambour de 50 kilowatts tournant à 3.500 tours, sous 100 volts. Cet inventeur s'est efforcé de montrer par des diagrammes réels que ces machines conviennent bien au couplage avec les turbines à vapeur.

La dynamo Lamme, construite par la Westinghouse Electric and Mfg donnerait entière satisfaction. Une génératrice donnerait 10.000 ampères, sous 200 volts à 1.200 tours (fig. 1056 à 1057). Le stator et le rotor sont

en acier coulé et chaque extrémité du rotor comporte huit anneaux, correspondant chacun à 32 volts. (Il y a une paire de balais par anneau.)

La machine homopolaire se prête aux grandes intensités et aux faibles

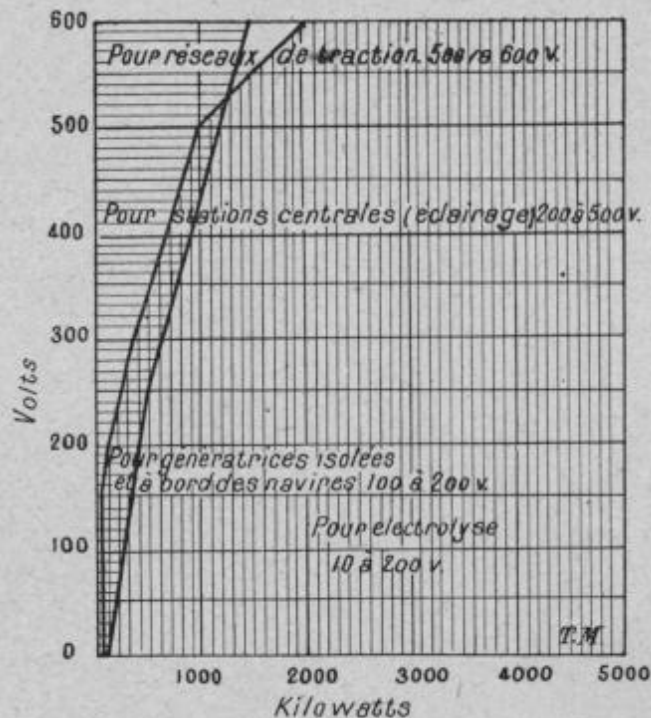


FIG. 1055. — Diagramme montrant le champ d'application des dynamos homopolaires et celui des dynamos à collecteur.

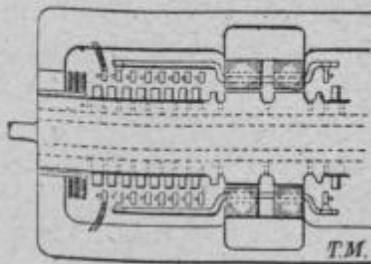


FIG. 1056. — Dynamo homopolaire, système Lamme.

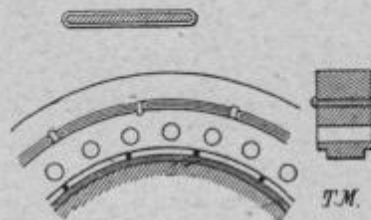


FIG. 1057. — Anneau d'une dynamo homopolaire, système Lamme, avec interposition d'une baguette élastique.

tensions (électrolyse) pour l'obtention des hautes températures dans les fours à résistance, les fours d'affinage des métaux (fours Girod), pour la fusion des matières très réfractaires (four Valcker), pour les fours à réchauffer (Fritz Gérald), les fours à distiller les métaux (Côte et Pierron), les fours à arc en général, les fours à carbure de calcium et à ferro-alliages.

441. Calcul élémentaire d'une dynamo. — Soient : \mathfrak{B}_p , l'induction magnétique sur la surface polaire; K , le rapport de la surface embrassée par les pièces polaires à celle de l'induit, on aura pour l'induction moyenne à la périphérie de l'induit : $K\mathfrak{B}_a$ (K varie de 0,50 à 0,80 et \mathfrak{B}_a est pris égal à 6.000 le plus ordinairement); l_p , le pas polaire. La valeur du flux total émanant d'un pôle par centimètre de longueur de l'induit a pour expression :

$$\Phi_i = l_p \times K \times \mathfrak{B}_p.$$

Celui dans l'anneau induit est :

$$\Phi_a = \frac{l_p \times K \times \mathfrak{B}_p}{2},$$

et enfin celui dans les inducteurs :

$$\Phi_i = \frac{l_p \times K \times \mathfrak{B}_p}{2} \gamma;$$

γ , coefficient dit d'Hopkinson ou coefficient de fuites magnétiques = 1,20.

Appelons \mathfrak{B}_a l'induction dans l'induit et \mathfrak{B}_i celle dans les culasses inductrices, on a pour l'épaisseur radiale de l'anneau :

$$e_a = \frac{\Phi_a}{\alpha \times \mathfrak{B}_a} \text{ centimètres,}$$

et pour l'épaisseur radiale des culasses :

$$e_i = \frac{\Phi_i}{\mathfrak{B}_i} \text{ centimètres.}$$

\mathfrak{B}_a et \mathfrak{B}_i varient entre 8.000 et 12.000 gauss et le coefficient α qui tient compte de l'isolant entre les feuilles de tôle = 0,85 environ.

Quant à l_p , pour des raisons pratiques, on ne descend pas au-dessous de 30 centimètres; de cette façon le nombre de pôles est donné par la relation :

$$2p < \frac{\pi d}{30} < \frac{d}{10} \text{ environ.}$$

La f. e. m. moyenne par centimètre de conducteur placé à la surface de l'induit a pour valeur :

$$\frac{K \times \mathfrak{B}_p \times v}{10^8} \text{ volts.}$$

Et la longueur de conducteur par volt égale :

$$\frac{10^8}{K \times \mathfrak{B}_p \times v} \text{ centimètres;}$$

v , vitesse périphérique de l'induit en centimètres par seconde, qui varie entre 1.200 et 2.000 centimètres par seconde.

Si l'enroulement induit est partagé par les balais en $2a$ circuits mis en parallèle par les balais (ce nombre est déterminé par la condition que, autant que

possible, l'intensité du courant, par rangée de balais, ne doit pas dépasser 300 ampères), la longueur totale L des conducteurs placés à la surface de l'induit, par volt, a pour expression :

$$L = 2a \times \frac{10^8}{K \times v \times \mathfrak{B}_p}$$

L , varie de 18 à 84 α .

Par suite, la longueur totale des conducteurs posés à la surface de l'induit, pour avoir une force électromotrice E , est :

$$L_t = 2a \times \frac{10^8}{K \times v \times \mathfrak{B}_p} \times E \text{ centimètres.}$$

Pour tenir compte de la réaction d'induit, on peut prendre $E = 1,10 U$; U , tension aux bornes de la machine.

D'après la vitesse périphérique v maxima admissible, on détermine le diamètre d de l'induit par la relation approximative :

$$d = 20 \frac{v}{n};$$

v , vitesse angulaire en tours par minute.

L'intensité se détermine par la relation : $\frac{I}{a} = 300$.

La section d'un conducteur est : $\frac{I}{2\alpha\delta}$ millimètres carrés;

δ , densité du courant en ampères par millimètre carré, soit 4,5 à 5 ampères par millimètre carré.

La longueur de l'induit l_t se détermine d'après la relation :

$$l_t = 2a \times \frac{10^8 E}{K \times v \times \mathfrak{B}_p \times N},$$

N , nombre de conducteurs que l'on peut disposer sur l'induit, avec la condition : $N \times l_t = L_t$, en supposant une seule couche sur l'induit.

Si l_t paraît exagérée, on placera deux ou trois couches de conducteurs.

On peut donc maintenant évaluer la force électromotrice de la machine, car on a :

$$E = \frac{K \times v \times \mathfrak{B}_p \times N \times l_t}{2a \times 10^8} \text{ volts.}$$

Il est facile d'en déduire la relation connue :

$$E = \frac{p \times n \times N \times \Phi}{a \times 60 \times 10^8} \text{ volts,}$$

dans laquelle Φ est le flux total émanant d'un pôle.

En effet :

$$v = \frac{\pi d n}{60}; \quad \frac{K \pi d l}{2p} = S_p \quad \text{et} \quad S_p \mathfrak{B}_p = \Phi.$$

APPLICATION NUMÉRIQUE. — Soit une dynamo tétrapolaire de 190 ampères 120 volts, à enroulement shunt (fig. 1058).

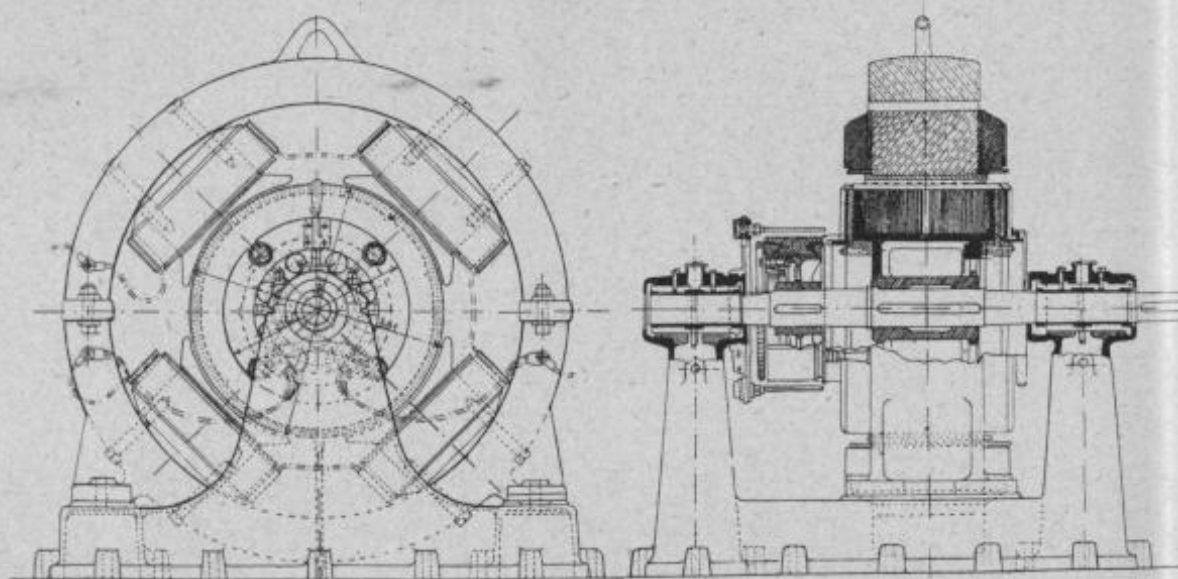


FIG. 1058.

1^o INDUIT. — *Diamètre de l'induit.* — Comme première approximation touchant le diamètre extérieur de l'induit, nous prenons la formule ci-après, préconisée par Kapp :

$$\frac{P}{d^2 l \omega} = c;$$

$c = 0,04$ pour les dynamos bipolaires jusqu'à 15 kilowatts, 0,07 pour les dynamos tétrapolaires, et 0,09 pour les machines hexapolaires. Notre machine tournant à 1.000 tours par minute, nous avons :

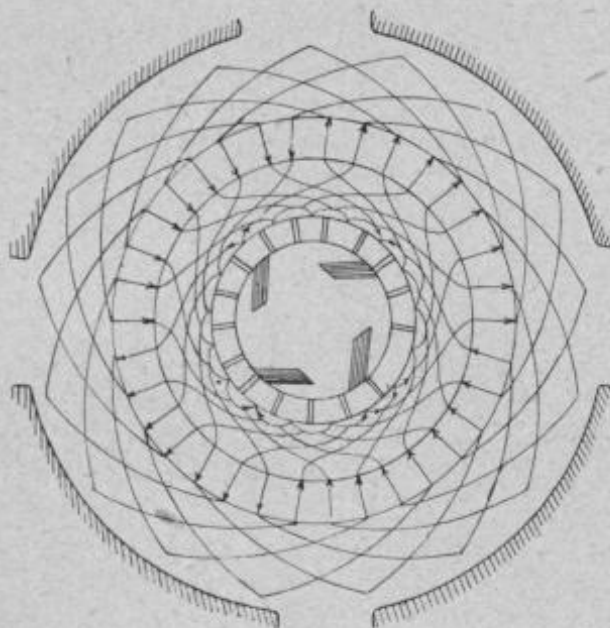


FIG. 1059.

$$\frac{(190 \times 120) \times 60}{d^2 \times l \times 1.000} = 0,07,$$

et, en faisant $l = 0,78d$ par exemple, on obtient :

$$0,78d^3 = \frac{22.800 \times 60}{70};$$

d'où

$$d = \sqrt[3]{\frac{22.800 \times 60}{70 \times 0,78}} = 293,$$

soit 293 millimètres en nombre rond.

Ampères-tours. — Comme bobinage, nous adopterons celui en série-parallèle d'Arnold, avec induit en tambour denté et ayant autant de circuits dérivés que de pôles (fig. 1059). Pour

le nombre d'ampères-barres, la chute de tension due à la résistance ohmique de l'armature et la perte de voltage provenant de la réaction de l'induit, nous admettons les chiffres respectifs suivants : 200 ampères-barres par centimètre de périphérie de l'induit et 6 volts (5 0/0) pour chacune des pertes de voltage.

Par suite, le nombre total d'ampères-tours-barres est égal à :

$$29,5 \times 3,14 \times 200 = 18.500 \text{ en nombre rond.}$$

Bobinage. — Comme chaque conducteur doit être parcouru par un courant de $\frac{190}{4} = 47,5$ ampères, le nombre total de conducteurs périphériques est donné par la relation :

$$\frac{18.500}{47,5} = 391, \text{ soit } 193 \text{ spires.}$$

Des conducteurs induits en fil de cuivre de $\frac{40}{10}$ de diamètre, correspondant à une densité de 3,75 ampères par millimètre carré, conviendront bien dans le cas qui nous occupe, et, si nous en plaçons 6 par encoche, c'est-à-dire 3 par section, avec un revêtement de deux couches (fig. 1060), le nombre de sections sera représenté par : $\frac{193}{3} = 65$. Mais comme nous sommes en présence d'un bobinage série-parallèle, nous prenons 68 sections, soit :

$$68 \times 6 = 408 \text{ conducteurs.}$$

Et la formule du bobinage : $\gamma = \frac{N}{2p} \pm 1$, fournit :

$$\gamma = \frac{136}{2 \times 2} \pm 1 = 33 \text{ ou } 33,$$

N étant le nombre de faisceaux ou $\frac{408}{3}$, soit 136.

Dimensions des encoches. — La largeur des encoches, pour du fil de 4 millimètres de diamètre, est portée à 5^{mm},8 au fond de la rainure (soit 1^{mm},8 pour les deux épaisseurs de la gaine isolante). La (fig. 1061) montre les dimensions qui en résultent pour les dents et les rainures.



FIG. 1061.

Noyau de l'induit. — La tension aux bornes de l'induit à vide devant être de : $120 + (6 + 6) = 132$ volts, la force électromotrice en fonction du flux, du nombre de conducteurs et de la vitesse, a pour expression :

$$E = 132 \frac{\Phi \times 390 \times 1.000}{60 \times 10^8};$$

d'où

$$\Phi = \frac{132 \times 60 \times 10^8}{39} = 2.030.000.$$

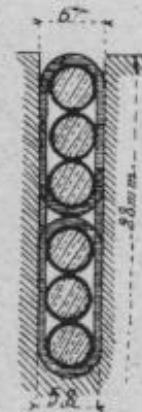


FIG. 1060.

Par suite :

$$\frac{2.030.000 \times 390}{408} = 1.940.000 \text{ webers.}$$

Avec une induction de 12.000 gauss dans les tôles de l'induit, la section offerte au passage du flux est :

$$\frac{1.940.000}{12.000} = 162 \text{ centimètres carrés,}$$

soit 81 centimètres carrés pour la section véritable, puisque le flux se divise dans l'induit en deux faisceaux.

Avec une longueur brute de l'induit de 23^{cm},9, la longueur utile, défalcation faite des isolants, n'est guère que de 20 centimètres.

Par suite, la hauteur du fer en dehors des encoches est donnée par la relation : $\frac{81}{20} = 4$ centimètres, et le diamètre intérieur des tôles est égal à

$$23,9 - 8 = 16 \text{ centimètres en nombre rond.}$$

2° INDUCTEURS. — *Carcasse magnétique.* — Avec un coefficient de dispersion de 1,35, le flux de force total est : $1.940.000 \times 1,35 = 2.620.000$ webers. Les inducteurs étant en acier, par exemple, on peut admettre une induction de 15.000 gauss, et alors la section nette offerte au passage du flux est représentée par :

$$\frac{2.620.000}{15.000} = 175 \text{ centimètres carrés.}$$

Des pôles de 160 millimètres, avec fentes de 12 millimètres pour réduire la valeur de la réaction transversale de l'induit, fournissent une surface de 180 centimètres carrés. Si nous assignons à la carcasse inductrice une largeur de 27 centimètres et une épaisseur moyenne de 33 millimètres, de façon

à obtenir une section de 87^{cm}2,5 (le flux magnétique se divisant en deux faisceaux dans la carcasse inductrice), nous aurons une induction uniforme de 15.000 gauss dans tout le circuit inducteur.

La forme de la carcasse étant dessinée approximativement, nous obtenons les dimensions ci-après pour les différentes parties du parcours du circuit magnétique : dans le fer,

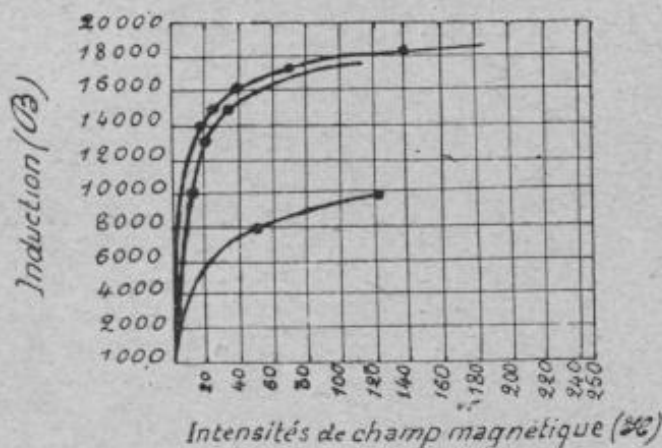


FIG. 1062.

70 centimètres ; dans l'air, 0^{cm},6 ; dans l'induit, 15 centimètres, et dans les dents, 5^{cm},8. Les trois courbes représentées par la (fig. 1062) ont trait, la plus grande à l'induction dans les tôles, la moyenne dans l'acier, et l'inférieure dans la fonte. Ainsi, pour une induction de 15.000 gauss dans l'acier :

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi Ni}{10l} = 35;$$

d'où on tire :

$$Ni = \frac{35 \times 10 \times 70}{12,5} = 1.960 \text{ ampères-tours.}$$

De même, dans la tôle de l'induit, pour une induction de 12.000 gauss :

$$Ni = \frac{9 \times 10 \times 15}{12,5} = 108 \text{ ampères-tours.}$$

Entrefer. — L'entrefer ayant une épaisseur de 3 millimètres (entrefer simple), avec un induit de 295 millimètres de diamètre, l'alésage des pièces polaires atteindra 301 millimètres. Prenant comme angle au centre des pièces polaires un angle de 60°, le développement d'un pôle sera : $\frac{30,1 \times 3,14 \times 60}{360} = 158$ millimètres, et la surface de l'entrefer : $15,8 \times 23 = 364$ centimètres carrés. L'induction dans l'entrefer sera donc définie par :

$$\frac{1.940.000}{364} = 5.340.$$

Et le nombre d'ampères-tours : $Ni = \frac{5.340 \times 6}{12,5} = 2.560.$

L'induit comportant 68 dents, le nombre de celles-ci soumises à l'action d'un pôle est : $\frac{68 \times 60}{360} = 12$, et la section moyenne offerte par ces dents au passage du flux est représentée par : $12 \times 0,625 \times 20 = 150$ centimètres carrés. L'induction dans les dents est par suite :

$$\frac{1.940.000}{150} = 12.900 \text{ gauss,}$$

et :

$$Ni = \frac{10 \times 10 \times 3,8}{12,50} = 46 \text{ ampères-tours.}$$

Le nombre d'ampères-tours total sur chacun des circuits magnétiques est donc égal à $1.960 + 108 + 46 + 2.560 = 4.674$, soit pour les bobines des électros : $4.674 \times 2 = 9.348$.

La résistance R des bobines est $\frac{LN}{60s}$ à froid et $\frac{LN}{50s}$ à chaud, L étant la longueur moyenne d'une spire d'électro et N le nombre des spires des 4 bobines.

La section du fil conduisant le courant d'excitation se tire de la relation suivante dans laquelle i représente l'intensité du courant d'excitation :

$$i = \frac{E \times 50 \times s}{LN}; \quad \text{d'où : } s = \frac{LNi}{50E} = \frac{0,70 \times 9.348 \times 1,9}{120 \times 50} = 2 \text{ mm}^2;$$

soit un fil de $\frac{16}{40}$ et une densité de courant de 1 ampère par millimètre carré.

Par suite, on devra placer sur les bobines : $\frac{9.348}{1,9} = 4.900$ spires, soit 1.225 par électro.

Tension de réactance. — La valeur de la tension de réactance, par application de la formule donnée au (§ 323), est de 1,4 volt, la longueur de la spirale étant composée de 46 centimètres de fil placé dans les encoches de l'induit et de 40 centimètres de fil dans l'entrefer. On se trouve ainsi dans les conditions exigées pour le fonctionnement sans étincelles de la machine.

GÉNÉRATRICES A COURANT ALTERNATIF

I. — ALTERNATEURS MONOPHASÉS

442. Généralités sur le courant alternatif. — L'expression d'une fonction sinusoïdale est :

$$y = y_0 \sin. \omega t$$

où ω la pulsation a pour valeur : $2\pi f$;

$$\text{alors la période } T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} = \frac{1}{\infty}$$

$$\text{et } f \text{ ou } \infty, \text{ la fréquence} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{\pi}$$

La dérivée de la fonction sinusoïdale est représentée par :

$$\frac{dy}{dt} = y_0 \omega \cos. \omega t \quad (1)$$

Elle est décalée de $\frac{\pi}{2}$ sur la fonction périodique $[y = f(t)]$ et de même période qu'elle.

L'intégrale de la fonction (1) est :

$$\int y dt = \frac{1}{\omega} y_0 \cos. \omega t ;$$

elle est décalée de $\frac{\pi}{2}$ sur y mais en sens inverse.

Une fonction sinusoïdale peut être figurée par un vecteur de direction fixe, mais de grandeur variable (*fig. 1063*).

Un vecteur peut être remplacé par deux vecteurs tournant en sens inverse à la vitesse angulaire ω (*fig. 1064*).

On peut aussi représenter les quantités alternatives par des vecteurs faisant, avec un axe d'origine fixe, des angles égaux à leur angle de phase à l'origine en tournant avec la vitesse angulaire de la pulsation. On peut supposer les vecteurs fixés sur le diagramme et celui-ci animé du mouvement de rotation ω autour de 0.

Le vecteur représentatif d'une dérivée et celui de l'intégrale sont décalés de $\frac{\pi}{2}$, en sens inverse, du vecteur fonction.

Le courant alternatif produit un champ magnétique et ce dernier

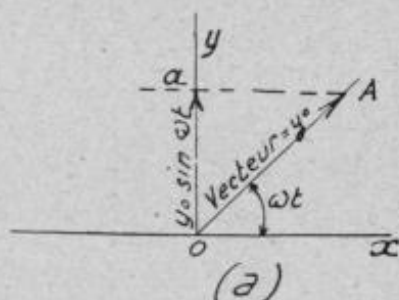


FIG. 1063.

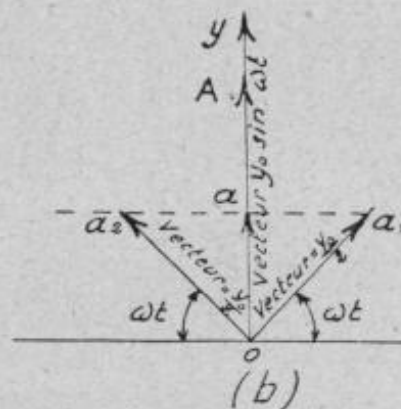


FIG. 1064.

réagit en donnant naissance à une force électromotrice de self-induction dont les valeurs dépendent seulement des variations du flux. Cette force électromotrice est alternative et décalée en retard de un quart de période par rapport à la phase de l'intensité, c'est-à-dire par rapport à la force électromotrice résultante dans le circuit.

Il résulte que l'énergie produite par période a pour expression :

$$W = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi T.$$

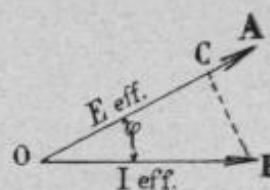


FIG. 1065.

Et celle fournie pendant l'unité de temps, c'est-à-dire pendant f périodes, est égale à :

$$E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi T f, \quad \text{ou} \quad E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi \quad (\text{puisque } Tf = 1).$$

Cette dernière expression a reçu le nom de puissance réelle et, si on représente par OA et OB (fig. 1065) la tension et le débit efficaces du courant alternatif, on a :

$$P_a \text{ (puissance apparente)} = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{max}} I_{\text{max}}}{2}.$$

$$P_r \text{ (puissance réelle)} = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi = P_a \times \cos \varphi \text{ (1)}.$$

(1) Au lieu de la définition usuelle :

$$\cos \varphi = \frac{P_r}{P_a},$$

M. Campos propose la définition :

$$\cos \varphi = \cos \times \text{arc tang} \times \frac{\text{puissance déwattée}}{\text{puissance réelle}},$$

Mais $I_{\text{eff}} \cos \varphi = OC =$ courant watté ; par suite, P_r est égal au produit de E_{eff} par le courant watté.

La f. e. m. efficace, qui est la force nécessaire pour faire circuler un courant I_{eff} dans un circuit, dont l'indépendance est $\sqrt{L^2\omega^2 + R^2}$ ou $\sqrt{R^2 + 4\pi^2 \infty^2 L^2}$ (avec $\infty = \frac{1}{T}$ et $\omega = \frac{2\pi}{T}$), a pour valeur :

$$\frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 E_{\text{max}}^{(1)};$$

$$E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} = I_{\text{eff}} \sqrt{1 + \frac{L^2\omega^2}{R^2}} = I_{\text{eff}} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi} = I_{\text{eff}} \frac{1}{\cos \varphi};$$

$$E_{\text{moy}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_{\text{eff}} = 0,9 E_{\text{eff}};$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{\text{max}};$$

$$I_{\text{moy}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{eff}} = 0,9 I_{\text{eff}}.$$

Appelons η le rendement à pleine charge d'un alternateur, la puissance nécessaire pour l'entraîner est :

$$W = \frac{1.000 \times P_r}{736\eta}, \text{ en kilowatts.}$$

Les quantités alternatives ont généralement une allure qui diffère plus ou moins de la courbe représentant un phénomène harmonique simple, courbe qui est une sinusoïde, qui en réalité est plus ou moins déformée. Dans la courbe de l'intensité ni l'induction mutuelle, ni la self-induction, ni la capacité ne causent de déformation quand il n'y a pas de fer ; quand ce dernier existe, elle se trouve déformée par l'action de l'hystérésis.

ce qui revient à substituer la somme géométrique des puissances apparentes à leur somme algébrique. Tandis que la première donne des résultats dépendant non seulement de la charge, mais aussi du mode d'alimentation, la seconde, au contraire, est absolument indépendante de l'alimentation du réseau.

(¹) On donne parfois une autre définition de la force électromotrice efficace en disant qu'elle est égale à la racine carrée de la moyenne des carrés des valeurs instantanées de la force électromotrice. Le carré de E_{eff} ou E_{eff}^2 , par définition, est l'ordonnée du

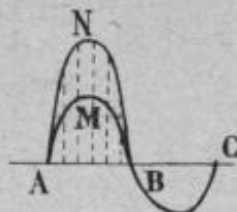


FIG. 1066.

rectangle ayant même base AB que la sinusoïde AMB (fig. 1066) et même surface que la sinusoïde ANB obtenue en élevant au carré les ordonnées de la première.

Lorsque la courbe de la force électromotrice n'est pas une sinusoïde, celle de l'intensité se trouve déformée par l'action du fer qui produit un décalage en retard de la courbe de l'intensité par rapport à celle du flux, puis par la self-induction qui aplatit l'onde du courant, enfin par la capacité qui produit une véritable distorsion de la courbe de l'intensité. La connaissance des courbes de tension et d'intensité et leur véritable allure au point de vue pratique présentent une réelle importance et peuvent être d'un grand secours dans beaucoup de cas, aussi les courbes représentatives des valeurs alternatives ne sont pas en pratique rigoureusement sinusoïdales ; elles sont même parfois telles qu'il devient impossible de traduire par une équation les variations des fonctions périodiques. Et alors on désigne sous le nom de *sinusoïde équivalente* une fonction périodique quelconque, qui a la même valeur efficace que la fonction périodique considérée (fig. 1067).

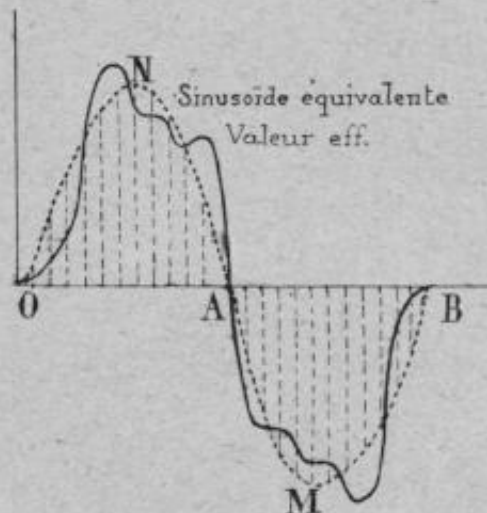


FIG. 1067.

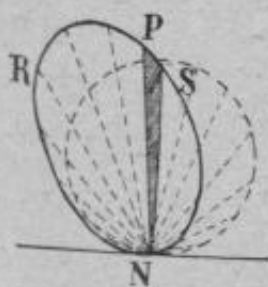


FIG. 1068.

Pour tracer cette sinusoïde, on divise OB en 24 parties égales, par exemple, correspondant ainsi chacune à 15° sur le cercle de référence dans la représentation vectorielle.

Puis, d'un point N (fig. 1068), on fait partir 12 vecteurs faisant entre eux un angle de 15° et sur lesquels il est porté les différences ordonnées de la courbe ONA. La courbe NPR ainsi obtenue a pour surface :

$$(1) \quad \int_0^\pi \frac{e^2 d\alpha}{2},$$

e représentant une ordonnée de la courbe périodique ONA et α un angle élémentaire infiniment petit dont le sommet se trouve en N. A la limite, la surface d'un triangle élémentaire NPS est donnée par : $\frac{e^2 d\alpha}{2}$, par suite la surface de la courbe NPR sera bien celle exprimée par la formule (1).

Mais $\int_0^\pi e^2 d\alpha = \pi E_{\text{eff}}^2$; donc la surface de MPR = $\frac{\pi E_{\text{eff}}^2}{2}$, ou :

$$E_{\text{eff}}^2 = \frac{2S}{\pi}, \quad \text{et enfin} \quad E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2S}{\pi}}.$$

De plus, l'on remarquera que, quand la variation de la force électromotrice est sinusoïdale : $E_{\text{eff}}^2 = \frac{E_{\text{max}}^2}{2}$.

Par conséquent, l'amplitude de la sinusoïde équivalente est donnée par :

$$E_{\text{max}}^2 = \frac{4S}{\pi}; \quad \text{d'où} \quad S = \frac{\pi E^2}{4},$$

égalité qui montre que l'amplitude de la sinusoïde équivalente est égale au diamètre d'un cercle de référence ayant une surface S , et, comme dans le système des coordonnées polaires la sinusoïde est représentée par un cercle ayant un diamètre égal à l'amplitude, les différentes cordes issues du point N donnent les valeurs des ordonnées de la sinusoïde.

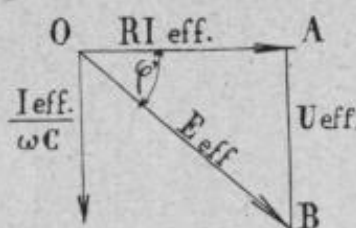


FIG. 1069.

Dans un circuit de résistance R ayant une capacité C , celle-ci a pour effet d'avancer la phase du courant sur celle de la tension d'un angle φ' (fig. 1069), dont la tangente est égale à :

$$\frac{AB}{OA} = \frac{I_{\text{eff}}}{\omega C R I_{\text{eff}}} = \frac{1}{\omega C R}.$$

Si on fait : $\tan \varphi$ (décalage dû à la self-induction) = φ' , ou :

$$\frac{L\omega}{R} = \frac{1}{\omega C R}, \quad \text{ou} \quad L\omega^2 C = 1,$$

le courant sera en phase avec la tension aux bornes du circuit considéré et on aura une condition de résonance, l'ajustement de la self et de la capacité étant variable, puisqu'il faut avoir : $L\omega^2 C = 1$.

Les forces électromotrices, les intensités, les charges des accumulateurs, les forces magnétomotrices, enfin toutes valeurs alternatives peuvent être représentées par des vecteurs tournants ou par des coordonnées polaires, qui simplifient et rendent plus compréhensibles leurs fonctions.

On voit, en particulier, que la composition des questions sinusoïdales s'opère d'une façon analogue à la composition des forces en mécanique, le résultat final étant ici aussi indépendant de l'ordre dans lequel on procède aux différentes compositions.

Certains problèmes que l'on rencontre fréquemment dans la technique du courant alternatif se résolvent d'une façon très rapide par la méthode graphique, telle que la détermination des forces électromotrices d'un circuit comportant une bobine de self et une capacité, de deux circuits montés en dérivation et où, aux bornes communes de la dérivation, agit une

force électromotrice sinusoïdale, celle du décalage du courant sur la tension, la dérivée d'une fonction sinusoïdale, etc.

L'emploi de la méthode symbolique ou des imaginaires, introduite par Steinmetz, offre des avantages que nous essaierons de démontrer en traitant une même question par cette méthode et par la méthode géométrique.

A cet effet, considérons deux alternateurs, de force électromotrice E_1 et E_2 , montés en série et fonctionnant l'un en génératrice et l'autre en réceptrice, et proposons-nous de déterminer la puissance de la réceptrice en fonction des tensions E_1 et E_2 , de la résistance R de la ligne, de la réactance (ωL) et du décalage (φ) des forces électromotrices.

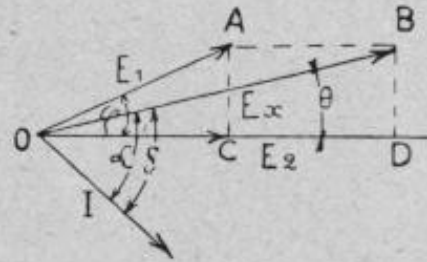


FIG. 1070.

Soient E_1 et E_2 les vecteurs représentant, par la méthode géométrique, les forces électromotrices considérées, E_r leur résultante et I le vecteur du courant circulant sous l'effet de E_r (fig. 1070).

La puissance de la réceptrice est évidemment représentée par :

$$P_2 = E_2 I \cos \alpha = E_2 I \cos (\delta - \theta).$$

Or $I = \frac{E_r}{K}$, K représentant l'impédance du circuit.

Par suite : $E_r = KI$.

Si on projette les droites OA et OB sur la direction du vecteur E_2 , on obtiendra les points C et D , et on a : $BD = E_r \sin \theta$ et $AC = E_1 \sin \varphi$.

Mais $AC = BD$; donc : $\sin \theta = \frac{E_1}{E_r} \sin \varphi = \frac{E_1 \sin \varphi}{KI}$.

De même : $OD = OC + CD$, ou : $E_r \cos \theta = E_1 \cos \varphi + E_2$, et :

$$\cos \theta = \frac{E_1 \cos \varphi + E_2}{KI}.$$

Si on développe l'expression de la puissance P_2 et si on remplace $\sin \theta$ et $\cos \theta$ par les valeurs ci-dessus, on obtient :

$$P_2 = \frac{E_2}{K} [\cos \delta (E_1 \cos \varphi + E_2) + \sin \delta E_1 \sin \varphi].$$

D'un autre côté, $\cos \delta = \frac{R}{K}$, R représentant la résistance ohmique du circuit dont K est l'impédance ; de même, $\sin \delta = \frac{s}{K}$, s étant la réactance du même circuit.

$$\text{Donc enfin : } P_2 = \frac{E_2 R + E_1 E_2 \cos \varphi R + E_1 \sin \varphi \times s}{R^2 + s^2}.$$

En passant à la méthode des imaginaires, nous prenons le vecteur de E_2 comme axe d'origine, et nous pouvons écrire (fig. 1071) :

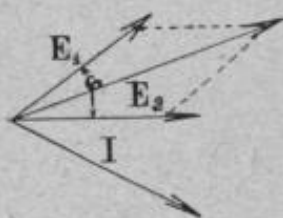


FIG. 1071.

$$[E_2] = E_2; \quad [E_1] = E_1 (\cos \varphi + i \sin \varphi);$$

$$[I] = \frac{[E_1] + [E_2]}{R + is} = \frac{E_2 + E_1 (\cos \varphi + i \sin \varphi)}{R + is}.$$

Multipliant les deux termes de cette expression par $(R - is)$, il vient :

$$(I) = \frac{[E_2 + E_1 (\cos \varphi + i \sin \varphi)] (R - is)}{R^2 - i^2 s^2} = \frac{[E_2 + E_1 (\cos \varphi + i \sin \varphi)] (R - is)}{R^2 + s^2},$$

puisque $i^2 = -1$; d'où :

$$(I) = \frac{E_2 R + E_1 \cos \varphi R + E_1 \sin \varphi \times s + i (-E_2 s - E_1 \cos \varphi s)}{R^2 + s^2},$$

expression de la forme $a + bi$.

L'expression imaginaire de la force électromotrice (E_2) étant E_2 peut être considérée comme de la forme $c + di$, d égalant 0 ; par suite, en appliquant la règle trouvée pour la détermination de la puissance par les imaginaires, on a :

$$P = bd + ac = \frac{E_2 R + E_1 E_2 \cos \varphi R + E_1 \sin \varphi s}{R^2 + s^2},$$

expression identique à celle qu'a donnée la méthode géométrique, mais d'une façon plus laborieuse.

COURANTS BIPHASÉS. — Les courants biphasés ou diphasés peuvent se comparer à deux courants monophasés superposés dont les forces électromotrices sont décalées de $1/4$ de période (90°). Les vecteurs représentatifs des deux forces électromotrices sont perpendiculaires l'un à l'autre.

En principe, dans un tel système, quatre conducteurs sont nécessaires, deux pour chaque phase, un d'aller et l'autre de retour ; pratiquement, on peut réunir les deux conducteurs de retour en un seul, alors dans celui-ci circule un courant égal à chaque instant à la somme des deux courants. Les deux phases sont réalisées par deux enroulements distincts.

Soit i_{eff} le courant dans une phase, les circuits étant équilibrés, la valeur de l'intensité dans le conducteur de retour commun est : $i_{\text{eff}} \sqrt{2}$.

La puissance développée dans les deux phases est :

$$P = 2e_{\text{eff}} i_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

Si nous appelons r la résistance d'un conducteur, i_{eff} le courant dans ce même conducteur, la chute de tension dans le conducteur a pour valeur : $i_{\text{eff}} r$ et, pour les quatre conducteurs aller et retour, la chute de tension est $2i_{\text{eff}} r$. Pour la distribution à trois conducteurs, e_1 étant la chute de tension dans un conducteur, e_2 la chute de tension dans le conducteur commun, la résultante ou chute de tension e est donnée par l'expression :

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 e_2 \sqrt{2}}.$$

Si la chute de tension dans le conducteur commun est égale à la chute de tension dans un conducteur unique, on a :

$$e = e_1 \sqrt{2 + \sqrt{2}} = 1,845 e_1 ;$$

$$e = i_{\text{eff}} r \times 1,845 \text{ volts.}$$

Les récepteurs peuvent comprendre soit deux circuits élémentaires distincts ou deux circuits ayant un point commun, l'alimentation pouvant alors se faire par 3 fils (*fig. 1072*).

Les courants diphasés ne sont que peu utilisés.

COURANTS TRIPHASÉS. — Les courants triphasés peuvent se comparer à trois courants monophasés superposés dont les forces électromotrices sont décalées entre elles de 120° , soit de $1/3$ de période. Les vecteurs représentatifs des forces électromotrices ont entre elles des angles de 120° .

Les valeurs instantanées sont données par les formules :

$$e_1 = E \sin \alpha ; \quad e_2 = E \sin (\alpha + 120^\circ) = E \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \right) ;$$

$$e_3 = E \sin (\alpha + 240^\circ) = E \left(-\frac{1}{2} \sqrt{3} \cos \alpha - \sin \alpha \right) ;$$

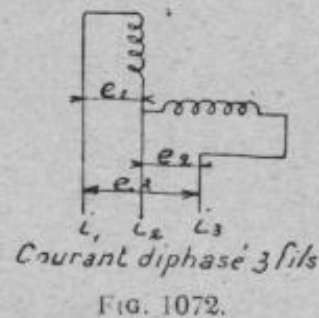
et :

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

La même loi s'applique aux courants : $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

Couplage en étoile (*fig. 1073*). — Si l'on appelle e_0' la tension par phase, c'est-à-dire mesurée entre $a_1 e_1$, commencement et fin d'une phase, e' la tension entre phases, c'est-à-dire mesurée entre deux conducteurs, on a :

$$e' = e_0' \sqrt{3}.$$



La puissance développée est exprimée par :

$$P = 3e_0' i' \cos \varphi \quad \text{ou} \quad P = \sqrt{3}e' i' \cos \varphi,$$

en supposant les trois phases équilibrées.

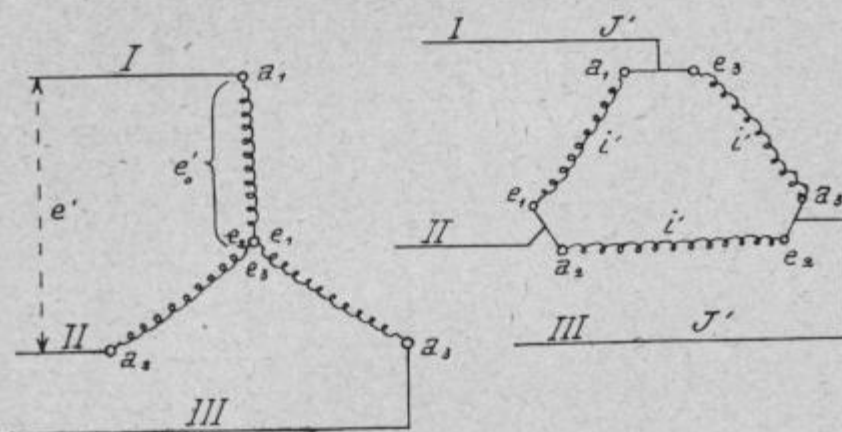


FIG. 1073.

Dans le montage étoile, pour qu'il soit auto-régulateur il faut (fig. 1074) un quatrième conducteur réunissant le centre des deux étoiles du départ et de l'arrivée et alors on peut avoir des charges inégales dans les trois circuits. On peut supprimer le quatrième fil en reliant les deux centres des étoiles à la terre.

Couplage en triangle. — Dans ce système, la tension par phase égale la tension entre phases :

$$e_0' = e'.$$

Le courant a pour valeur : $i' = \frac{J'}{\sqrt{3}}.$

Et la puissance développée :

$$P = 3e' i' \cos \varphi$$

ou :

$$P = \sqrt{3}e' J' \cos \varphi.$$

Le montage en triangle assure l'indépendance des circuits des récepteurs, avantage important pour les lampes à incandescence ; le système est pratiquement auto-régulateur.

Chute de tension. — Si $i \times r$ est la chute de tension dans un con-

ducteur, r = la résistance de ce conducteur, dans deux conducteurs on a :

$$\delta = ir\sqrt{3}.$$

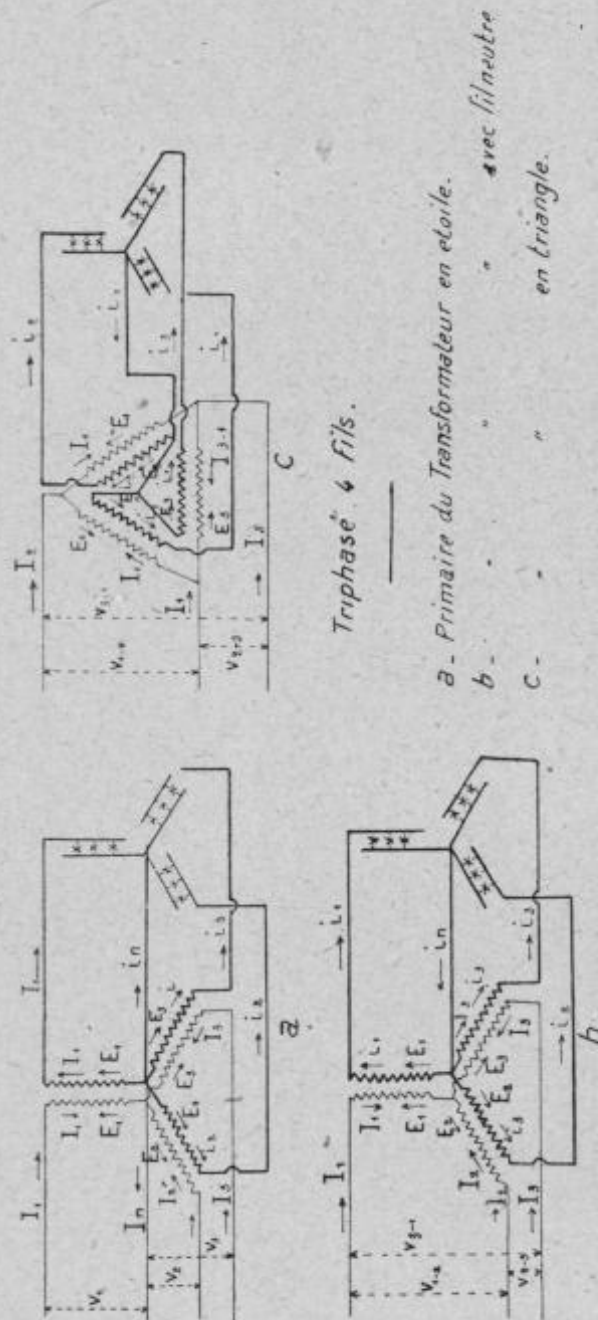


FIG. 1074. — Schéma d'une distribution à courant triphasé à quatre fils.

Les relations entre les courants et les tensions dans les générateurs et récepteurs triphasés sont comme ci-après (fig. 1075) :

1^o Générateur et récepteur en étoile [dispositif (a)] :

$$\text{Générateur : } I = i; U = u\sqrt{3}; \text{ récepteur : } i = I \text{ et } u = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

u = tension simple et U = tension composée étoilée.

2° Générateur en étoile et récepteur en triangle [dispositif (b)] ;

$$\text{Générateur : } I = i ; U = u \sqrt{3} ; \text{récepteur : } i = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ et } u = U.$$

3° Générateur en triangle et récepteur en étoile [dispositif (c)] ;

$$\text{Générateur : } I = i \sqrt{3} ; U = u ; \text{récepteur : } i = I ; u = \frac{U}{\sqrt{3}}.$$

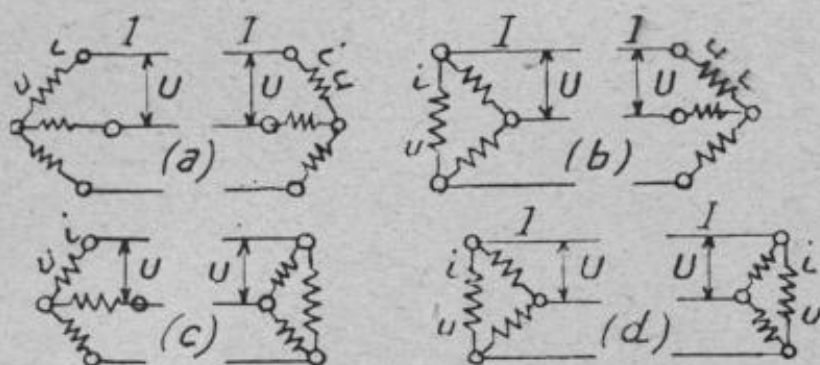


FIG. 1075.

4° Générateur et récepteur en triangle [dispositif (d)].

$$\text{Générateur : } I = i \sqrt{3} ; U = u \text{ et } i = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ et } u = U.$$

La puissance est toujours : $W = \sqrt{3} U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$.

443. Nature des alternateurs simples. — Dans ces machines, tous les fils induits sont, suivant le moment, ou tous également actifs ou tous inactifs, et pour leur logement on emploie deux ou plusieurs encoches par pôle. Celles-ci, notablement plus grandes que dans les dynamos, sont soit complètement ouvertes, soit le plus souvent demi-fermées avec des formes rectangulaires ou ovales. Avec la machine à haute tension, les encoches sont généralement fermées, garnies de tubes aussi complètement fermés, qui empêchent les étincelles de jaillir de l'enroulement au fer. Cette disposition est particulièrement recommandable lorsque l'alternateur est destiné à la commande des fours électriques, ce qui permet de ne pas faire dépasser au courant, lors de la mise en court-circuit, une valeur triple au plus de l'intensité normale. L'induit est bobiné de telle sorte que toutes les spires, supposées parcourues par un courant continu, tendent à magnétiser l'armature dans une seule et unique direction ; cet enroulement peut être imbriqué ou ondulé avec bobines longues ou courtes.

Les induits sont établis avec des disques ou noyaux en tôle et enrou-

lements noyés, que l'induit soit fixe ou mobile. Presque tous les enroulements modernes sont du type à tambour. Dans les alternateurs de grande puissance, l'induit est divisé au moins en deux parties, et chacune d'elles est munie d'un enroulement d'un type déterminé. Ces divers enroulements sont ensuite reliés entre eux selon l'application que l'on a en vue. Pour les machines à haute tension, l'on s'adresse de préférence au bobinage imbriqué, et le plus souvent les bobines sont faites sur formes.

L'enroulement peut être à bobines séparées (haute et moyenne tension), à bobines enchevêtrées (moyenne et basse tension) ou à barres (grande intensité) ; il se fait avec ou sans coupures, suivant que l'on peut ou non « le diviser » en plusieurs pièces sans enlever de bobine induite.

L'induit mobile ne s'applique plus que pour les alternateurs de faible puissance ; dans ce cas, on donne plus de largeur à la machine dans le sens de l'axe.

L'enroulement induit peut être effectué soit au moyen d'une disposition dite « bobine courte », soit avec la disposition dite « bobine longue ». Dans le premier cas, chaque spire induite a une largeur égale à très peu près à celle des pièces polaires, soit les $\frac{2}{3}$ du pas, et il n'y a qu'un seul côté de la spire qui soit soumis à l'induction ce qui fait que cette disposition est délaissée. Dans le second cas, chaque bobine a une largeur presque égale au pas, et les deux côtés sont soumis également à l'action du champ magnétisant.

Au point de vue du montage, les bobines d'une même section sont enfouies dans une rainure, alors que dans le système à bobines longues, chaque rainure reçoit les conducteurs de deux sections voisines. Cette dernière disposition convient aussi aux alternateurs à haute tension, et elle est uniquement employée pour les alternateurs simples.

A l'effet d'éviter que les conducteurs des diverses bobines de l'enroulement ne se touchent sur les côtés de l'induit, on les dispose dans des plans différents. Quant à la distance à ménager entre les bobines, elle doit être telle qu'une étincelle venant à éclater entre deux bobines consécutives, il n'en puisse résulter de dégâts pour la machine.

Quant à l'influence de l'entrefer, elle s'exerce seulement sur la valeur du courant magnétisant et sur le facteur de puissance. L'induction maxima dans l'entrefer varie sensiblement en raison inverse du nombre de pôles, et par suite le flux par pôle, dont la valeur est fonction du produit de la largeur du pôle par l'induction maxima, varie lui-même en raison directe du carré de la largeur du pôle.

Les alternateurs à inducteur mobile, à pôles radiaux alternés, disposés à l'intérieur de la machine — au moins pour les grandes puissances — sont les plus employés, soit qu'ils possèdent autant de bobines que

de pôles (les plus usuels), soit qu'il n'y ait qu'une bobine inductrice unique.

Avec l'emploi de conducteurs à section carrée ou de ruban de cuivre pour le montage des bobines inductrices, on a pu obtenir des vitesses périphériques considérables, dépassant parfois 50 mètres à la seconde.

Les machines à inducteur mobile externe et à induit fixe offrent une plus grande sûreté au point de vue exploitation que celles à induits tournants, car cette disposition permet de recueillir le courant sans l'intermé-

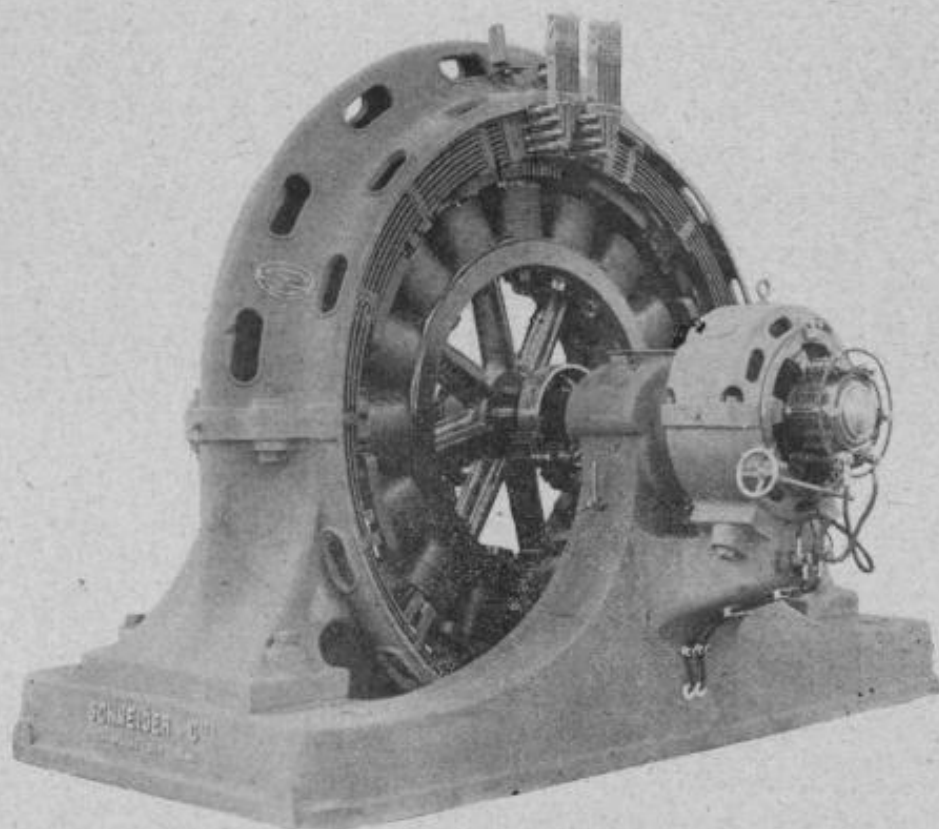


FIG. 1076. — Alternateur monophasé de 520 K. V. A., 65 volts.
375 tours, 50 périodes.

diaire de bagues, celui-ci se transmettant dans la ligne simplement au moyen de conducteurs reliés à des barres fixes. On y adjoint des bagues seulement pour le courant d'excitation provenant d'une source de courant à basse tension.

On compose les inducteurs au moyen de pièces polaires à large épanouissement garnies de bobines inductrices, et les noyaux de celles-ci sont constitués soit par des tôles minces isolées entre elles, soit par du fer forgé ou par de l'acier, soit enfin par une disposition en forme d'encoches périphériques permettant de n'avoir qu'une seule bobine inductrice.

Tantôt les pôles en regard sont de mêmes noms (flux tournant) ou de

noms contraires (flux alternant), ou enfin tous les pôles de même polarité sont d'un côté et les pôles de polarité contraire de l'autre côté pour la disposition à deux couronnes.

La (fig. 1077) représente une génératrice à courant alternatif avec inducteur fixe. Les spires passant devant un pôle nord reçoivent une induction de sens contraire à celle des spires passant devant un pôle sud. Les côtés des bobines sont donc parcourus alternativement par des courants de sens contraire.

L'on paraît préférer maintenant les inducteurs à noyau massif et faiblement saturés, d'autant plus que l'on peut obtenir une petite chute de tension en augmentant l'entrefer, disposition qui s'oppose à l'établissement du flux de réaction d'induit, mais qui oblige à donner un poids plus considérable au système inducteur.

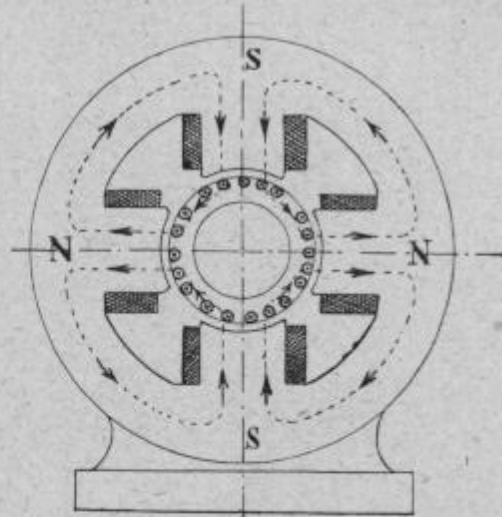


FIG. 1077.

La forme des noyaux polaires se fait rectangulaire, ovale ou ronde, mais la section circulaire est toujours préférable pour les raisons que nous avons déjà données. La longueur de ces noyaux ou leur hauteur suivant l'axe est l'objet, de la part des constructeurs, de nombreuses études. Quelques-uns donnent à la surface des pièces polaires une courbure un peu plus prononcée que celle qui correspond au rayon ; mais généralement on abat les angles des extrémités en forme de plan incliné. Cette façon de faire, qui augmente l'épaisseur de l'entrefer aux extrémités des pièces polaires, permet de se rapprocher davantage de la courbe de la force électromotrice idéale, c'est-à-dire de la forme sinusoïdale.

Les épanouissements polaires des bobines inductrices se font massifs ou feuilletés. Cette dernière disposition convient dans tous les cas, mais avec les alternateurs triphasés avec noyau d'induit muni de rainures à section rectangulaire, on peut utiliser des pièces polaires massives, pourvu que le nombre de rainures soit au moins de 6 par pôle, si toutefois la rainure n'a pas une largeur supérieure à 50 0/0 de l'épaisseur correspondante de l'entrefer moyen.

Les alternateurs à pôles alternés donnent lieu à une classe de machines dites à « flux ondulé », qui possèdent une seule bobine magnétisante (fig. 1078), de telle sorte que tous les pôles nord, par exemple, sont situés d'un même côté de la bobine unique, et les pôles sud de l'autre côté. L'in-

duit est constitué par deux enroulements montés sur des anneaux feuilletés disposés sur une couronne en fonte ou en acier, enroulements que l'on laisse indépendants ou que l'on couple suivant le service demandé à la machine. Les conducteurs induits sont logés soit dans des trous, soit dans des rainures.

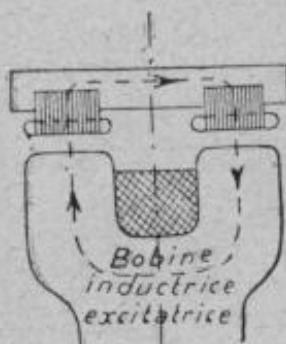


FIG. 1078.

Avec ce genre d'alternateurs, le flux ne change jamais de sens, contrairement à ce qui se passe dans les alternateurs simples à pôles alternés ; il varie constamment entre une valeur minima et une valeur maxima. De plus, l'induit est toujours fixe, ce qui lui a fait donner le nom d'alternateur à cuivre fixe. Ce type d'alternateur convient surtout pour les cas où la commande est effectuée par des machines motrices à grande vitesse angulaire, telles que les turbines à vapeur dont la vitesse est supérieure à

50 mètres par seconde.

On peut réaliser un alternateur à deux tensions différentes ; de même si le nombre des pôles nord de l'inducteur n'est pas le même que celui des pôles sud, on obtient un alternateur à deux fréquences. En décalant d'un certain angle les pôles nord par rapport aux pôles sud, on peut rendre unique le système induit ou bien obtenir des forces électromotrices alternativement décalées de phase.

On peut distinguer les alternateurs selon leurs vitesses : alternateurs - volants ou à faible vitesse angulaire (50 à 150 tours par minute) ; alternateurs à moyenne vitesse (150 à 1.000 tours par minute) et alternateurs à grande vitesse ou turbo-alternateurs (800 à 1.500 tours et plus).

A égalité de puissance un alternateur monophasé est plus lourd, plus cher et a un plus faible rendement qu'un alternateur triphasé.

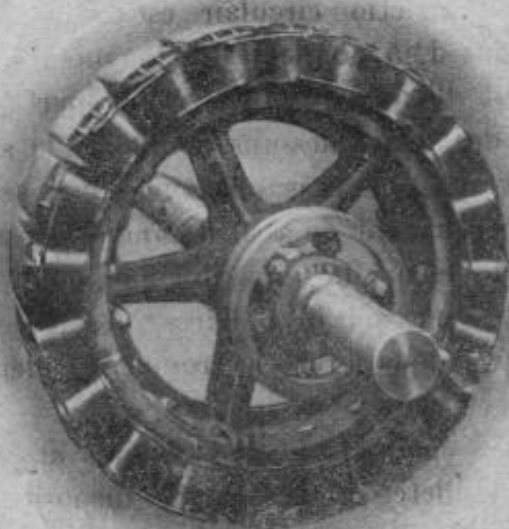


FIG. 1079. — Inducteur tournant d'alternateur de 2.000 kw., 300 tours (Maison Bréguet).

444. Valeurs de la force électromotrice. — D'une manière générale, si on appelle E la force électromotrice par phase, n le nombre de

périodes par seconde, et z le nombre de fils actifs ($z = 2pq$; q , nombre de fils par bobine; p , nombre de paires de pôles), on a :

$$E_{\text{eff}} = \frac{K\Phi n z}{60 \times 10^8}.$$

Si on remplace $\frac{n}{60}$ par ω , on obtient : $E_{\text{eff}} = \frac{K\Phi \omega z}{10^8}.$

Le coefficient K dépend du nombre d'encoches par phase et du rapport de la largeur du pôle à la largeur occupée sur l'induit par l'enroulement. Lorsque la bobine n'occupe qu'une rainure, $K = 2,22$; quand l'enroulement occupe les $2/3$ de la largeur d'un pôle, disposition couramment usitée, $K = 1,85$, et, lorsque l'enroulement est uniformément réparti, disposition peu avantageuse, $K = 1,45$; ces valeurs de K s'appliquent au cas où on considère la force électromotrice comme une sinusoïde.

Mais, dans la pratique, la courbe de la force électromotrice comporte des sommets plus ou moins aigus que les sinusoïdes, ou des sommets plus aplatis et à amplitudes plus ou vertes.

Considérons un alternateur ordinaire, formé de deux couronnes avec p pôles dans un sens et p pôles dans un sens opposé (hétéropolaire), avec une bobine ayant une largeur double de celle d'un pôle (fig. 1080); la valeur de la force électromotrice est donnée par l'expression :

$$E_{\text{eff}} = \frac{2,31 \Phi \omega z}{10^8}.$$

On voit que la force électromotrice est plus élevée que dans le cas d'un courant de forme sinusoïdale; mais cela n'est exact que lorsque la largeur totale du fil de la bobine ($cd + ef$) ainsi que la largeur du pôle sont égales à la moitié du pas. Les bobines peuvent avoir des largeurs égales à des fractions du pas, soient $1/4$, $1/2$, 1 , $1\ 1/2$; lorsqu'elles ont une largeur moindre que l'espace entre les pôles, les courbes résultantes ont des pointes que l'on peut éviter en prenant, par exemple, des pôles de largeur représentant les $3/4$ du pas ⁽¹⁾ avec une spire de largeur égale à un quart de pas, une deuxième spire de largeur égale à la moitié du pas et une troisième de la largeur des pièces polaires.

Soit maintenant un alternateur *homopolaire* (c'est-à-dire dont les pôles

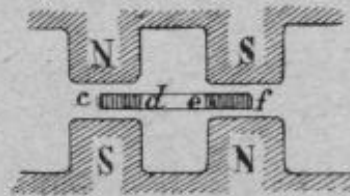


FIG. 1080.

⁽¹⁾ Pas, distance qui sépare deux pôles consécutifs de noms contraires; dans les alternateurs homopolaires, le pas est la moitié de l'intervalle qui sépare deux pôles successifs.

de mêmes noms sont situés du même côté de la ligne neutre). Supposons que le pas soit égal au double de la largeur d'un pôle, et prenons une bobine ayant une largeur pareille à celle d'un pôle (*fig. 1081*).



FIG. 1081.

Dans la position qu'occupe la bobine, le flux coupé est maximum, et la force électromotrice engendrée nulle. Si la machine a p pôles et si Φ' est le nombre de lignes de force qui va d'un pôle à l'autre, l'induction par centimètre carré est représentée par $\frac{\Phi'}{d^2}$ (chacun des pôles ayant comme section un carré). Enfin, si D est le diamètre de l'induit, celui-ci faisant n tours, la vitesse est, par suite, égale à $\frac{\pi D n}{60}$, et, la longueur du fil soumis à l'induction étant égale à d , la force électromotrice engendrée a pour expression :

$$E = \frac{\Phi'}{d^2} \times \frac{2pn}{60} d = \frac{2pn\Phi'}{60d} \quad \text{ou} \quad E = \frac{2pn\Phi'}{60 \times 10^8} \text{ volts.}$$

En tenant compte de la dispersion Φ'' qui se produit entre les pôles, on a :

$$E_{\text{eff}} = \frac{2pn(\Phi' - \Phi'')}{60 \times 10^8} \text{ volts.}$$

Si on a autant de bobines que de pôles, c'est-à-dire p bobines et que chacune d'elles contienne q fils, on obtient : $z = pq$.

Et alors :

$$E_{\text{eff}} = \frac{pnz(\Phi' - \Phi'')}{60 \times 10^8} \text{ volts.}$$

Or, dans un alternateur homopolaire, $\frac{pn}{60} = \infty$, et, le flux à considérer Φ étant égal à la moitié de $(\Phi' - \Phi'')$, on a enfin comme résultat :

$$E_{\text{eff}} = \frac{2\Phi \infty z}{10^8} \text{ volts.}$$

La valeur de la force électromotrice est ainsi de 100 % plus faible que dans le cas d'un alternateur dont la tension a une forme sinusoïdale.

Si la bobine était enroulée sur un noyau, qu'elle eût une largeur égale à celle du pôle et que l'on admît pour le noyau une largeur correspondant à la moitié de la largeur du pôle, la force électromotrice ne conserverait

sa valeur maxima que pendant un quart de période, et la force électromotrice aurait alors pour valeur :

$$E_{\text{eff}} = \frac{1,63\Phi \sim z}{10^8} \text{ volts } ^{(1)};$$

c'est-à-dire qu'elle n'est plus que les 0,73 de celle d'un alternateur dont la force électromotrice suit la loi sinusoïdale.

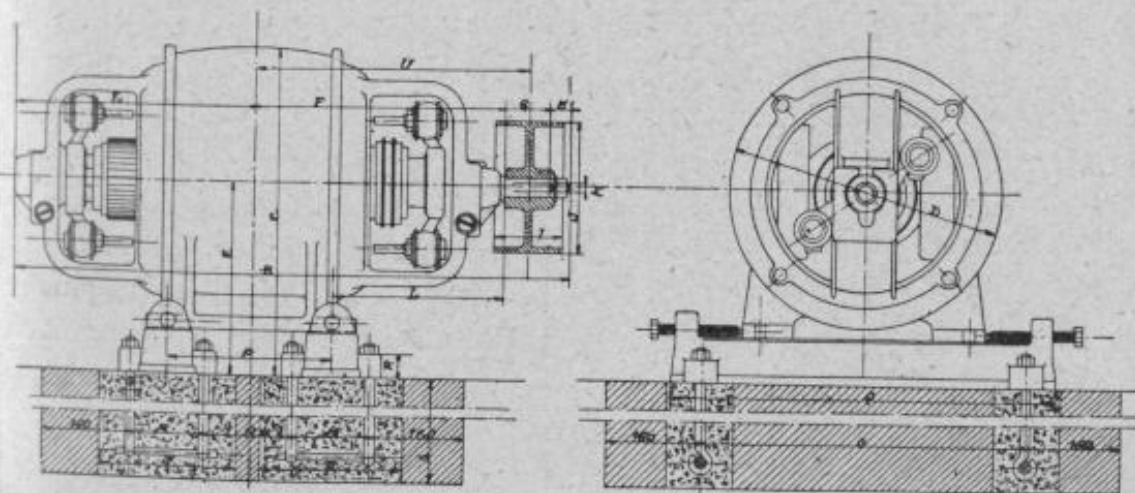


FIG. 1082. — Alternateur à induit tournant Bréguet, Type AB.

445. Excitation des alternateurs. — Les inducteurs des alternateurs sont excités par des courants continus, ou du moins par des courants redressés. Dans ce dernier cas, on utilise une ou plusieurs bobines de l'induit, et on emploie soit un commutateur-redresseur tournant, soit deux commutateurs ordinaires composés d'autant de touches qu'il y a de pôles, les touches étant reliées ensemble alternativement en deux jeux. Avec l'excitation en série, il est nécessaire d'avoir un transformateur ; le primaire de celui-ci est traversé par le courant total, et le secondaire est mis en tension avec le circuit inducteur de l'alternateur, en passant par le commutateur-redresseur.

L'excitation en dérivation peut être prise directement aux bornes de l'induit, ou passer par un transformateur réducteur de tension, lorsque la tension de la machine est à force électromotrice élevée.

L'étude du fonctionnement d'un alternateur se fait, comme pour les dynamos, au moyen de *caractéristiques* à circuit ouvert ou interne et à circuit fermé ou externe. Le courant inducteur fourni par l'excitatrice est réglé par l'intermédiaire d'un rhéostat.

⁽¹⁾ Thomalen dans *Lehrbuch der Elektrotechnik* (Julius Springer, 1903) et A. Sengel dans *Elektrotechnische Zeitschrift* (décembre 1907) ont donné des formules permettant de calculer ce coefficient.

Les caractéristiques en charge, qui donnent E_{eff} (I_{eff}) se tracent généralement avec un courant d'excitation constant, et pour chacune d'elles on maintient $\cos \varphi$ du réseau constant. Ce sont des ellipses d'autant plus aplaties sur la droite joignant les points de fonctionnement à

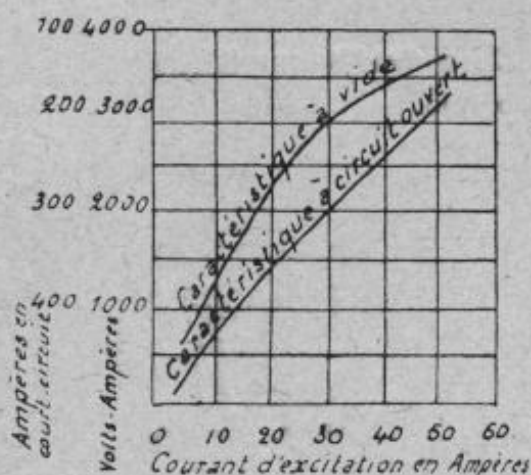


FIG. 1083.

vide et en court-circuit (points sur les axes) que l'angle de décalage extérieur est plus grand.

Les caractéristiques à vide et en court-circuit (fig. 1083) permettent, étant tracées en fonction de l'excitation, de déterminer la résistance apparente de l'induit en court-circuit, c'est-à-dire avec un décalage de un quart de période. Cette résistance apparente est d'autant plus petite que les décalages du courant sont plus faibles.

La courbe de la force électromotrice (caractéristique à vide), a la même forme que la courbe du flux ; elle s'abaisse plus ou moins rapidement, suivant le degré de saturation des diverses parties du circuit magnétique et les dérivations qui se produisent. La courbe de l'intensité en court-circuit est presque droite ; elle s'infléchit légèrement pour les valeurs élevées de l'excitation. L'énergie dépensée pour l'excitation des alternateurs représente à peu près 2 à 5 0/0 de la puissance totale.

446. Chute de tension dans les alternateurs. — La détermination de la chute de tension dans la construction des alternateurs joue un rôle des plus importants. En effet, une machine dont la tension varierait dans de trop grandes limites, entre la marche à vide et celle en charge, serait inutilisable et, d'autre part, la connaissance de la chute de tension sert à fixer l'excitation pour la machine en charge.

Il importe surtout d'avoir les moyens nécessaires de prédéterminer cette chute de tension sans être obligé de mettre en jeu des machines d'une puissance supérieure à celle dont on dispose dans un atelier de construction. De là diverses méthodes que nous allons indiquer.

La *méthode Behn-Eschenburg*, la première proposée en date, consiste à déterminer la caractéristique à vide de l'alternateur (courbe donnant la tension aux bornes en fonction du courant d'excitation), puis aussi la caractéristique en court-circuit de la même machine. En prenant le rapport des ordonnées des deux courbes correspondant à une même excitation, on obtient l'impédance intérieure de l'alternateur pour cette excitation. La force électromotrice de l'alternateur à vide étant la résultante

de la force électromotrice en charge, de la force électromotrice de self-induction et de la chute ohmique, qu'on prend égale à une fois et demie ou deux fois la chute due à la résistance de l'induit pour tenir compte des courants parasites, il devient facile, connaissant le décalage φ du courant sur la tension en charge, de déterminer la différence entre la tension à vide et celle en charge pour une même excitation. Cette méthode très simple, lorsqu'on l'applique à des alternateurs saturés, conduit à des résultats supérieurs à ceux de la réalité.

La *méthode Roltherl* consiste à calculer l'excitation en charge, en admettant qu'elle est la résultante de l'excitation à vide et de l'excitation nécessaire pour faire passer le courant normal dans l'alternateur lors de l'essai en court-circuit. Cette méthode, au contraire de la précédente, donne des résultats inférieurs à la réalité.

Méthode Blondel. — M. A. Blondel a établi que les causes diverses de la chute de tension sont : la réaction des courants déwattés, la réaction des courants wattés, la chute ohmique, la dispersion, et enfin la self-induction.

Soient : U la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur, E la force électromotrice induite, I le courant débité décalé d'un angle φ connu sur la différence de potentiel aux bornes, R la résistance du circuit extérieur, y compris la résistance apparente due aux courants parasites, et L le coefficient de self-induction.

L'alternateur ayant deux réactances, l'une ωl relative au courant watté et l'autre $\omega l'$ au courant déwatté, le diagramme des forces électromotrices sera représenté par la (fig. 1084), dans laquelle OD représente le courant I , somme des deux vecteurs $I \cos \theta$ et $I \sin \theta$, et OG la force électromotrice totale, qui est égale à la tension aux bornes U augmentée des forces électromotrices de réaction dont l'une est en phase avec E , et l'autre en quadrature, augmentée en outre de la chute ohmique due à l'effet Joule et aux pertes parasites.

De l'examen du diagramme résultent les trois opérations ci-après, qui permettent de déterminer la chute de tension en fonction des constantes :

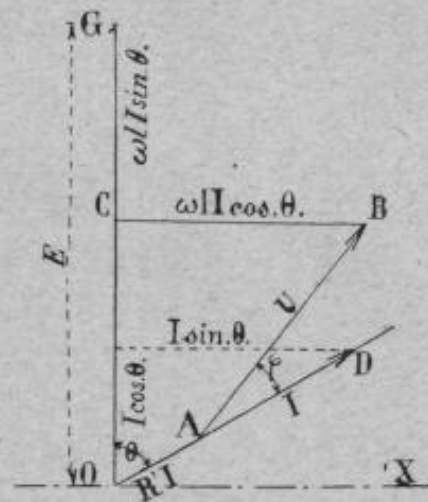


FIG. 1084.

1°

$$\tan \theta = \frac{\omega (L + l')}{R + R'};$$

$$2^{\circ} \quad E = I \left[\frac{(R + R')^2 + \omega^2 (L + l) (L + l')}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2 (L + l)}} \right];$$

$$3^{\circ} \quad U = I \sqrt{R'^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{R'^2 + \omega^2 L^2} \frac{E \sqrt{(R + R')^2 + \omega^2 (L + l)}}{(R + R')^2 + \omega^2 (L + l) (L + l')}.$$

Dans ces formules, R' est la résistance du circuit extérieur, non compris la résistance apparente due aux courants de Foucault.

Méthode Fischer-Hinnen. — L'auteur de cette méthode établit une relation entre les ampères-tours induits et les ampères-tours inducteurs, lorsqu'on s'impose la chute de tension en charge et le facteur de puissance ($\cos \varphi$).

Soient : E la force électromotrice de l'alternateur en charge, e la force électromotrice à vide, e' la force électromotrice due à la self-induction, laquelle égale $(L\omega I)$, et I le courant total de l'induit, on a :

$$E = \sqrt{e^2 - e'^2 \cos^2 \varphi} - e' \sin \varphi.$$

Appelons K la chute de tension, la formule suivante permet de déterminer le rapport de la force électromotrice de self à la force électromotrice à vide

$$\frac{E}{e} = \sqrt{1 - K^2 \cos^2 \varphi} - K \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}.$$

Soient $K = 0,60$ et $\cos \varphi = 0,85$, on trouvera :

$$\frac{E}{e} = 0,543.$$

D'autre part :

$$\frac{E}{e} = \frac{A'}{A} \frac{Nl \sqrt{2}}{2p \times i \times n} \cdot \frac{R_i}{R_a};$$

i , courant inducteur ; n , nombre de spires inductrices par circuit magnétique ; R_i , résistance magnétique du circuit inducteur, et R_a , celle du circuit induit ; N , nombre de fils montés en série dans l'alternateur, et p , nombre de paires de pôles de l'inducteur.

Les valeurs moyennes de $\frac{A'}{A}$ sont les suivantes :

Alternateurs monophasés à induit fixe et à pôles tournants...	1,14
— polyphasés —	1,44
— — à enroulements fixes et fer tournant..	1,1

$\frac{R_i}{R_a}$ est égal en moyenne à 0,77 pour les alternateurs monophasés, et 1,25 pour les alternateurs polyphasés.

Méthode Heyland. — La solution préconisée par M. Heyland est basée sur la réaction mutuelle et directe des champs de l'alternateur et de son excitatrice. Ces deux machines peuvent être amenées à réagir mutuellement de toute façon désirable, simplement en altérant les conditions magnétiques de pôles consécutifs ou, en d'autres termes, en adoptant des pôles inégaux pour des polarités opposées. La réaction sur le champ de l'excitatrice est strictement proportionnelle à une réaction d'induit de l'alternateur.

Enfin, nous signalerons, pour mémoire, les méthodes Picou, Arnold, Potier, Niethammer, Bauch et Guibert.

Dans les alternateurs à faible chute de tension, l'intensité maxima ne dépasse pas six fois l'intensité normale, et dans ceux à forte chute de tension, l'intensité du courant de court-circuit atteint tout au plus le triple de l'intensité normale.

La chute de tension varie avec la charge et le facteur de puissance du réseau, augmentant lorsque ce dernier diminue.

Pour un alternateur court-circuité à ses bornes, le courant de court-circuit dépend de la résistance ohmique de l'enroulement, de la réactance dudit enroulement et de la réaction d'induit.

Au point de vue de cette dernière, on a été conduit à utiliser des réactances externes placées aussi près que possible des bornes de l'alternateur à protéger, ou encore à intercaler à la jonction des trois branches de l'Y, dans le cas d'un enroulement en étoile. Dans la première disposition, outre leur fonction, elles protègent l'armature contre des surtensions externes ; dans la seconde, elles offrent une garantie contre son propre courant en cas de court-circuit. La première disposition produit de meilleurs effets lorsque les alternateurs ont à fonctionner en parallèle.

Les méthodes de Rothert et de Behn-Eschenburg, pour trouver la variation de tension des machines synchrones, déterminée par les caractéristiques à vide et en court-circuit, donnent des résultats différents, dépendant de la saturation du fer, et qui peuvent s'écarter de la vérité. La cause en est, selon M. Haga, que la théorie sur laquelle ces méthodes se basent est insuffisante, malgré sa simplicité.

On sait que le diagramme des tensions d'une machine synchrone s'établit de la manière suivante (*fig. 1085*), d'après la théorie bien connue de M. A. Blondel.

I = le courant de l'armature ; E_b = la tension aux bornes de la machine ; φ = l'angle de décalage extérieur ; ψ = l'angle de décalage intérieur ; IR = la chute ohmique symphasée avec le courant ; E_s = la tension de self-inductance de l'armature en quadrature avec I ; E_d = la tension engendrée par les ampères-tours du courant $I \cos \psi$, produisant

le champ transversal, perpendiculaire sur la force électromotrice fictive E induite par l'inducteur.

$E_r = E - E_s =$ la force électromotrice symphasée avec E , induite par

le champ qui résulte de la différence entre les ampères-tours de l'inducteur et les ampères-tours démagnétisants du courant $I \sin \psi$.

La réaction de l'armature est formée de quatre composantes :

IR , E_s et E_d sont indépendantes de la saturation, tandis que E_r est une fonction de la caractéristique d'excitation à vide.

IR se trouve de la façon

suivante : on mesure l'augmentation de la puissance consommée par le moteur qui entraîne la génératrice synchrone, tantôt en court-circuit, et sous une excitation telle que le courant I passe dans son armature, tantôt non excitée et à circuit ouvert.

E_s se trouve d'après la méthode de M. H. Hobart (fig. 1086) : une des phases de l'induit (si la machine est bi ou triphasée) est parcourue par le courant I de la fréquence normale, emprunté à une source auxiliaire et est placé coaxiale avec les pôles de l'inducteur. On mesure la tension aux bornes de la phase indiquée, le courant et l'énergie au moyen d'un wattmètre, et la tension aux bornes des bobines de l'inducteur produite par le champ alternatif traversant les pôles, ou d'une bobine auxiliaire, embrassant un pôle tout auprès de l'armature. Pour cette mesure, on emploie un voltmètre électrostatique, qui permet de déterminer la valeur exacte de la force électromotrice, induite par le champ alternatif. En réduisant cette tension dans le rapport des nombres de tours de la phase de l'armature et de l'inducteur ou de la bobine induite, M. Haga construit le diagramme suivant (fig. 1087) où :

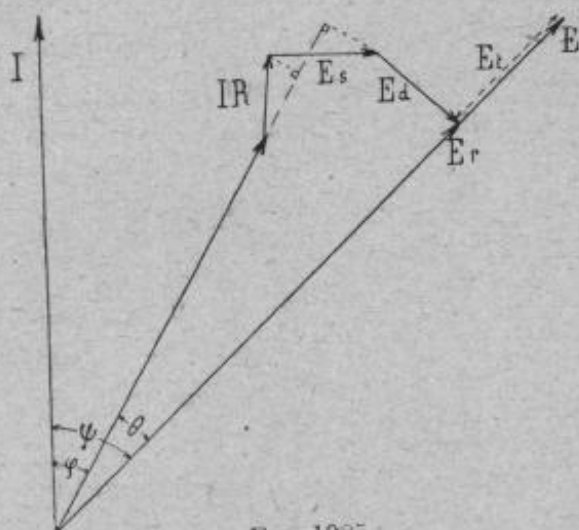


FIG. 1085.

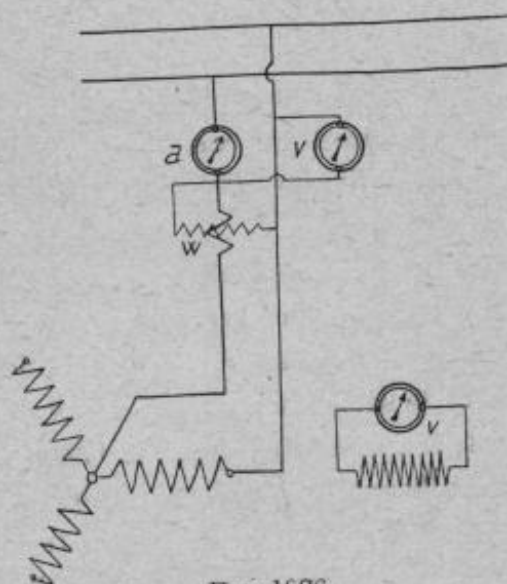


FIG. 1086.

e_1 = tension aux bornes de la phase ; I = courant de la phase ; α = angle de décalage entre e et I ; e_2 = tension aux bornes de l'inducteur ou de la bobine, en quadrature avec I .

La différence entre $e_1 \sin \alpha$ et e_2 est donc la force électromotrice, E_s , produite dans l'armature par le champ de fuite à travers les encoches et par celui déterminé par la partie de l'induit qui se trouve en dehors du fer de l'armature.

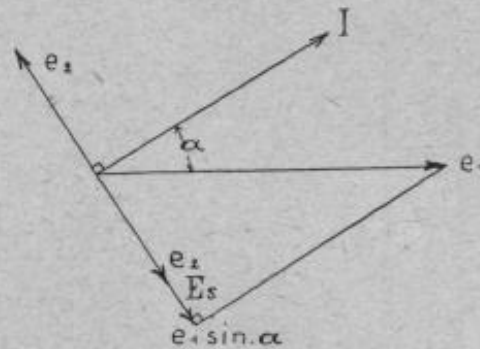


FIG. 1087.

Une autre manière presque équivalente est de mesurer la réactance de l'induit avant le montage de l'inducteur ; la valeur ainsi trouvée est un peu trop grande.

Reste à fixer encore les deux autres composantes de la réaction de l'induit. La difficulté se trouve dans la différence de réluctance pour le champ transversal donné par $I \cos \psi$ et le champ démagnétisant produit par $I \sin \psi$.

Les tensions et, par conséquent, les champs sont proportionnels aux ampères-tours, quand la machine est non saturée. La connaissance des ampères-tours est nécessaire pour déterminer E_s à l'aide de la caractéristique à vide.

L'expérience se fait ainsi : la machine synchrone est mise en mouvement avec une vitesse correspondante à peu près à la fréquence normale. Le champ est non excité, mais l'induit est fermé sur une source auxiliaire mono, bi ou triphasée, de fréquence voisine de celle de la génératrice ; le courant alternatif envoyé dans l'induit par cette source donne naissance à un champ tournant, qui glisse par rapport au champ tournant inducteur, et la fréquence de glissement est égale à la différence entre la fréquence du courant et celle de la rotation.

En réglant la vitesse de la machine, on peut diminuer à son gré ce glissement, de sorte que les appareils de mesure (ampèremètre, voltmètre et wattmètre) peuvent facilement suivre toutes les variations, qui résultent du changement de la réluctance du champ tournant. Cette réluctance étant maxima quand l'axe des ampères-tours de l'armature coïncide avec la zone neutre ($\psi = 0^\circ$), et minima quand elle coïncide avec les pôles ($\psi = 90^\circ$), l'impédance de la machine changera périodiquement. La composante déwattée de la tension est toujours la somme de E_s , indiquée ci-dessus, et de la tension induite par le champ tournant.

En lisant les trois instruments aux deux moments où la tension est minima et maxima, on peut obtenir la composante déwattée de la tension ; en retranchant de celle-ci la force électromotrice E_s d'induction du



PUISSANCE EN KILOVOLTS-AMPÈRES

ÉLÉMENTS

	75	180	320	420	560	750	1.000	1.300
ALTERNATEURS MONOPHASÉS NORMAUX : 25 PÉRIODES	ATM. 15 10 2 3,9 67,5 82,7 89,0 10,4 15,5 1,2 2,0 2.350	1-8 12 4,3 5,8 77 87,2 91,7 10,2 15,5 1,6 2,7 6.450	20 14 6,5 8,6 81,8 89,9 93,2 9,8 15,5 2,3 3,9 10.200	21 16 8,3 10,8 82,8 90,5 93,6 9,4 15,5 3,0 5,0 14.200	22 16 10,5 13,4 83,8 91,1 94,1 9,0 15,5 3,5 5,9 18.200	23 20 13,2 16,6 84,5 91,5 94,4 8,5 15,5 4,5 7,5 23.200	24 20 16,3 20,5 85,2 91,9 94,7 7,6 15,5 5,5 9,2 28.500	25 24 20,7 25,3 85,5 92 94,8 6,0 15,5 6,9 11,5 35.200
Type.....								
Nombre de pôles.....								
Pertes dans le fer en kw.....								
Pertes dans le cuivre totales en kw à pleine charge et à chaud pour $\cos \varphi = 0,8$								
Rendements en pour 100 à chaud pour $\cos \varphi = 0,8$								
0,25 de la charge.....								
0,50 —.....								
1,00 —.....								
Chute de tension à pleine charge et à chaud en pour 100 : $\cos \varphi = 1$ $\cos \varphi = 0,8$								
Puissance absorbée par l'excitation, en kw : A vide..... A pleine charge.....								
Intensité de court-circuit.....								
Poids total en kg.....								
ALTERNATEURS MONOPHASÉS NORMAUX : 50 PÉRIODES	ATM. 15 10 2,1 3,6 65,5 81,5 89,0 11 15 1,4 2,4 2.200	18 12 4,4 6,0 75,1 86,6 91,4 10,8 15 2,1 3,4 6.000	20 14 6,6 8,9 80,6 89,3 93,1 10,4 15 2,9 4,9 10.000	21 16 8,4 11,2 81,8 90,0 93,3 10 15 3,7 6,2 14.000	22 16 10,6 13,8 82,8 90,5 93,8 9,6 15 4,4 7,4 18.000	23 20 13,3 18,2 83,6 91,0 94,1 9,1 15 5,0 9,4 23.000	24 20 16,4 21,9 84,3 91,3 94,5 8,2 15 6,8 11,4 28.300	25 24 20,8 27,4 84,5 91,4 94,6 6,6 15 8,6 14,4 35.000
Type.....								
Nombre de pôles.....								
Pertes dans le fer en kw.....								
Pertes dans le cuivre totales en kw à pleine charge et à chaud pour $\cos \varphi = 0,8$								
Rendements en pour 100 à chaud pour $\cos \varphi = 0,8$								
0,25 de la charge.....								
0,50 —.....								
1,00 —.....								
Chute de tension en pleine charge et à chaud en pour 100 : $\cos \varphi = 1$ $\cos \varphi = 0,8$								
Puissance absorbée par l'excitation, en kw : A vide..... A pleine charge.....								
Intensité de court-circuit.....								
Poids total en kg.....								

courant correspondant, on obtient d'une part la valeur de E_d ($\psi = 0$), et d'autre part la valeur de E_r ($\psi = 90^\circ$), dans une machine non saturée. On déduit facilement de E_d , à l'aide de la caractéristique à vide, le nombre des ampères-tours démagnétisants pour un courant déterminé et pour $\psi = 90^\circ$.

Maintenant les quatre composantes étant connues, on peut construire pour toute sorte de charge le diagramme de M. Blondel.

Quand I , E_k et φ sont donnés, on trouve E de la manière suivante : θ est l'angle entre E et E_k ;

$$\sin \theta = \frac{E_d + E_s \cos \varphi - IR \sin \varphi}{E_k + E_s \sin \varphi + IR \cos \varphi},$$

ou, parce que θ est un angle assez petit :

$$\theta \approx 57,3 \cdot \frac{E_d + E_s \cos \varphi - IR \sin \varphi}{E_k + E_s \sin \varphi + IR \cos \varphi}.$$

Or E_d est proportionnelle à : $I \cos \psi = I \cos \varphi + \theta$, et dépend aussi de la valeur inconnue de θ ; on trouve θ par une solution graphique en dessinant une courbe reliant en coordonnées rectangulaires deux valeurs de θ évaluées, l'une d'après les valeurs prises pour le calcul de E_d , et l'autre d'après les valeurs de θ tirées par substitution de E_d dans la formule précédente ; le point d'intersection de cette courbe avec la bissectrice des axes des coordonnées donne la valeur exacte de θ .

Le tableau ci-avant renseigne sur les éléments constitutifs d'alternateurs monophasés de 75 à 1.300 kilovolts-ampères construits par la Société « La Française électrique ».

II. — ALTERNATEURS TRIPHASÉS

447. Dispositions usuelles adoptées pour l'établissement des alternateurs triphasés. — Dans les alternateurs triphasés, dont la disposition générale est d'ailleurs identique à celle des alternateurs simples, l'intervalle entre deux pôles de mêmes noms, intervalle correspondant à une période complète, est divisé en trois parties, chacune d'elles recevant une des trois séries de bobines induites *longues* ou *courtes* (fig. 1588).

Les phases des trois forces électromotrices induites sont décalées de 120° l'une par rapport à l'autre, c'est-à-dire d'un tiers de période, et l'appareil nécessite au moins trois rainures par pôle. Au lieu de placer les

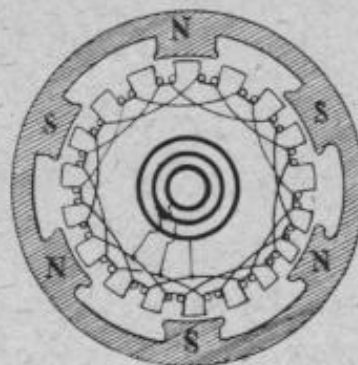


FIG. 1588.

conducteurs d'une même section dans une seule rainure, on les dispose moitié dans une rainure et moitié dans la suivante, ou même dans plusieurs rainures, disposition qui permet de construire des alternateurs de

grande puissance, par suite d'une meilleure utilisation du flux.

L'enroulement de chaque phase, divisé en plusieurs séries de bobines placées dans des logements adjacents, affaiblit dans une notable proportion l'inductance et la réaction d'induit.

Les alternateurs triphasés se font avec 6, 9 ou même 15 rainures par pôle. Le plus souvent, on emploie quatre bobines par pôle et par phase. Certains constructeurs prennent deux rainures et demie par pôle et par phase, c'est-à-dire que, dans un des champs magnétiques, les conducteurs d'une section sont logés dans deux alvéoles, et, dans le champ magnétique suivant, dans trois rainures.

L'alternateur à « pôles alternés » est adopté par presque

tous les constructeurs. Quant à l'alternateur à « flux ondulé », il est réservé pour certaines applications spéciales sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Le nombre de pôles varie suivant la fréquence désirée et la vitesse angulaire (ω) de l'organe mobile. La distance qui sépare les diverses bobines entre elles, sur les côtés de l'induit, varie selon la différence de

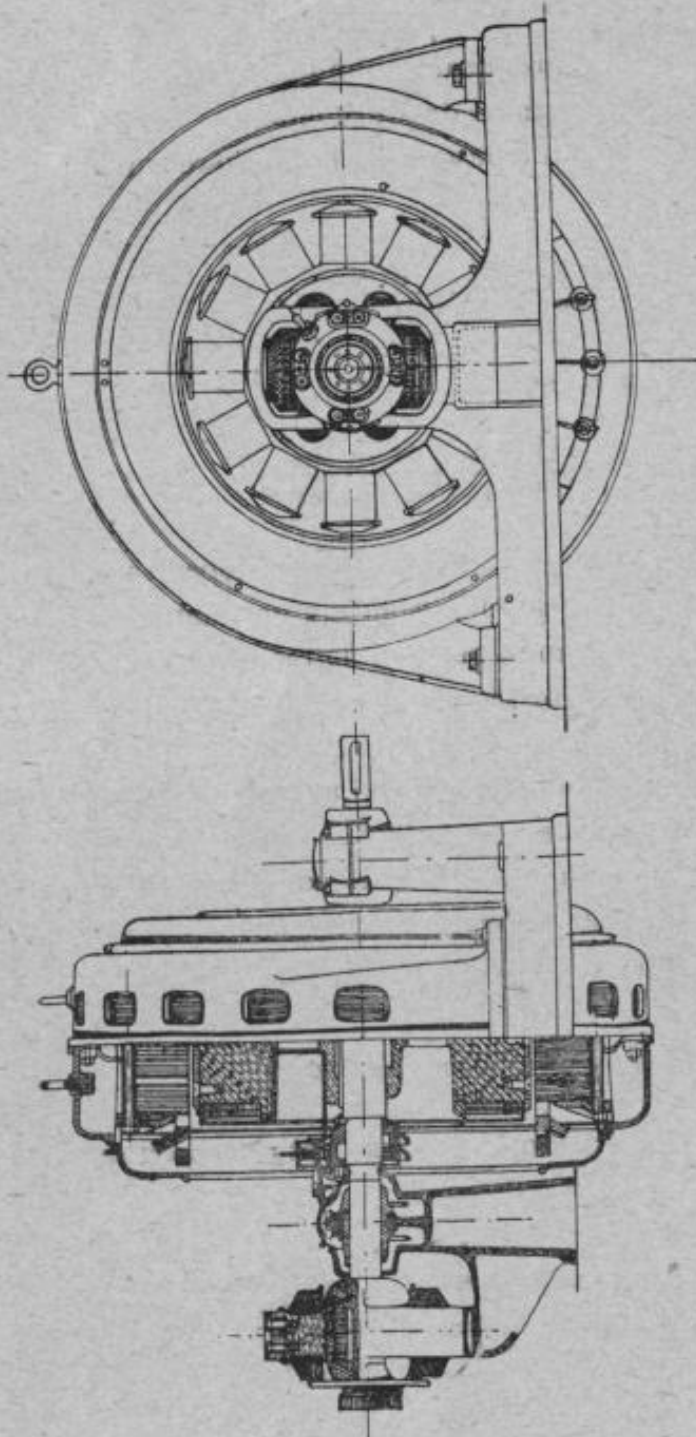


FIG. 1089.

potentiel entre elles. Dans les alternateurs à très haute tension, elle est au minimum de 0^m,10.

Les machines modernes ont généralement de 12 à 24 pôles (*fig. 1087*), ce qui, avec les fréquences usuelles, permet d'avoir des vitesses assez réduites. Dans les machines puissantes et à haut voltage, le nombre des pôles dépasse parfois le chiffre de cent. Ces dernières ont les enroulements — correspondant aux nombreux pôles — presque universellement réunis en série, au lieu d'être en parallèle. Quelquefois la moitié des bobines est montée en parallèle et fournit ainsi la moitié de la tension et un courant double.

L'isolement est fait au moyen de micanite et d'amiante exclusivement supportant sans détérioration la température de 100° que peuvent atteindre les conducteurs au centre des encoches ; la subdivision des conducteurs s'impose dès que leur section totale dépasse 200 millimètres carrés et les bobines sont imprégnées aux deux faces de l'induit.

Les bobines induites sont maintenues dans les encoches du rotor par des clavettes métalliques qui servent de dispositifs amortisseurs. De cette façon on a pu réduire les pertes supplémentaires par courts-circuits à 75 0/0 des pertes par effet Joule, en triphasé, et à 15 0/0 en alternatif simple.

Certains auteurs attribuent le claquage des bobines à haute tension à la présence de l'air interposé entre les différentes couches de fils logés dans les encoches.

De là le procédé Haefely qui consiste à enrober la partie des conducteurs intérieure aux encoches dans une enveloppe isolante, du « micarta-folium », épousant exactement la section de l'encoche et formant avec la bobine un ensemble compact à l'intérieur duquel il n'existe plus de cellules d'air.

Pour un alternateur donné, la chute de tension varie avec la charge et également avec le facteur de puissance du réseau, augmentant lorsque ce dernier diminue. C'est pourquoi la réaction d'induit et la dispersion augmentent beaucoup, lorsque le facteur de puissance diminue. Aussi, dans un alternateur bien établi, la chute de tension, qui est de 5 0/0 et quelquefois moindre lorsque la charge n'est pas inductive, atteint jusqu'à 30 0/0 lorsque le facteur de puissance n'est que 0,70 à 0,60.

Le montage en étoile convient particulièrement pour les alternateurs et les moteurs triphasés dans les transmissions d'énergie pour que la transmission s'effectue sous une tension $\sqrt{3}$ fois ou 1,73 0/0 supérieure à l'énergie qui existe aux bornes de chaque enroulement de l'alternateur. Il convient de remarquer que le montage en étoile avec trois conducteurs n'est pas auto-régulateur ; pour réaliser cette condition, il faut relier par un quatrième conducteur le centre des étoiles. Avec ce système de distribu-

tion, l'intensité du courant dans la ligne est réduite dans le rapport de $\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$, et le poids de cuivre nécessaire n'est que les 0,33 de celui qu'exige une distribution à courant alternatif simple.

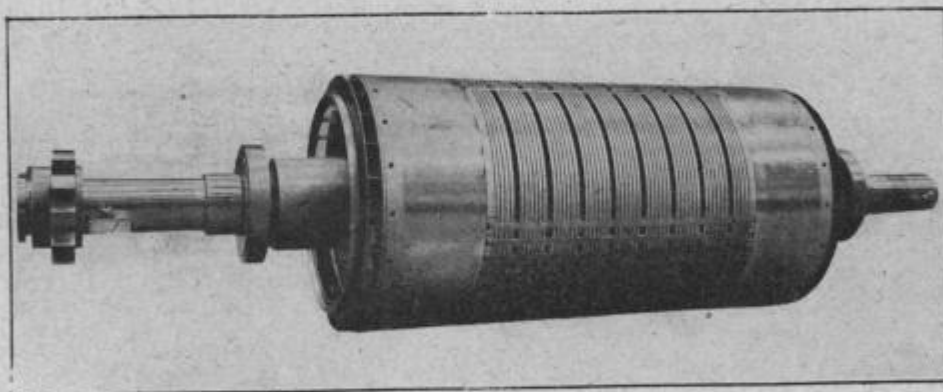


FIG. 1090. — Rotor d'un alternateur triphasé 2.500 kw., 8.000 volts, 42 périodes, 3.000 tours (C^{ie} Électr.-Mécanique).

La faveur dont jouit actuellement l'alternateur asynchrone est justifiée par les qualités qu'il présente, telles que : excellente construction mécanique, rendement élevé, caractères favorables en ce qui concerne les courts-circuits et la résonance, puissante action d'amortissement des oscillations, absence d'enroulements en rotation, de bagues collectrices et de circuits d'excitation, facilité de marche en parallèle et de la répartition des charges par le régulateur.

En traitant des stations centrales (chapitre xxvii), nous aurons l'occasion de nous étendre d'une façon plus particulière sur cette remarquable machine.

448. Harmoniques des courants alternatifs. — Dans un alternateur ou un moteur synchrone, l'onde de flux magnétique se déforme gravement quand la charge augmente, et cela d'autant plus que le facteur de puissance est plus élevé ; cette déformation donne lieu à des harmoniques supérieurs dans l'onde de force électromotrice engendrée. Ainsi la réaction et l'inductance de l'induit ⁽¹⁾ ont pour résultat non seulement

⁽¹⁾ On connaît les méthodes de M. Blondel et de M. Fischer-Hinnen pour analyser expérimentalement la réaction d'induit.

Elles exigent l'emploi de bobines de self — ou, avec la variante de Coales, de transformateurs, — et, d'autre part, les constructions graphiques auxquelles elles aboutissent ne donnent le résultat cherché qu'avec une assez grande indétermination, lorsqu'on a affaire à des machines dont la caractéristique est rapidement ascendante ; dans ce cas, en effet, les deux lignes dont il s'agit de prendre l'intersection ne se coupent pas assez nettement.

une perte de tension, mais encore font subir à la courbe de force électromotrice des alternateurs des effets qui amènent des phénomènes de résonance ayant pour cause la variation des harmoniques sous l'influence des variations de la charge et des changements d'inductance et de capacité dus aux appareils employés.

M. Kapp a cherché à s'affranchir de ces deux difficultés, et voici la méthode qu'il propose.

On fait marcher la machine en court-circuit, sans bobines de self, et on règle son excitation de manière que le courant garde la même valeur *dans une phase déterminée*, tandis qu'on met successivement toutes les autres phases en circuit.

En faisant varier le courant qui traverse les autres phases, on fait également varier les contre-ampères-tours produits par l'armature, tandis qu'en même temps la tension de réactance de la phase particulière qu'on a choisie (celle où l'on maintient le courant constant), reste la même.

La force électromotrice à circuit ouvert étant (si l'on néglige la très petite correction due à la résistance de l'induit) la somme de la tension de réactance et de la chute de tension produite par les contre-ampères-tours de la réaction d'induit, on pourra séparer les deux termes correspondants en faisant des lectures dans deux conditions différentes.

Prenons, par exemple, le cas du *montage en étoile*, à centre accessible (dans ce cas, la solution de M. Kapp est absolument correcte ; elle n'est approximative que dans le cas du montage en triangle). Voici comment on opérera : le centre accessible O est connecté par l'intermédiaire d'interrupteurs S_1, S_2, S_3 , aux bornes des trois phases.

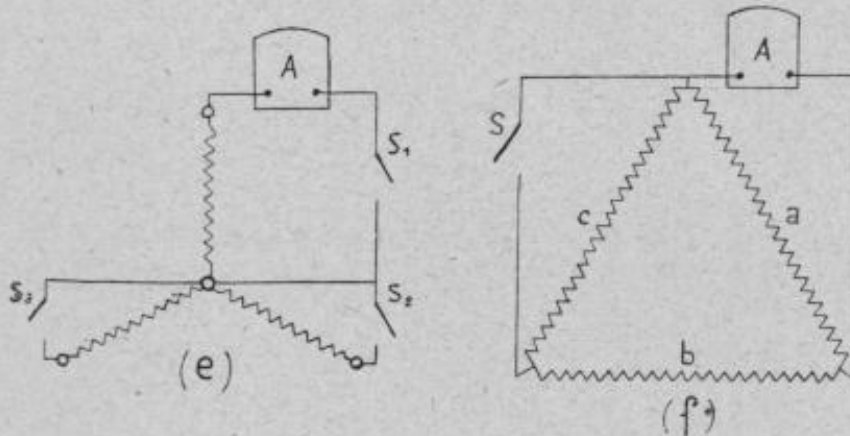


FIG. 1091.

Pour la *phase particulière* choisie, soit *a* (dispositif *e*, fig. 1091), le circuit de connexion comprend un ampèremètre A.

On lance la machine à sa vitesse normale, et on relève de la manière ordinaire la caractéristique à vide, les trois interrupteurs S_1, S_2, S_3 , étant ouverts. Puis on ferme S_1 , et on règle l'excitation de manière à ce que le courant qui traverse la phase *a* soit celui de la pleine charge. En même temps on note l'excitation et on déduit la force électromotrice correspondante à l'aide de la caractéristique à vide.

On ferme enfin les deux autres interrupteurs. Des courants de court-circuit circulent alors dans les deux autres phases aussi bien que dans *a*, et l'action démagnétisante de l'induit se trouve accrue, de telle sorte que l'indication de l'ampèremètre est plus faible qu'auparavant ; on la ramène à sa valeur primitive en augmentant l'excitation, et, de nouveau, on note cette excitation et la force électromotrice correspondante, à l'aide de la caractéristique.

On a donc deux lectures de forces électromotrices et une lecture d'intensité, c'est-à-dire tout ce qu'il faut pour séparer la tension de réactance et les contre-ampères-tours.

Pour le *montage en triangle*, on emploie le dispositif *f* avec un seul interrupteur S , *a* étant encore la *phase particulière* choisie et A l'ampèremètre.

Dans les alternateurs ordinaires, les harmoniques sont tous de rang impair, ceux d'ordre 3 et 5 sont introduits par les pièces polaires, tandis que les harmoniques d'ordre élevé proviennent de la denture.

Le troisième harmonique est presque toujours le plus important, et il est suffisant pour produire la résonance à un degré dangereux, s'il arrive à coïncider avec la fréquence du système ⁽¹⁾.

Le moyen le plus simple, pour éviter les harmoniques provenant de la

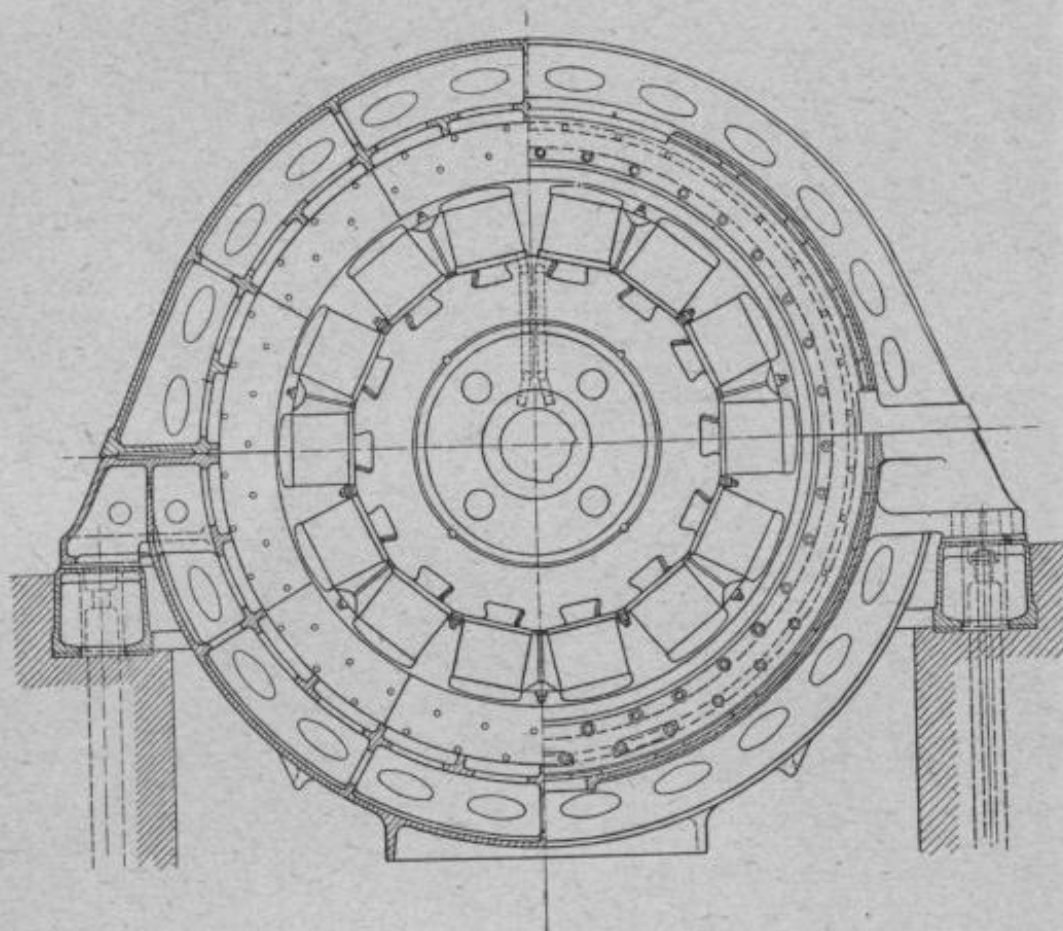


FIG. 1092. — Alternateur triphasé de 5.625 K. V. A.

denture, consiste à employer un grand nombre d'encoches presque fermées. On peut employer également un induit portant une dent de plus que celle nécessaire au bobinage, ce qui fait chevaucher la denture sous tous les pôles.

Les harmoniques peuvent être amplifiés soit par magnétisation ou diammagnétisation des dents de l'armature, provenant des courants qui par-

⁽¹⁾ Le problème de la décomposition d'une courbe périodique en ses harmoniques se rencontre très fréquemment dans l'étude des machines à courants alternatifs et cette décomposition est importante. On en trouve un calcul très simple dans la *Revue électrique* du 17 novembre 1906, par K. H. Haga.

courent l'induit, soit par résonance proprement dite des harmoniques ; mais c'est seulement avec des harmoniques d'ordre élevé qu'il peut se produire les résonances qui, comme on le sait, fatiguent l'isolant, diminuent le rendement des alternateurs, altèrent la régularisation et rendent difficile la marche des moteurs.

Les moteurs asynchrones, les transformateurs statiques, les bobines de réaction peuvent provoquer des harmoniques par des déformations, dues à diverses causes, qu'ils font subir à la courbe du courant en déterminant une réaction sur la courbe de tension. Les commutatrices et les moteurs à collecteur donnent lieu à des harmoniques provenant des variations ou oscillations du flux produites par la commutation.

Dans les alternateurs asynchrones, il ne se produit pas de déformation du champ par réaction d'induit, et tant que le fer du circuit magnétique n'est pas saturé, leur onde de force électromotrice est à peu près sinusoïdale à toute charge. Il n'y a donc pas de courants locaux entre les alternateurs asynchrones, et ils ne tendent pas non plus à donner lieu à des résonances dans le réseau. En outre, l'alternateur asynchrone est l'amortisseur le plus énergique qu'on puisse avoir. Une installation possédant des alternateurs asynchrones alimentant des commutatrices est presque entièrement à l'abri des courants oscillants et de la résonance.

Dans les usines génératrices d'importance secondaire, fournissant directement l'énergie aux circuits de lumière et de force motrice, les conditions ne sont pas aussi favorables aux alternateurs synchrones, surtout si le facteur de puissance est bas.

Pour mettre un réseau en charge, il convient de commencer par donner à l'alternateur sa pleine excitation, ensuite sa pleine vitesse. La méthode mise en charge la plus sûre consiste à interposer une résistance liquide, que l'on supprime graduellement dans l'espace de quelques secondes. (Nous rappellerons incidemment que, dans les installations à haute tension, les interrupteurs à huile sont préférables à ceux à air, car ils permettent une rupture graduelle qui a lieu au moment où l'intensité passe par zéro, condition très heureuse pour la transmission à longue distance et à haute tension.) Lorsqu'on charge un alternateur, l'amplitude des harmoniques de la courbe de tension peut être influencée à la fois par le circuit extérieur et par les réactions qui se produisent dans l'alternateur lui-même.

Un alternateur triphasé à une rainure par pôle et par phase donne surtout les harmoniques qui ont 5 fois à 7 fois la fréquence du terme fondamental ; les alternateurs à deux rainures par phase et par pôle, les harmoniques 11 et 13, et ceux à trois rainures par pôle et par phase, les harmoniques 17 et 19, et ainsi de suite.

On peut atténuer les harmoniques, et même en supprimer pratiquement

quelques-uns en répartissant les conducteurs d'induits en plusieurs bobines par pôle et par phase, en employant des induits à encoches presque fermées, en inclinant les encoches de l'induit par rapport à la surface polaire et en donnant aux pôles des proportions convenables.

La self-induction d'un circuit, opposant une impédance aux ondes du courant proportionnelle à la fréquence, a pour résultat d'atténuer les amplitudes des harmoniques supérieures, et de faire tendre les courants vers la forme sinusoïdale.

Les *étouffeurs d'harmoniques*, suggérés par M. M. Leblanc, consistent

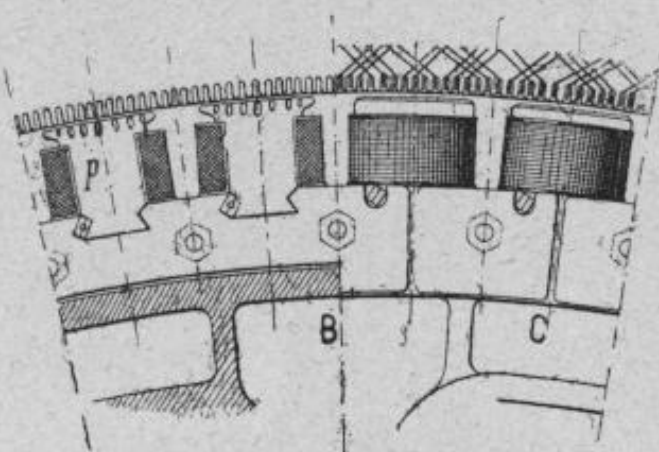


FIG. 1093. — Circuits amortisseurs.

à disposer, à la surface des inducteurs des alternateurs ou des circuits induits des machines d'induction, des circuits fermés sur eux-mêmes et très résistants. L'emploi des étouffeurs d'harmoniques n'est pas d'ailleurs incompatible avec celui des circuits amortisseurs (fig. 1093).

Dans le cas d'un alternateur triphasé, les surtensions dues aux harmoniques peuvent être rendues beaucoup plus faibles qu'avec du courant monophasé (20 0/0 avec l'harmonique 11 ; 38 0/0 avec l'harmonique 5).

La Société alsacienne de Constructions mécaniques donne aux courbes de tension de ses alternateurs une forme sinusoïdale, en découpant en zigzag les arêtes des pièces polaires, de manière à faire varier à volonté l'intensité du flux sous les cornes de ces dernières, tout en réalisant la continuité de l'entrefer. La Société Westinghouse arrive à s'opposer à la production des harmoniques de premier rang en faisant varier l'écartement des rainures successives. On pourrait obtenir le même résultat en faisant varier le nombre des spires des diverses bobines constituant l'enroulement induit.

D'après Steinmetz, il semblerait que l'on attache trop d'importance à la forme de la courbe du courant ou de la tension des alternateurs, en cherchant à la rapprocher le plus possible d'une sinusoïdale, car la forme plus ou moins pointue fournit, pour le même flux et le même nombre de spires, une puissance utile plus grande que les alternateurs donnant un courant sensiblement sinusoïdal, et les moteurs recevant ces courants non sinusoïdaux absorbent moins par hystérésis et ont un meilleur rendement.

Pour se rendre compte de la valeur des harmoniques d'une force électromotrice complexe on peut se servir utilement des ondographes ou oscillographes. On dispose à cet effet un condensateur de la plus grande capacité possible en dérivation sur la force électromotrice à analyser, et on examine la forme du courant de charge qui exagère les harmoniques supérieurs et indique, par le nombre de dents de la courbe obtenue, l'harmonique supérieur important et limite ainsi les recherches.

449. Couplage en parallèle des alternateurs. — Pour opérer le couplage en parallèle des alternateurs, c'est-à-dire mettre en circuit sur un même réseau un alternateur avec un ou plusieurs autres en fonctionnement, on met le premier en marche à sa vitesse normale et, en agissant sur le rhéostat d'excitation, on l'amène à la même vitesse que celui ou ceux en service ; en même temps, on opère la mise en phase des deux machines au moyen de lampes de couplage.

On égalise les forces électromotrices des deux alternateurs en se basant sur les indications des ampèremètres et en augmentant l'excitation de l'alternateur qui débite le courant le plus intense ; en opérant en sens inverse pour l'autre, on continue à agir sur les rhéostats d'excitation jusqu'à ce que l'on rende minimum la somme des indications des deux ampèremètres. Pour retirer un alternateur du circuit, on effectue les opérations du couplage en sens inverse.

Dans le couplage en parallèle des alternateurs, il y a lieu de considérer que c'est de l'écart angulaire que dépend l'avance ou le retard de la force électromotrice d'un alternateur par rapport à la différence de potentiel de l'autre alternateur avec lequel il doit être couplé, car la vitesse des machines doit être rigoureusement la même pour obtenir des fréquences égales.

Pour assurer un bon couplage en parallèle, il faut que le coefficient d'irrégularité (différence entre la vitesse périphérique maxima et la vitesse périphérique minima divisée par le double de la vitesse moyenne par tour) ne soit pas supérieur à $1/150$ pour une fréquence entre 50 et 60 et pour une commande par courroie, et à $1/250$ pour une commande directe. Avec des fréquences moins élevées, le coefficient peut être pris plus grand et *vice versa*.

Les battements des lampes indicatrices de phases permettent d'apprécier les variations de vitesse qui peuvent exister entre deux machines. Avec les alternateurs triphasés, les trois lampes sont reliées à deux petits transformateurs statiques triphasés. On dispose ces lampes de façon que, lorsque les alternateurs sont en concordance de phase, une lampe soit éteinte et que les deux autres possèdent le même éclat sans

dépasser le rouge, ou que les trois lampes s'allument successivement dans un ordre déterminé, tant que la vitesse de l'alternateur est trop grande, et passent par un ordre d'allumage inverse quand la vitesse de l'alternateur tend à baisser.

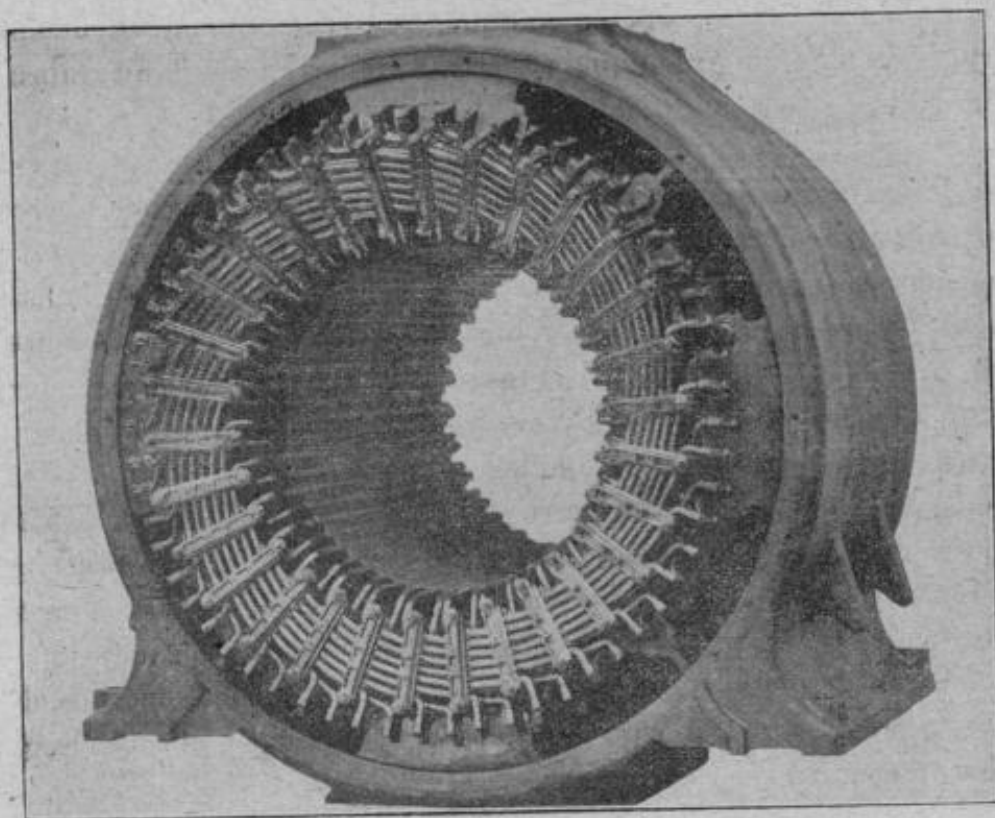


FIG. 1094. — Stator d'un alternateur triphasé 3.000 kw., 15 tours.
(C^{te} Électro-Mécanique).

La disposition donnée par la (fig. 1095) permet de n'employer que deux lampes par machine, et, si les deux points neutres sont reliés entre eux, une seule lampe suffit.

Le courant excitateur est fourni par la génératrice à courant continu E en dérivation, munie de son rhéostat r . Les deux enroulements M de l'excitation des génératrices triphasées sont couplés en parallèle et réglés séparément par un rhéostat R.

Pour mettre une machine en charge, l'autre travaillant sur le réseau, on règle d'abord l'excitation et la tension convenables en agissant sur R, et ensuite on ferme l'interrupteur tripolaire en se servant des lampes de phase. Pour faire varier la puissance, on agit sur l'admission de l'eau dans les turbines. Les régulateurs R servent aussi à maintenir la tension de tout le réseau à une valeur convenable, c'est-à-dire à compenser l'accroissement de la perte de tension produite lorsque le débit augmente.

Si on veut arrêter une génératrice, on diminue la charge jusqu'à ce que le wattmètre marque zéro, cela en diminuant l'admission ou en fermant graduellement les vannes des turbines; puis, à l'aide d'un des régulateurs R, on amène le courant à zéro.

Ceci fait, on peut séparer la machine du réseau au moyen du tripolaire, le courant d'excitation ne devant être interrompu qu'après. Ce n'est que lorsqu'on veut arrêter la dernière génératrice et qu'elle fournit encore du courant qu'il est à recomman-

der de diminuer d'abord l'excitation pour réduire le courant et la tension, avant d'ouvrir l'interrupteur.

Indépendamment des lampes, on installe soit un voltmètre, soit un ampèremètre reliés à de petits transformateurs statiques. Alors les montages sont disposés de telle sorte que, lorsque la force électromotrice de l'alternateur à coupler est en concordance de phase avec la tension du circuit extérieur, les lampes sont éteintes et l'aiguille du voltmètre marque zéro, ou que, lorsque les phases des forces électromotrices respectives des deux alternateurs sont en concordance exacte, l'ampèremètre n'indique le passage d'aucun courant. Avec les alternateurs de grande puissance et de grandes dimensions, on peut utiliser, pour le couplage, un phasemètre ordinaire.

Le couplage en parallèle s'effectue d'autant plus rapidement que les alternateurs ont une résistance intérieure plus faible et que les machines ont une plus grande vitesse angulaire, c'est-à-dire un plus petit nombre de pôles. C'est ce qui explique certaines difficultés que l'on rencontre pour la mise en parallèle des alternateurs de grande puissance.

Le montage des lampes de phase en courant triphasé se fait exactement comme en monophasé. Pour les courants de basse tension, on n'a qu'à brancher trois lampes comme l'indique le schéma de la (fig. 1096). Si les trois lampes *l* s'allument et s'éteignent en même temps, le montage est

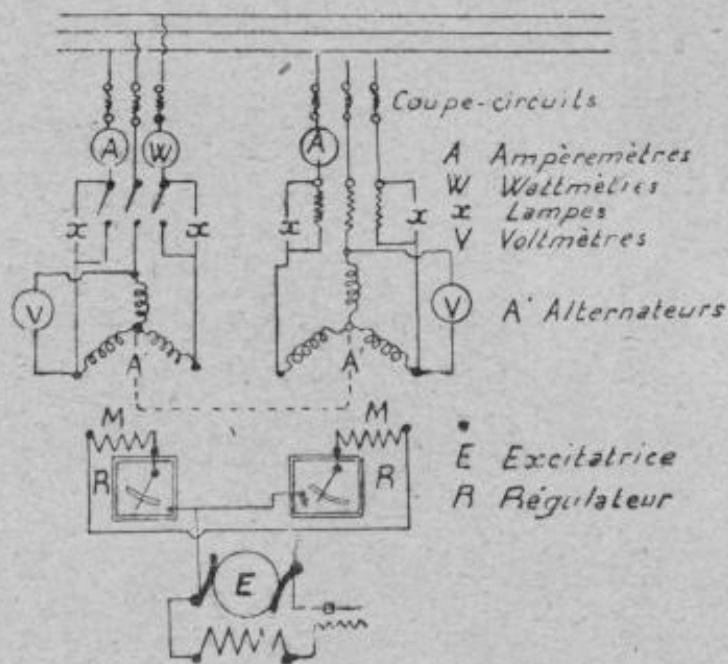


FIG. 1 95.

en bon ordre et on peut fermer l'interrupteur lors de l'extinction parfaite des trois lampes. Ce montage a pour but de se rendre compte de la corres-

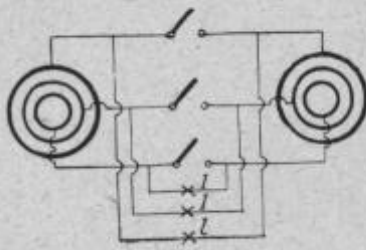


FIG. 1096.

pondance parfaite des connexions du couplage. En exploitation courante, une ou deux lampes suffisent comme en alternatif simple.

Pour la haute tension, il suffit aussi d'un transformateur monophasé par machine, que l'on intercale soit entre le fil neutre et un fil extrême, soit entre deux fils extrêmes.

Indépendamment des lampes, il est utile d'installer un voltmètre ; alors un des transformateurs est monté en dérivation sur les barres de l'alternateur en service, et l'autre en dérivation sur les bornes de l'alternateur à coupler. Les circuits secondaires des transformateurs sont reliés de façon que lorsque la force électromotrice de l'alternateur à coupler est en concordance de phase avec la tension du circuit extérieur, c'est-à-dire en opposition de phase par rapport au circuit interpolaire des alternateurs, les lampes sont éteintes et l'aiguille du voltmètre est au zéro.

L'emploi d'un ampèremètre monté comme l'indique la (fig. 1097) est préférable à l'usage du voltmètre, car il permet de faire très rapidement l'opération du couplage.

Les deux secondaires des transformateurs t et t' sont montés en opposition, de sorte que, quand le synchronisme est atteint, l'ampèremètre n'est traversé par aucun courant. Les écarts de vitesse dépendent de l'intensité du courant qui se développe dans le circuit des secondaires, laquelle dépend de la valeur donnée à la résistance r . On ferme l'interrupteur i seulement au moment où les lampes de phase indiquent que l'on est sur le point d'atteindre le synchronisme parfait.

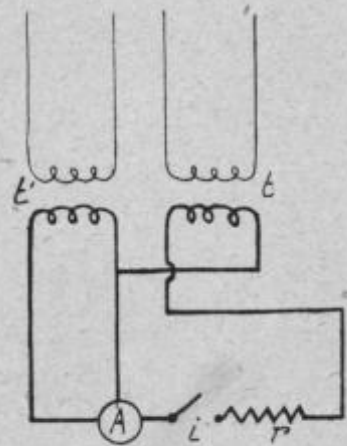


FIG. 1097.

La maison Siemens et Halske a fait breveter le dispositif suivant pour les installations à courant triphasé. Les lampes de phase s'allument dans un ordre déterminé lorsque l'alternateur à coupler a une vitesse angulaire trop grande, et s'allument en ordre inverse lorsque la vitesse est trop faible. Les lampes a , b , c (fig. 1098) sont reliées aux secondaires de deux transformateurs triphasés t et t' . Lorsque les alternateurs sont au synchronisme, la lampe a est éteinte, et celles b et c ont le même éclat ne dépassant pas le rouge, parce qu'il y a un décalage de phase de $1/3$ de période entre les tensions en 2 et 3', et en 3 et 2'. Tant que la vitesse de l'alternateur est

trop grande, on voit d'abord s'allumer la lampe *b*, puis *a*, et enfin *c*. Si, au contraire, la vitesse angulaire de l'alternateur est trop faible, l'ordre d'allumage des lampes est inversé.

Les appareils dits synchronoscopes peuvent avec avantage être substitués aux indicateurs avec lampes ; ils sont de deux systèmes, celui dit à induction et le système Lincoln.

Le premier de ces appareils est tout indiqué lorsque l'installation possède des transformateurs-réducteurs pour appareils de mesure ; comme il n'absorbe que 10 watts à peine, il peut être relié aux appareils de mesure.

Le synchronoscope Lincoln est surtout applicable aux stations centrales un peu considérables, ses indications étant visibles à une certaine distance. Il a été utilisé pour la mise en parallèle des alternateurs de 5.000 chevaux de la Centrale du Niagara. Cet appareil est constitué par une bobine fixe mise en dérivation, par l'intermédiaire d'un transformateur-réducteur, sur les barres du tableau de distribution ; à l'intérieur de cette bobine est un équipage mobile comportant deux bobines *a* et *b* disposées à angle droit et portant un index ; celles-ci sont montées en dérivation aux bornes de l'alternateur à coupler, par l'intermédiaire d'un transformateur-réducteur. Le montage est opéré

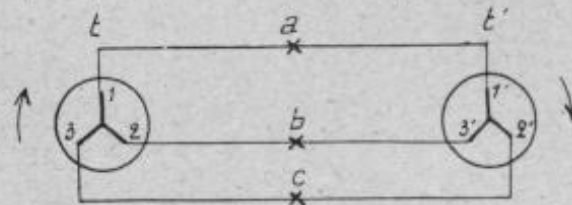


FIG. 1093.

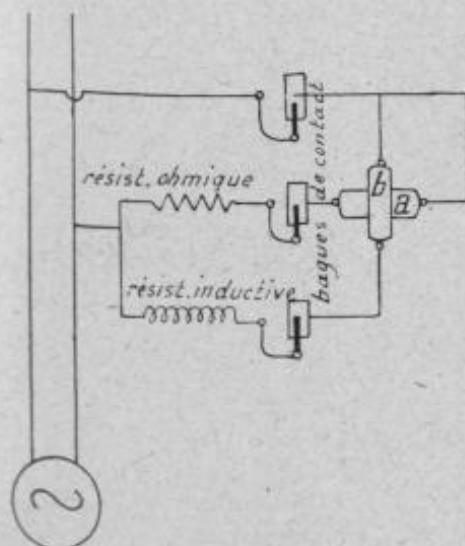


FIG. 1099.

comme le montre le schéma (fig. 1099). Les phases de l'intensité des courants qui passent dans les bobines *a* et *b* sont artificiellement décalées d'environ un quart de période par l'introduction d'une résistance ohmique et d'une grande résistance inductive. Le système, en se déplaçant dans un sens, indique une avance de phase et un retard dans l'autre sens avec une vitesse d'autant plus grande que l'on se trouve plus éloigné du synchronisme. Lorsque l'index s'arrête dans la position correspondant au parallélisme

des bobines *a* et de la bobine fixe, le synchronisme est obtenu, et on peut mettre l'alternateur en circuit.

Enfin, nous signalerons un système d'appareil automatique destiné à provoquer, sans le secours d'aucun opérateur, le couplage de deux alternateurs ; de plus, il découple les mêmes alternateurs si la fréquence ou

la tension viennent à varier brusquement. La (fig. 1100) donne le schéma du coupleur automatique, et la (fig. 1101) le montage de l'appareil.

Un fléau E oscillant autour du point L supporte, à chacune de ses extrémités, deux noyaux cylindriques en fer. Ces noyaux peuvent plonger chacun dans un solénoïde formé de 8 bobines diversement couplées.

Chaque solénoïde comporte deux séries de quatre bobines alternées placées les unes au-dessus des autres. L'une de ces séries est reliée à un des alternateurs par les bornes 1 et 2, l'autre série à l'autre alternateur à coupler par les bornes 3 et 4.

Les connexions sont disposées de telle sorte que, lorsque les alternateurs sont en coïncidence de phase, les champs magnétiques produits par

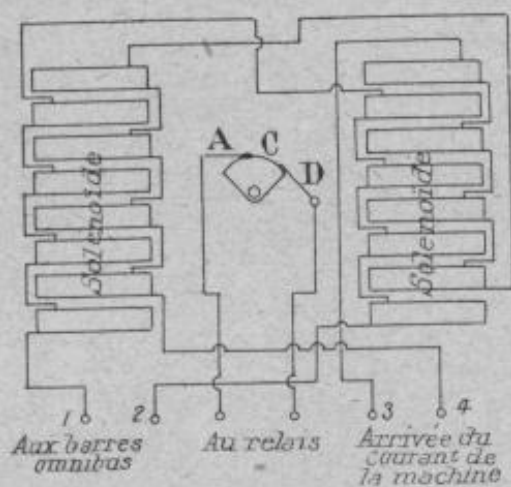


FIG. 1100.

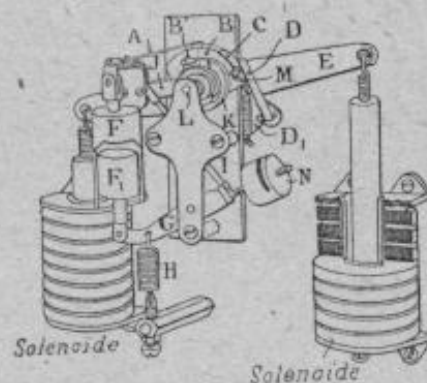


FIG. 1101.

les deux séries de bobines du solénoïde de gauche sont en opposition et se neutralisent, tandis qu'au même moment les champs des deux séries de bobines du solénoïde de droite s'ajoutent et attirent le noyau de fer doux. Lorsque, au contraire, les alternateurs sont en opposition de phase, le solénoïde de gauche devient actif, tandis que celui de droite n'agit plus sur son noyau. Enfin, lorsque le déphasage n'est que de 90° , les attractions restent les mêmes et les noyaux sont également attirés.

Le phénomène de la mise en concordance de phases se produit donc sur cet appareil par une série d'oscillations du fléau analogues aux extinctions et allumages des lampes de phase. On a utilisé ce mouvement, en particulier, lorsqu'il devient de plus en plus lent, pour actionner le contact d'un relais commandant l'interrupteur de couplage.

Dans ce but, le fléau peut actionner un secteur B portant des contacts, par l'intermédiaire d'un amortisseur à air F.

Tant que les oscillations du fléau sont rapides, l'air ne peut s'échapper assez vite du cylindre F, et ce dernier entraîne le secteur B. Lorsque les oscillations se font lentement, l'air s'échappe peu à peu du cylindre, et le

secteur tend à rester immobile ; le fléau continuant sa course, un balai A porté par lui vient toucher au contact C du secteur et ferme le circuit du relais et le couplage se produit.

Si la vitesse d'une des machines vient ensuite à varier accidentellement, un déphasage se produira, le fléau basculera violemment vers la gauche, et le contact avec le relais sera rompu par le balai D ; le couplage sera supprimé.

Les procédés « stroboscopiques » peuvent être utilisés comme indicateurs de vitesse et non de phase. Lorsque le couplage se fait dans la soirée, l'emploi de l'arc est d'un bon service ; pour cela, on projette la lumière sur l'inducteur mobile de l'alternateur, et, lorsque la vitesse angulaire de l'alternateur à coupler prend sa valeur normale, les pôles paraissent fixes. Mais, si la vitesse est trop grande ou trop faible, on a nettement la vision d'un mouvement en avant ou d'un mouvement en arrière.

Un autre moyen stroboscopique, permettant d'apprécier la vitesse angulaire de l'alternateur à coupler, consiste à regarder son inducteur à travers l'inducteur et l'alternateur en marche, ce qui donne lieu à une série d'éclipses se reproduisant à intervalles réguliers. Lorsque les vitesses des deux alternateurs sont identiques, les pôles des deux machines paraissent immobiles et le phénomène peut être facilement observé à la lumière du jour ⁽¹⁾.

On peut aussi réaliser le couplage des alternateurs à l'aide de « synchroniseurs électrostatiques », qui s'accouplent au circuit à haute tension, soit directement, soit indirectement par l'intermédiaire d'un condensateur : une aiguille est influencée par deux couples de quadrants reliés respectivement avec les deux alternateurs, de façon à marquer zéro lorsque les actions des deux couples égaux et de sens contraire s'annulent ; à ce moment, on peut fermer l'interrupteur.

Pour permettre la fermeture sans danger, à un moment quelconque, de

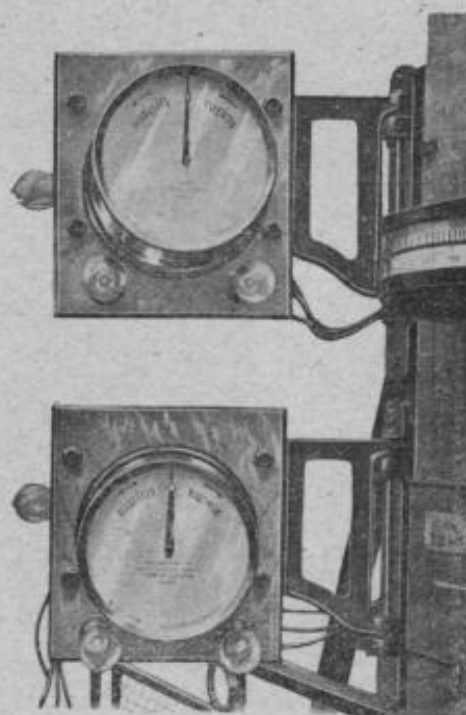


FIG. 1102. — Indicateur synchroniseur Thomson-Houston.

⁽¹⁾ La limite d'application des méthodes stroboscopiques est donnée par la possibilité de compter les éclats. Si on fixe cette limite à trois par seconde, pour une machine à quatre pôles, le système de disque stroboscopique ayant autant de secteurs noirs que le moteur a de pôles, on peut mesurer des glissements de 30/0 à la fréquence 50. Le disque à un seul secteur permet d'atteindre la même limite avec le disque à une seule fente (Kapp) ; la limite est de 120/0, à la même fréquence que ci-dessus.

l'interrupteur qui doit coupler deux machines, et sans qu'on ait à se préoccuper de l'égalité de vitesse angulaire ou d'excitation des machines, MM. Morgan, Brooks et Akers constituent l'impédance à mettre en série entre les deux machines à synchroniser par une bobine dépourvue de tout noyau de fer.

Quand les alternateurs sont commandés par des turbines, le couplage s'opère aisément.

La répartition de la charge sur les deux alternateurs, une fois le couplage effectué, est une opération délicate et qui demande une certaine habileté. On doit manœuvrer les rhéostats d'excitation non seulement jusqu'au point où les ampèremètres de chaque alternateur indiquent la même intensité, mais jusqu'à ce que la somme des débits soit égale à celle que marque l'ampèremètre principal. Ceci pour le cas où les alternateurs sont commandés par un même moteur. Quand les alternateurs ont chacun leur moteur spécial, on ne peut que s'en tenir à obtenir de rendre minima la somme des deux lectures de chacun des ampèremètres car, pour avoir une égalité absolue, il faudrait agir sur les moteurs qui commandent les alternateurs. En résumé, l'opération de la répartition de la charge consiste à égaliser les forces électromotrices des alternateurs, puis en se basant sur les indications des ampèremètres, augmenter l'excitation de

l'alternateur qui est le plus chargé et opérer en sens inverse pour l'autre. On continue à agir graduellement sur les rhéostats d'excitation jusqu'à ce que les ampèremètres ne laissent subsister qu'une petite différence entre les indications données par chacun d'eux.

Parmi les dispositifs existant aujourd'hui pour la mise en parallèle automatique des alternateurs, un des plus simples est représenté par la (fig. 1103) ; il a été breveté par Faulhaber, à Duisburg-sur-Rhin. On emploie des transformateurs qui possèdent un enroulement secondaire divisé ; le pôle permanent d'un électro-aimant porte une tige filetée à vis sans fin

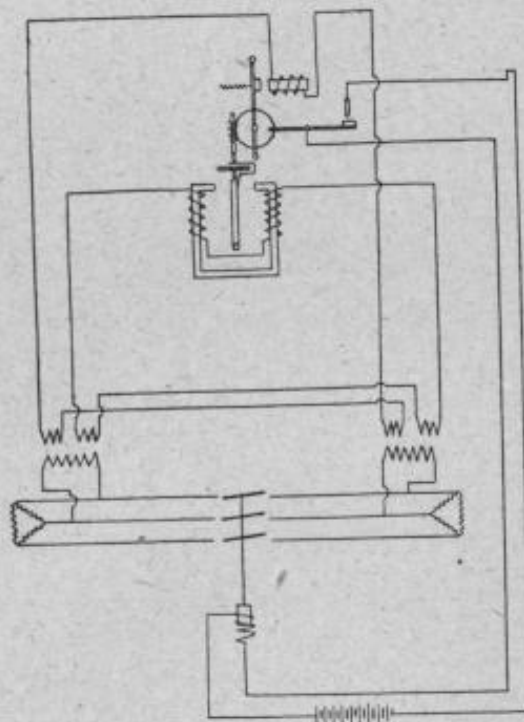


FIG. 1103.

qui attaque une roue dentée et une petite roue d'arrêt. Deux cliquets fixes sont en rapport avec cette dernière. La roue dentée tourne dans une fourche mobile et supporte une tige d'entraînement ; elle est obligée,

à cause d'un poids directement relié à l'axe, de revenir constamment dans sa position normale. La fourche, par le moyen d'un ressort, est tournée de telle sorte que la roue dentée pénètre dans la tige filetée et l'électro-aimant, par contre, dès qu'il est excité, dégage la roue dentée de la tige. Les enroulements secondaires des transformateurs sont couplés en série avec l'électro-aimant de telle manière que les tensions s'additionnent, quand les machines sont à égalité de fréquence et de phase.

450. Rendement des alternateurs. — Le rendement des alternateurs s'obtient comme pour les dynamos, c'est-à-dire en mesurant les deux facteurs (puissance électrique utile et puissance mécanique dépensée), ou en évaluant la puissance utile et la puissance perdue. Pour la mesure directe, on fait débiter l'alternateur sur une résistance variable, en mesurant au moyen d'un wattmètre la puissance électrique utilisée dans le circuit extérieur, et on évalue la puissance mécanique à l'aide d'un dynamomètre de transmission. Lorsque les circuits à dépense sont également chargés, la puissance utile est égale à trois fois la puissance moyenne d'un circuit, et la mesure ne se fait que sur un point. Mais, si les circuits ont des charges inégales, il est indispensable de faire une lecture sur chacun d'eux. Quand ceux-ci, tout en étant équilibrés, présentent de l'induction, la mesure de la puissance totale peut s'effectuer en une seule lecture que l'on multiplie par 3, et, si on est en présence d'un montage en étoile, il faut que le centre de cette dernière soit accessible pour la mesure de la tension.

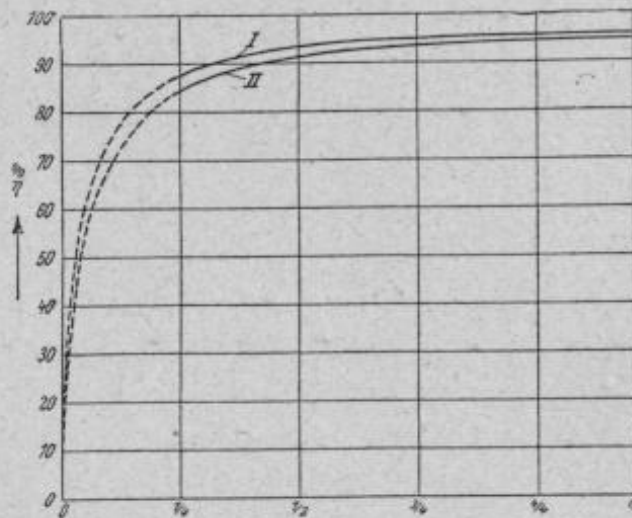


FIG. 1104. — Courbes de rendement d'un alternateur de 5625 K. V. A. — 6.600 volts.

Dans le cas d'un montage en triangle, l'un des côtés doit être abordable pour y installer la spire en gros fil du wattmètre pour la mesure de l'intensité.

M. A. Blondel emploie une méthode analogue à celle utilisée par Swinburne pour les machines à courant continu, et connue sous le nom de « méthode des pertes séparées » (354).

M. Mordey divise l'induit de l'alternateur en deux parties inégales qu'il réunit en opposition, l'une agissant comme moteur, l'autre comme géné-

ratrice, évitant ainsi de recourir à deux machines séparées comme dans le système Swinburne.

Dans les essais de rendement, on doit tenir compte de la nature du rôle que la machine est appelée à effectuer en tant que service continu ou

intermittent. Pour ce dernier cas, l'opération doit être faite à la température ordinaire, tandis que, pour un fonctionnement continu, l'essai doit être pratiqué lorsque la machine a atteint la température normale correspondant au régime de marche continue.

Pour les alternateurs destinés à assurer un service de jour ou service de moteurs, il y a lieu de prévoir un facteur de puissance au plus égal à 0,8, et la puissance de l'excitatrice sera déterminée par cette con-

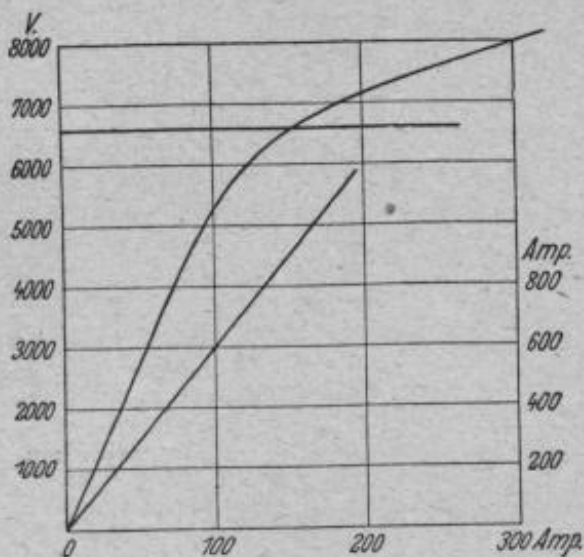


FIG. 1105. — Caractéristiques à vide et en court-circuit d'alternateur 5625 K. V. A.

dition. La variation de tension doit s'opérer en maintenant constant le courant d'excitation ; on la déterminera pour un facteur de puissance égal à l'unité et pour le facteur de puissance prévu. Il en sera de même pour le rendement, qui doit s'entendre de celui correspondant à la charge nominale. Les essais de surcharges se font aussi pour le facteur de puissance prévu.

La méthode de ralentissement de Routin permet d'évaluer les pertes par frottement et ventilation. Elle consiste à lancer la machine à essayer à une vitesse un peu supérieure à celle normale, puis, après avoir coupé le courant d'alimentation, à relever la courbe de décroissement (fig. 1106) de la vitesse angulaire en fonction du temps.

On peut obtenir une valeur plus complète de la machine en recourant à des essais sur la solidité mécanique de ses parties constitutives.

Les méthodes que nous venons d'examiner procèdent par évaluation directe du rendement, mais leur emploi peut donner lieu à d'assez fortes

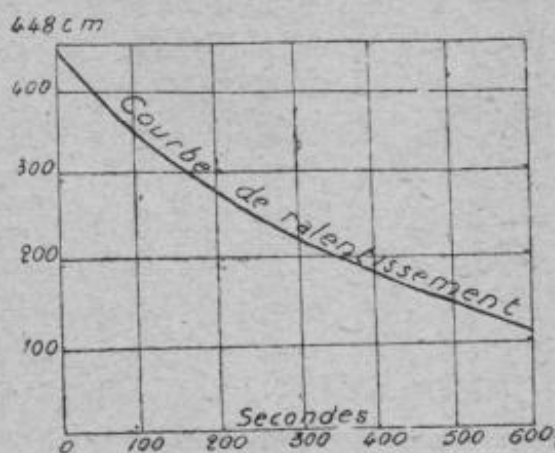


FIG. 1106.

erreurs. Aussi, en usine, on préfère s'adresser aux méthodes dites indirectes, que l'on trouve décrites en détail dans les traités spéciaux.

Pratiquement, on peut admettre que les pertes dans des alternateurs de 30, 100 et 500 kilowatts sont respectivement :

Dans l'inducteur (rI^2)...	1,5 à 4 0/0	1 à 2,5 0/0	et	0,5 à 1,5 0/0
Dans l'induit (rI^2).....	2 à 4	1,33 à 3	et	1 à 1,5
Pertes dans le fer.....	2 à 4	1,5 à 3	et	1 à 2
Par frottements.....	2 à 4	1,5 à 3	et	1 à 2

Le rendement électrique pour les machines de 20 à 50 kilowatts est de 90 à 91 0/0, 95 0/0 pour les machines de 75 kilowatts et 97 0/0 pour celles d'une puissance supérieure. Le rendement industriel des mêmes machines varie de 80 à 85 0/0 et de 92 à 93 0/0 à pleine charge. A demi-charge, il baisse d'environ 5 0/0.

451. Méthodes d'essai et tensions d'épreuve. — Les ateliers d'Oerlikon ont proposé une nouvelle et très intéressante interprétation pour la détermination du rendement des machines et qui s'applique aussi aux transformateurs. Le rendement de la machine qui est livrée pour une puissance normale de A kilovolts-ampères avec un facteur de puissance $= \cos \varphi$ doit être défini par le quotient suivant :

$$\eta = \frac{A \cos \varphi}{A \cos \varphi + v i_1^2 \times r_1 + i_1^2 \times r_2 + i_2 \times c},$$

où v représente les pertes à vide en kilowatts pour la tension, la fréquence ou le nombre de tours normaux, soustraction faite de toutes les pertes dans le cuivre des enroulements occasionnées par le courant et l'excitation à vide ; $i_1^2 \times r_1$ représente les pertes dans le cuivre de l'enroulement primaire inducteur ou d'excitation, dont la résistance totale est r_1 et qui, pour une charge A, conduit le courant i_1 ; $i_2^2 \times r_2$ représente les pertes dans le cuivre de l'enroulement secondaire ou induit, dont la résistance totale (sans la résistance de contact des balais) est r_2 et qui, pour une charge A, conduit le courant i_2 ; $i_2 \times c$ représente, pour les machines avec collecteurs ou bagues de glissement, la perte due à la résistance de contact, sur toutes les surfaces frottantes des balais ; pour des balais de charbon on doit adopter pour une valeur moyenne $c = 0,002$ et r_1 et r_2 doivent se rapporter à une température de 60°.

Il est à remarquer que les pertes $i_1^2 r_1$ et $i_2^2 r_2$ s'obtiennent par de simples mesures de résistance ; le courant d'excitation i_1 , qui correspond à la charge i_2 résulte de la caractéristique de la machine. Pour les machines à courant continu et les moteurs à bagues de glissement avec balais en

charbon, la perte aux balais $c \times i_2$ peut facilement être mesurée trop grande, vu que la résistance de contact des charbons sur le collecteur fixe et sans courant est, généralement, beaucoup plus grande que pour un col-

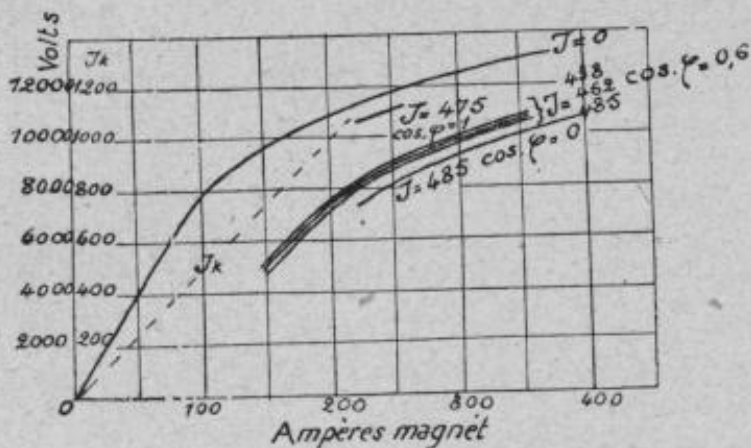


FIG. 1107. — Caractéristiques d'un alternateur Allmanna Svenska.

lecteur en mouvement et une densité de courant normale dans les charbons. Il est donc préférable d'introduire une valeur moyenne, résultant d'une série d'essais consciencieux, et qui correspond aux densités normales de courant et aux pressions habituelles des surfaces de contact des

espèces de charbons ordinaires. La firme Oerlikon fixe cette perte par l'expression :

$$\frac{2 \times i_2}{1.000} \text{ kilowatts.}$$

Les pertes à vide à la tension normale sont généralement faciles à déterminer dans les moteurs et les transformateurs. Les pertes dans le

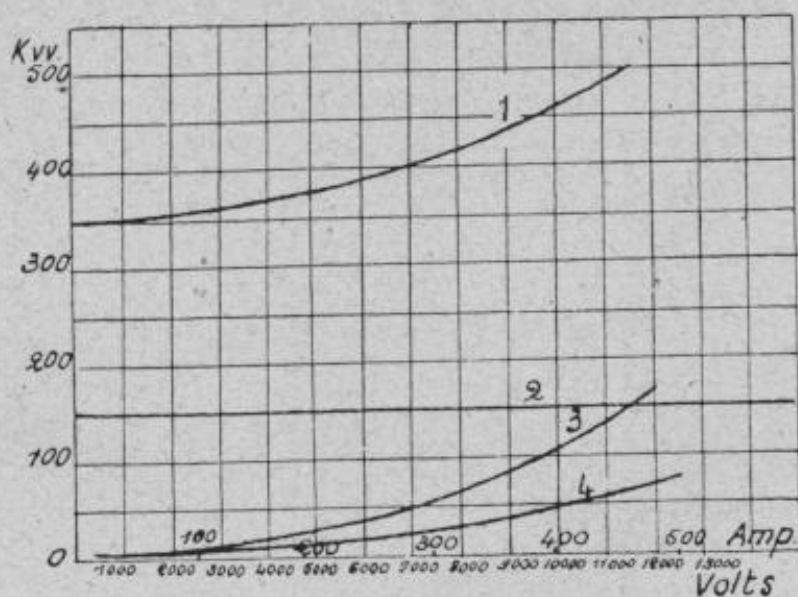


FIG. 1107 bis. — Courbes des pertes séparées d'un alternateur Allmanna Svenska.

cuiivre produites par le courant à vide sont rarement fortes et peuvent être facilement soustraites.

Dans les générateurs, les pertes à vide se déterminent le plus facilement en faisant marcher le générateur à vide, comme moteur, et en mesurant sa consommation d'énergie.

Pour les générateurs couplés directement à des machines à vapeur, dont l'arbre et les paliers sont généralement livrés par le constructeur de la machine à vapeur, les pertes par friction dans les paliers et les pertes de ventilation du volant sont à attribuer en charge à la machine à vapeur, ce que l'on fait en séparant les pertes magnétiques à vide.

La détermination du rendement des moteurs-générateurs doit être obtenue aussi d'après cette définition vu que, en général, l'établissement d'une charge constante et la mesure simultanée, exacte, du grand nombre de grandeurs influençant le rendement, sont très difficiles à obtenir.

Le rendement déterminé d'après les définitions ci-dessus doit, théoriquement, être un peu plus favorable que le rendement obtenu dans la pratique, puisque la définition exclut expressément toutes les pertes dites supplémentaires résultant de la réaction d'induit et d'autres causes semblables. La mesure et le calcul exacts de ces pertes sont, en général, impossibles. Dans les machines modernes, rationnellement construites, elles s'élèvent relativement peu et sont dans les limites des erreurs de mesure de tout rendement.

La possibilité d'une détermination précise et simple du rendement, d'après la définition proposée, présenterait de si grands avantages pratiques sur toutes les autres méthodes, peut-être plus parfaites au point de vue théorique, que les ateliers d'Oerlikon espèrent la voir adopter par tout spécialiste qui s'est déjà occupé de semblables mesures.

En outre, cette mesure est en concordance avec la méthode dite « méthode de la marche à vide » pour la détermination du rendement, décrite par l'Union des ingénieurs électriciens allemands dans le paragraphe 41 des *Normes pour les machines électriques et les transformateurs*; et aussi avec la définition du rendement mesurable, donnée dans les paragraphes 19 et 21 des *Règles pour les offres, la fourniture et les essais des machines électriques et transformateurs, rédigées par les associations des industriels du Nord de la France*.

D'après la proposition des ateliers d'Oerlikon, il n'y a que les pertes dans le rhéostat qui soient émises comme ne dépendant pas de la machine.

Il est aussi intéressant de connaître l'interprétation donnée par cette même firme de la chute de tension d'une machine ou d'un transformateur, livrée pour une puissance normale de A kilovolts-ampères avec un facteur de puissance $= \cos \varphi$ pour une tension normale de E volts; cette chute e est la différence entre la tension normale E et la tension $E + e$ que prend la machine à vide pour l'excitation et le nombre de tours qui cor-

respondent à la pleine charge à la tension normale avec le facteur de puissance correspondant.

On remarquera que, pour les transformateurs, la chute de tension pour $\cos \varphi = 1$ est, à peu de chose près, égale à la chute de tension dans la résistance ohmique des enroulements. Cette chute de tension est :

$$\frac{e}{E_1} = \frac{i_1^2 \times r_1 + i_2^2 r_2}{E_1 \times i_1}.$$

La chute de tension pour $\cos \varphi = 0$ est généralement déterminée pour les transformateurs par la tension aux bornes e , qui est nécessaire pour faire passer le courant normal i_1 dans l'enroulement primaire à la fréquence normale, l'enroulement secondaire étant court-circuité.

Il est généralement difficile d'établir une pleine charge de générateurs à courants triphasés et alternatifs, avec exactement le facteur de puissance prévu pour la livraison ; par contre, il est souvent facile de charger un générateur avec le courant de pleine charge à la tension normale au moyen de moteurs synchrones faiblement excités et marchant à vide ; on peut alors accepter naturellement l'approximation $\cos \varphi = 0$. Ce mode de charge est très facile à pratiquer dans les centrales à deux ou plusieurs générateurs. Quand, pour une excitation déterminée, on a observé une chute de tension e_0 au moyen de la caractéristique à vide et de la charge d'intensité i pour $\cos \varphi = 0$, on peut, d'après l'expérience, pour une même intensité de charge et un autre facteur de puissance $\cos \varphi$, déduire la chute de tension du diagramme connu de Kapp. Pour cela, il faut supposer au préalable que, pour une excitation déterminée, la tension E_0 du générateur à vide forme la résultante de la tension aux bornes E et de la chute de tension e_0 pour l'intensité de charge i . La chute de tension e est, dans le diagramme, dirigée presque perpendiculairement à l'intensité i et la tension aux bornes E forme l'angle φ avec l'intensité i . Pour l'intensité i et avec le facteur de puissance φ , la chute de tension est donc $E_0 - E$. Pour plus de facilité, nous représentons ci-contre le diagramme de Kapp (fig. 1108).

La ligne horizontale CJ correspond à l'intensité du courant i ; perpendiculairement à CJ et à partir du point C on porte $CA = e_0$. Du point A et avec un rayon $AB = E_0$ on trace un arc de cercle BB_0 ; également du point C avec le même rayon E_0 , l'arc de cercle DD_0 . Pour une différence de phases quelconque φ entre l'intensité du courant i et la tension aux bornes E , on trace une ligne CB à partir du point C, qui forme avec l'horizontale CJ l'angle φ .

Là où la ligne coupe l'arc de cercle BB_0 se trouve l'extrémité du vecteur E , qui doit être égal à la tension aux bornes pour un déphasage φ et

une tension à vide donnée E_0 . Le prolongement de la ligne CB jusqu'à l'arc de cercle DD₀ donne évidemment le vecteur CD = E_0 , et ainsi la différence BD peut être immédiatement mesurée comme étant la chute de tension e pour un déphasage φ . Si $\varphi = 90^\circ$, B se rapproche de B₀ et D de D₀ et la portion B₀D₀ = AC = e_0 représente alors la chute de tension maxima e_0 . Si $\varphi = 0$, S se rapproche de B₁, D de D₁ et B₁D₁ représente alors la chute de tension pour la charge non inductive. Cette chute de tension B₁D₁ doit être augmentée de la chute de tension dans la résistance ohmique de l'enroulement.

Le diagramme peut être construit pour différentes valeurs de E_0 , c'est-à-dire pour différentes valeurs de l'excitation pour lesquelles la chute de tension e_0 , en

charge purement inductive, peut être observée directement ou extrapolée. Les valeurs de l'excitation seront particulièrement importantes pour lesquelles, d'après la caractéristique à vide, la tension à vide surpasse la tension normale E de la valeur garantie e .

La méthode que les ateliers d'Oerlikon proposent pour la détermination de la chute de tension présente, dans tous les cas, une installation facile de mesures, et, pour les générateurs modernes, ne conduit qu'à un très léger écart entre les valeurs trouvées et la réalité.

Les erreurs auxquelles cette détermination simplifiée de la chute de tension, comparée à la mesure directe, peut conduire, se trouvent indiscutablement dans la limite des erreurs permises qui, pour une mesure directe, résultent de l'imperfection des instruments et des difficultés d'une observation parfaite.

Pour les transformateurs et les générateurs dont la chute pour une charge non inductive n'est pas très faible, comparée à la chute pour une charge inductive, le diagramme doit être étendu de la façon suivante pour obtenir une détermination plus exacte de la chute de tension, en

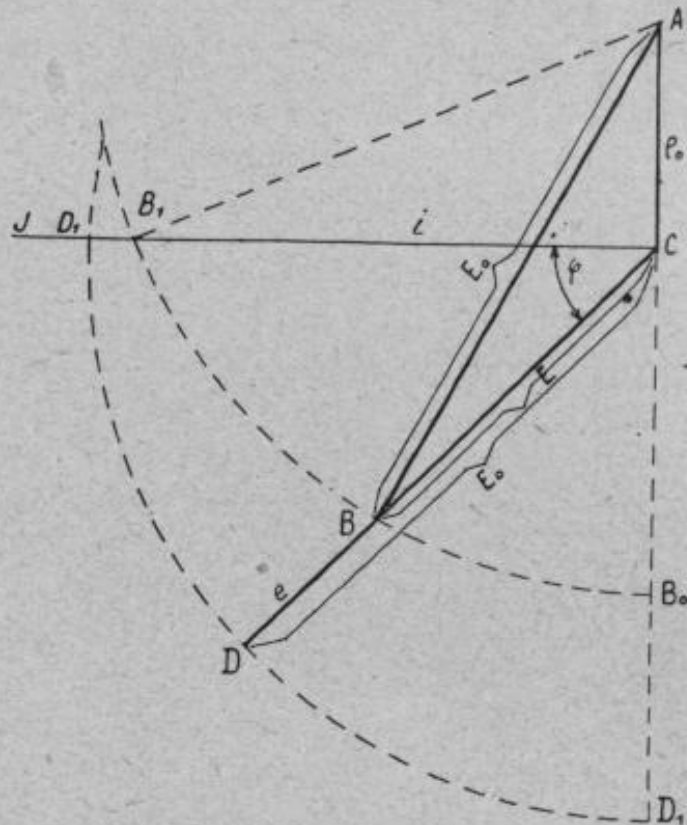


FIG. 1108.

décomposant la chute maxima e_0 en ses composantes : la chute ohmique et la chute purement inductive e_1 et e_2 . Ce diagramme est représenté (fig. 1109) et doit être traité, pour le reste, comme le premier diagramme : AC_1 est perpendiculaire à $C_1B_1D_1$; CC_1 est la chute de tension ohmique et AC_1 la chute de tension inductive.

La méthode d'essai d'isolement des enroulements à haute tension préconisée par les ateliers

d'Oerlikon, méthode que cette firme applique normalement dans son local d'essais et qu'elle recommande lors des expertises, s'applique de même aussi bien aux machines électriques qu'aux transformateurs.

La valeur de la tension d'épreuve et la durée de la mise sous tension sont fixées, à défaut d'autres indications, par les *Normes et règlements de l'Association des Electriciens allemands (V. d. E.)*.

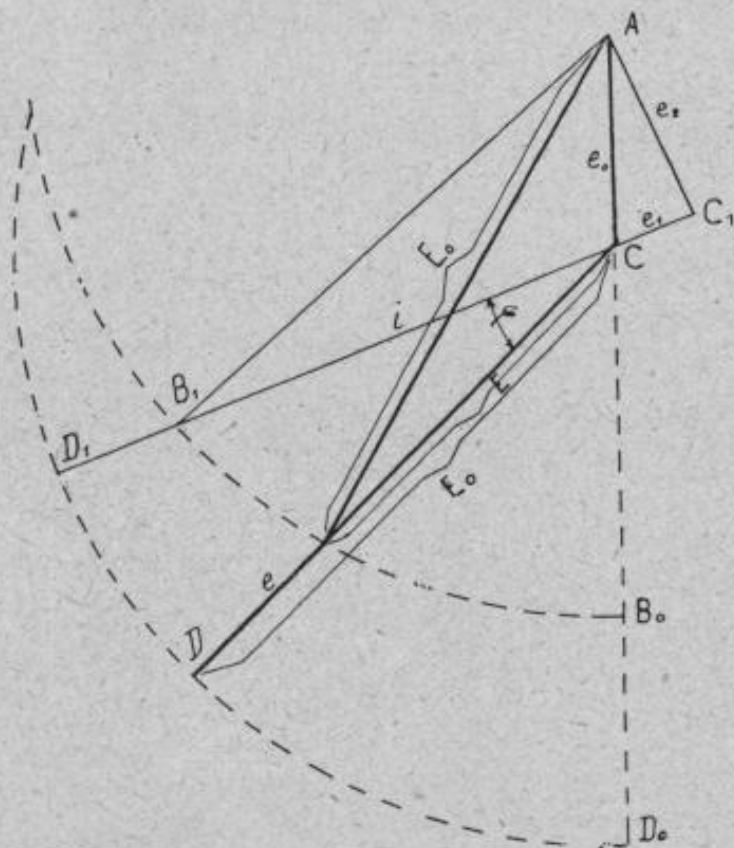


FIG. 1109.

La tension d'épreuve est créée dans l'appareil même à essayer, et on relie successivement chacune des bornes de l'enroulement à la masse et à l'une des bornes de l'enroulement à basse tension. On obtient ainsi un essai d'isolement de l'enroulement considéré en lui-même et de l'isolement par rapport à la masse et au circuit à basse tension. Dans cet essai, on n'expose pas non plus les parties d'enroulement comme par exemple le neutre d'un transformateur triphasé, qui ne sont pas faites pour résister à de si grandes différences de potentiel par rapport à la masse, à être détériorées par l'essai même, qui a surtout en vue l'isolement des parties du circuit aux environs des bornes à haute tension.

La tension d'épreuve est appliquée sous la forme de courant alternatif pendant trente minutes. La surtension peut être créée dans la machine ou transformateur à essayer, par une augmentation de la fréquence jusqu'à 20 0/0. Dans les enroulements triphasés dont le neutre est à la terre,

ce point est relié pendant l'essai à la masse et au circuit à basse tension. Si le neutre, en service normal, ne doit pas être relié directement à la terre, mais seulement par l'intermédiaire d'une résistance ou d'une bobine d'induction, ou encore d'un appareil de surtension approprié, il est recommandable de tenir le neutre isolé pendant l'essai, et de mettre à la terre, successivement chacune des bornes du transformateur.

Lorsqu'il n'est pas possible de créer la surtension dans l'appareil même à essayer, il faut alors la produire extérieurement, dans un transformateur à haute tension, dont une des bornes est reliée au bâti et au circuit à basse tension de l'appareil à essayer, et l'autre borne à l'enroulement à haute tension de celui-ci. Dans ce cas, toutes les parties du circuit à haute tension, de même que toutes les parties métalliques de la masse et de la basse tension, doivent être reliées très soigneusement entre elles, et chaque électrode ainsi constituée, aux bornes du transformateur d'essai. Il est à conseiller aussi de brancher entre le circuit à haute tension et le transformateur d'essai une résistance ou une bobine d'induction, pour empêcher la formation de courts-circuits ou d'arcs permanents en cas de rupture de l'isolement essayé.

Dans tous les cas, il est nécessaire de mesurer la tension d'épreuve directement aux électrodes auxquelles elle est appliquée, au moyen d'un éclateur qui a été étalonné pour une tension sinusoïdale. Par suite de phénomènes secondaires compliqués, d'états variables de charge et de décharge et entre les conducteurs formant, dans leur ensemble, un condensateur et éventuellement de phénomènes de résonance dus à la présence de self-induction dans les fils d'amenée, il se produit inévitablement, entre les électrodes, des surtensions momentanées, dont la forme est très différente de la sinusoïde, qui est implicitement à la base de ce genre de mesures. Ces valeurs momentanées, très élevées parfois, peuvent évidemment provoquer les décharges et les ruptures de l'isolant. Dans la mesure de la tension au moyen de voltmètres et de transformateurs de mesure, ces surtensions ne peuvent être décelées, par suite de leur faible valeur efficace, tandis qu'elles sont indiquées sûrement par l'éclateur, qui réagit exclusivement sur les maxima de la différence de potentiel.

Il est recommandable de procéder comme suit : on fixe d'abord la tension d'épreuve par plusieurs décharges obtenues successivement, avec certitude, à l'éclateur placé entre les électrodes et réglé à la distance correspondant à la tension (sinusoïdale) d'essai prescrite.

La valeur effective de la tension correspondant à ces décharges peut être observée chaque fois au voltmètre, et cette valeur effective est celle qui correspond réellement, dans l'essai entrepris, à la tension d'essai voulue et prévue par les garanties, de sorte que la suite de l'essai, et notamment l'application de la surtension pendant le temps prévu, peut se faire

avec le voltmètre seul, l'éclateur ne servant plus qu'à de dispositif de sécurité.

Dans la pratique, le dispositif préconisé par la *Standardisation Commission* de l'*American Institution of electrical Engineers*, en 1902-1903, s'est montré le plus commode pour ce genre de mesures et donne les résultats les plus constants. L'éclateur est constitué par deux aiguilles d'acier, dont la distance entre pointes a été réglée par des essais de laboratoire pour une tension rigoureusement sinusoïdale, et est exprimée graphiquement ou par des tables directement en fonction de la tension effective de rupture.

Toutes les mesures de surtension dans les essais d'isolement à haute tension sont faites, par la firme Oerlikon, d'après cette méthode. Nous donnons ci-après la table des distances normales de rupture entre pointes d'aiguilles.

Tension effective	Distance en millimètres	Tension effective	Distance en millimètres
10.000	11,9	60.000	118
20.000	25,4	70.000	148,5
30.000	41,3	80.000	180
40.000	62,2	90.000	212
50.000	90,0	100.000	244

Dans tous les essais d'isolement, il est absolument nécessaire que les machines et transformateurs à essayer soient parfaitement propres et secs, qu'il n'y ait pas trace de poussière sur les parties isolées, que celles-ci soient partout imprégnées et séchées par un échauffement de quelques heures si l'appareil est resté quelque temps exposé à l'humidité, par exemple pendant le montage. Il arrive qu'un corps étranger, en apparence sans importance, collé à la surface de l'isolant, soit une cause de décharge et même de rupture de l'isolant.

Au cas de transformateurs à bain d'huile, le transformateur doit être, avant la mesure, chauffé dans le bain d'huile à la température de 110° pendant au moins deux heures.

452. Régulation des alternateurs. — Les divers systèmes employés pour les réglages de la tension des alternateurs peuvent se diviser en deux classes : ceux où on utilise à cet effet le courant d'excitation qui est emprunté à l'alternateur, et ceux où on fait appel à un dispositif mécanique agissant sur un rhéostat.

Dans la première catégorie, on distingue les cas où le courant de l'alternateur est transformé en courant continu par un commutateur en synchronisme, le courant de l'induit renforçant l'excitateur (méthodes Ganz, Westinghouse, General Electric Co, Heyland, Anderson), par des redres-

seurs spéciaux (méthodes Dobrowoski, Crompton) et celui enfin où le courant de l'alternateur règle les ampères-tours d'une excitatrice ayant un induit pourvu d'un bobinage particulier (méthodes Hutin et Leblanc, Boucherot, Damelson, Rice Reist, Steinmetz, Arnold).

Dans la seconde catégorie, on trouve les méthodes Blathy, Thury, Dick, Kennely et Whiting, Chapman, Siemens-Schuckert et Tirrill, dont nous donnons les descriptions au chapitre xxvii (stations centrales).

L'automatisme, la suppression du groupement d'excitation, l'économie d'installation et la simplification des manœuvres qui résulteraient de la solution de ce problème donnent à celui-ci un intérêt capital.

On sait que la possibilité de l'autoexcitation est définie au point de vue théorique et qu'il reste à la réaliser d'une façon nettement efficace.

L'alternateur autoexcitateur de Boucherot dont l'excitatrice spéciale comprend un stator identique à celui d'un moteur d'induction et alimenté par les courants alternatifs est une des solutions les plus ingénieuses présentées.

Les excitatrices Latour et Heyland sont constituées par un anneau Gramme sur le collecteur duquel reposent trois balais calés à 120° les uns des autres et servant à son alimentation par courants triphasés.

L'alternateur auto-excitateur Alexanderson repose plus simplement sur le principe du commutateur redresseur et la régulation automatique de la tension est assurée par une disposition spéciale du rhéostat de champ. Ainsi tandis que le rhéostat d'excitation des générateurs ordinaires est réglé à la main, celui de la machine d'Alexanderson est triphasé et la tension qu'il absorbe est automatiquement réglée par l'action de courants opposés aux courants d'excitation. Ces courants régulateurs sont engendrés par un transformateur dont le primaire est monté en série sur le circuit d'armature, de sorte qu'ils sont également fonction de la charge du réseau aussi bien que de son facteur de puissance.

La (fig. 1110) fournit un schéma de la solution préconisée. Les phases de l'enroulement auxiliaire Alexanderson sont disposées de telle sorte que

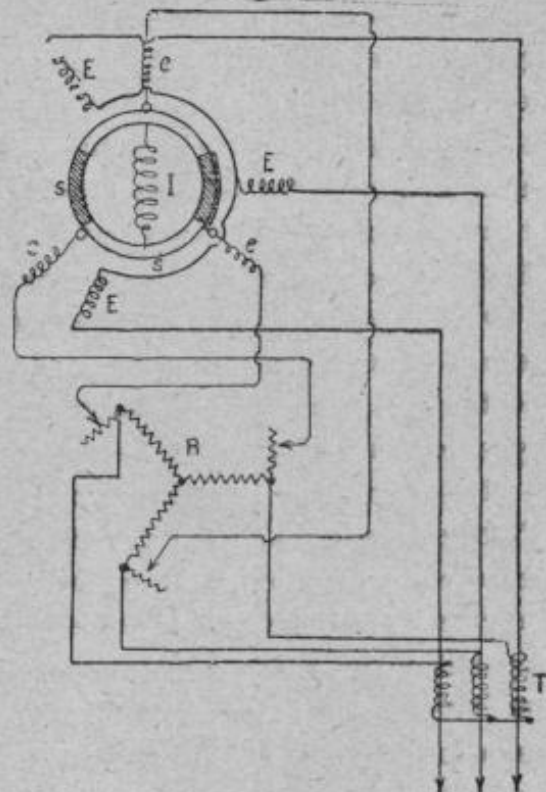


FIG. 1110.

la tension induite retarde de $\frac{\pi}{2}$ par rapport aux phases correspondantes de l'enroulement principal.

L'opération de mise en parallèle d'alternateurs autoexcitateurs Alexanderson, qu'ils soient employés seuls ou associés à des alternateurs de construction ordinaire, n'exige aucune précaution particulière.

En Amérique les excitatrices en bout d'arbre se sont généralisées et le tamponnage des excitatrices s'est étendu d'une façon considérable. On a adopté le dispositif suivant pour la régulation automatique : une dynamo shunt fonctionne en parallèle sur des barres collectrices dites barres d'excitatrices ; à ces barres est également reliée la batterie, les génératrices principales recevant leur excitation d'un second groupe de barres appelées barres d'excitation ; entre les barres d'excitatrices et les barres d'excitation est placé un survolteur-dévolteur dont le champ est réglé par un régulateur automatique ; les barres d'excitatrices sont maintenues à tension constante et les fluctuations de tension, par l'effet du fonctionnement du survolteur-dévolteur, sont reportées intégralement sur les barres d'excitation.

Les caractéristiques d'un alternateur asynchrone sont que, pour une charge donnée, il marche à une vitesse bien définie, supérieure à celle du synchronisme ; qu'il débite un courant watté qui représente la puissance fournie par lui au circuit et qu'il reçoit du réseau un courant déwatté dont l'intensité dépend de la tension et de la composante wattée du courant. Comme cette dernière varie en grandeur quand la charge de la machine varie, il faut disposer d'une machine pouvant fournir un courant diphasé en arrière et qui devra maintenir constante la tension du réseau.

Dans le cas d'un alternateur asynchrone, le courant magnétisant nécessaire pour son excitation doit être produit en dehors de la machine. On peut alors avoir recours soit à un condensateur, soit à un alternateur synchrone, soit à un moteur synchrone surexcité.

Si l'alternateur asynchrone marche avec un alternateur synchrone, c'est ce dernier qui fournit tout le courant magnétisant qu'exigent l'alternateur asynchrone et le circuit extérieur, en même temps que la tension du réseau est déterminée par l'excitation de l'alternateur synchrone. La répartition du courant watté entre les deux machines est fixée par les régulateurs de leurs machines motrices. La charge que prend l'alternateur asynchrone dépend de son glissement en avant de l'alternateur synchrone qui prend le reste de la charge. Quand une charge nouvelle survient à l'usine elle est d'abord reçue par l'alternateur synchrone ; celui-ci ralentissant, le glissement de l'alternateur asynchrone augmente, de sorte qu'une partie de la charge lui est transférée. Mais la tension du réseau, à toute charge, est toujours fixée par l'excitation de l'alternateur synchrone.

Il en est de même si l'alternateur asynchrone marche avec un moteur synchrone ou une commutatrice : la régulation du voltage est celle de la machine synchrone et la tension du réseau dépend de la valeur de son excitation. Quand la charge augmente, la nouvelle charge est d'abord reçue par la machine synchrone, qui cède une partie de l'énergie accumulée dans ses masses en mouvement ; comme elle se ralentit, la charge est transférée à l'alternateur asynchrone, la machine synchrone fournissant seulement le surplus de courant magnétisant qu'exige l'alternateur pour ce supplément de charge. Le régulateur de la machine motrice actionnant l'alternateur asynchrone fixe la fréquence du réseau, et le glissement de la machine synchrone par rapport à l'alternateur s'établit à une valeur juste suffisante pour permettre à cette dernière machine de fournir toute la puissance demandée par le réseau.

Pour un alternateur donné, la chute de tension varie avec la charge et avec le facteur de puissance du réseau, augmentant lorsque ce dernier diminue ; autrement dit, la réaction d'induit et la dispersion augmentent lorsque le facteur de puissance baisse de valeur.

Relativement au facteur de puissance ($\cos \varphi$), l'alternateur peut être considéré comme travaillant sur impédance constante, s'il n'alimente que des lampes et des transformateurs, et alors $\cos \varphi$ est à peu près indépendant de la tension. D'autre part, l'alternateur peut être considéré comme travaillant presque à débit constant (indépendant de la vitesse), s'il n'alimente que des moteurs asynchrones actionnant des appareils à couple résistant constant, et $\cos \varphi$ varie alors en raison inverse de la tension.

D'après M. Boucherot, il conviendrait de fixer la variation de tension en fonction de la vitesse en même temps que la variation de tension en fonction de la charge, car, si l'on tient compte qu'avec des moteurs, lorsque la tension baisse plus que la fréquence, le débit augmente et *vice versa*, il peut être dangereux de ne se préoccuper que de la chute de tension à vitesse constante. De là la nécessité de saturer les alternateurs à l'effet de réduire la baisse de tension qui se produit lors d'une augmentation de charge.

Quand la régulation de la tension doit se faire d'une façon automatique (telle que dans un réseau comportant de brusques et importantes variations de charges), on fait varier automatiquement la valeur du courant d'excitation dans l'inducteur de l'alternateur, qui est alors compoundé au moyen des procédés dont il est question ci-après.

Nous avons dit que l'excitation des alternateurs est demandée soit à la machine elle-même, soit à une source indépendante et à courant continu. La dynamo excitatrice peut être montée sur l'arbre de l'alternateur ; mais, dans les usines hydroélectriques de quelque puissance,

les excitatrices séparées, sont couplées directement avec des turbines spéciales. Parfois on dispose à part un circuit pour l'excitation de tous les alternateurs de l'usine ; mais, dans ce cas, il est indispensable de maintenir bien constante la différence de potentiel, quelle que soit la charge.

Le calcul de l'excitation à fournir aux inducteurs doit prévoir une certaine marge pour la réaction inductive de l'enroulement dans le cas de courants redressés, comme pour la réaction démagnétisante de l'armature dans le cas du courant continu.

MM. Leblanc et Hutin déterminent dans l'excitatrice un champ résultant ayant à chaque instant les propriétés suivantes : intensité proportionnelle au courant inducteur nécessaire et par conséquent variable avec les différents régimes de l'alternateur, direction indépendante du régime. La première condition supprime la présence du rhéostat, et la seconde, le décalage des balais.

Il nous paraît utile de signaler les procédés d'auto-excitation d'alternateurs triphasés faits par M. Limb au moyen de soupapes électrolytiques, qui ont pu être mis en charge par ce moyen, partie sur des résistances non inductives, partie sur des moteurs triphasés asynchrones.

453. Compoundage des alternateurs. — Le compoundage des alternateurs est une question qui a été très étudiée, et divers constructeurs ont proposé un certain nombre de dispositions intéressantes ; le fait que ce compoundage doit avoir pour effet de compenser non seulement la chute de tension due à la résistance ohmique, mais aussi celle occasionnée par la réactance, conduit à une complication qui rend difficile une solution parfaite.

La Société des ateliers de constructions mécaniques de Charleroi emploie, pour obtenir le compoundage ou un certain taux d'hypercompoundage de ses alternateurs, une excitatrice qui fonctionne à la même fréquence que l'alternateur et qui a, par suite, le même nombre de pôles que ce dernier, dans le cas de l'accouplement direct. Son induit est pourvu de bagues comme pour une commutatrice et son inducteur est construit de façon que la réaction d'induit soit exactement compensée à toutes les charges. La compensation de l'induit joue encore un rôle plus important, c'est de maintenir, pour toutes les charges et pour tous les déphasages, la concordance des vecteurs des tensions alternatives induites, respectivement dans l'alternateur et l'excitatrice. Ceci permet d'annuler le débit du circuit alternatif auxiliaire et de réduire l'importance des organes accessoires du compoundage.

Le circuit de ce dernier est constitué par un bobinage auxiliaire de quelques spires, logées dans les encoches du stator et connectées en série

avec le secondaire d'un petit transformateur dont le primaire est traversé par le courant d'une des phases. Un entrefer est ménagé dans le circuit magnétique de ce transformateur, de façon à lui donner une self-induction mutuelle telle que le passage du courant primaire développe, aux bornes secondaires, une force électromotrice proportionnelle à la tension de réactance de l'alternateur.

Voici quelques explications sur le principe du système.

Abstraction faite de la résistance ohmique qu'on peut en général négliger, la tension aux bornes U d'un alternateur peut être considérée comme la résultante de la tension induite E et de la tension de réactance ωLi , due à la self-induction de l'alternateur (*fig. 1111*). Le vecteur E qui représente la force électromotrice totale induite dans le stator par le champ du

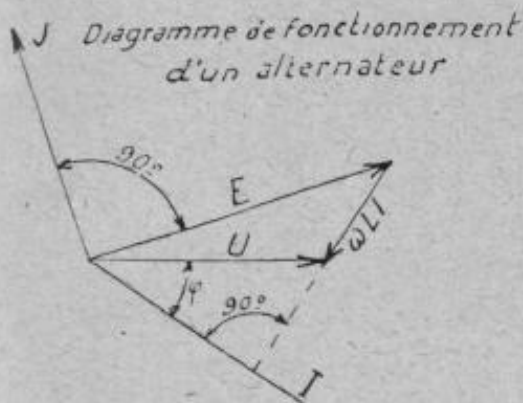


FIG. 1111.

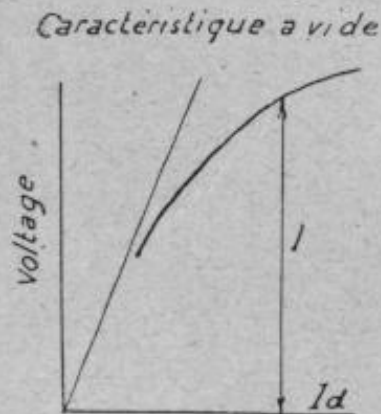


FIG. 1112.

rotor inducteur est décalé de 90° sur l'axe J de celui-ci et son amplitude est mesurée par l'ordonnée de la caractéristique à vide correspondant au courant d'excitation I_d donnant la tension U en charge (*fig. 1112*). Le vecteur ωLi est déphasé de 90° sur le courant. Au courant d'excitation I_d correspond sur l'excitatrice une tension continue qui lui est proportionnelle et, entre ses bagues, une tension alternative e . L'induit de cette excitatrice est calé de telle sorte que cette tension e soit décalée de 90° sur l'axe du pôle de l'alternateur ; elle est, par suite, en phase avec E .

Pour obtenir sur l'excitatrice la tension correspondante au courant d'excitation I_d , il suffit évidemment d'appliquer à ses bagues une tension alternative égale à e . Cette tension est donnée par le circuit de compoundage, lequel comprend un enroulement donnant une composante u proportionnelle à U , et un autre enroulement donnant une deuxième composante v proportionnelle à la tension de réactance.

Le système est réglé pour que la résultante de ces deux tensions partielles soit précisément correspondante comme phase et comme ampli-

tude à la tension alternative que développerait entre ses bagues l'excitatrice fonctionnant en auto-excitation au régime considéré ; de sorte qu'à ce régime le circuit de compoundage n'a théoriquement pas à débiter et

joue uniquement un rôle d'indicateur de la tension d'excitation. Si la caractéristique de l'excitatrice est convenable, cette propriété sera vraie pour tous les régimes.

M. Boucherot obtient le compoundage des alternateurs par l'emploi d'une excitatrice spéciale (fig. 1114) à enroulements sinusoïdaux et de transformateurs de compoundage. L'induit de l'excitatrice est logé à l'intérieur d'un rotor muni d'un enroulement polyphasé. Le transformateur a pour but de faire varier la tension aux bornes du stator de l'excitatrice ; il porte un entrefer réglable qui permet, en combinant la variation d'entrefer avec celle du nombre des spires de l'enroulement-série, d'obtenir, au moment de la mise

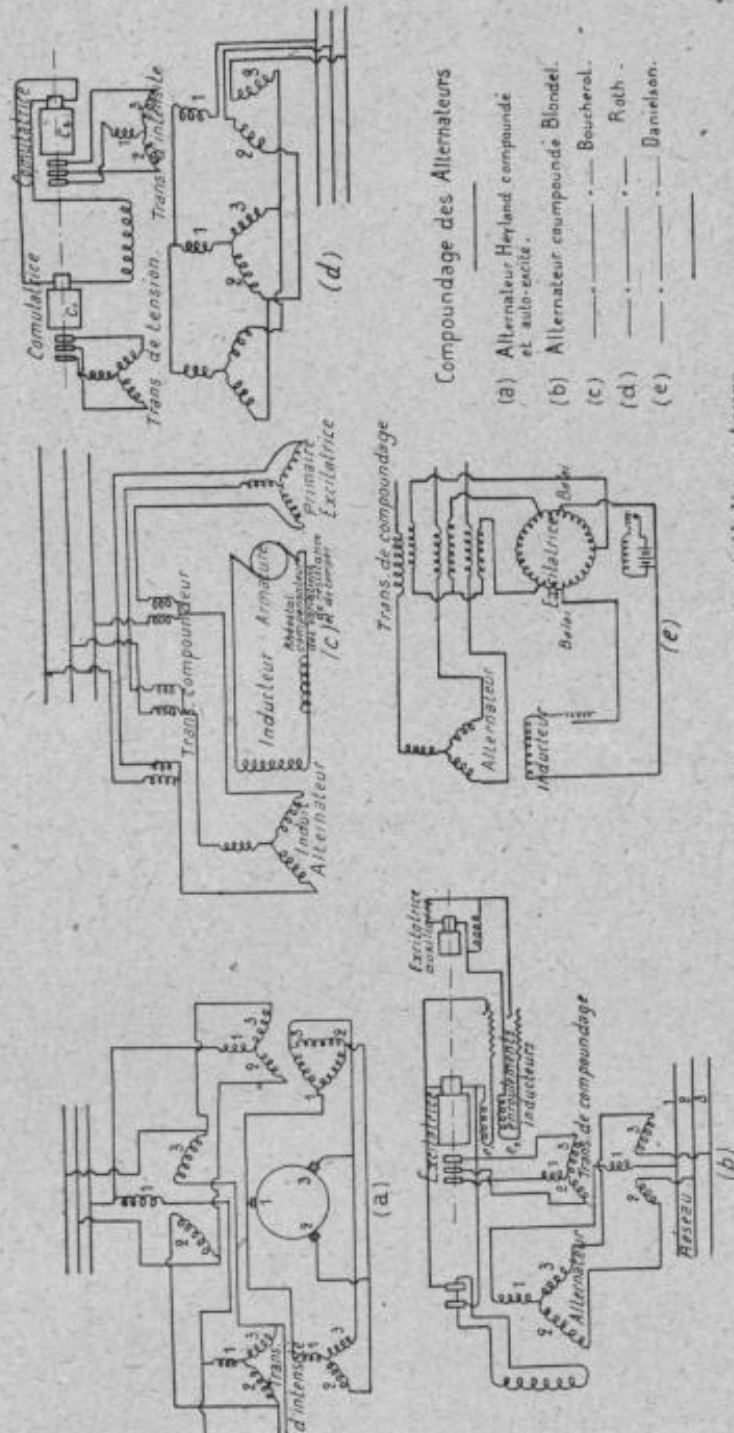


FIG. 1113. — Schémas de compoundage d'alternateurs.

en marche de l'alternateur, un compoundage rigoureux. La réduction de prix acquise dans l'établissement de l'alternateur compense le supplément de coût du groupe d'excitation (excitatrice sinusoïdale et transformateur).

La maison Ganz applique le système de montage représenté schématis-

quement par la (fig. 1115). L'inducteur F de la génératrice G reçoit le courant nécessaire d'une petite dynamo excitatrice g qui a deux enroulements en dérivation f et f' . En série avec f est montée une résistance W dont les extrémités sont reliées, par l'intermédiaire de la bobine de réactance d , aux enroulements secondaires, disposés en série, des transformateurs i et v . Le premier de ces transformateurs, i , est monté en primaire comme transformateur de tension; le second, v , est monté en primaire comme

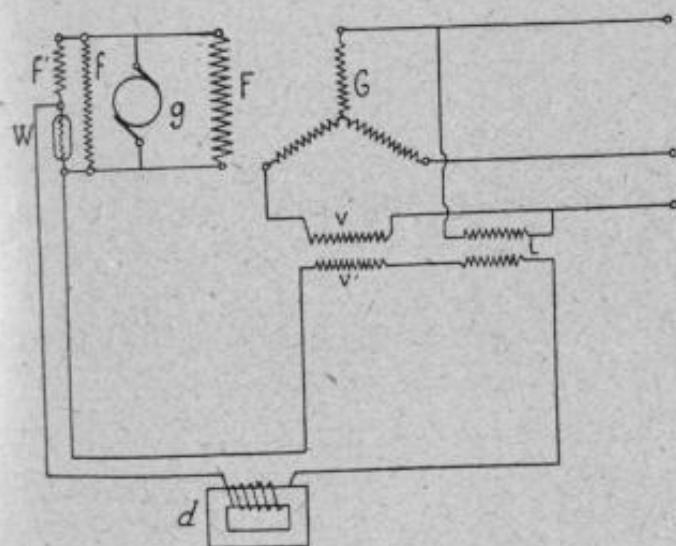


FIG. 1115.

conséquemment sa tension, prend une valeur plus grande.

L'alternateur compound de M. A. Blondel a pour organe intermédiaire une commutatrice (§ 178) dont l'inducteur reçoit une excitation constante de la part d'une petite dynamo auxiliaire et une autre variable, qui provient de ses balais, et dont l'induit (côté bagues) est relié au secondaire d'un transformateur ayant son primaire parcouru par le courant débité par l'alternateur. L'induit (côté collecteur) alimente les inducteurs de l'alternateur, et ce sont les variations dans l'intensité et la phase des

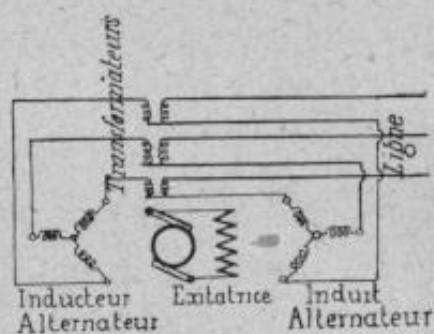


FIG. 1114.

transformateur d'intensité; leurs forces électromotrices secondaires respectives sont en concordance de phases et perpendiculaires l'une à l'autre. La charge de la génératrice vient-elle à s'accroître, le courant secondaire augmente également et la valeur de W s'accroît. Il s'ensuit que l'action du second enroulement f' diminue et que l'excitation de la génératrice, et

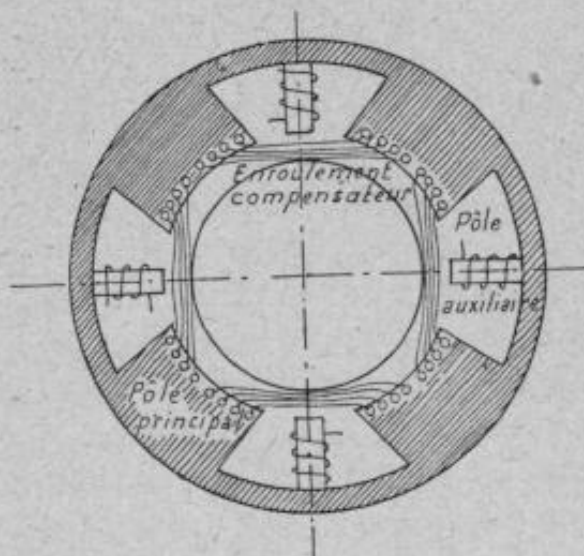


FIG. 1116.

courants passant par les bagues qui provoquent les variations voulues de la tension au collecteur.

L'alternateur compound Latour est caractérisé par l'emploi d'une excitatrice spéciale, dont la tension aux bornes est amenée automatiquement à la valeur de compoundage ou d'hypercompoundage par le dispositif suivant.

La dynamo excitatrice D (fig. 1117) produit du courant continu recueilli par des balais sur un collecteur ordinaire C ; ce courant continu est envoyé dans les bobines inductrices de l'alternateur triphasé A. Cette excita-

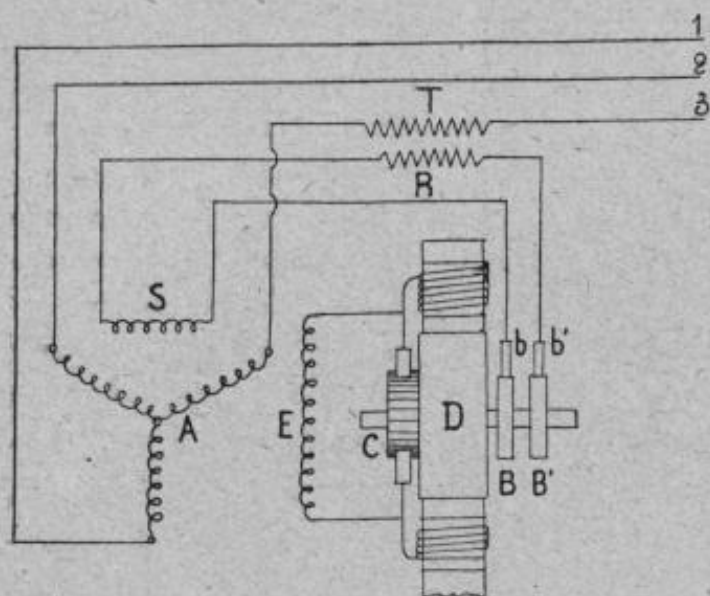


FIG. 1117.

trice est munie, en plus, de deux bagues B et B', reliées respectivement en deux points opposés de l'induit, bagues sur lesquelles appuient deux frotteurs *b* et *b'*.

Ce dispositif spécial de dynamo constitue une commutatrice dont le fonctionnement consiste à transformer du courant alternatif en courant continu et *vice versa*, ou à produire, en même temps, du courant

continu aux balais et des courants alternatifs aux bagues. En un mot, c'est une dynamo polymorphique.

Cette dynamo excitatrice a la même fréquence que l'alternateur et, à cet effet, elle est calée en bout d'arbre et a un nombre de pôles égal à celui de l'alternateur ; les pôles de mêmes noms de l'excitatrice et de l'alternateur sont en regard l'un de l'autre, de manière à obtenir la coïncidence des plans neutres géométriques. En d'autres termes, la force électromotrice alternative de l'excitatrice, à circuit ouvert, est en concordance de phase avec celle de l'alternateur.

Enfin, comme dernière particularité, la dynamo excitatrice est munie d'un enroulement compensateur (fig. 1116), constitué par des spires logées dans les noyaux polaires mêmes, et parcouru par le courant induit. Cet enroulement compensateur rétablit l'uniformité du flux sous le pôle et permet un bon fonctionnement avec un calage fixe des balais à tous les régimes ; en d'autres termes, cet enroulement a pour effet d'annuler la réaction magnétique d'induit, ce qui conserve au vecteur de la force électromotrice une direction constante pour tous les régimes.

L'alternateur A (*fig. 1117*), ordinairement triphasé, est muni d'un enroulement supplémentaire S, formé de quelques spires logées dans les encoches du stator. Une force électromotrice alternative simple est induite dans cet enroulement de compoundage, relié aux bagues B et B' de la dynamo excitatrice, en passant par le secondaire d'un transformateur TR.

Ce transformateur a son primaire T parcouru par le courant d'une des phases de l'alternateur et son secondaire R par le courant de compoundage produit par l'enroulement monophasé supplémentaire du stator de l'alternateur. Ce courant de compoundage est théoriquement nul si la caractéristique de l'excitatrice est convenable et si le réglage préliminaire est bien fait.

Un entrefer est ménagé dans le circuit magnétique de ce transformateur, afin de lui donner une self-induction telle que le passage du courant primaire développe, aux bornes du secondaire, une force électromotrice de valeur proportionnelle à la tension de réactance de l'alternateur.

Le diagramme vectoriel pratique d'un alternateur peut être réduit à celui que représente la [*fig. 1118 (a)*] dans lequel U est la différence de potentiel aux bornes, $\omega L_s I$ la force électromotrice de self-induction et E la force électromotrice totale induite par le flux inducteur.

Le compoundage a pour objet de maintenir la constance du vecteur U, qui est lui-même la résultante de $\omega L_s I$ et de E. Lorsque le courant débité augmente, $\omega L_s I$ augmentant également, il faut élever la valeur de E.

Pour augmenter E, il faut augmenter le flux inducteur, c'est-à-dire le courant d'excitation parcourant les bobines inductrices de l'alternateur et, pour cela, il faut augmenter la tension du courant continu aux bornes de l'excitatrice.

Pour renforcer ce courant continu d'excitation, on diminuerait, dans un réglage à la main, la résistance du rhéostat de champ du shunt, mais dans le système Latour, c'est la force électromotrice développée dans le circuit de compoundage de l'alternateur qui, appliquée aux bagues BB' de la commutatrice, produit le relèvement de la tension continue aux bornes de celle-ci et, par conséquent, dans les électros F de l'alternateur.

Le fonctionnement du système est le suivant : on suppose d'abord les frotteurs *bb'* relevés et l'alternateur débitant un certain courant sous la tension normale. Le courant d'une des phases (ici la phase 3) traversant le primaire T du transformateur engendre, dans le secondaire R, une force électromotrice alternative en retard de 90° sur le flux et, par conséquent, sur le courant de phase [*fig. 1118 (b)*]. Cette force électromotrice *v* est donc en phase avec $\omega L_s I$ et le transformateur est construit de telle façon qu'elle reste constamment proportionnelle à $\omega L_s I$.

Ceci est obtenu en ménageant un entrefer dans le circuit magnétique du transformateur, qui devient ainsi comparable à celui de l'alternateur. Les coefficients de self-induction de ces deux machines doivent donc varier suivant une loi commune, avec la variation du courant.

Aux bornes du circuit S, il se développe une autre différence de potentiel u due au flux résultant de l'alternateur qui produit la tension U .

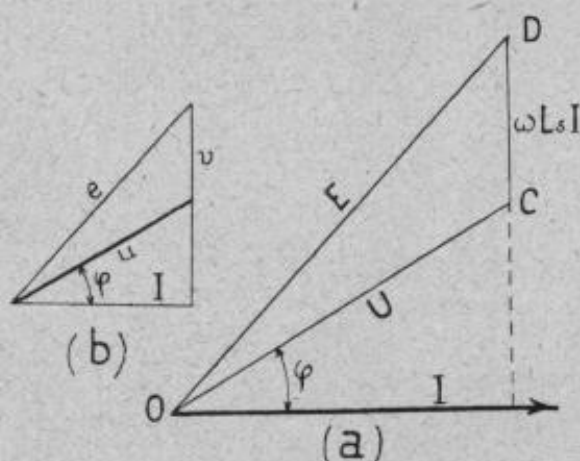


FIG. 1118.

On a donc u proportionnel et en phase avec U . On voit, par conséquent, qu'il se développe aux bornes bb' du circuit de compoundage une force électromotrice alternative e qui est la résultante de u et de v . Le triangle de ces trois forces est donc semblable au triangle OCD et e , résultante de u et de v , est donc proportionnelle à E .

Si la tension développée par l'excitatrice à ses bornes, ou

plutôt à ses bagues, est égale à e et en phase avec elle, le circuit de compoundage ne débitera pas de courant, si on abaisse les frotteurs bb' .

Soit, à présent, le circuit de compoundage raccordé par les frotteurs bb' . On suppose qu'il se produise une augmentation de la demande de courant, c'est-à-dire de la charge de l'alternateur.

Le courant croissant dans la phase 3 et traversant le primaire T produit une augmentation de la force électromotrice v dans le secondaire R. De ce chef, le côté v du triangle de la [fig. 1118 (b)] augmente et le côté e augmente également, le transformateur ayant été construit dans ce but. A ce moment, le triangle (b) se déforme, car le secondaire du transformateur débite et le vecteur de la force électromotrice qui est produite dans ce secondaire n'est plus perpendiculaire au vecteur du flux primaire.

Le vecteur e ayant augmenté, la tension alternative et la tension continue de l'excitatrice augmentent et, par conséquent, aussi le courant continu envoyé aux inducteurs F de l'alternateur ; u augmente de ce chef et les deux triangles (a) et (b) ont une tendance à redevenir semblables.

Pour maintenir la constance de U , il faut que E ait une certaine valeur, à laquelle correspond un courant d'excitation déterminé par la caractéristique à vide.

Lorsque la dynamo excitatrice débite ce courant, elle développe à ses bagues une tension alternative qui doit être égale à e , si on veut que le circuit de compoundage ne débite pas. Pour obtenir ce résultat, il faut que l'excitatrice ait une caractéristique convenable, ce qui constitue une

des particularités du système Latour ; dans la marche en auto-excitation, l'excitatrice donne à ses bagues, pour tous les régimes, une tension alternative égale et contraire à e , résultant de la combinaison de u et de v .

Le compoundage est d'autant plus parfait que cette condition est mieux réalisée.

Dans le procédé Miles Walker, le compoundage est obtenu sans transformation du courant alternatif, en utilisant la réaction d'induit pour renforcer le champ inducteur.

Le rotor possède un enroulement réparti dissymétriquement dans des entailles par rapport à l'axe du pôle. Par suite de la disposition choisie, certaines des dents du rotor formant corne polaire d'avant sont saturées à fond, de sorte que la réaction n'affaiblit que très peu le champ ; la corne d'arrière est, au contraire, peu saturée et le champ y est renforcé sensiblement par la réaction d'induit. Les dimensions sont choisies de façon que la machine soit hypercompoundée pour $\cos \varphi = 1$ et sensiblement compound pour des facteurs de puissance peu inférieurs à l'unité. Le réglage automatique ainsi obtenu est fonction de la valeur du courant et diffère suivant le déphasage. Tel quel, il permet évidemment, sans être absolument parfait, de réduire l'entrefer des machines et de pousser corrélativement l'utilisation de la matière.

Compoundage Dalémont et Herdl. — Dans ce procédé, on ne compense que la réaction longitudinale ; pour cela il faut ajouter, à l'excitation à vide, une excitation supplémentaire proportionnelle à $I \sin \psi$ (ψ étant le décalage entre le courant et la force électromotrice).

Compoundage de Rice. — L'arbre de l'alternateur porte à la fois l'inducteur tournant et l'induit de l'excitatrice qui a le même nombre de pôles que l'alternateur. Les pôles de l'excitatrice sont fixés à une culasse en anneau qui porte l'induit de l'alternateur. L'induit de l'excitatrice est un enroulement de dynamo à courant continu ordinaire avec collecteur et fournit le courant nécessaire à sa propre excitation et à celle de l'alternateur.

Sur le circuit principal du générateur se trouve le primaire d'un transformateur dont le secondaire est relié au moyen de trois bagues à trois points à 120° de l'induit de l'excitatrice. A vide celle-ci fonctionne en génératrice dimorphique et envoie dans le secondaire du transformateur un courant qui induit dans le primaire une faible force électromotrice opposée à celle de l'alternateur.

En débit inductif, si le courant est en retard sur la tension, les courants circulant dans l'induit de l'excitation produisent un champ fixe qui renforce celui produit par l'excitation ; la tension de l'excitatrice et par suite la force électromotrice de l'alternateur augmentent. Si le courant est en avance sur la tension, celle-ci tend à augmenter, mais les courants cir-

culant dans l'armature de l'excitatrice diminuent le flux magnétique et la tension de l'excitatrice baisse et avec elle la force électromotrice de l'alternateur.

Compoundage de Roth. — L'excitation est fournie par deux commutatrices alimentées l'une par le secondaire d'un transformateur branché en dérivation sur les bornes de l'alternateur, l'autre par le secondaire d'un transformateur série dont le primaire est parcouru par le courant de l'alternateur. Du côté continu les deux commutatrices sont connectées en

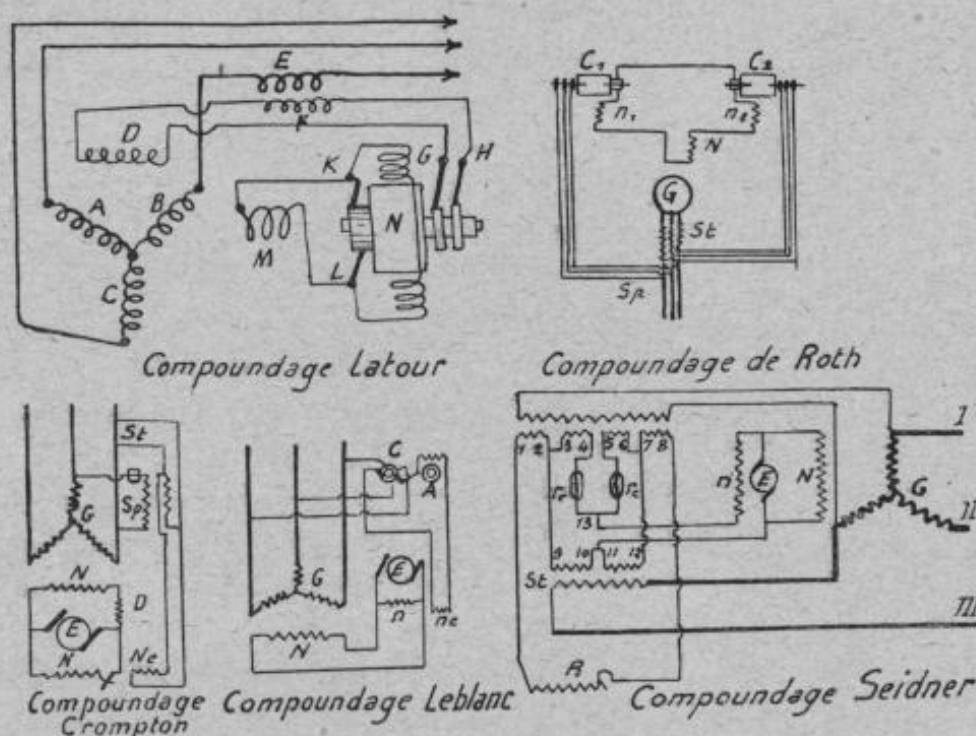


FIG. 1119.

série et alimentent les conducteurs de l'alternateur et les inducteurs de chacune d'elles.

Compoundage Leblanc. — L'excitatrice E (fig. 1119) possède deux enroulements inducteurs, l'un n en dérivation, l'autre n_c placé entre les bornes extrêmes d'une dynamo à tension constante A et d'une commutatrice C montées en série. La commutatrice est placée en dérivation aux bornes de l'alternateur G. Lorsque la tension a sa valeur normale, les différences de potentiel aux bornes de la commutatrice et de la dynamo sont égales et opposées; il ne passe donc aucun courant dans n_c . Si la tension augmente ou diminue il se produit un courant de compensation dans n_c qui diminue ou augmente la tension de l'excitatrice et ramène la différence de potentiel à sa valeur normale.

Compoundage d'Heyland. — Il consiste à agir, sans appareil auxiliaire, sur le champ de l'excitatrice en utilisant un flux de dispersion de l'alter-

nateur, lequel varie comme la réaction d'induit, c'est-à-dire comme doit varier l'excitation de l'alternateur quand la tension aux bornes doit rester constante.

Compoundage Dalivo Dobrowolsky. — Ce procédé est basé sur l'emploi des soupapes électrolytiques à aluminium qui ne laissent passer le courant que dans un sens.

En série avec les inducteurs de l'excitatrice E se trouvent le secondaire d'un transformateur S_t dont le primaire est en tension avec l'induit G de l'alternateur et trois éléments en aluminium A_c . Quand l'excitatrice débite, les soupapes ne laissent passer le courant du secondaire du transformateur que dans un sens tel que l'excitation de l'excitatrice soit renforcée.

Compoundage Crompton. — L'alternateur G (fig. 1119) est excité par l'excitatrice E dont les inducteurs sont saturés. L'enroulement N_c placé sur les pôles de l'excitatrice ne reçoit, à vide, que le courant du secondaire du transformateur de tension S_p et est connecté de façon à réduire l'excitation pour que la tension aux bornes de l'alternateur ait sa valeur normale.

En charge, l'alternateur G donne naissance à un courant qui oppose son action à celle du transformateur S_p , de sorte que le flux des inducteurs de l'excitatrice augmente et, par suite, la force électromotrice de l'alternateur croît.

Compoundage Parsons. — Entre les pôles de l'excitatrice est placée une dérivation magnétique en fer feuilletée portant des bobines excitées par le courant débité par l'alternateur. Si cette dérivation est saturée par l'excitation à courant continu de l'excitatrice, le courant alternatif y provoque une diminution de flux sans donner lieu à une augmentation correspondante.

Finalement le flux augmente dans l'induit et sa force électromotrice augmente et avec elle celle de l'alternateur.

Compoundage Seidner (fig. 1119). — Si l'on applique aux extrémités d'une résistance de fer, une tension croissante, on obtient, entre certaines limites, un courant d'intensité constante : la résistance du fer augmente et croît donc avec la tension.

Ainsi, si on fait passer simultanément dans une telle résistance du courant continu et du courant alternatif, la résultante pourra être maintenue constante. Si donc l'intensité efficace du courant alternatif varie de 0 à J, valeur constante du courant résultant, le courant continu variera de J à 0.

L'alternateur G est excité par l'enroulement N alimenté par l'excitatrice E dont le circuit inducteur est n . Les deux résistances en fer r_c , sont reliées au circuit n et aux secondaires de deux transformateurs.

De récentes expériences tendent à montrer qu'on peut employer pour le compoundage des alternateurs des redresseurs quelconques, en particulier ceux à mercure, et que les puissances pour lesquelles on établit ces appareils sont suffisantes pour permettre le compoundage de toutes les machines.

Ces redresseurs seraient aujourd'hui entrés dans la pratique industrielle et plusieurs installations en Allemagne posséderaient de ces appareils. En Amérique cette question est aussi à l'ordre du jour et Cooper Hewitt serait arrivé à réaliser un redresseur capable d'une puissance de 200 kilowatts en service continu. Il y aurait là une source d'intéressantes applications et en particulier dans la traction à cause des inconvénients présentés par les convertisseurs rotatifs. A Francfort-sur-le-Mein on a installé dans une grande fonderie un redresseur de 80 kilowatts sous 220 volts qui fournit la puissance de l'usine pendant les dix heures de travail de jour. Le courant alternatif simple de la ville à 2.850 volts, 45,3 périodes, est d'abord abaissé par un transformateur et transformé en courant continu à 220 volts par le redresseur. Pour une charge de 200 ampères et au-dessus en service continu, il faut faire agir une pompe à vide pour maintenir ce dernier à la valeur désirable. Un redresseur de 300 kilowatts fonctionne dans les ateliers Lanz à Mannheim; il est auto-exciteur. Le courant primaire triphasé de 3×3.150 volts 50 périodes est ramené à la tension convenable au moyen d'un transformateur dont le secondaire fournit du courant hexaphasé. Le redresseur transforme ce dernier en courant très légèrement ondulé à la tension de 2×220 volts. Les récipients employés contiennent en partie 12, en partie 18 anodes qui sont reliées par groupe aux six phases du transformateur.

Ces redresseurs sont entièrement construits presque uniquement en fer et en acier.

Voici quelques données relevées sur des redresseurs en fonctionnement. La plus petite chute de tension mesurée dans l'arc est de 11,5 volts pour

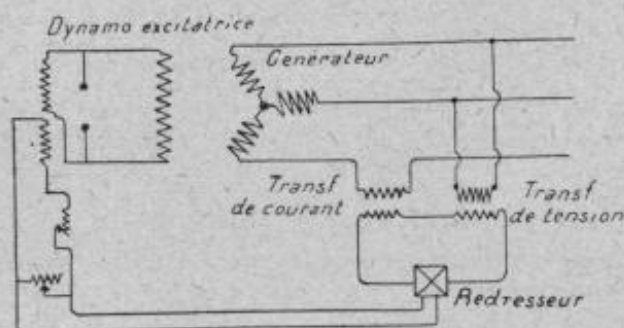


FIG. 1120.

une distance des électrodes de 7 centimètres et de 14 volts pour 25 centimètres. Le courant par anode étant de 30 ampères leur température a atteint 550° à 650°. La température des points les plus chauds de l'arc varie aux environs de 1.000°.

Pour le courant inverse dans les redresseurs, on a trouvé 0,4 milliampère pour 110 volts 30 ampères et 0,6 pour 110 volts 60 ampères.

En général, la dynamo excitatrice seule (fig. 1120) est munie d'un enrou-

lement compound. La résistance du redresseur est à déterminer de telle sorte que le courant continu minimum correspondant à la marche à vide de l'alternateur soit supérieur au courant continu nécessaire au fonctionnement de l'appareil. Pour parfaire le réglage, il est bon d'ajouter en série des résistances variables dans le circuit continu du redresseur ; ce procédé permet également l'hypercompoundage.

454. Conditions d'installation des alternateurs triphasés. —

Sous le rapport de la construction et des dispositions générales, tous les alternateurs sont semblables. Les machines à partir de 3.000 volts sont plutôt établies avec des induits fixes pour éviter les efforts mécaniques sur l'isolant, et l'armature est généralement extérieure aux inducteurs.

Il y a tendance actuellement à faire fournir directement aux alternateurs la tension de ligne ; cependant quelques constructeurs hésitent à entrer dans cette voie par la crainte de voir l'alternateur détérioré par la foudre. Les machines à fer tournant conviennent plus spécialement pour la production des hautes tensions.

Les alternateurs ont, en général, une résistance très faible par rapport à leur réactance, et leur angle de stabilité est assez grand ; mais, si on vient à brancher sur eux une ligne dont la résistance soit très grande par rapport à la réactance, l'angle de stabilité pourra être considérablement diminué et leur marche devenir, de ce fait, très irrégulière. Une réaction d'induit modérée, des pôles lamellés et des amortisseurs énergiques paraissent être les « conditions spéciales » auxquelles doivent s'attacher les constructeurs pour obtenir une bonne stabilité de marche.

Dans les alternateurs de grande puissance, l'induit est construit très rigide pour qu'il puisse résister, d'une part, à son propre poids et, d'autre part, aux efforts considérables et aux grandes vibrations auxquels il est soumis. L'induit doit être bien équilibré et muni en outre d'un dispositif de centrage.

Pour la facilité des réparations, on place les induits des gros alternateurs à inducteurs tournants sur des glissières, de sorte qu'on peut les amener aisément en dehors des inducteurs, en les faisant glisser le long de l'arbre.

La puissance unitaire des alternateurs atteint 5.000 kilowatts et plus avec des intensités efficaces de 10 à 300 ampères et des vitesses de 70 à 95 tours à la minute. Leur poids total varie de 80 à 100 kilogrammes par kilowatt utile, pour descendre à 50 ou 60 kilogrammes dans les fortes unités.

Quand les turbines sont à axe vertical, l'alternateur peut être commandé par l'intermédiaire d'engrenages coniques, de manière que son arbre soit horizontal. A partir de 200 et 300 kilowatts, on emploie la com-

mande directe, l'arbre de l'alternateur étant vertical et la roue horizontale formant volant. Les turbines pour hautes chutes ont leur axe horizontal, et la commande est directe.

455. Descriptions et spécifications de quelques types d'alternateurs de construction moderne. — I. *Alternateur triphasé, 2.000 kilovolt-ampères et 5.200 volts, 500 tours, 50 périodes.* — Cette machine a été installée par la Société alsacienne de constructions mécaniques à l'usine hydroélectrique du Refrain (Doubs) (§ 350). La carcasse de l'induit fixe est formée de deux parties en fonte avec joint horizontal à hauteur de l'axe de la machine (*fig. 1121*). Elle repose sur un socle en fonte qui porte également les deux paliers. A l'intérieur de la carcasse sont fixées les tôles de l'induit, isolées entre elles et assemblées par paquets séparés par des plaques-évents. Le noyau induit ainsi formé (*fig. 1122*) porte des cannelures ouvertes dans lesquelles sont logés les enroulements soigneusement isolés de la masse. Ces enroulements sont constitués par des spires formées sur gabarit, identiques et interchangeable ; elles sont mises en place sans qu'il soit nécessaire de faire aucune opération d'enroulement et sont maintenues par de simples cales en matière isolante qui viennent s'engager dans des rainures ménagées dans les dents de l'induit.

Le volant inducteur est constitué par une étoile en acier coulé, clavetée sur l'arbre. La jante du volant est formée par une série de bagues en acier coulé placées à chaud sur l'étoile. Les pôles inducteurs formés également de tôles isolées entre elles et assemblées en paquets sont boulonnés depuis l'intérieur de la jante, ce qui permet de changer soit une bobine inductrice, soit une bobine induite sans démonter d'autres pièces. Le courant inducteur est amené aux pôles par le moyen de deux bagues fixées sur l'arbre et de frotteurs.

Les surfaces polaires ont une forme spéciale antiharmonique brevetée.

Les rendements garantis pour $\cos \varphi = 1$, sont : 95 0/0 à pleine charge, 94,5 à 94,5 à trois quarts de charge et 91,5 à demi-charge.

Spécification :

Puissance unitaire normale.....	2.000 k. v. a.
Tension aux bornes.....	5.200 volts
Vitesse.....	500 t. m.
Fréquence.....	50 périodes sec.

STATOR

Nombre de cannelures par pôles et par phase....	3
Nombre total de cannelures.....	108
Dimensions des cannelures	23/54 millim.

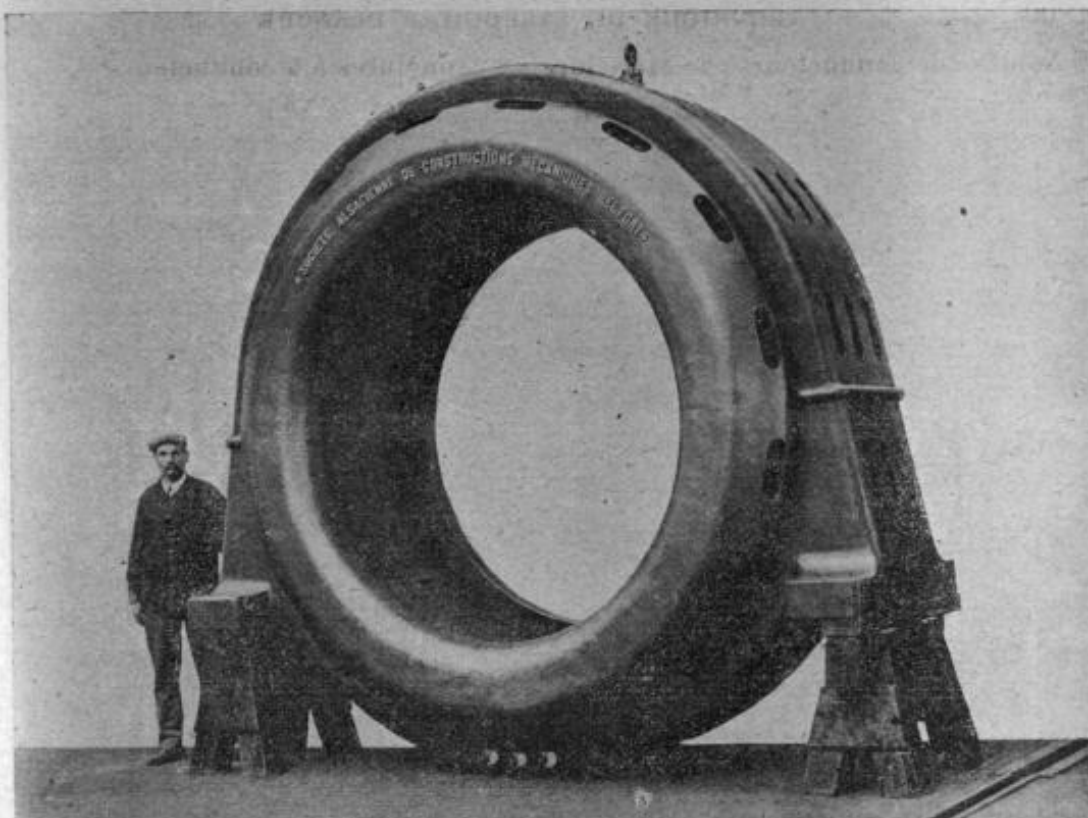


FIG. 1121. — Alternateur de 2.500 HP. Stator. (Société alsacienne de Constructions mécaniques).

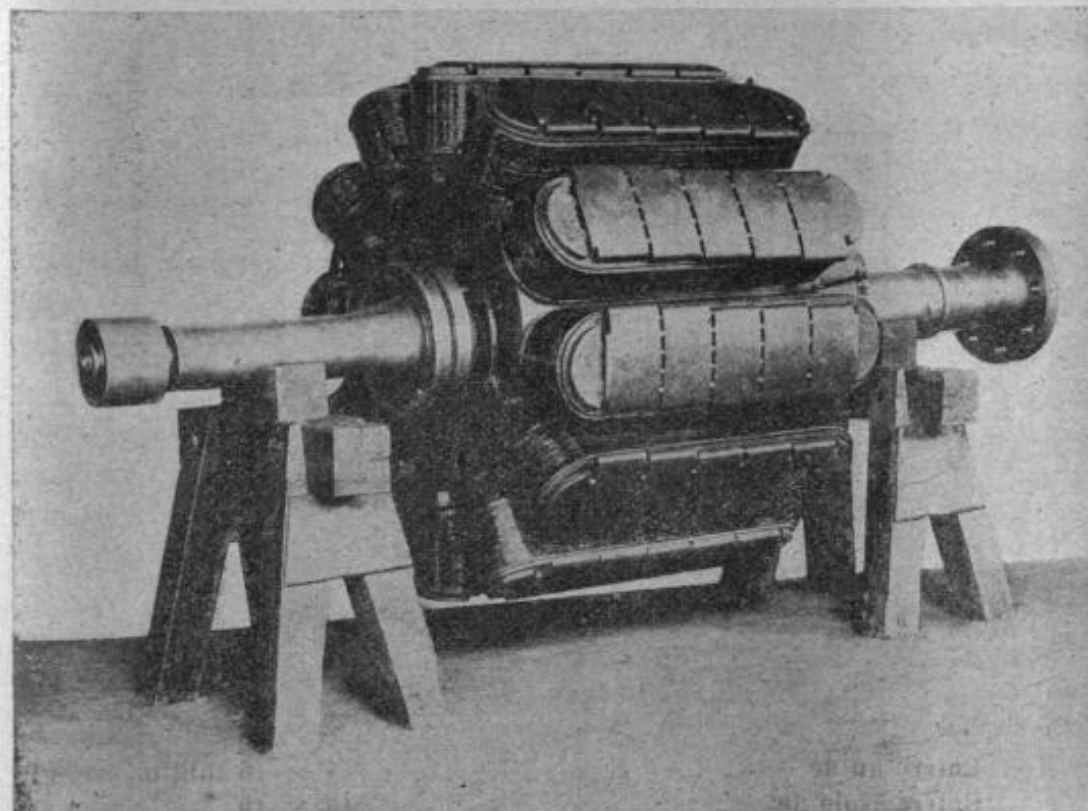


FIG. 1122. — Alternateur de 2.500 HP. Rotor. (Société alsacienne de Constructions mécaniques).

ROTOR

Nombre de pôles.....	12
Nombre de spires par bobine.....	56,5
Cuivre nu de.....	$25 \times 2,5$ millim.

Les spires de cuivre sont isolées par 0,5 de presspahn.

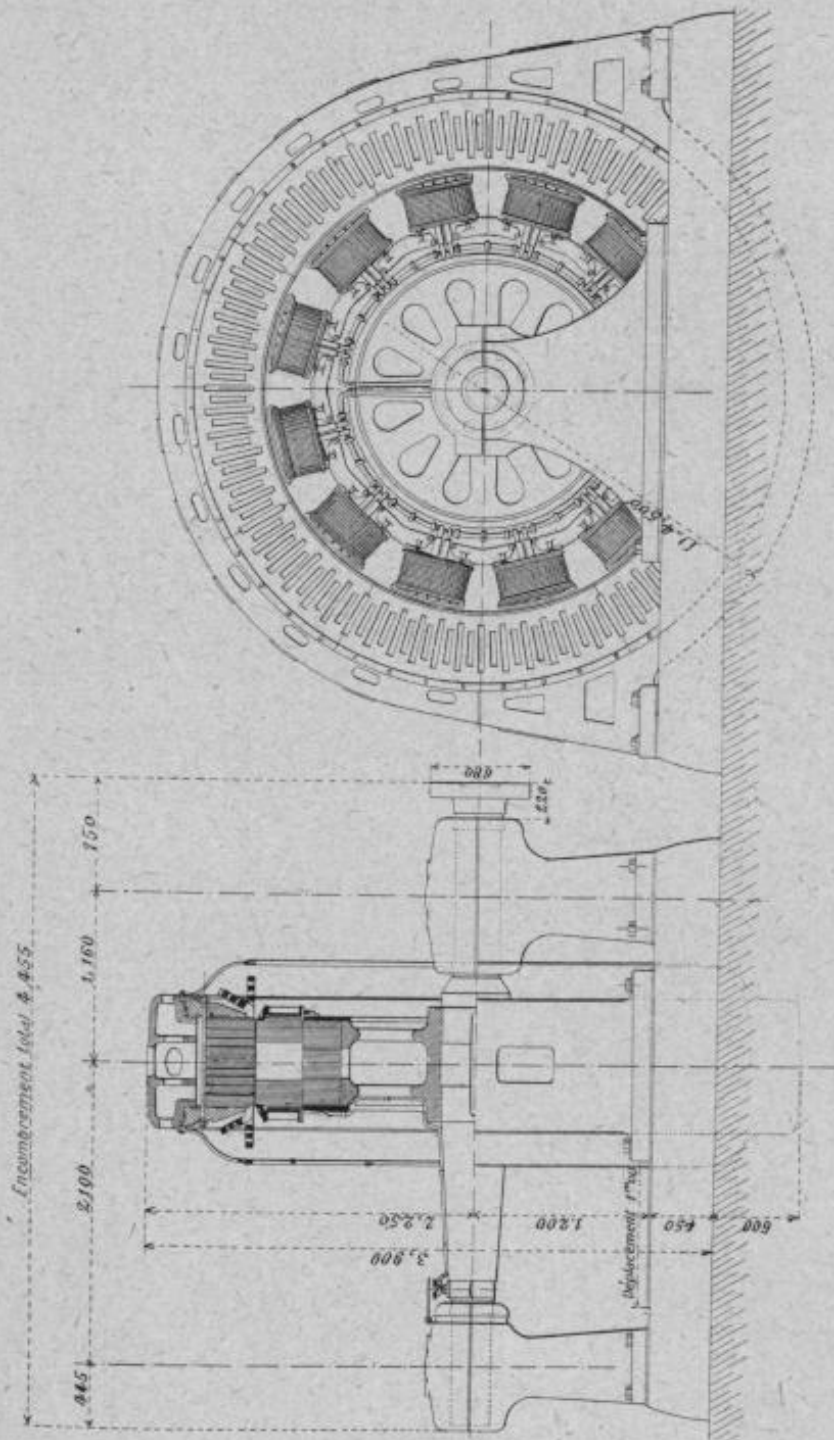


FIG. 1124. — Alternateur triphasé Thomson-Houston, 7.500 volts, 3.000 K. V. A., 250 tours, 12 périodes.
Usine hydroélectrique de la Brillanne.

II. Alternateur triphasé de 3.060 kilovolts-ampères, 5.000 volts, 500 tours, 50 périodes. — Cette machine (fig. 1123), construite par la Compagnie Générale d'Électricité de Creil, pour l'usine hydroélectrique d'Orlu,

a été établie pour qu'elle puisse supporter sans inconvénient la vitesse d'emballement des turbines, en cas de non-fonctionnement du régulateur, la vitesse dans ce cas, pouvant atteindre 900 tours à la minute. Les rendements sont, pour pleine charge, trois quarts de charge, demi-charge et un quart de charge et pour $\cos \varphi = 0,8 : 95,5 ; 94,4 ; 92$ et 85,4 p. 0/0.

Spécification :

Puissance apparente.....	3.060 k. v. a.
Tension entre phases.....	5.000 volts
Vitesse normale.....	500 t. m.
Fréquence.....	50 périodes
Énergie pour l'excitation.....	22,6 kilowatts
Tension de l'excitation.....	110 volts
Poids de l'alternateur.....	40 tonnes

III. *Alternateur triphasé, 7.500 volts, 3.000 kilovolts-ampères, 250 tours, 25 périodes.* — Cette machine (*fig. 1124 à 1126*) a été construite par la Compagnie Thomson-Houston pour l'usine hydroélectrique de la Brillanne. En voici la spécification :

Ampères : $\cos \varphi = 1 = 208$; $\cos \varphi = 0,90 = 231$.

Puissance en kilowatts : 2.700.

Type du bobinage : γ .

Nombre d'encoches total : 108.

Nombre d'encoches par phase et par pôle : 3.

Nombre de bobines par phase : 9.

Nombre de bobines par spire : 8.

Nombre de conducteurs par encoche : 8.

Dimensions des encoches : $36,5 \times 70$ millimètres.

Section du conducteur : 77 millimètres carrés.

Densité de courant pour la pleine charge :

$$\cos \varphi = 1 = 2,7 ; \text{ pour } \cos \varphi = 0,9 = 3,00.$$

Résistance ohmique à 20° C. par phase : 0,203 ohm.

Nombre de bobines du bobinage inducteur : 12.

Nombre de spires par bobine — : 95.

Section du conducteur inducteur : 90 millimètres carrés.

Mode de connexion des bobines inductrices : séries.

Résistance totale à 20° C. : 0,4704 ohm.

Diamètre intérieur de l'induit : 3 mètres.

Vitesse périphérique en mètres par minute : 39.

Longueur effective du noyau avec sections de ventilation : 600 ; effective : 500.

Entrefer minimum : 8 millimètres ; moyen : 13 millimètres.

Rapport de l'arc polaire au pas : 0,70.

Ampères d'excitation : plein voltage, à vide : 125 ; plein voltage, pleine charge, $\cos \varphi = 1$: 140 ; plein voltage, pleine charge, $\cos \varphi = 0,80$: 180.

Régulation à pleine charge non inductive : 10 0/0.

Rapport du courant de court-circuit au courant de pleine charge, pour l'excitation correspondant au plein voltage sous la pleine charge non inductive : 2,5 — 2,75.

Rendements présumés :

25 0/0 de surcharge : $\cos \varphi = 1$: 95,3 ; $\cos \varphi = 0,90$: 94,5.

Pleine charge : $\cos \varphi = 1$: 93 ; $\cos \varphi = 0,90$: 94,3.

1/2 charge : — 92 ; — 91,5.

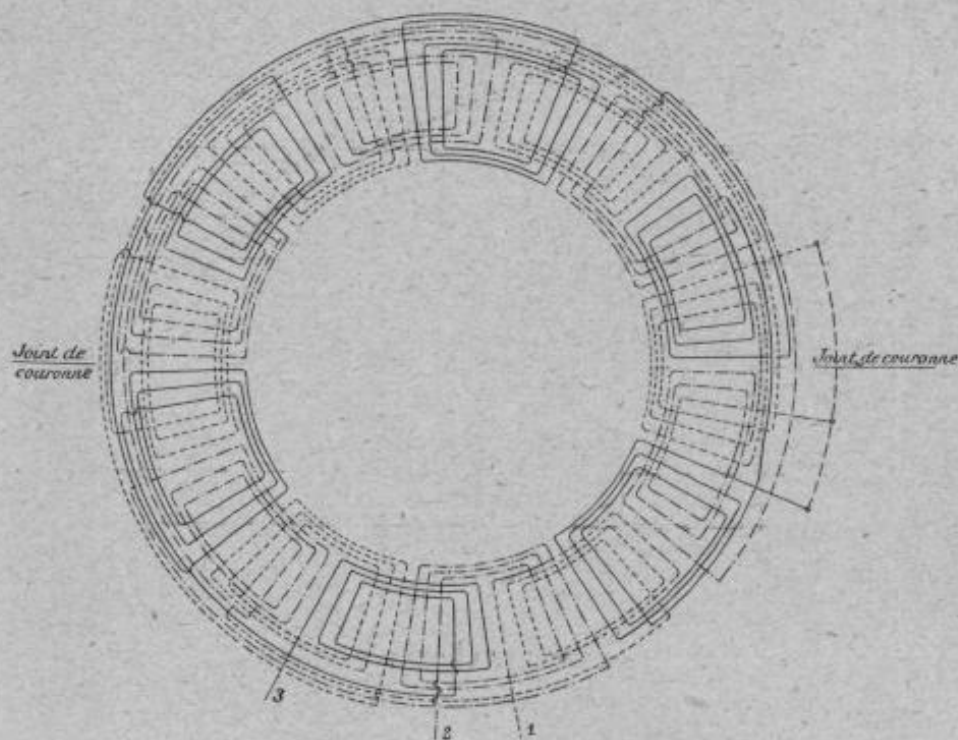


FIG. 1125. — Diagramme du stator.

IV. Alternateur triphasé de 900 kilovolts-ampères, 11.000¹⁷ volts, 215 tours, 50 périodes. — Cette machine, installée à l'usine hydroélectrique de Sauviat et construite par la maison Allioth, est représentée par la spécification ci-après : induit fixe ; puissance absorbée, 1.000 HP ; intensité normale 47,5 ampères ; nombre de pôles inducteurs, 28 ; induit, 168 rainures, 2 trous par pôle et par phase, chaque bobine formée de 17 spires d'un fil de 4mm,8 de diamètre ; connexions en étoile, enroulement du type à trois étages de bobines avec coupure : inducteur, bobines montées en série, chacune d'elles formée de 116 spires constituées par un ruban de cuivre de 18mm × 2mm,5 enroulé sur champ ; vitesse périphé-

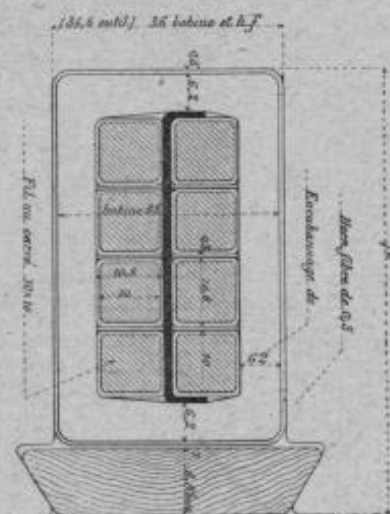


FIG. 1126. — Encoches du stator.

rique, 28 mètres par seconde ; chute de tension, 4 0/0 pour $\cos \varphi = 1$ et 16,5 0/0 pour $\cos \varphi = 0,75$.

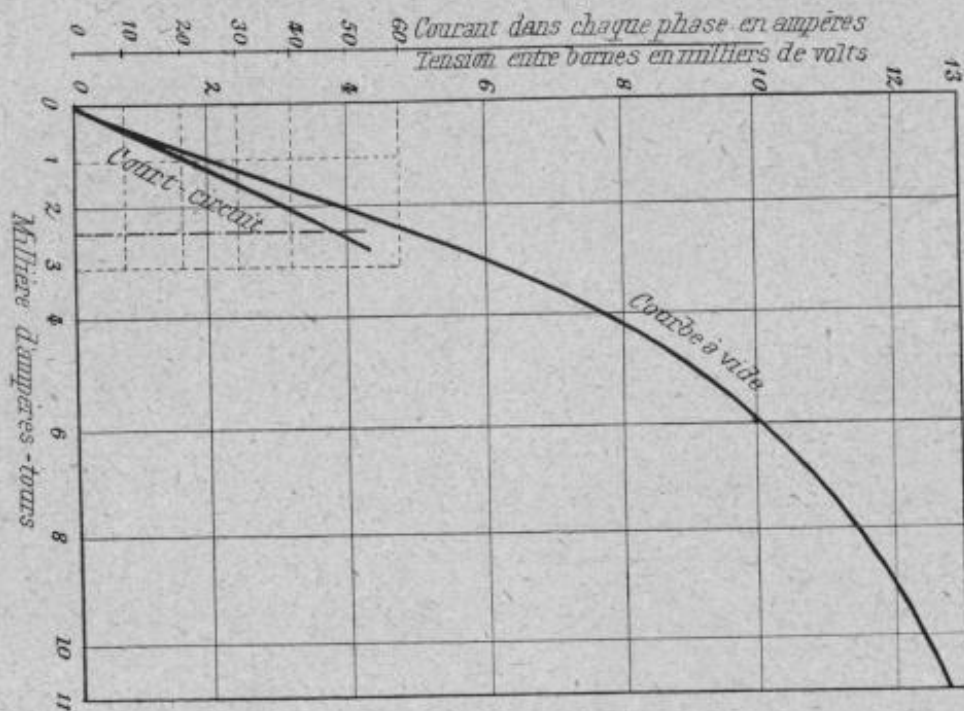


FIG. 1127.

La (fig. 1127) donne les caractéristiques à vide et de court-circuit, et la (fig. 1128) les courbes de rendement.

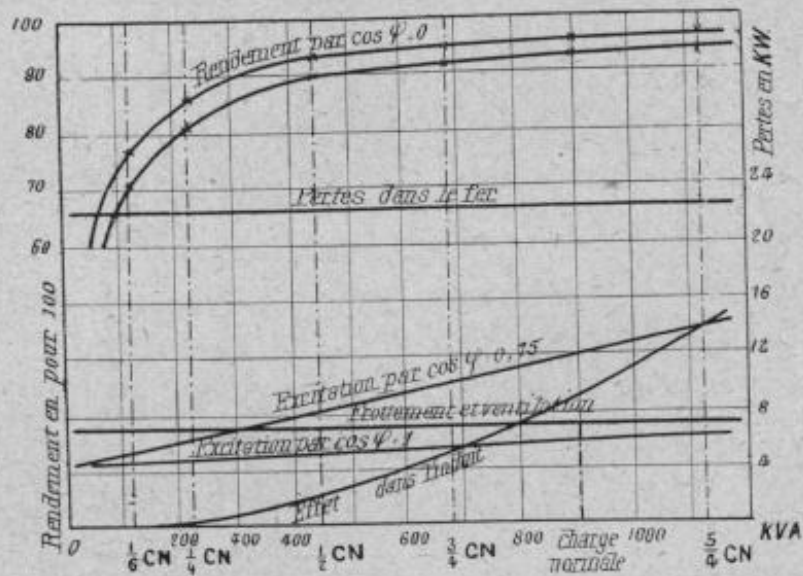


FIG. 1128.

V. Alternateur triphasé de 2.500 kilovolts-ampères, 50 périodes (Schneider et Cie). — Nombre de pôles, 12 ; pertes dans le fer en kilowatts, 40 ; pertes dans le fer en kilowatts, 15,8 ; à pleine charge et à chaud pour

$\cos \varphi = 0,8, 14,6$; rendement à chaud, en pour 100, pour $\cos \varphi = 0,8$: quart de la charge = 89, demi-charge = 93 et pleine charge = 95 ; chute de tension à pleine charge et à chaud, en pour 100, pour $\cos \varphi = 1 : 8$, et pour $\cos \varphi = 0,8 : 22$; puissance absorbée par l'excitation en kilowatts, à vide : 6, et à pleine charge pour $\cos \varphi = 1 : 18$; intensité de court-circuit, en ampères, 1.000, et poids total en kilogrammes, 29.000.

VI. *Alternateurs triphasés de 30.000 volts de l'usine hydroélectrique d'Amiene (Italie).* — Leur vitesse est de 400 tours. Ils peuvent fonctionner soit en triphasé, soit en monophasé. En triphasé ils peuvent supporter 100 ampères par phase pendant un temps indéfini. Ils développent donc 5.190 kilowatts si la charge n'est pas inductive et 5.190 kilowatts sur circuits inductifs ($\cos \varphi = 0,7$). Dans chacun de ces cas, les échauffements sont respectivement de 40° et 45° C. au-dessus de l'ambiante.

En monophasé ($\cos \varphi = 0,7$) ils débitent 130 ampères (2.730 kilowatts).

Ils peuvent passer brusquement de la charge maximum à la marche à vide et supporter une minute de court-circuit avec l'excitation maxima. Ils ont été calculés largement pour permettre le passage d'un régime équilibré à un régime d'inégale répartition des charges, tout en maintenant la constance de la tension.

L'axe appuie sur deux coussinets, distants de 3 mètres, ayant 270 millimètres de diamètre et 350 millimètres de longueur, refroidis par l'eau ; il déborde en dehors d'eux et porte à faux d'un côté la roue motrice et de l'autre l'induit de l'excitatrice. Entre les deux coussinets tourne, comme volant, la roue de l'inducteur qui est formée d'un anneau d'acier d'une seule pièce calé à chaud sur 6 rais d'acier fondu.

L'inducteur a 12 pôles, de section elliptique, en acier fondu, avec épanouissements lamellés. Leurs enroulements sont formés d'un ruban de cuivre nu de 40×3 millimètres carrés, isolés avec des anneaux de press-pahn. Il y a 61 spires par pôle ; la résistance totale des spires d'un champ est de 0,24 ohm, à chaud.

Le diamètre extérieur de la carcasse en fonte contenant le noyau de l'induit est de 4 mètres et sa largeur axiale de 1^m,27. Le diamètre intérieur de l'induit est de 2^m,4 et l'entrefer atteint 14 millimètres. Il y a, par phase, 12 bobines induites, incluses dans les encoches du noyau ; chacune contient 24 barres de cuivre de $9 \times 5,7 = 51$ millimètres carrés. Ces barres sont entortillées avec plusieurs couches de ruban de mica et enfermées dans des tubes de mica ; la bobine est donc très compacte et son isolement élevé.

Les bobines sont connectées en étoile. A vide, avec 30.000 volts aux barres, la force électromotrice efficace par spire est de 62 volts. La résistance de chaque branche de l'étoile est de 0,4 ohm à 20° C.

L'induit peut tourner sur des cylindres ajustables, ce qui permet de le

centrer en tout temps autour de la roue inductrice et de faciliter la mise en place des bobines, leur inspection et les réparations.

L'excitatrice peut fournir 440 ampères sous 110 volts; l'intensité d'excitation se règle à partir du tableau, mais l'ampèremètre est placé sur l'excitatrice. Les fils d'excitation passent par deux trous pratiqués sur le coussinet et aboutissent à deux colliers situés sur l'axe.

Le poids total de l'alternateur et de l'excitatrice est de 76 tonnes dont 22¹/₂ pour la partie tournante.

VII. *Alternateurs triphasés de 10.000 volts de l'usine hydroélectrique de Tivoli (Italie).* — Sur l'axe de chaque turbine est calée, comme volant, la roue des inducteurs de l'alternateur. Celui-ci est en effet à induit fixe, extérieur aux inducteurs, ce qui facilite les réparations et le nettoyage. De plus, les excitatrices sont placées en bout d'arbre de chaque alternateur. Ainsi, lorsqu'il se produit un court-circuit, la vitesse de rotation de la turbine diminue et par suite la tension aux bornes de l'alternateur, très rapidement pour deux raisons : réduction de la vitesse et affaiblissement de l'excitation. Ceci est important dans l'espèce, car les interrupteurs de départ sont à temps : ils ne déclanchent qu'au bout de six ou sept secondes et, durant ce laps de temps, un court-circuit produirait des dommages énormes si l'excitation était séparée.

L'arbre appuie sur les deux coussinets distants de 3^m,150 et déborde en dehors de chacun d'eux portant à faux d'un côté la roue motrice de la turbine et de l'autre l'induit de l'excitatrice.

Les deux coussinets possèdent une circulation d'eau pour refroidissement, uniquement par mesure de prudence, car, quand on fait tourner l'alternateur sans refroidir les coussinets, la température de ces derniers ne surpasse pas l'ambiance de plus de 37°. La partie tournante pèse 34 tonnes et la force vive emmagasinée dans le volant formé par la roue des inducteurs est de 2.000.000 de kilogrammètres.

Le poids total de l'alternateur est de 86 tonnes.

L'inducteur a 24 pôles cylindriques en acier fondu, terminés par un épanouissement polaire lamellé. Le diamètre intérieur de l'induit est de 4^m,020, l'entrefer de 10 millimètres; le diamètre intérieur de la carcasse en fonte contenant le noyau de l'induit est de 5^m,280 et la largeur, suivant l'axe de 1^m,170. Le noyau est formé de 550 millimètres de tôles de fer avec 5 canaux de ventilation dont 4 de 15 millimètres et celui du milieu de 25 millimètres.

L'enroulement des 24 bobines inductrices est formé de ruban de cuivre nu de 30 millimètres sur 5 millimètres, isolé au presspahn; il y a 50 spires par pôle; la résistance totale des spires d'un champ est de 0,21 ohm à 20° C.

A chaque pôle correspondent trois encoches sur l'anneau induit;

chaque encoche contient, dans un tube de micanite de 6 millimètres d'épaisseur, 6 câbles de chacun 19 éléments, du diamètre de 1^{mm},8, de la section de 48^{mm}²,3 par câble.

L'enroulement qui passe par 6 encoches constitue une bobine induite.

Les douze bobines de chaque phase sont disposées en série et les trois branches groupées en étoile. La force électromotrice induite dans chaque spire de l'armature, en marche à vide et avec 10.000 volts aux pôles, est égale à 27,8 volts.

La résistance d'une branche de l'étoile est de 0,25 ohm à 20° C.

A la vitesse normale des turbines (225 tours), la fréquence est de 45 périodes avec une fluctuation de 3 0/0 qui facilite la mise en parallèle. Les régulateurs peuvent donner une fréquence comprise entre 42 et 48.

Les alternateurs sont enroulés de manière que chaque branche de l'enroulement puisse supporter, pendant un temps indéfini, 200 ampères, ce qui donne sur un circuit non inductif 3.464 kilowatts, c'est-à-dire 4.700 chevaux électriques. Dans ces conditions, aucune partie de l'alternateur ne s'échauffe au delà de 40° sur l'ambiante. Ces alternateurs ont donc la puissance des alternateurs diphasés installés au Niagara par la Cataract Construction Co, et ils étaient, à l'époque de leur installation, les plus grands qui aient été construits en Europe.

En monophasé, dans les mêmes conditions, chaque alternateur peut débiter 200 ampères sous 10.000 volts, soit 1.400 kilowatts et l'échauffement ne dépasse pas 40°.

En raison des services simultanés (éclairage, forcé motrice, traction) qu'il est nécessaire d'assurer, de l'inégale répartition des charges sur les phases, les alternateurs ont été calculés très largement. La chute de tension entre la marche à vide et la marche en charge (200 ampères par phase, 10.000 volts, 42 périodes, $\cos \varphi = 0,7$) est de 11,5 0/0.

VIII. *Alternateur de 5.000 HP 8.000 ampères 250 volts pour électrochimie.* — Cet alternateur qui a été construit pour l'usine d'aluminium de Vigeland (Norvège) peut, avec les caractéristiques indiquées plus haut, tourner à 220 tours-minute.

Il est muni de pôles auxiliaires, mais n'a qu'un seul collecteur.

La culasse des aimants est en fonte d'acier coupée en deux moitiés par un plan horizontal. Les entretoises, venues de fonte avec les noyaux de serrage du rotor, font office d'ailettes de ventilateur. Aucune partie de la machine, après marche prolongée en pleine charge n'atteint des surélévations de température supérieures à 35°. L'induit a un diamètre de 2^m,80 et une largeur du feuillard de 0^m,390. Dans le noyau sont taillées 400 encoches de 8^{mm},5 de largeur et 44 millimètres de profondeur. L'enroulement est à tambour avec conducteurs reliés parallèlement. Dans chaque encoche se trouvent deux conducteurs de 16 × 5^{mm},6 de section.

L'entrefer est en moyenne de 6 à 7 millimètres. L'induit est muni de connexions de compensation placées sur le côté opposé au collecteur.

Le diamètre de ce dernier est de 1^m,40 et chacune des 400 lames présente une longueur de 0^m,81. Les frettes des collecteurs permettent de régler la pression uniformément sur tout le tour du collecteur. Les douze lignes de balais sont connectées alternativement aux anneaux collecteurs principaux, positif et négatif.

Les vingt pôles auxiliaires sont connectés par deux en série en dix groupes. Chaque spire comprend deux conducteurs parallèles de 10×20 millimètres de section.

Cet alternateur a été construit pour les ateliers d'Oerlikon.

IX. *Alternateur de 6.000 kilowatts pour turbine Brow Boveri Parsons.*

— Il débite du courant triphasé à 10.250 volts 25 périodes et est construit pour fournir en marche normale 5.000 kilowatts, soit environ 5.500 kilovolts-ampères pour une valeur du cosinus de l'angle de décalage égale à 0,90, mais il peut fournir pendant deux heures jusqu'à 6.000 kilowatts et exceptionnellement pendant quelques instants jusqu'à 7.300 kilowatts.

L'excitation est fournie par un service auxiliaire indépendant à la tension de 220 volts.

Le stator, ou induit, est divisé en deux parties, ce qui facilite la construction et le montage. Dans le bâti, complètement fermé, sont aménagés des canaux de ventilation prenant, dans le sous-sol de la salle, l'air qui est aspiré par deux ventilateurs placés sur l'arbre de l'inducteur. L'air, entrant par le bas, entoure ou traverse l'inducteur et les enroulements de l'induit, dans lequel on a ménagé, à cet effet, des canaux, et est refoulé par un large orifice formant cheminée au-dessus de la carcasse. Des coupe-circuits sont disposés sur les enroulements connectés en étoile. Les bobines qui composent les enroulements sont fixées par des cales en bois dans les rainures. L'isolation des enroulements a été résolue de telle sorte que chaque bobine a résisté, avant la mise en place, à une tension de 35.000 volts appliquée pendant cinq minutes et que l'ensemble, entièrement monté, a été éprouvé pendant trente minutes à la tension de 21.000 volts.

On peut visiter facilement les enroulements du stator complètement fermé, en enlevant les couvercles placés de chaque côté.

Pour annuler, aussi complètement que possible, les vibrations, autant que pour assurer la résistance mécanique de l'ensemble, le rotor est monté sur un arbre creux, de 1 mètre environ de diamètre.

Le champ magnétique est produit par des tôles d'acier clavetées sur l'arbre et sectionnées de manière à réserver les intervalles assurant une bonne ventilation. Elles comportent, longitudinalement, des rainures qui

reçoivent les bobines d'excitation maintenues par des barres métalliques.

Les barres sont enfermées dans des calottes faites d'un métal antima-gnétique. Contre ces calottes sont fixés les ventilateurs. Enfin, il y a à chaque bout une bague collectrice, de telle sorte que le rotor est tout à fait symétrique. Le courant d'excitation, dont l'intensité peut dépasser 200 ampères, est amené aux bagues en cuivre au moyen de balais en charbon.

Le rendement de l'alternateur et l'augmentation de température, par rapport à l'air ambiant, à pleine charge, ont été mesurés à l'usine de Saint-Denis.

L'élévation de température est au plus de 30° C. Quant au rendement, il est de 96,2 0/0, en dehors des pertes dues au frottement et à la venti-lation et du travail nécessité par l'excitation.

X. *Alternateur triphasé 42 périodes 3.300 volts 1.500 kilowatts, 181 tours-minute. Canale Miliani, C^{ie} Westinghouse.* — L'induit forme la partie fixe, il est constitué par une cou-ronne de 500 millimètres de largeur de tôles d'acier doux, isolées entre elles et placées à l'intérieur d'une carcasse de fonte rigide et indé-formable. Des canaux de ventila-tion sont ménagés dans la masse des tôles.

Le bobinage est fait de fil isolé, de 52 millimètres carrés de section en cuivre de haute conductibilité. Ce fil est logé dans des tubes de micanite épousant la forme des can-nelures poinçonnées dans les tôles; le nombre des cannelures est de 168, leur largeur est de 23 millimètres et leur hauteur de 33 millimètres. Dans chaque cannelure se trouvent huit conducteurs formant quatre groupes de deux conducteurs réunis en parallèle. La connexion est faite en étoile.

La partie tournante formant l'inducteur de l'alternateur est constituée par un volant d'acier de 2^m,600 de diamètre. Sur la périphérie du volant sont boulonnés solidement 28 pôles d'acier venus de fonte avec épanouis-sements polaires.

Les bobines inductrices sont constituées par des barres de cuivre méplat de 2^{mm},8 × 28^{mm} enroulées sur champ et isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Chaque bobine est faite de 53 spires. La

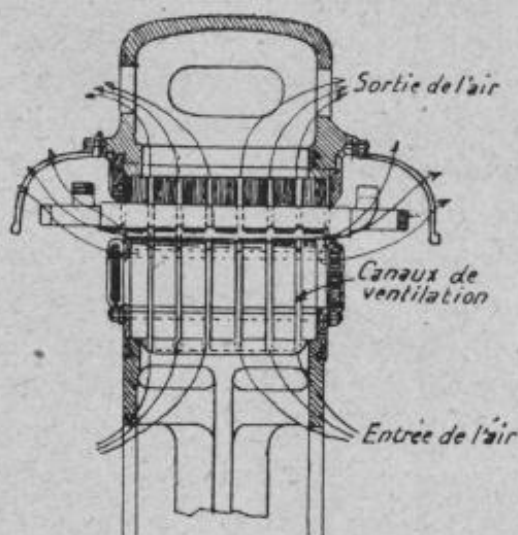


FIG. 1129. — Canaux de ventilation.
(Alternateurs Westinghouse).

longueur de l'entrefer est de $2\text{mm} \times 8\text{mm}$ dans l'axe des pôles et de $2\text{mm} \times 12\text{mm}$ à leurs extrémités.

L'ensemble de la partie tournante et de la partie fixe est monté sur une base en fonte encastrée dans la maçonnerie et présentant des crans pour le déplacement latéral du stator, ce qui facilite beaucoup les réparations des bobinages induit et inducteur.

Ces alternateurs supportent leur pleine charge de 1.500 kilowatts sous 3.300 volts d'une façon continue, sans que l'élévation de température des enroulements dépasse de plus de 45°C . la température ambiante; une surcharge de 25 0/0, pendant six heures, sans que l'élévation de température des enroulements dépasse de plus de 60°C . la température ambiante; et une surcharge de 50 0/0, pendant une heure, sans danger.

Le rendement aux différentes charges est comme suit : pleine charge, 93,5 0/0 avec facteur de puissance = 0,8; $3/4$ de charge, 92,3 et $1/2$ charge, 90 0/0. Comme puissance d'excitation, l'alternateur absorbe, en pleine charge avec $\cos \phi = 0,8$, 312 ampères sous 125 volts.

Le poids total est de 40 tonnes.

XI. *Alternateur à arbre vertical.* — Dans les usines génératrices où l'on utilise des chutes d'eau de quelques mètres seulement de dénivellation au moyen de turbines à arbre vertical et à faible vitesse de rotation, on a généralement abandonné l'emploi de roues coniques comme organe de transmission entre la turbine et la génératrice électrique.

Au point de vue du rendement, ces alternateurs sont comparables aux bons alternateurs à arbre horizontal; seule la répartition des pertes est différente. La puissance d'excitation nécessaire est relativement plus grande dans les hautes pressions, conséquence de l'entrefer par rapport au pas polaire nécessitée par les exigences de la construction; par contre, les pertes par friction et ventilation sont moindres, grâce à la faible vitesse de rotation. Cette dernière favorise la réduction des pertes dites d'entrefer (pertes supplémentaires).

Nous citerons, à titre documentaire, un cas spécial limite de faible vitesse angulaire, consistant en un alternateur Oerlikon tournant à 40 tours-minute installé à l'usine hydroélectrique de la ville de Brème (alternateur triphasé 500 kilowatts 7.000 volts 50 périodes).

L'inducteur est coulé en quatre pièces avec bras en I, l'intervalle polaire est de 115 millimètres, les dimensions en profil des aubes sont très réduites : 75 millimètres à l'épanouissement, 45 millimètres au noyau. La machine comporte 150 pôles, feuilletés et fixés aux noyaux au moyen d'une queue d'aronde. Les bobines inductrices en ruban de cuivre enroulées de champ sont bandagées extérieurement. Les perforations du stator sont au nombre de six par pôle. L'enroulement, disposé dans deux plans,

se compose exclusivement de bobines droites et de bobines coudées, les bobines gauches de chaque phase ayant pu être supprimées sans inconvénient. Les essais ont fourni les chiffres suivants :

Chute de tension en 0/0 de la tension normale : 4,8.

Charge inductive : 17,2.

Augmentation du courant d'excitation du vide à pleine charge en 0/0 de l'excitation à vide (en charge inductive) = 33.

Capacité de surcharge inductive en 0/0 de la puissance en K. V. A. (surcharge 1/2 heure) : 50.

Rendement mesuré en 0/0	{	Pleine charge non inductive : 92,7, $\cos \varphi = 0,8$.
		Demi-charge — 88,9, — 0,8.

CHAPITRE XXII

MACHINES RÉCEPTRICES

1. — MOTEURS ALCOURANT CONTINU

456. Force contre-électromotrice et couple moteur. — Les moteurs à courant continu peuvent être alimentés par un courant soit à potentiel constant, soit à intensité constante.

Appelons E la tension du courant qui alimente le moteur et I l'intensité, la puissance disponible est : $E \times I$. Une partie seulement de cette énergie (ΦnNI) est seulement utilisée dans la réceptrice, l'autre partie (RI^2) se dégageant sous forme de chaleur dans les conducteurs de résistance R .

On a par suite :

$$EI = \Phi nNI + RI^2 \quad \text{ou} \quad E = \Phi nN + RI,$$

d'où l'on tire :

$$(1) \quad I = \frac{E - \Phi nN}{R}.$$

L'expression ΦnN mesure la valeur de la force contre-électromotrice e et on peut mettre la formule (1) sous la forme :

$$(2) \quad I = \frac{E - e}{R}.$$

La puissance P_m utilisable sur le moteur, qui est celle fournie sur son arbre, déduction faite des pertes par frottements, par hystérésis et par courants parasites, a pour expression :

$$P_u = eI = 2\pi nC_m = \omega C_m,$$

C_m désignant le couple moteur.

Mais $e = \Phi nN$; donc :

$$(3) \quad C_m = \frac{\Phi IN}{2\pi}, \text{ en unités C. G. S.}$$

En exprimant I en ampères, l'expression (3) devient :

$$C_m = 1,621 \times 10^{-10} \times \Phi IN \text{ kilogrammètres.}$$

D'autre part, si on remplace dans la formule (3) la valeur de I tirée de la formule (1), on a :

$$C_m = \frac{N\Phi}{2\pi} \times \frac{E - \Phi nN}{R} ;$$

$$\text{d'où : } n \text{ (nombre de tours de l'induit par seconde)} = \frac{E - RI}{N\Phi}.$$

A une augmentation du couple moteur correspondent une augmentation de chaleur et un décroissement de production de l'hystérésis.

En pratique, les moteurs série sont construits de manière à avoir un circuit magnétique fortement saturé à pleine charge.

457. Régulation du moteur-série (*fig. 1130*). — Lorsqu'un moteur série est branché sur une conduite à potentiel constant, l'intensité et le couple sont maximum au démarrage et varient avec la vitesse. Le couple moteur décroît en même temps que la vitesse augmente ; cette dernière étant variable avec la charge, lorsqu'elle tombe à une valeur faible, le moteur s'emballe.

La régulation de la vitesse s'obtient en faisant varier le champ et en agissant soit sur le nombre de spires de l'inducteur, soit en shuntant l'inducteur par une résistance variable.

Sous une tension constante, le moteur prend à chaque instant une vitesse telle que la force contre-électromotrice qu'il développe diminue quand le courant augmente ; le nombre de tours est très faible sous de fortes charges et très grand dans le cas contraire. La vitesse du moteur, sous faible charge, peut être abaissée en intercalant dans son circuit une résistance (rhéostat de réglage) qui a pour effet de diminuer la force contre-électromotrice à produire.

Si ρ est cette résistance, on aura $e = E - I(R + \rho)$.

Mais l'introduction de ρ dans le circuit a pour effet d'occasionner une perte de travail par seconde représentée par ($I^2\rho$ watts) et, par suite, d'abaisser le rendement du moteur.

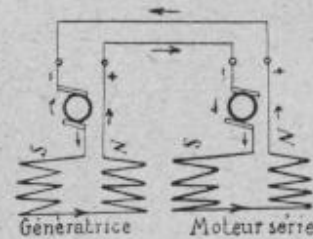


FIG. 1130.

On peut éviter cet inconvénient en effectuant le réglage de la vitesse par une modification de la résistance propre du moteur. A cet effet on compose l'enroulement de l'inducteur de plusieurs bobines qui peuvent être connectées, soit en série, soit en parallèle, système très employé dans

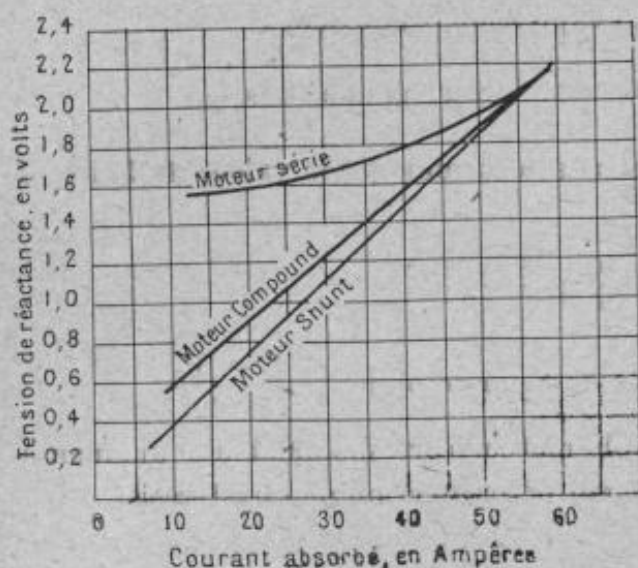


FIG. 1131.

les moteurs de tramways (chapitre xxviii). La résistance a sa valeur la plus forte quand le courant traverse toutes les spires successivement, et sa valeur la plus faible quand ces mêmes spires sont connectées en quantité. De cette façon, en employant les connexions en série pour les faibles charges et en arrivant par une production progressive à la mise en parallèle, on

réalise une vitesse du moteur constante sous charges croissantes. La tension de réactance n'augmente pas proportionnellement à la charge comme dans le moteur shunt ; la (fig. 1131) montre la tension de réactance comparée dans les trois types de moteurs.

Un autre procédé consiste à mettre en dérivation de l'enroulement une résistance variable, qui, en diminuant le courant d'excitation, a pour effet d'augmenter la vitesse de l'induit.

La (fig. 1132), qui comporte les caractéristiques des différents genres de moteurs à courant continu alimentés par un courant à potentiel constant, montre que l'on peut, grâce à un choix convenable du mode d'enroulement, satisfaire à l'aide du moteur électrique aux conditions de marche les plus diverses.

Les caractéristiques électromécaniques ou courbes déterminant le couple, la vitesse et la puissance utile d'un moteur en fonction du courant (alimentation à potentiel constant) sont les courbes les plus intéressantes à connaître.

La caractéristique mécanique ou courbe représentative du groupe en fonction de la vitesse présente un intérêt tout spécial quand il s'agit de comparer les qualités du moteur électrique à celles des moteurs à vapeur ou à gaz. On peut aussi établir des courbes donnant la puissance

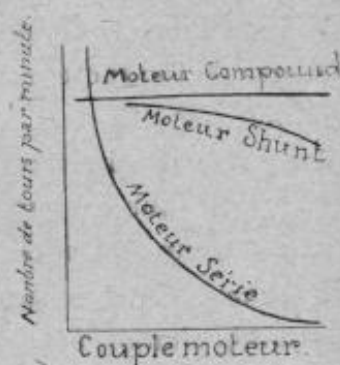


FIG. 1132.

électrique absorbée, l'effort de traction en fonction de la force électromotrice ou de l'intensité, etc.

Lorsque le moteur série fonctionne avec un courant à intensité constante, le couple moteur est invariable quelle que soit la vitesse. Quand la charge décroît, la vitesse augmente jusqu'à ce que les résistances passives compensent la diminution de charge.

Le moteur série présente surtout l'avantage d'un très grand couple au démarrage ; certains moteurs série arrivent à donner un couple initial décuple du couple normal. On peut couramment faire développer un couple d'une valeur double de celle du couple normal en ne demandant à la machine qu'un courant d'une valeur une fois et demie supérieure au courant normal.

La maison Felten et Guillaume, de Francfort, évite l'emballement du moteur série lorsqu'il vient à être déchargé, en introduisant une soupape électrolytique (fig. 1333), dans un circuit dérivé pris aux bornes de l'enroulement inducteur et contenant

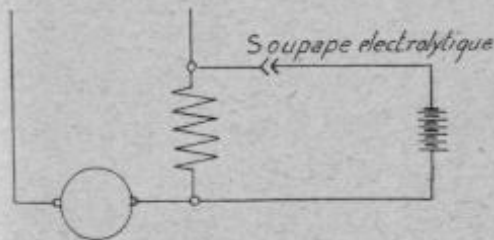


FIG. 1333.

une source de courant additionnelle (une batterie d'accumulateurs, par exemple). Au moment où le voltage aux bornes du moteur devient plus petit que celui de la source auxiliaire,

cette dernière fournit un courant additionnel qui maintient constant le champ du courant principal. Si la vitesse du moteur continue à croître, il en résulte une diminution du courant envoyé par le réseau, qui est limité à la valeur de la dépense à vide. Si le moteur est de nouveau chargé, sa vitesse tombe. Le courant fourni par le réseau atteint de nouveau sa valeur maxima, à laquelle la chute de tension aux bornes du circuit inducteur série dépasse la force électromotrice de la source additionnelle. Ici, le courant se renverserait dans ce circuit si la soupape électrolytique n'était pas intercalée. Mais, comme celle-ci s'oppose au passage du courant en trop, celui-ci est obligé de s'écouler par l'inducteur, dès que le courant continue à croître. De ce fait le moteur reprend les qualités du moteur série lorsque la vitesse tombe.

La fabrique de dynamos et de moteurs électriques d'Aarhus (Danemark) construit des moteurs électriques pouvant démarrer en pleine charge sans rhéostats et être inversés sans aucun danger. A cette fin chaque second noyau polaire de l'inducteur porte un enroulement série, tandis que les autres noyaux polaires sont munis d'un enroulement monté en parallèle sur l'induit. Les deux enroulements d'excitation sont connectés de telle manière que les noyaux polaires munis d'un enroulement série

sont de même pôle et ceux munis d'un enroulement en dérivation, de pôle contraire au précédent.

Le courant parcourt les enroulements dans un sens tel que les pôles deviennent alternativement des pôles nord et des pôles sud. L'induit doit être de préférence en série et tétrapolaire. Avec le genre d'enroulement en question, il se produit une espèce d'enroulement différentiel. Lorsque le moteur tourne à vide, l'intensité dans les bobines principales est faible ; par contre, elle est relativement intense dans les bobines en dérivation.

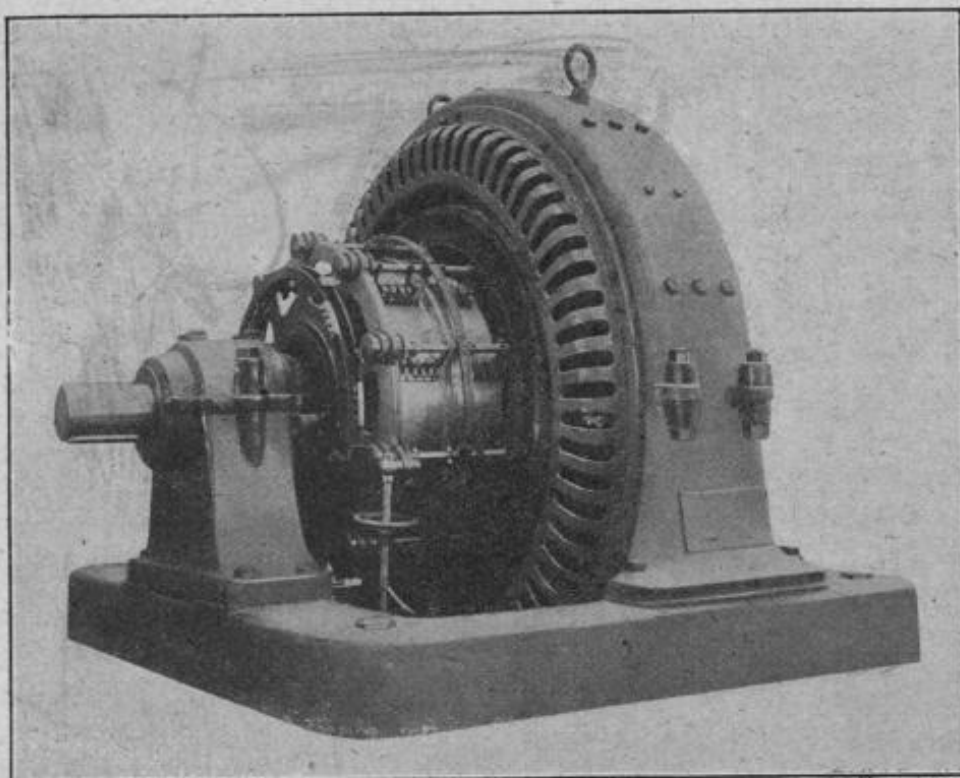


FIG. 1133 bis. — Moteur à courant continu 1.900 chevaux, 500 tours, 500 volts.
(C^{ie} Électro-Mécanique).

Lorsque le moteur est chargé, l'intensité augmente dans les bobines principales, tandis qu'elle diminue dans les bobines en dérivation. On peut aussi répartir la proportion entre les deux enroulements de telle manière que le nombre de tours du moteur varie avec la charge d'une manière pouvant être déterminée à l'avance, par exemple de façon que le moteur tourne également vite à n'importe quelle charge, ou qu'il tourne avec une vitesse qui augmente lorsque la charge diminue.

458. Régulation du moteur shunt (fig. 1134). — Dans ce genre de moteur, la somme des pertes est sensiblement constante et, au point de vue de la tension, on peut construire un excellent moteur aussi bien sous le rapport de l'échauffement que sous celui de la commutation, en em-

ployant pour l'enroulement induit un nombre de spires relativement considérable et une faible section du circuit magnétique. Comme généralement il est soumis à des charges variables, il convient de le calculer pour des pertes variables faibles et pour pertes constantes élevées.

Le moteur shunt, quand il est alimenté par un courant à tension constante, tourne à une vitesse pratiquement constante, quelle que soit la valeur de la charge. Le couple moteur est proportionnel à l'intensité du courant dans l'induit, si le débit dans la dérivation est constant. Il est limité par la valeur maxima que l'intensité du courant peut prendre sans échauffement anormal de l'armature.

On compense la variation de vitesse qui se produit entre la marche à vide et celle à pleine charge par une diminution du champ magnétique dans une proportion légèrement supérieure à celle dont la vitesse a déchu.

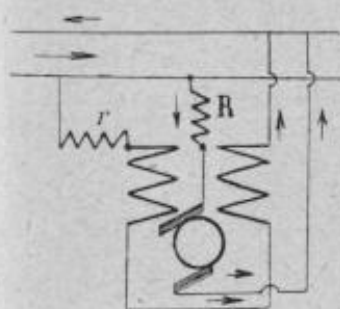


FIG. 1135.

Le rhéostat disposé à cet effet est branché entre la borne d'arrivée du courant et l'enroulement inducteur. On a soin, lors de la manœuvre, de fermer l'excitation avant la mise en marche par le rhéostat R placé dans le circuit de l'induit (fig. 1135).

Pour produire un arrêt brusque, on met l'induit en court-circuit tout en maintenant l'excitation, que l'on coupe ensuite. On adjoint assez souvent au rhéostat un électro-aimant agissant sur un déclencheur, à l'effet de mettre automatiquement le moteur à l'arrêt au cas de surcharge, dont on détermine au préalable la valeur.

On peut diminuer la vitesse à volonté, sans modifier le couple moteur, par le moyen de résistances intercalées dans le circuit de l'induit ; mais le rendement diminue à peu près proportionnellement avec la vitesse. Quant à celle-ci, on peut la régulariser en modifiant le flux, en sectionnant l'enroulement inducteur, lequel permet de faire varier le nombre de spires magnétisantes. M. Ward Léonard a mis en pratique un système (fig. 1136) qui consiste à exciter séparément le moteur et à alimenter son induit par le courant d'une génératrice spéciale, dont on fait varier l'excitation fournie par une source indépendante ; on fait aussi varier la tension du moteur, ce qui permet d'obtenir un grand nombre de vitesses

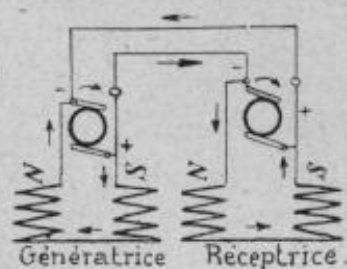


FIG. 1134.

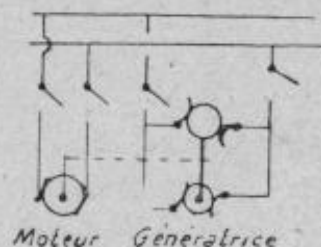


FIG. 1136.

différentes dans de *bonnes conditions de rendement*. Ce dispositif est particulièrement applicable à la manœuvre des ascenseurs, des ponts roulants, des treuils de mines, des laminoirs, des presses, etc. Le système Hilgner comprend, comme le système Léonard, un groupe moteur générateur relié électriquement au moteur principal, mais avec cette différence que l'arbre de ce groupe porte un volant très puissant. Pendant le démarrage du moteur principal, ce volant cède une partie de son énergie cinétique, pour la reprendre une fois le démarrage terminé. L'action du volant ne se fait sentir que si, sous l'effet de la charge, la vitesse du groupe varie dans des proportions suffisantes, ce qui s'obtient en compoundant le moteur par le

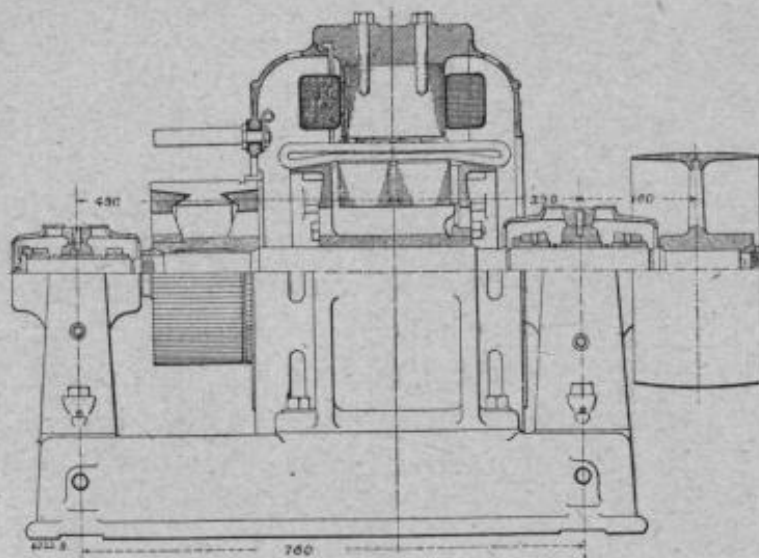


FIG. 1137. — Moteur shunt de 27 HP construit par l'Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget.

courant demandé à la génératrice. Enfin, on peut obtenir la variation de vitesse par une modification des dimensions de l'entrefer sans perte de puissance fournie, en éloignant ou en rapprochant progressivement les masses polaires de la périphérie de l'induit.

En effet, les variations de l'entrefer, en raison de la réluctance de l'air, qui est considérable, ont une influence très sensible sur la valeur du flux.

Pour pouvoir disposer de plusieurs vitesses du moteur, par exemple de 1 à 5, les ateliers d'Oerlikon emploient des bobines compensatrices parcourues par le courant principal et logées dans des rainures pratiquées dans les pièces polaires. Le champ ainsi créé est en sens inverse à celui de l'induit et annule la tension tendant à produire les étincelles entre les lames qui se trouvent dans la position neutre.

Le réglage par tensions multiples (procédé John Lundell) est très usité en Amérique. Quand on opère le réglage par l'emploi de survolteurs ou

de dévolteurs, on fait le plus souvent usage d'une génératrice actionnée par un moteur quelconque et dont l'induit est en série avec le moteur dont on doit faire varier la vitesse. On a imaginé toute une série de systèmes plus ou moins ingénieux bâtis sur ce système.

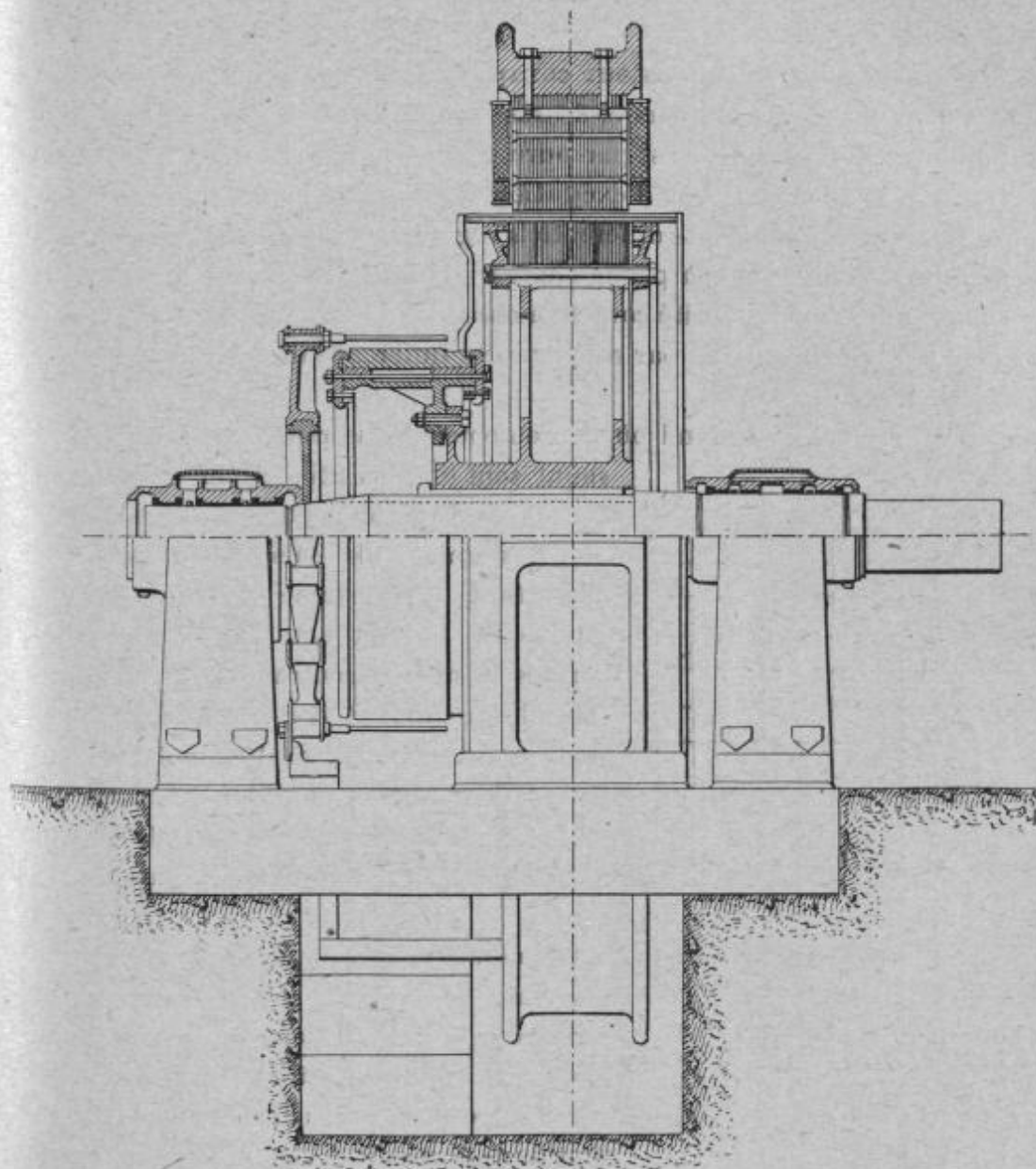


FIG. 1138. — Moteur compound de 850 HP, construit par la Société alsacienne de Construction mécanique.

Le régulateur de vitesse « Olmsted » Westinghouse a pour but de permettre une vitesse constante avec des moteurs à courant continu et excitation shunt, qui présentent une vitesse très variable par suite de fluctuations de tension. Il est basé sur le principe de la mise en court-circuit plus ou moins prolongée d'une partie de la résistance constituant le

rhéostat d'excitation du moteur, en utilisant les variations de vitesse memes de la machine.

Le moteur shunt tourne dans le même sens que pour son fonctionnement en génératrice. Enfin, pour changer le sens du mouvement, il faut inverser le sens du courant, soit dans l'inducteur seul, soit dans l'induit seul.

459. Régulation du moteur compound. — Dans ce moteur, qui tient des deux genres de moteurs ci-dessus, l'enroulement série, composé d'un nombre réduit de spires, est parcouru par le courant d'induit en sens contraire à celui du courant d'excitation circulant dans les spires en dérivation. Ces enroulements différentiels régularisent ainsi la vitesse entre la marche à vide et celle à pleine charge. L'enroulement série n'affaiblit le champ que d'une quantité correspondante à celle dont la perte de tension dans l'armature a varié par rapport à la différence de potentiel normale à ses bornes (50/0).

Les moteurs compound où l'enroulement série renforce l'enroulement shunt sont les plus utilisés, car les cas sont très rares où l'augmentation de charge ne doit pas amener de baisse de tension. En admettant une certaine variation dans la vitesse, on obtient une charge plus régulière de la station centrale, une commutation plus assurée et des variations de tension moins accentuées. Le moteur compound est surtout indiqué pour les cas où le démarrage énergique est entièrement à réaliser et où la puissance varie beaucoup.

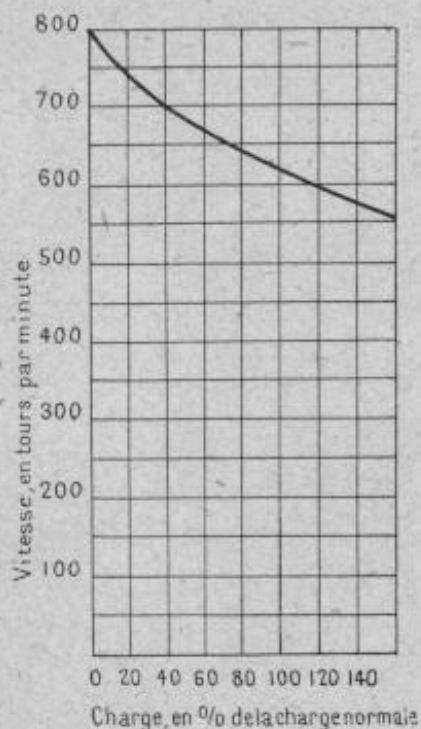


FIG. 1139. — Courbe de saturation à la vitesse de 800 tours (Moteur compound de 30 HP, 500 volts, Hobart.)

On augmente le couple au démarrage en inversant le courant dans l'enroulement série pour le rétablir dans son sens normal, lorsque le moteur a atteint la vitesse désirée. L'arrêt est obtenu en coupant le courant dans le circuit dérivé ou dans le circuit de ligne.

L'électromoteur compound, dans les cas de charges très variables, fonctionne d'une façon imparfaite, l'augmentation de l'intensité dans l'enroulement série pouvant amener une inversion du champ inducteur.

460. Démarrage des moteurs à courant continu. — Au repos, l'induit d'un moteur, en communication avec le courant du réseau de ten-

sion E reçoit un courant dont l'intensité est : $E = IR$, car la force contre-électromotrice se trouve encore être nulle. A mesure que la vitesse augmente, e augmente et I diminue jusqu'à une certaine valeur pour laquelle l'armature est à même de vaincre de façon permanente le couple résultant C_m .

La perte généralement consentie dans l'induit étant de 2 à 5 0/0 de l'énergie fournie au moteur, on a :

$$IR = \frac{1}{50} \quad \text{à} \quad \frac{1}{20} \quad \text{de} \quad E$$

pendant la marche à pleine charge. Mais alors, au démarrage, IR étant égal à E , le courant de démarrage I devra être limité par un rhéostat de démarrage de résistance ρ (fig. 1140), de façon que $E = I(R + \rho)$. Pendant la mise en marche, on diminue ρ , puisque la force contre-électromotrice s'accroît, et, quand le régime normal de vitesse est une fois atteint, l'on supprime totalement cette résistance.

Actuellement, la plupart des rhéostats des moteurs électriques comportent à la fois les résistances de démarrage et celle du réglage de la vitesse et sont commandés par une seule manette, ainsi que le montre schématiquement la (fig. 1141). Dans la position (1) de la manette, le courant est totalement interrompu ; dans la position (2), le courant se rend aux inducteurs pour revenir dans la ligne. Pour toute position intermédiaire, le courant, avant de parvenir en D, est obligé de passer par les résistances (r_0) d'ouverture du courant. Entre (2) et (3), la manette met en circuit le rhéostat de démarrage.

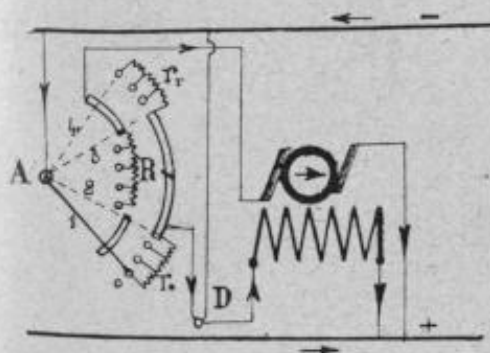


FIG. 1141.

Dans toute position au delà de (3), il n'y a aucun obstacle au courant se rendant dans l'induit ; le courant inducteur, au contraire, est obligé de franchir les résistances (r_2) qui servent au réglage de la vitesse. Pour obtenir l'arrêt du moteur, on ramène la manette vers (1) en déterminant une diminution progressive du courant de l'induit d'abord, et enfin une interruption complète des circuits induit et inducteur.

Un type de rhéostat très utilisé consiste à mettre un petit électro en série avec l'inducteur et capable de produire le déclenchement de l'interrupteur à minima ; en outre, un second électro traversé par le courant de

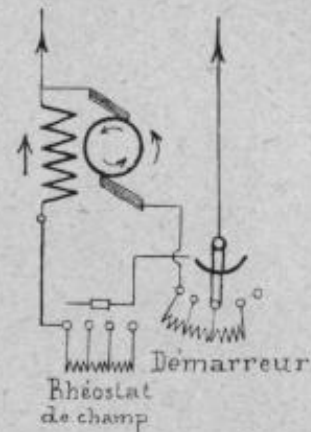


FIG. 1140.

l'induit, pour une intensité donnée, met le premier électro hors circuit. Alors, ce dernier ne pouvant plus retenir la manette du rhéostat, celle-ci est rappelée automatiquement par un ressort antagoniste.

Au point de vue du régime auquel on peut soumettre les résistances

industrielles, il y a lieu de distinguer entre celles restant constamment en circuit (résistances à régime permanent, tels que les rhéostats d'excitation et les réducteurs de vitesse) et les résistances à régime temporaire (démarreurs).

Pour éviter la fusion des coupe-circuits sous l'effet d'un démarrage trop brusque, on construit des démarreurs à progression lente, qui sont prévus de telle manière que le levier de contact ne peut se déplacer d'un plot à l'autre

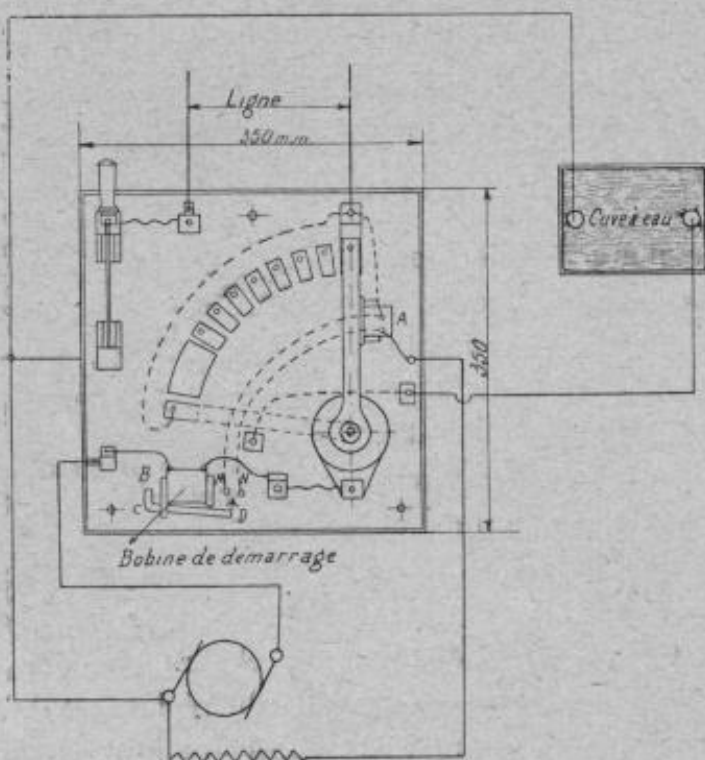


FIG. 1142.

que par mouvement saccadé, pour passer d'une résistance à la suivante, afin que la durée du démarrage soit augmentée.

Les démarreurs à déclenchement maximum automatique (fig. 1142) se

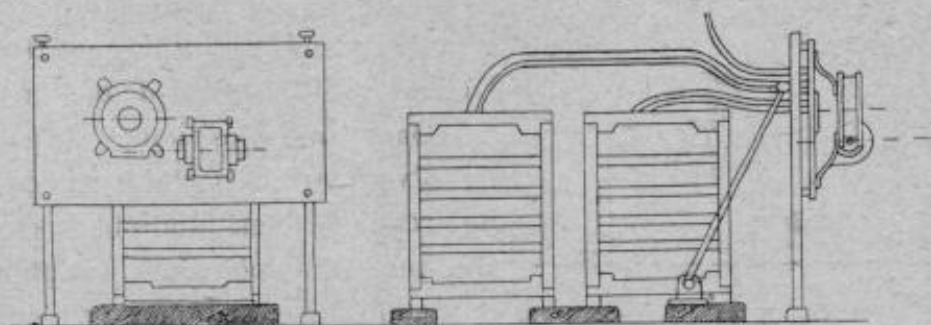


FIG. 1143. — Rhéostat de champ à commande par moteur.
(Construction Thomson-Houston.)

composent d'une bobine magnétique intercalée dans le circuit principal, qui dégage un cliquet d'arrêt du levier de contact du démarreur, lorsque le courant dépasse une certaine limite, de sorte que ce levier est ramené dans sa position de zéro sous l'effort d'un ressort en acier.

Les disjoncteurs automatiques à minimum ont pour fonction de séparer un moteur du réseau, alors que, pour une raison quelconque, le courant vient à faire défaut. On relie le disjoncteur à minimum avec le démarreur, de manière qu'une bobine magnétique en dérivation sur le

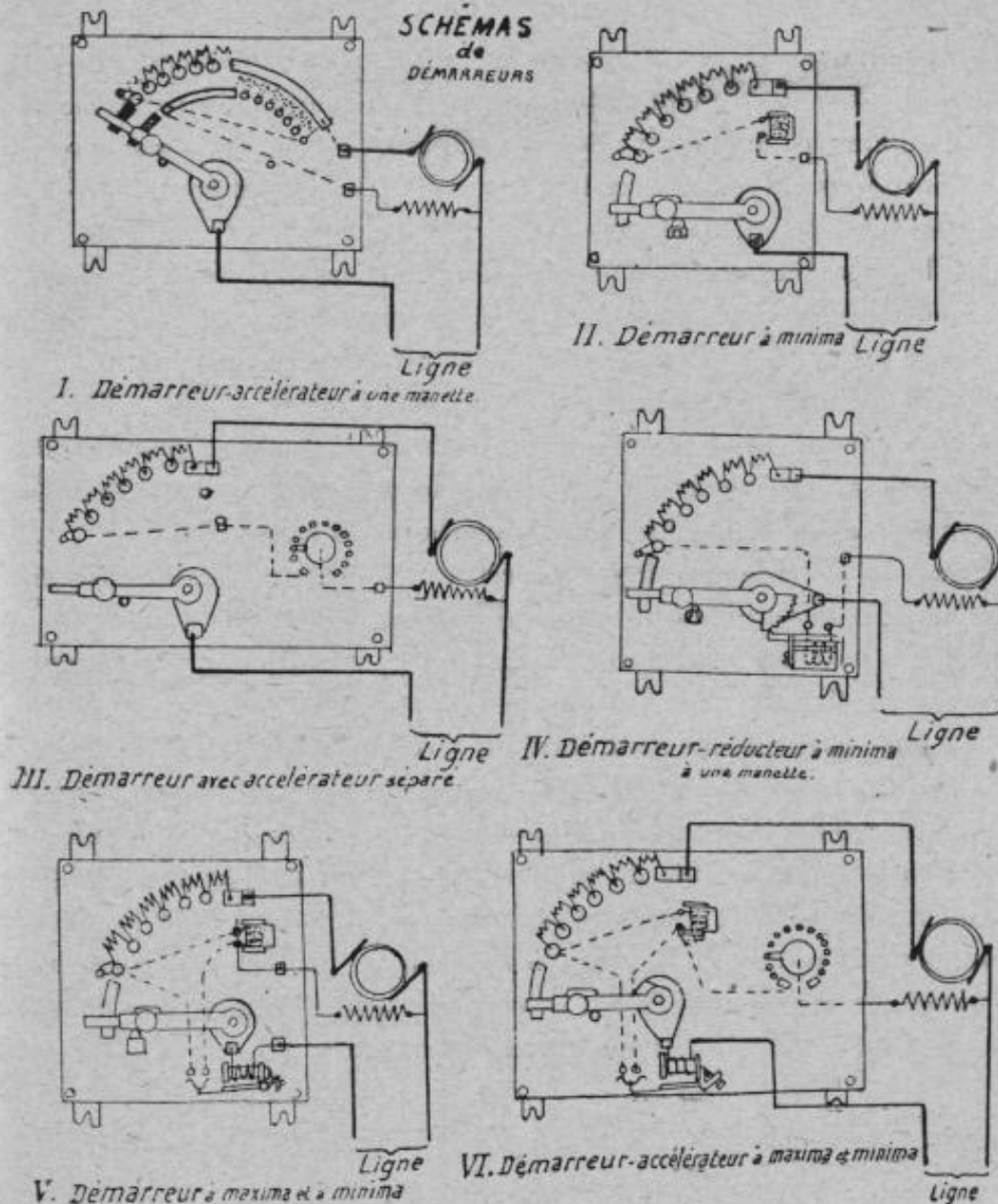


FIG. 1144. — Schémas de démarreurs divers.

courant principal maintienne le levier de contact du démarreur dans sa position de fermeture tant que la tension subsiste. Lorsque la tension disparaît, le levier de contact revient brusquement dans sa position de zéro.

La plupart des démarreurs se font maintenant avec bobine à maxima et à minima. Ces appareils sont généralement construits de telle manière

que le courant qui parcourt la bobine de déclenchement à minima est fermée par un contact auxiliaire à ressort. La bobine de déclenchement à maxima est alors disposée de façon à interrompre le contact ci-dessus, dès que l'appel de courant du moteur a atteint une limite supérieure donnée ; de ce fait, la bobine de déclenchement à minima est privée de contact et lâche par suite le levier de contact.

Pour la conduite des gros moteurs, on emploie des démarreurs à liquide, et lorsque le déclenchement automatique est demandé, on place dans la conduite d'amenée du courant des interrupteurs automatiques séparés du démarreur. Mais ces résistances liquides sont très souvent combinées avec un déclenchement automatique ⁽¹⁾.

Dans les distributions à haute tension, les transformateurs de démarrage sont utilisés avantageusement avec ces appareils ; la tension variable nécessaire au démarrage des moteurs est produite par graduation de la tension du réseau, c'est-à-dire que l'on évite la destruction de l'énergie dans des résistances. Ces transformateurs de démarrage peuvent être combinés très avantageusement et d'une façon parfaite au point de vue construction avec déclenchement automatique du réseau.

D'après M. G. Erlacher, il y a intérêt à recouvrir les fils de résistances d'une couche de vernis noir, mais qui ne doit se volatiliser qu'à 300 ou 400° ; puis, pour les résistances à régime permanent, il y a avantage à employer des fils relativement fins mis en parallèle, et, pour les démarreurs, à faire usage de fils gros, formant « volant ».

A titre d'indication, pour les électriciens d'usines qui peuvent avoir à établir des résistances, nous donnons le tableau suivant, établi par M. Erlacher, pour des fils de maillechort, lequel montre les intensités en ampères admissibles pour des températures de 100° à 400° (à 400°, le fil commence à rougir, et, à 100°, l'isolement des fils résiste encore), ainsi que pour démarrage en 15, 30 et 60 secondes à une température de 400°. On a supposé la température de l'air ambiant à 30°.

(1) Dans le moteur Oerlikon type blindé le courant d'air fourni par un ventilateur disposé à l'intérieur de la carcasse pénètre dans le moteur par le pied d'une des flasques et, après avoir traversé le moteur dans toute sa longueur, est expulsé par le socle de l'autre flasque.

La résistance de démarrage est montée sur l'arbre même du rotor, à l'intérieur de la carcasse et tournant avec ce dernier. Le dispositif d'enclenchement de cette résistance actionne en même temps l'interrupteur primaire avec lequel il est verrouillé.

Diamètre du fil en mm		0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Restant en circuit	brillant	0,7	2,0	5,7	10,3	16,0	22,3
Échauffement 100°	noir	0,9	2,5	7,0	12,8	19,6	27,5
Restant en circuit	brillant	1,1	3,1	8,8	16,0	24,8	34,6
Échauffement 200°	noir	1,6	4,6	13,0	24,0	37,0	51,5
Restant en circuit	brillant	1,5	4,2	12,0	21,7	33,7	47,0
Échauffement 300°	noir	2,4	6,8	19,2	35,0	54,0	76,0
Restant en circuit	brillant	1,8	5,2	14,7	26,7	44,5	58,0
Échauffement 400°	noir	3,4	9,6	27,2	49,0	77,0	107
Démarrage en 15 secondes ...	brillant	3,9	14,8	55,3	120	210	325
Échauffement maximum 400° ..	noir	4,4	16,3	69,5	128	222	341
Démarrage en 30 secondes ..	brillant	3,2	11,3	42,0	90	156	240
Échauffement maximum 400° ..	noir	3,6	12,8	46,0	98	168	256
Démarrage en 60 secondes ...	brillant	2,6	8,9	32,2	68	117	180
Échauffement maximum 400° ..	noir	3,1	10,4	36,4	76	129	197

Dans le calcul des rhéostats de démarrage, il convient de rechercher le courant maximum de démarrage que l'on admet et soit I_d sa valeur. Appelons U la tension d'alimentation ; R la résistance totale du rhéostat, formé par les résistances partielles $r_1, r_2 \dots r_n$; R_a la résistance de l'induit ; I le courant normal absorbé par le moteur ; E' la force contre électromotrice quand le courant a sa valeur de régime.

Pour un moteur shunt on applique la formule :

$$I_d = \frac{U - E'}{R_a + R - r_1}$$

Pour une nouvelle force électromotrice E'' , on calcule la résistance à supprimer r_2 par la condition :

$$I_d = \frac{U - E''}{R_a + R(r_1 + r_2)}$$

Et ainsi de suite jusqu'à r_n .

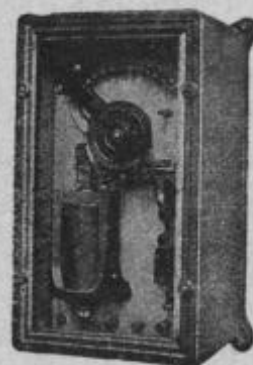


FIG. 1145. — Démarreur automatique pour moteurs à courant continu (Société l'Éclairage Électrique).

Le moteur série fournit :

$$I_d = \frac{U - E'}{R_a + R_i + R - r_i},$$

donc on a la valeur de r_i .

R_i , résistance de l'inducteur. On continue comme ci-avant.

En ce qui concerne la section des fils, on doit distinguer le cas où les démarrages sont espacés (où la chaleur produite peut se dissiper dans l'intervalle de deux opérations successives) et le cas de démarrages fréquents.

Dans le premier cas, la section S du fil, en centimètres carrés est fournie par l'expression :

$$S = \sqrt{\frac{0,24 \rho t}{C_{\omega} (T_2 - T_1)}} = KI \sqrt{\frac{t}{T_2 - T_1}};$$

ρ résistivité du métal, t durée de passage du courant, C chaleur spécifique du conducteur en calories par gramme-masse, K poids spécifique du conducteur, T_2 température maximum admissible et T_1 la température ambiante.

D'autre part soient θ la durée du démarrage en secondes, et n le nombre de résistances partielles, et admettant $T_2 = 150^\circ$ et $T_1 = 15^\circ$. En remplaçant t successivement par $\frac{\theta}{n}$, $\frac{2\theta}{n}$, ..., $\frac{\theta(n-1)}{n}$, ..., θ et donnant à I une valeur moyenne entre les limites de variation de courant pendant le démarrage, on aura la section à donner au fil des diverses résistances partielles du rhéostat.

Les valeurs de K sont :

$$\text{Fer} = 0,00168; \text{cuivre } 0,0071 \text{ et nickeline } 0,0125$$

Pour les démarrages fréquents, on fait :

$$I = K' \sqrt{\frac{s}{r}} = K' \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{d^3}{\rho}},$$

avec $K' = 0,0588$ pour le fer, $0,0248$ pour le cuivre et $0,46$ pour la nickeline.

On remplace maintenant de plus en plus les auto-démarrateurs à servomoteurs par les dispositifs de mise en marche dits « à contacteurs », qui se composent, suivant la puissance du moteur, d'un plus ou moins grand nombre de commutateurs à commande électro-magnétique, dont un ou

plusieurs mettent d'abord le moteur en circuit, tandis que les autres suppriment successivement les résistances. Ils consistent tous en un électro-aimant qui reçoit le courant de manœuvre et dont le noyau actionne, par une liaison mécanique appropriée (tige ou jeu de leviers), les contacts pour le courant du moteur. Quand il s'agit de plusieurs contacteurs montés en série, chacun d'eux possède en outre des contacts auxiliaires destinés à mettre en circuit le contacteur suivant et ainsi de suite.

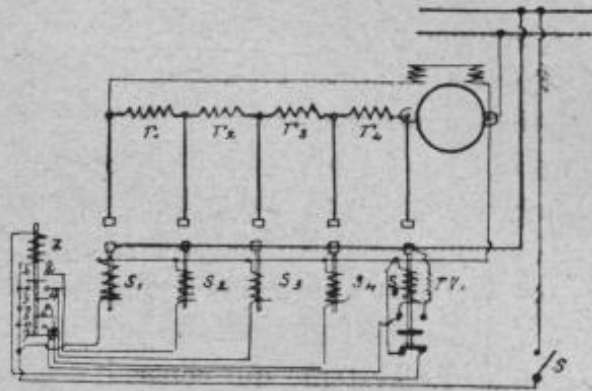


FIG. 1146. — Distribution par contacteur pour un moteur à courant continu avec quatre étages de résistance.

461. Considérations sur les procédés permettant de faire varier la vitesse des moteurs à courant continu. — Ces procédés, que nous avons signalés brièvement plus haut, peuvent se classer en deux catégories : variation de la tension appliquée aux bornes de l'induit et modification de la force électromotrice induite.

Nous examinerons d'abord les différentes solutions répondant à la première catégorie. L'emploi d'une génératrice spéciale entraînée par un moteur auxiliaire branché sur le réseau n'est pas un procédé économique, le rendement de l'ensemble étant faible ; de plus, la commutation de la génératrice aux faibles allures est particulièrement défectueuse. Les mêmes observations s'appliquent à la méthode par laquelle on obtient les variations de vitesse par l'introduction d'une résistance en série avec l'induit ; mais elle est encore très utilisée en raison de sa simplicité. Le procédé qui consiste dans l'emploi d'une dynamo auxiliaire, dont la tension s'ajoute à celle du réseau ou est mise en opposition avec elle, jouant ainsi le rôle de survoltrice ou de dévoltrice, offre des difficultés au point de vue de la commutation et la matière est mal utilisée, car la machine auxiliaire doit être calculée pour la tension et l'intensité maximum. Le procédé, qui consiste à obtenir des variations de vitesse par couplage d'induits entre eux (procédé particulièrement applicable aux moteurs série) ou sur un réseau à tensions multiples, offre un moyen de réglage avantageux quand le moteur fonctionne à tension et à couple constants.

Nous abordons maintenant l'appréciation des solutions concernant la seconde catégorie. Tous les procédés utilisés consistent à agir sur l'intensité du champ magnétique ; on opère soit sur le circuit d'excitation avec un rhéostat ou par couplage des bobines inductrices, soit sur la réluctance

du circuit magnétique, l'excitation restant constante, soit sur le flux utile traversant l'induit, soit sur le nombre de conducteurs périphériques. Le premier moyen ne s'emploie guère que concurremment avec d'autres moyens auxiliaires, tel que le couplage d'induits ; le second dispositif ne s'utilise guère que pour les machines bipolaires, et les vitesses extrêmes pratiquement réalisées sont dans un rapport qui ne dépasse pas $1/4$ (ce mode de réglage est particulièrement précieux pour les moteurs actionnant des machines-outils) ; dans le troisième moyen, le flux total est fourni par deux systèmes inducteurs (type Lanhoffer) qui permettent des variations de vitesse aussi progressives qu'on le désire et dans un rapport quelconque. Le système qui consiste à agir sur le flux utile en modifiant le nombre de pôles, auquel cas la vitesse angulaire varie différemment suivant le genre d'enroulement de l'armature, n'offre un réglage qu'entre des limites assez restreintes.

Enfin le réglage par modification du nombre de conducteurs soumis à l'induction offre une assez bonne solution où le rendement varie peu aux différentes allures, mais à couple constant la matière est mal utilisée, la machine devant être calculée pour la vitesse maxima. A puissance constante, l'utilisation est meilleure.

Un système bien particulier est celui de Essberger de Schöneberg qui obtient le réglage des moteurs à courant continu en captant les courants avant leur redressement par le collecteur (fig. 1147). Sur ce dernier on prélève, à cet

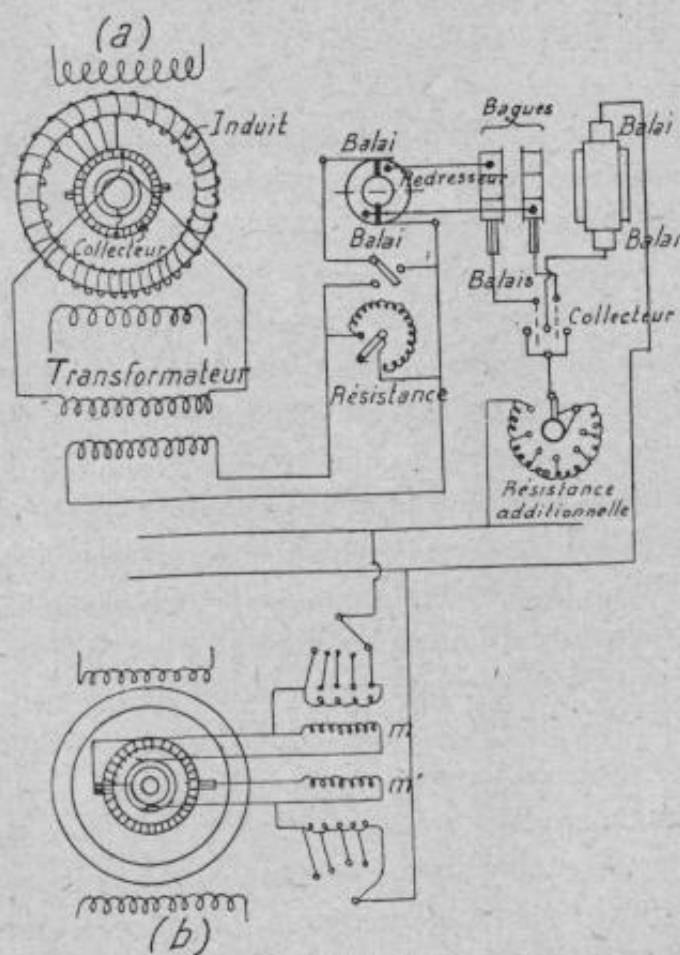


FIG. 1147.

effet, au moyen de bagues, les courants pulsatoires de l'induit, et on les envoie à un transformateur. Suivant le nombre de tours de l'induit et son nombre de pôles, on lance dans le primaire du transformateur du courant alternatif d'un nombre de périodes plus ou moins grand. Le courant alternatif induit dans le secondaire est amené au redresseur par les balais et de là aux bagues. D'autres balais qui frottent sur ces dernières

conduisent un courant redressé dont le sens peut être réglé par le collecteur ; ce courant continu peut alors être envoyé dans le circuit du moteur électrique et être mis en série avec le courant continu de l'induit.

Suivant la distance du courant redressé, on envoie par suite une force électromotrice à l'induit dans le sens positif ou négatif, qui augmente ou diminue le nombre de tours. Comme le redresseur est accouplé à l'arbre du moteur d'une façon quelconque, il se conforme de lui-même à chaque nombre de périodes. Avec la disposition d'après le schéma (b), deux courants indépendants sont captés à l'induit. Étant donné que les courants engendrés dans les bobines primaires m et m' sont des courants continus pulsatoires, on pourrait à la rigueur les introduire directement dans le circuit de l'induit.

En général, tous ces procédés n'offrent pas une variation absolument progressive de la vitesse ; il y a des saccades incompatibles avec les exigences de la pratique, et le réglage n'est généralement possible ou économique qu'entre des limites assez rapprochées.

L'emploi judicieusement combiné des divers procédés, selon leurs qualités propres, peut conduire à des solutions permettant d'obtenir un nombre de vitesses convenables d'ordre progressif, plus aisément qu'avec un seul d'entre eux. L'essentiel à retenir, c'est que l'attention ne doit pas seulement se fixer sur l'organe isolé, mais bien sur l'économie générale du système entier, qui fixera sur la solution à intervenir.

462. Freinage électrique. — La propriété qu'ont les électromoteurs de pouvoir être utilisés comme génératrices offre le moyen de réaliser un freinage souple et puissant, si on vient à interrompre brusquement toute arrivée de courant au moteur.

La récupération d'énergie que l'on peut utiliser par le renversement de la marche d'un moteur a trouvé son application dans les tramways, dans les appareils de levage, etc. ⁽¹⁾.

Si l'on a affaire à un moteur série, pour réaliser le freinage, il faut changer le sens des connexions de l'inducteur, c'est-à-dire connecter la bobine inductrice de telle façon que le courant produit par l'induit la traverse dans la même direction que pendant le fonctionnement normal comme moteur (*fig. 1148*). Dans le cas d'une machine shunt, il n'y a aucune modification à faire, et la machine s'excite en conservant en génératrice le même sens de rotation qu'elle avait en réceptrice.



FIG. 1148.

⁽¹⁾ *Calcul et construction des appareils de levage*, par E. Pacoret (*Encyclopédie scientifique des aide-mémoire*, Gauthier-Villars, éditeur, Paris.)

Le moteur en dérivation se prête donc d'une façon remarquable au freinage, en ce sens qu'il ne nécessite aucune inversion de son enroulement inducteur et que, d'autre part, il est facile de rendre sa force électromotrice supérieure à la tension du réseau en élevant l'intensité de son flux Φ par l'action du rhéostat d'excitation. La force électromotrice décroissant avec la vitesse, la puissance du frein diminue aussi avec cette dernière ; pour y remédier, on introduit une résistance variable qui a pour effet d'augmenter l'intensité à mesure que la force électromotrice décroît, jusqu'à mettre finalement la résistance en court-circuit.

On peut réaliser un freinage plus énergique en n'absorbant pas seulement l'énergie produite par la machine simplement dans des résistances, mais en l'utilisant aussi pour la production d'un couple qui s'oppose au mouvement des masses.

La possibilité de faire travailler le moteur électrique comme génératrice permet d'autre part, pendant le freinage, de renvoyer du courant dans le réseau même qui l'alimentait si la génératrice a un excès de tension, c'est-à-dire si sa force électromotrice est supérieure au voltage du réseau ; sans quoi ce dernier enverrait à nouveau du courant dans l'électromoteur. Mais le moteur série ne peut être utilisé pour la récupération de l'énergie, sa force électromotrice étant très petite pour de faibles intensités et très forte quand ces dernières sont très intenses.

En traction électrique, on utilise la réversibilité des moteurs shunt pour charger, pendant les descentes, une batterie d'accumulateurs, opposant ainsi, en outre, une résistance utile à des parcours trop rapides dans les fortes déclivités.

Les courants de Foucault se prêtent aussi à l'obtention du freinage. A cet effet, on prend un cylindre en fer massif ou un disque que l'on fixe sur l'arbre de l'appareil dont on veut ralentir le mouvement ou déterminer l'arrêt. On entoure le cylindre d'une carcasse magnétique à plusieurs pôles, que l'on excite au moment où l'on veut opérer le freinage.

Les freins électromagnétiques, très employés aujourd'hui, s'obtiennent par l'envoi du courant produit par un moteur fonctionnant comme génératrice — au lieu de le perdre inutilement dans des résistances — dans un électro-aimant spécial monté sur la carcasse du moteur, lequel attire à lui un plateau en fer solidaire de l'essieu attaqué par le moteur et provoque ainsi un frottement énergique, d'où résulte un freinage très puissant.

463. Rendement et essais des moteurs. — Pour se rendre compte des conditions de régulation d'un moteur à courant continu, on le fait fonctionner à son régime normal en absorbant le travail mécanique qu'il développe, par un frein dynamométrique à frottement ou par une génératrice étalonnée et débitant sur un rhéostat. En faisant varier le débit

de cette dernière, on a le moyen de voir comment se comporte l'électromoteur aux différentes charges. Le diagramme représenté par la (fig. 1149) montre bien l'allure du rendement d'un moteur aux différentes vitesses sous lesquelles on le fait fonctionner.

Le rendement industriel est le rapport de la puissance utilisable ($P_u = \omega C_m$) à la puissance électrique dépensée. On peut mesurer le terme ωC_m , à l'aide d'un frein de Prony ou autre, lorsqu'on fait varier le couple résistant, en maintenant aux bornes une différence de potentiel constante que l'on détermine, ainsi que l'intensité, au moyen d'un volt-

mètre et d'un ampèremètre. On a de telle façon les données nécessaires pour établir des diagrammes, en représentant la puissance recueillie et le rendement industriel par les ordonnées de courbes dont les abscisses sont les vitesses du moteur.

On désigne plus particulièrement sous le nom de dynamomètres d'absorption les organes de transmission spécialement prévus pour mesurer le couple transmis ; ce sont des appareils qui reçoivent d'une part et transmettent d'autre part la puissance à mesurer. Les types en sont assez nombreux ; les moins aptes à se mettre rapidement en équilibre sont ceux

où il intervient un poids et les plus précis sont ceux à liquides ou hydrauliques.

On peut déterminer la force d'une machine en mesurant le travail fourni par son arbre : le couple moteur que celui-ci subit produit une torsion qui lui est propor-

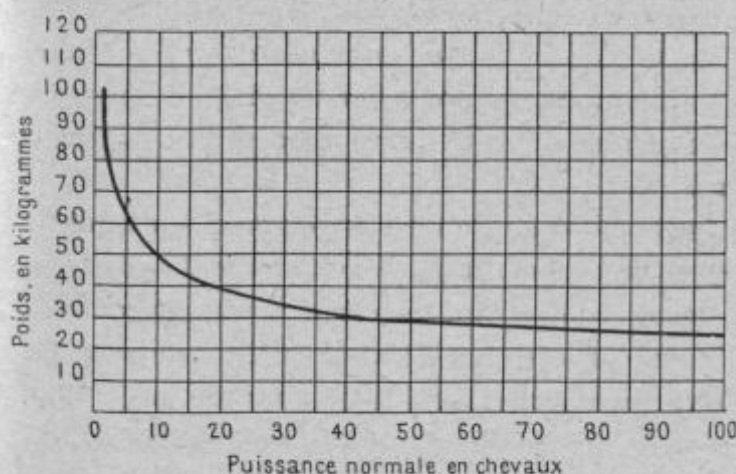


FIG. 1150. — Poids total par kilowatt. Moteurs protégés à courant continu, vitesse de 700 tours (Hobart).

tionnelle. Il suffit de connaître l'élasticité du métal de l'arbre pour déduire le couple. Seulement, cette torsion est très faible en général (un demi-degré environ par mètre, un degré au maximum), et il est nécessaire de l'amplifier pour la rendre mesurable. C'est ce que font tous les *lorsiomètres* ; les uns utilisent un système de leviers amplificateurs,

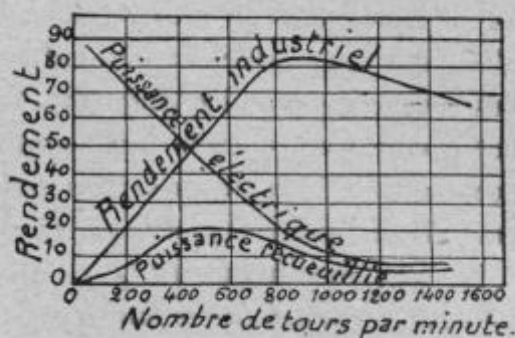


FIG. 1149.

les autres un rayon lumineux, ce qui permet d'opérer sur une grande longueur et d'avoir par conséquent un angle de torsion d'autant plus grand ; d'autres encore comportent une disposition électrique où la torsion, c'est-à-dire le décalage de deux sections éloignées, se manifeste par un courant d'une intensité déterminée qu'on mesure au galvanomètre ; là aussi on a l'avantage des grandes longueurs. L'appareil de M. Fottinger, en particulier, permet de recueillir des diagrammes en amplifiant par des leviers le décalage de deux disques fixés sur l'arbre à une distance déterminée : l'aiguille indicatrice trace la courbe sur un tambour concentrique à l'arbre.

Les dynamos-freins, dit M. A. Mauduit, sont maintenant employés par tous les constructeurs de moteurs, aussi bien électriques qu'à vapeur et à explosion. Elles offrent sur les freins genre Prony l'avantage d'un réglage plus simple, plus précis et surtout plus rapide ; n'exigeant pas d'eau de réfrigération, elles peuvent être utilisées dans tous les locaux ⁽¹⁾.

La dynamo-frein se compose d'une dynamo ordinaire dont le bâti peut osciller librement autour des paliers, munis de billes, afin de diminuer spécialement le frottement au départ, et de permettre ainsi des mesures plus précises. Par des masses additionnelles convenablement disposées sur la carcasse, on amène le centre de gravité de la partie basculante à être sensiblement sur l'axe de rotation commun ou très légèrement en dessous ; la sensibilité de l'appareil est ainsi rendue très grande.

Si on commande une telle machine par un moteur et qu'on la charge, la carcasse inductrice est entraînée par l'attraction de l'induit et tend à tourner dans le même sens. Pour la ramener à sa position normale d'équilibre, il faut développer sur le bâti un couple antagoniste égal au couple moteur, ce que l'on fait en ajoutant des poids sur un plateau disposé à l'extrémité d'un levier secondaire du bâti ou en retenant ce levier au moyen d'un dynamomètre.

Autant que possible, il est bon de manchonner directement sur le même arbre le moteur à essayer et la dynamo-frein ; sinon on emploie la commande par courroie, en tenant compte du glissement de la courroie.

Parmi les méthodes d'essai utilisées pour déterminer le rendement des moteurs électriques, celle de Swinburne, dont il est question au (§ 440), ne demande ni frein ni dynamomètre. Soit un électromoteur série dont r_a représente la résistance de l'induit, r_i celle de l'inducteur et ρ la résistance due aux frottements mécaniques, aux courants parasites et à l'hystérésis.

Pour obtenir cette valeur de ρ ou la somme des résistances passives de l'électromoteur, on envoie dans les inducteurs un courant indépendant d'intensité (i) et de force électromotrice (e), correspondant au courant

(1) *Machines électriques*, par A. Mauduit. Dunod et Pinat, éditeurs, 1910.

normal du moteur fonctionnant comme génératrice. Le moteur tournant à vide, à la vitesse normale, on note la valeur de la force électromotrice (soit e') et celle de l'intensité (soit i') traversant l'induit. On a alors la valeur de η , qui est représentée par : $e'i' - i'^2 r_a$.

Et le rendement de l'électromoteur est donné par l'expression :

$$\eta = \frac{ei}{ei + (r_a + r_i)i^2 + (e'i' + i'^2 r_a)}$$

On remarquera que l'on peut, en outre, recourir aux mêmes méthodes précédemment signalées et que, dans les machines puissantes, le rendement ne change pas notablement, que ces machines fonctionnent comme génératrices ou comme moteurs.

Enfin, comme conditions générales de réception des moteurs, échauffement, mesure des températures, surcharges, essais de surtension, d'isolement, elles sont identiques à celles indiquées pour les génératrices à courant continu (§ 335).

Les causes de dérangement dans le fonctionnement des moteurs sont d'ordre électrique ou d'ordre mécanique.

Pour un moteur shunt ou compound, on peut être en présence, relativement à la première de ces causes, d'un mauvais calage des balais, d'un collecteur en faux rond ou mal divisé, d'un champ inducteur insuffisant ou d'une interruption dans le circuit de l'induit. Les charbons quelquefois rougissent, alors ils ont une section trop faible ou ils embrassent trop de sections et court-circuitent des bobines induites. Quand le moteur chauffe d'une façon anormale, cela dépend d'une surcharge ou de contact dans l'induit, ou enfin de court-circuit entre couches de fil. Dans le cas de machines multipolaires, il est presque impossible de déterminer la bobine avariée (si elle se trouve dans des couches inférieures) par différence de température. Étant donné qu'un inducteur sain présente une différence de voltage d'une bobine à l'autre qui n'excède pas 5 0/0, on pourra donc se rendre rapidement compte du défaut à l'aide d'un voltmètre.

Lorsque le moteur s'emballe, cela provient soit d'accidents dans les inducteurs, soit d'un mauvais calage des balais.

Avec les moteurs série, une modification quelconque du champ peut amener des étincelles et être occasionnée par une petite avarie dans la résistance fixe pour les moteurs à réglage par décalage. La production d'étincelles anormales dans les moteurs à réglage par le champ dépend soit d'une interruption dans l'induit, soit du mauvais calage des balais, d'un mauvais état du collecteur, de charbons trop larges ou trop étroits, soit enfin d'un champ trop faible ou dissymétrique. Le moteur série ne pouvant s'échauffer du fait du courant de ligne, il faut attribuer les causes d'un échauffement anormal, le plus souvent, à des contacts entre bobines

ou entre spires de bobine. Quant à l'emballlement dans un moteur série, il est, dans la majorité des cas, prévenu par le fonctionnement du disjoncteur.

II. — MOTEURS MONOPHASÉS

464. Moteurs synchrones. — On peut utiliser tout alternateur comme moteur, à la condition de lui amener un courant de la fréquence qu'il produirait à la même vitesse.

Ce genre de moteur n'est pas utilisé pour les moyennes et petites forces, et il est d'ailleurs impropre à toute application où l'on a besoin d'un courant anormal de démarrage.

Un moteur synchrone à champ constant présente les caractères particuliers suivants : 1° il ne peut tourner qu'à une vitesse bien déterminée qui correspond à la fréquence du courant alternatif fourni, vitesse qu'il doit d'ailleurs conserver sous toutes les charges ; 2° il n'est pas possible de le faire démarrer de lui-même, même à vide, car il ne développe un couple qu'en marche synchrone ; 3° les inducteurs doivent être excités par du courant continu.

Il est sujet à décrochage en cas de surcharge brusque, à la production d'harmoniques si la courbe de force électromotrice n'est pas identique à celle de la différence de potentiel du réseau, à pompage pouvant amener le décrochage dans le cas d'une fréquence du réseau variable.

Avant de brancher un moteur synchrone, on doit l'amener à la même fréquence, à la même tension et à la même phase que le courant d'alimentation et, quand l'excitation est trop faible ou trop forte, il se produit du courant dévatté et, par suite, une différence de phase. Le moteur asynchrone possède généralement un enroulement auxiliaire de démarrage dans lequel on envoie du courant décalé, sur le courant principal, par des bobines de self ou des capacités. Il y a ainsi création d'un champ tournant qui entraîne le rotor au synchronisme. Ces moteurs se prêtent très bien à la transformation du courant alternatif en courant continu. Enfin les moteurs ne possédant pas de collecteur peuvent être alimentés par du courant alternatif à haute tension.

On n'emploie le moteur synchrone que pour les transports d'énergie de très grande puissance, et quand il importe d'avoir une vitesse absolument constante. Ainsi, l'on en fait usage dans les transports de force pour renforcer les machines à vapeur existantes. Ils offrent aussi un intérêt quand on veut relever le facteur de puissance d'un réseau de distribution et que l'on désire compenser les décalages résultant de l'inductance du réseau. On branche alors, en série ou en dérivation sur les récepteurs, un moteur

tournant à vide et surexcité qui fonctionne à la façon d'un condensateur et rapproche le courant de la tension.

465. Moteurs asynchrones. — Les moteurs asynchrones à champ tournant sont aussi appelés « moteurs d'induction. »

On produit actuellement les champs tournants, par la combinaison de plusieurs champs, de diverses manières. Mais, quelle que soit la méthode employée, les intensités des champs alternatifs à réunir sont égales et décalées entre elles, et il faut qu'il y ait, en outre du décalage dans l'espace, un décalage de phase. M. Ch. Brown, le premier, a construit pratiquement des moteurs à courant alternatif simple à l'instar des moteurs polyphasés.

On dit que les champs alternatifs ont un décalage de phase lorsque leurs valeurs maxima ne se manifestent pas simultanément, mais se suivent à un certain intervalle de temps, ou autrement dit, lorsque les vecteurs des différents champs ne coïncident pas.

Comme cas particulier, deux champs alternatifs fixes, d'intensités égales, répartis autour de l'induit suivant une sinusoïde, alimentés par des courants sinusoïdaux décalés entre eux de un quart de période, créent un champ tournant réparti également suivant une sinusoïde et égal à la valeur maxima de chacun des deux champs alternatifs.

Le couple moteur des moteurs asynchrones à champ tournant est proportionnel aux courants dans l'organe mobile ; mais, ces courants étant eux-mêmes proportionnels au glissement ($\omega - \omega'$), il en résulte que la puissance totale P , transmise en watts à l'organe mobile par l'organe fixe, est également proportionnelle à $\omega - \omega'$, et qu'on peut écrire $P = b(\omega - \omega')$, b étant une constante qui dépend de l'intensité du champ, du rayon de l'organe mobile, de la longueur ainsi que de la résistance des conducteurs.

Au démarrage, $\omega' = 0$, le glissement $= \omega$ et le couple moteur a une valeur énorme s'il n'y a pas de dérivation magnétique ; à faible charge, ω' est très sensiblement égal à ω , et l'angle de glissement est considérable.

Les moteurs d'induction conviennent surtout aux unités de faible puis-

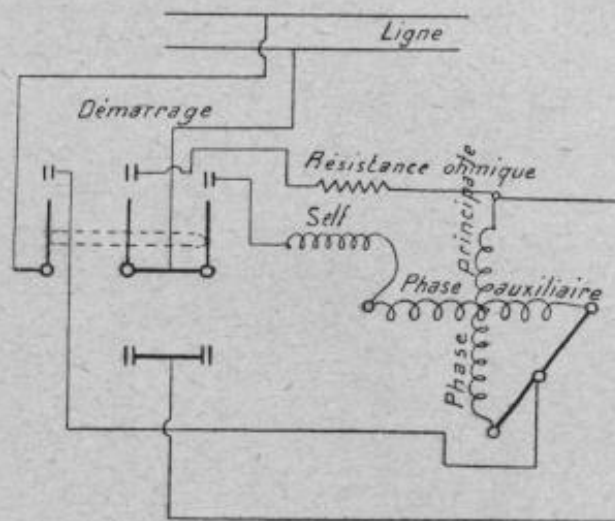


FIG. 1151. — Schéma d'un démarreur de moteur monophasé.

sance, en raison de leur facilité de démarrage. Ils comportent, suivant les applications auxquelles ils sont destinés, soit une résistance de démarrage, soit un compensateur, ce dernier étant employé quand le moteur ne doit pas démarrer à pleine charge, et lorsque le réseau ne peut fournir un courant de démarrage assez intense.

Pour les moteurs de grande puissance, on munit le moteur d'enroulements propres à déterminer le déphasage des deux circuits, en introduisant dans l'un une résistance non inductive et dans l'autre une bobine de self. M. Ricardo Arno intercale dans l'induit une résistance telle que l'accroissement du couple, résultant de l'impulsion imprimée au moteur, soit le plus grand possible. Le rotor est bobiné en triphasé et réuni à un rhéos-

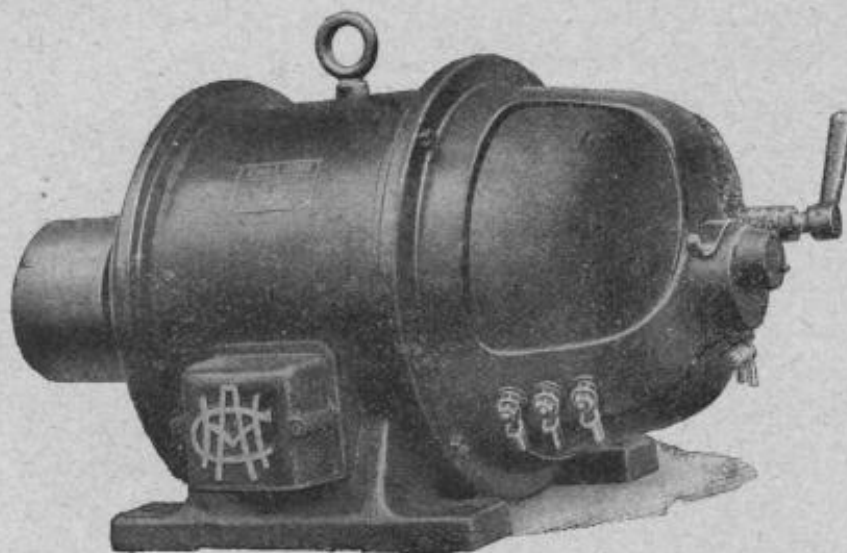


FIG. 1152. — Moteur asynchrone fermé à induit bobiné
(Construction H. Guénod, S. A.).

tat. Une faible impulsion suffit pour effectuer le démarrage. Une dissymétrie créée par le retard à la fermeture d'une des phases produit le même résultat.

Dans les moteurs avec enroulement n'occupant que les $\frac{2}{3}$ seulement de la surface du pôle, la surface restante est généralement prise par une phase supplémentaire qui permet au moteur de démarrer comme un moteur diphasé. Quand la puissance du moteur dépasse 75 HP, on recourt à l'emploi d'une résistance intercalée dans l'armature. La phase de démarrage comporte soit le double, soit la moitié du nombre de spires de la phase principale, la première proportion paraissant préférable.

Avec les moteurs monophasés on peut, à l'aide d'un transformateur, diminuer la tension au démarrage presque sans aucune perte d'énergie. Mais si l'on veut avec un tel transformateur rendre le démarrage autant que possible libre de tout à-coup, il est nécessaire de prévoir un grand

nombre de sorties et un nombre également grand de contacts sur l'appareil de démarrage. Pour empêcher qu'un courant très intense traverse les contacts, il faut qu'à chaque variation de la tension du moteur l'arrivée du courant soit suspendue.

A ce point de vue, les transformateurs rotatifs sont plus avantageux, dans lesquels on peut produire constamment toutes les tensions, depuis zéro jusqu'à une tension maxima positive ou négative, suivant la position d'une armature munie d'un enroulement.

On réunit les avantages des deux types de transformateurs en em-

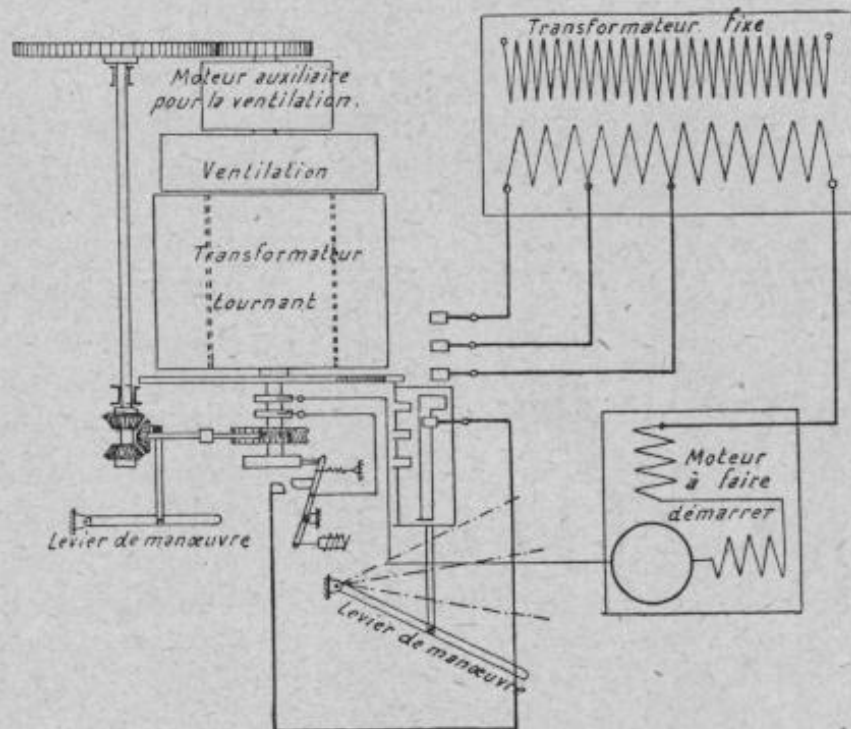


FIG. 1153.

ployant un transformateur statique avec peu de bobines de couplage, combiné avec un convertisseur additionnel. La tension de ce dernier est mise en opposition ou s'ajoute à celle du premier suivant la position de son armature et on obtient ainsi facilement le passage d'une tension partielle à une autre. Ce dernier dispositif de démarrage est principalement indiqué pour les gros moteurs, pour le démarrage desquels interviennent de fortes intensités. Pour assurer pendant le démarrage la commande alternative du transformateur tournant et du coupleur, qui établit la communication avec le transformateur à bobines, on peut les verrouiller mutuellement (fig. 1153).

466. Moteurs asynchrones à collecteur. — Les moteurs monophasés à collecteur, qui rentrent dans la catégorie des moteurs asyn-

chrones, et dont les propriétés se rapprochent de celles des moteurs série à courant continu, sont : le *moteur série* à vitesse variable ; le *moteur série* à vitesse constante ; le *moteur à répulsion* ; le *moteur série répulsion* ou *moteur série compensé*.

La consommation du moteur monophasé se distingue de celle du moteur à courant continu en ceci que, dans ce dernier, on n'a à s'occuper que de la self-induction des spires court-circuitées, produisant, comme on sait, un retard de la commutation. Dans le moteur monophasé, par contre, les bobines court-circuitées sont aussi sous l'action du champ principal, variable en intensité, lequel accélère la commutation lorsque le courant augmente, et la retarde, au contraire, quand le courant diminue, ainsi que sous l'influence du champ transversal, produit par l'induit.

La principale difficulté de la commutation est causée par le courant intense produit par le flux inducteur alternatif dans la ou les sections

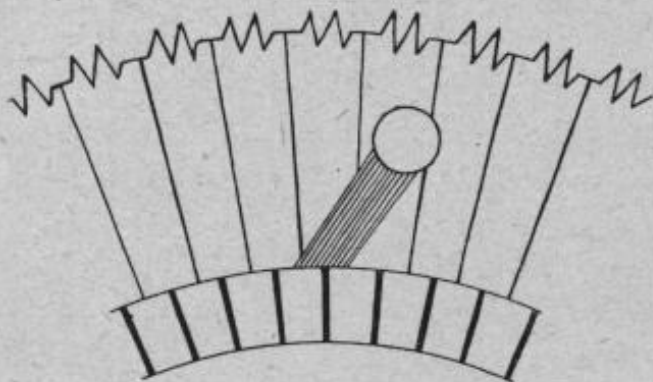


FIG. 1154.

mises en court-circuit par les balais. Si la section connectée est de résistance suffisamment faible, les ampères-tours qui s'y établissent au moment de la mise en court-circuit sont égaux aux ampères-tours inducteurs. Tous les constructeurs se sont efforcés de réduire ce courant local,

si nuisible à la commutation, depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse maxima. Pour le cas de l'arrêt ou de faible vitesse, la méthode pratique consiste à employer des connexions d'une résistance convenable entre les lames du collecteur et les conducteurs induits (*fig. 1154*). Ces résistances permettent de doubler l'intensité du flux inducteur, et par suite, de porter la tension entre les lames du collecteur à 6 ou 8 volts (2 fois à 2,5 fois plus faible que dans les moteurs à courant continu). Pour la marche à vitesse normale, on emploie soit des connexions résistantes, comme on vient de le voir, soit des pôles de commutation d'une forme quelconque (*fig. 1155*).

Le bobinage auxiliaire se décompose généralement en deux enroulements distincts, ce qui offre le grand avantage de pouvoir répartir l'enroulement destiné à compenser l'induction transversale sur toute la surface polaire et d'annuler ainsi le décalage de phase que produit, sans cela, le champ transversal.

Au point de vue de la fréquence, on sait que la tension dans la section en court-circuit est fonction du nombre de périodes. Pour une tension de

court-circuit donnée, l'induction par pôle peut être accrue dans le même rapport que la fréquence est diminuée. Si, à 25 périodes, on peut admettre

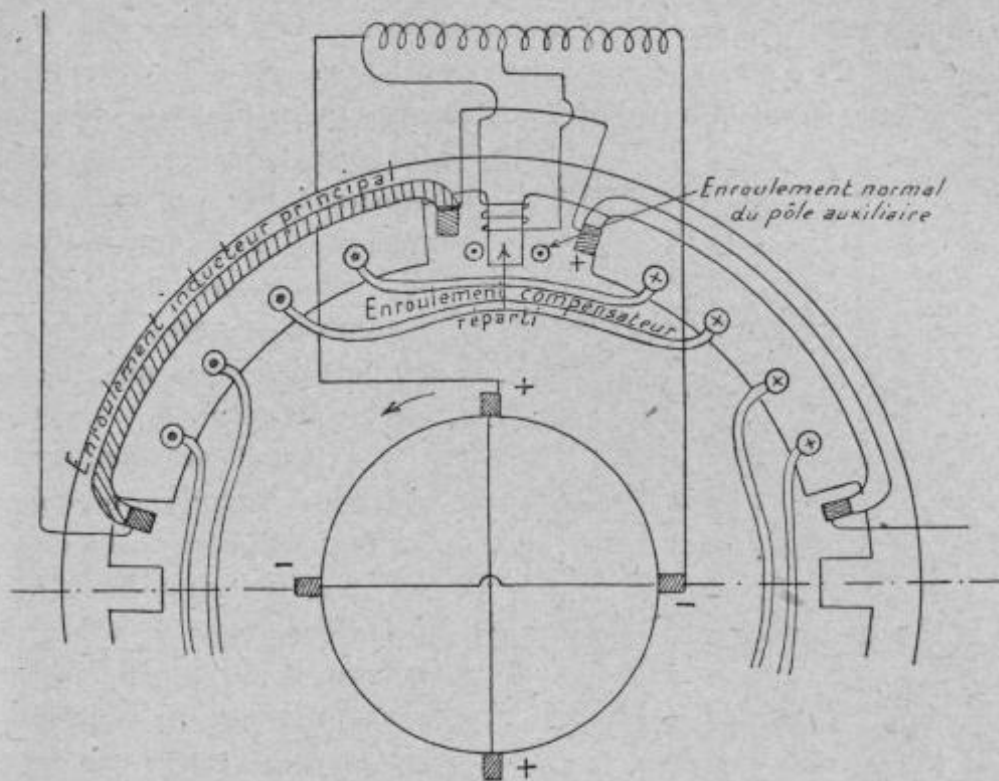


FIG. 1155.

une certaine induction maxima, à 12,5 périodes, on pourra doubler cette

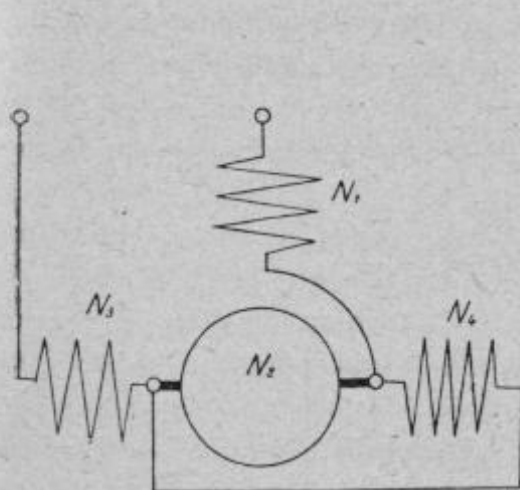


FIG. 1156. — Enroulement auxiliaire connecté directement sur les balais.

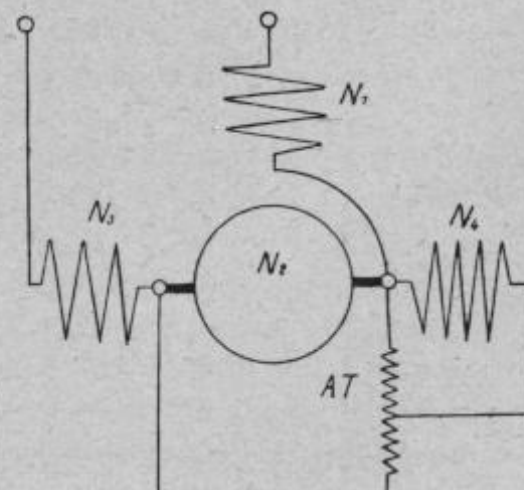


FIG. 1157. — Enroulement auxiliaire connecté par l'intermédiaire d'un auto-transformateur.

induction en laissant à la tension de court-circuit la même valeur. On pourrait donc doubler aussi la puissance utile si la saturation du circuit

magnétique permettait de doubler l'induction ; mais comme, à 25 périodes, on donne en général à l'induction une valeur très voisine de la saturation, on ne peut guère qu'augmenter de 30 à 40 0/0 la valeur de l'induction, mais au prix d'un grand accroissement de l'excitation. Pratiquement, il n'y a aucun intérêt à descendre au-dessous de 15 périodes, qui est d'ailleurs la valeur à peu près la plus basse qu'on puisse prendre pour

les transformateurs et autres appareils. Par rapport à la fréquence 25, la fréquence 65 permet d'accroître de 67 0/0 le nombre des spires inductrices et d'utiliser beaucoup mieux le circuit magnétique.

A l'effet d'éviter que les ampères-tours induits ne produisent un flux transversal important, on emploie l'enroulement compensateur, noyé dans la pièce polaire et disposé de façon à contre-balancer la diamagnétisation transversale due à l'armature. Pour aider à réduire le nombre de spires inductrices, on constitue les carcasses en tôle de haute perméabilité, et l'on évite ordinairement de placer des joints dans le circuit magnétique. En outre, on ne

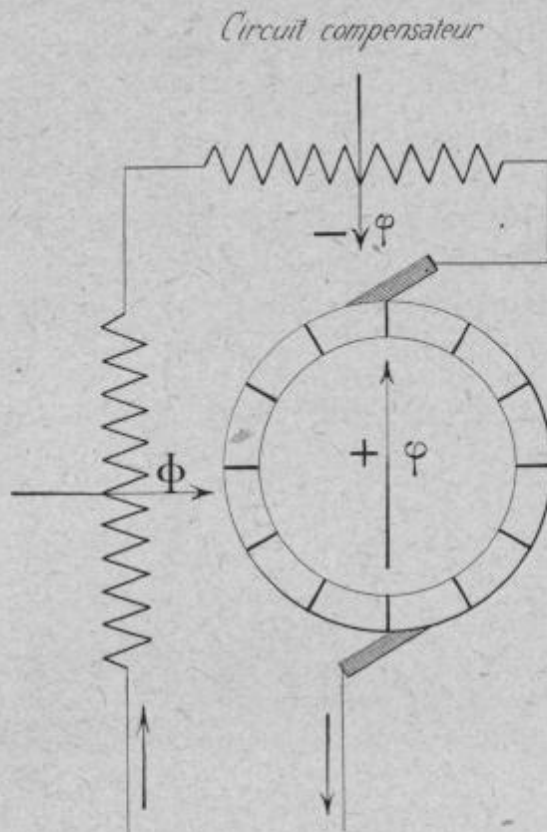


FIG. 1158.

fait travailler le fer qu'au-dessous du coude de la courbe du magnétisme.

Le moteur série à vitesse variable, dont le type original est celui réalisé par M. Lamme-Ryan, représenté schématiquement (fig. 1158), comporte un inducteur feuilleté à pôles saillants. La bobine inductrice principale développe le flux utile Φ . Dans des entailles, pratiquées sur les bords des pièces polaires, est un enroulement compensateur qui, équilibrant les ampères-tours de l'induit, annule toute réaction d'induit. Pour faciliter la commutation et réduire au minimum les étincelles aux balais, les liaisons des lames du collecteur aux différents points du bobinage sont effectuées par des connexions résistantes.

Ce moteur possède un grand couple au démarrage, et sa vitesse augmente lorsque la charge diminue. Il fonctionne parfaitement aux basses fréquences et son $\cos \varphi$ atteint 0,93. Dans le moteur Eikemeyer, le circuit

compensateur est fermé sur lui-même au lieu d'être monté en tension avec la bobine produisant le flux Φ .

Le moteur série à vitesse constante, dû à MM. Schuler et de Ferranti, est constitué par un stator annulaire muni de deux bobinages décalés de un quart de période l'un par rapport à l'autre.

Ces deux enroulements diphasés sont montés en tension avec le rotor qui est un induit de commutatrice triphasée (fig. 1160). Le moteur démarre comme le

moteur Lamme et, lorsqu'il est en vitesse, on met les trois bagues en court-circuit par un dispositif approprié.

Le moteur à répulsion, imaginé par Eikemeyer, a son stator muni de deux enroulements décalés de un quart de période et montés en tension. Le rotor est un induit de dynamo dont les balais, montés sur la ligne neutre, sont reliés par un court-circuit. Le couple de démarrage est plus faible que celui du moteur série, et la vitesse diminue avec la charge. Il se prête très bien à l'alimentation directe par courant de haute tension.

Le moteur série compensé dû à M. Latour réunit les propriétés du moteur série (fort démarrage) et du moteur à répulsion (bonne commutation).

Le stator est annulaire comme ceux des moteurs d'induction. Il ne comporte (fig. 1160) qu'un seul enroulement monté en tension avec le rotor et le réseau.

Aux extrémités du diamètre neutre interpolaire sont disposées deux lignes de balais reliées respectivement au stator et à la ligne, comme dans un moteur série, puis deux autres lignes de balais aux extrémités du diamètre correspondant à l'axe des pôles, ces deux dernières lignes de balais étant réunies en court-circuit, comme dans le moteur à répulsion. Si, dans les deux circuits en série (stator et rotor), on lance un courant alternatif, le démarrage s'effectue comme dans un moteur série et les étincelles ne se produisent qu'aux balais réunis en court-circuit tant que la vitesse n'est pas celle du synchronisme ; celle-ci atteinte, tout crachement disparaît. A cette vitesse, et pour cette seule valeur, le facteur de puissance est égal à l'unité.

Le moteur *Alkinson* comprend deux enroulements inducteurs dont l'un crée un champ perpendiculaire à la ligne des balais et l'autre un champ dirigé suivant cette ligne. Le premier est alimenté par le réseau et le

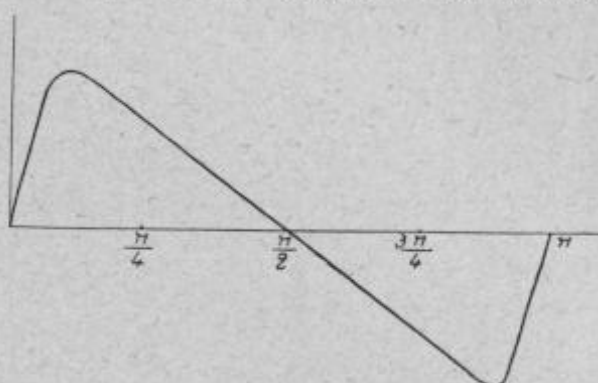


FIG. 1159. — Couple au démarrage d'un moteur à répulsion en fonction de l'angle de décalage des balais.

second, soit par la source, avec décalage variable du courant par intervention d'une résistance shunt, soit par une source auxiliaire ayant même fréquence que la source principale, soit enfin par le courant d'induit. L'inversion du sens de marche se fait par l'inversion des connexions d'un enroulement sans agir sur les autres.

Dans le moteur *Heyland* les lames du collecteur sont réunies par des résistances permettant de réaliser une commutation convenable.

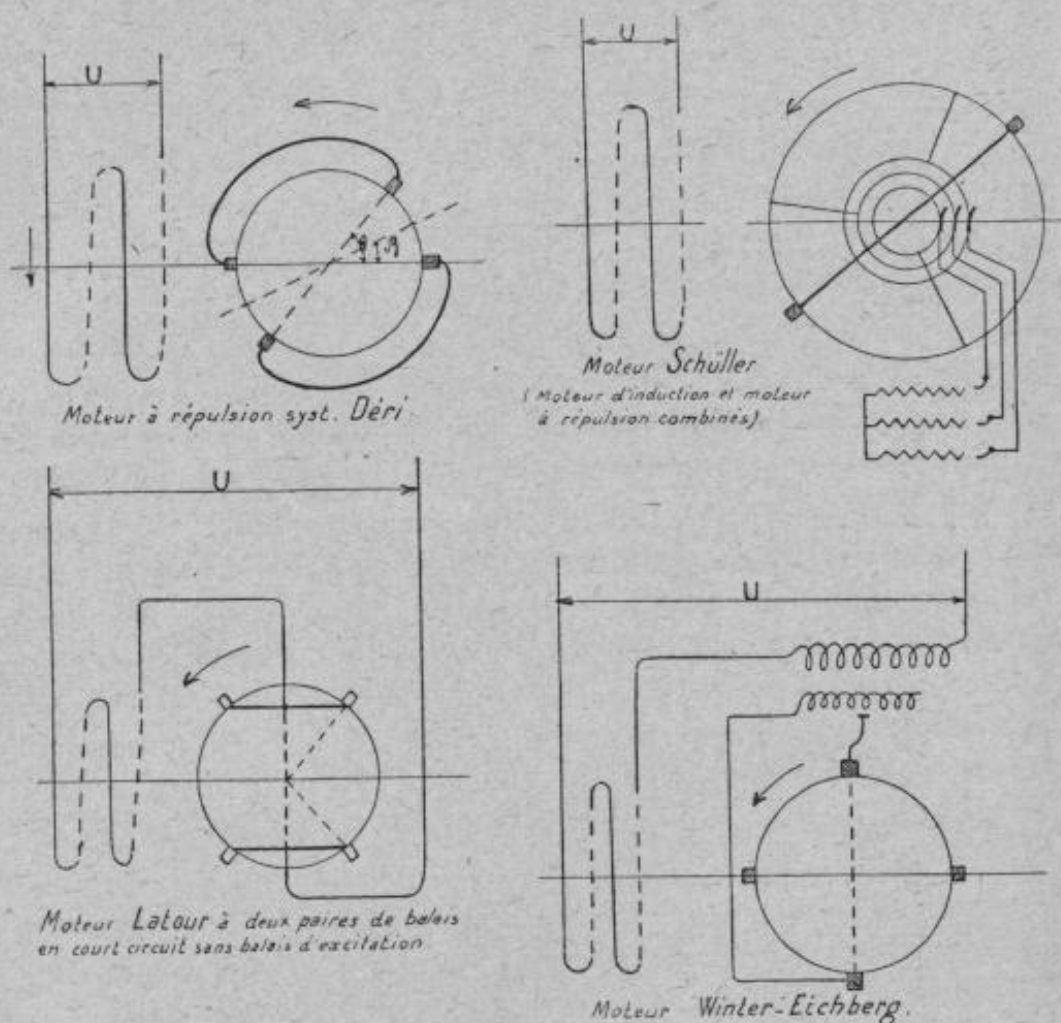


FIG. 1160. — Schémas de moteurs monophasés.

Le moteur *Osmos* comporte deux paires de balais, l'une dirigée suivant les axes polaires et en série avec l'inducteur, l'autre dirigée suivant les axes interpolaires et court-circuitée.

Dans le moteur *Déri* une seule des deux paires de balais est mobile et les balais sont réunis métalliquement.

Le moteur compensé à transformateur en série permet de modifier le couple de démarrage, dans de larges limites, en faisant varier la différence de potentiel aux bornes et en modifiant le rapport de transformation

du transformateur série ; plus ce rapport est grand, plus le couple est élevé.

Au point de vue de la commutation, le moteur à répulsion et le moteur compensé sont supérieurs au moteur série pour les vitesses voisines du synchronisme, mais non pour le démarrage et la marche hypersynchrone.

Tous les moteurs monophasés à collecteur peuvent être construits de façon à développer un couple de démarrage puissant et à diminuer de vitesse quand le couple augmente. Dans ces moteurs, on obtient le réglage de la vitesse en modifiant la différence de potentiel aux bornes du moteur ou de l'induit, et on peut freiner par résistances ou par récupération.

Avec les gros moteurs, il est possible d'atteindre un $\cos \varphi = 0,9$ pour la vitesse normale ; mais, au démarrage, le facteur de puissance est faible pour ces divers types de moteurs.

A proximité du synchronisme, le moteur à répulsion et le moteur compensé ont leurs champs alternatifs qui se transforment en un champ tournant circulaire, ce qui améliore les conditions de fonctionnement de la machine au point de vue de la commutation. A ce sujet, la formule de la tension de réactance (§ 332) peut être appliquée, mais la tension de réactance est une fonction de la forme du courant dans le temps et, d'une façon générale, est en phase avec le courant d'alimentation.

Il est avantageux, dans l'établissement des moteurs à répulsion, de maintenir petite la valeur du rapport des ampères-tours de l'induit aux ampères-tours de l'inducteur, et, comme la vitesse de rotation n'a pas besoin d'être comprise entre 1,5 et 3 fois le synchronisme (comme pour le moteur série), on peut les construire pour des fréquences de 40 ou 60.

Pour régler le couple moteur au moment du démarrage, on peut diminuer la différence de potentiel par l'emploi soit d'un transformateur ordinaire à nombre de bobines variables, soit d'un auto-transformateur à rapport de transformation variable, soit d'un régulateur de potentiel, d'un transformateur série alimentant l'induit, de résistances non inductives, et enfin en décalant les balais ou les connexions entre l'enroulement de l'inducteur et les bornes. On peut, d'ailleurs, faire des combinaisons de ces différents procédés.

Nous avons dit plus haut que les induits des machines monophasées à collecteur sont munis généralement de conducteurs de haute résistance entre les enroulements et les lamelles du collecteur. Une forme d'exécution pratique de ces résistances a été réalisée par Lamme. Les bobines d'induit sont disposées de telle manière que les côtés contre lesquels sont placées les résistances se trouvent dans la partie extérieure la plus large des encoches et les côtés opposés, dans la partie la plus étroite et la plus profonde. Elles sont arrangées par groupes isolés et séparés, dont les côtés ne sont pas plus larges que les ouvertures de la fente, par lesquelles elles

sont introduites ; les résistances sont logées dans la partie supérieure la plus large de la fente. Enfin des cales convenablement choisies maintiennent l'ensemble et fixent les bobines. Cette disposition a l'avantage que la chaleur développée dans les résistances peut s'échapper facilement, étant donné que les conducteurs se trouvent à proximité de la périphérie ; de plus, les encoches possèdent une forme telle que les lignes de force sont près de la racine et, sur tout le reste de la longueur, sont en nombre à peu près égal.

Pour empêcher la production d'étincelles sur les collecteurs, les ateliers de construction Oerlikon emploient un champ décalé dans la phase. La diminution d'intensité subséquente est obtenue en maintenant constante la somme des forces électromotrices nécessaires à la commande du moteur et à l'exécution du champ auxiliaire, et en prélevant sur la force électromotrice nécessaire à l'excitation du champ auxiliaire la force électromotrice ajoutée à la tension momentanée du moteur pour l'accroissement de la vitesse.

Ce procédé n'étant plus utilisable lorsque le transformateur contient, en plus de quelques petites bobines de couplage, une plus grande qui n'est employée que pendant la deuxième partie de la période de démarrage, par exemple de manière que les petites bobines soient d'abord intercalées l'une après l'autre, puis après ouverture de celles-ci, la grande bobine seule et finalement en même temps que les petites bobines à insérer de nouveau progressivement, la firme Siemens-Schukert emploie seulement

la force électromotrice de cette grosse bobine de couplage pour accroître ou diminuer la force électromotrice d'excitation du champ auxiliaire, ce qui peut avoir lieu de différentes manières. Nous nous bornerons à indiquer celle représentée schématiquement par la (fig. 1161) qui est d'ailleurs supérieure aux autres.

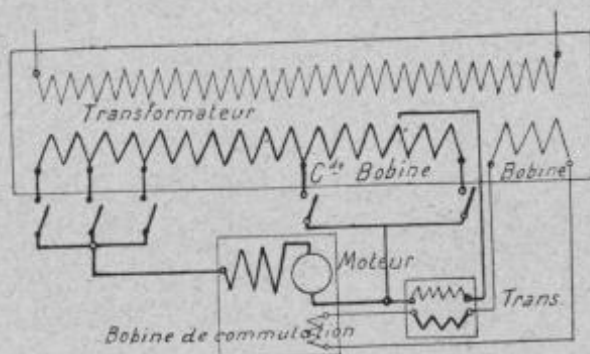


FIG. 1161.

Quant au réglage de la vitesse, il s'obtient au moyen de résistances en série, de bobines de self, de groupements en série et en parallèle des différents moteurs, ainsi que par décalage des balais.

On peut rendre sensiblement constante à toutes charges la vitesse angulaire des moteurs monophasés à collecteur par les procédés suivants.

Si on munit un moteur à collecteur, possédant un induit à courant continu, de deux lignes de balais en court-circuit, perpendiculaires l'un à l'autre, on obtient un moteur dont le fonctionnement est analogue à

celui d'un moteur asynchrone monophasé, presque synchrone à vide et dont le glissement en charge n'est que de quelques pour cent. Ce moteur peut, en outre, fonctionner en génératrice hypersynchrone. Mais son couple de démarrage est nul ; on devra donc le faire démarrer en moteur à répulsion, c'est-à-dire avec une seule ligne de balais en court-circuit et ne mettre en court-circuit la seconde ligne que lorsque la vitesse atteindra son régime normal se rapprochant du synchronisme. On améliore $\cos \varphi$ en reliant les balais de la seconde ligne à un second enroulement inducteur.

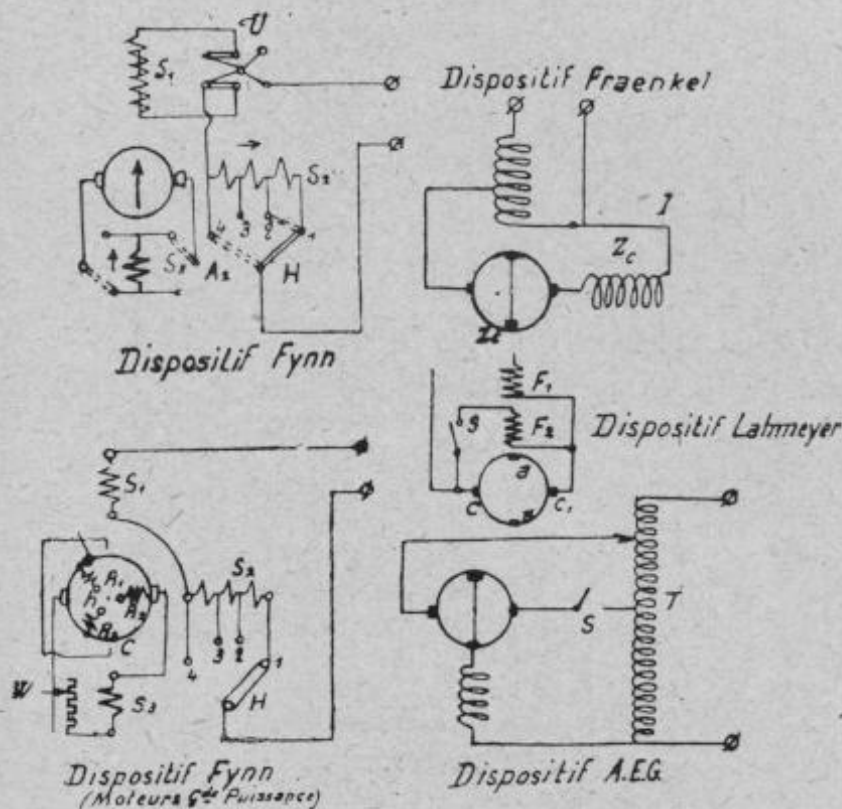


FIG. 1162.

On ne peut régler la vitesse du moteur en agissant sur le stator, mais on peut parvenir à ce résultat à l'aide d'un transformateur relié aux balais principaux ; le primaire de ce transformateur est branché sur le circuit d'alimentation et il suffit de prendre un nombre de spires variable sur le secondaire, qui est relié aux balais ; on peut ainsi insérer des selfs ou des résistances entre les connexions entre balais ; on est arrivé ainsi à réduire la vitesse de 50 0/0.

Arnold et Lacour emploient un dispositif analogue à celui de l'inducteur supplémentaire, dans lequel ils font varier la vitesse en modifiant le nombre de spires de cet inducteur supplémentaire.

Fynn emploie une disposition analogue (fig. 1162) où le moteur démarre en moteur à répulsion.

La Société Alioth, de Bâle, construit des moteurs de ce type pour des puissances de 1/2 à 18 chevaux, à des vitesses variant de 1.500 à 775 tours à vide et un rendement de 58 à 82 0/0.

Afin d'éviter les étincelles aux balais, Fynn met en série avec la bobine auxiliaire S, un rhéostat W que l'on met progressivement en court-circuit au démarrage; en outre, un enroulement auxiliaire triphasé ($R_1 R_2, R_3$) est ouvert au moment du démarrage et mis en court-circuit en marche normale.

Fraenkel emploie un dispositif mixte. La Société Lahmeyer préconise le dispositif (fig. 1162) et enfin l'A. E. G. a adopté la disposition où l'interrupteur S est ouvert au démarrage et fermé en marche normale (fig. 1162).

Au point de vue du freinage, le moteur compensé, pour pouvoir récupérer, doit être transformé en moteur shunt. Quant au moteur à répulsion, il permet le freinage à n'importe quelle vitesse, et, comme le moteur série, il travaille comme génératrice à courant continu s'il existe suffisamment d'aimantation rémanente.

Dans les moteurs de ce genre, tout le circuit magnétique doit être établi en tôles de fer doux, et il faut donner à la tension de réactance par section

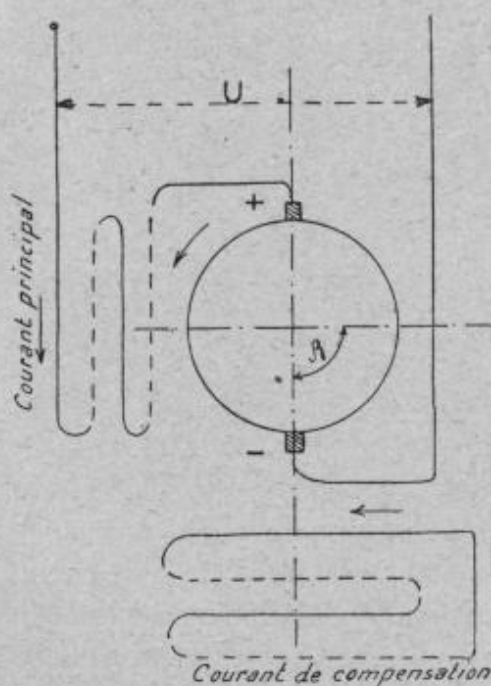


FIG. 1163. — Schéma d'un moteur-série compensé en court-circuit.

et à la tension indirecte par le courant primaire des valeurs aussi faibles que possible, et réduire l'inductance du moteur pour améliorer le facteur de puissance.

L'avantage qu'ont les moteurs monophasés de pouvoir fonctionner indifféremment sur deux sortes de courant a été mis à profit dans un grand nombre d'installations de traction, où les lignes interurbaines ont pu être raccordées à des lignes de tramways existantes et pénétrant dans le centre des villes. Ainsi la Compagnie Westinghouse fait le réglage des moteurs série munis d'un enroulement compensateur — dans la marche sur courant alternatif — par un auto-transformateur et un

régulateur de potentiel à partie mobile, et — dans la marche à courant continu — par des résistances simples. Le passage d'un mode de réglage à l'autre est effectué par un commutateur automatique.

III. — MOTEURS TRIPHASÉS

467. Moteurs synchrones. — Les moteurs synchrones triphasés se comportent comme les moteurs monophasés synchrones décrits au (§ 464) et les modes d'enroulement des alternateurs triphasés s'appliquent au bobinage des induits de ces moteurs. Ils peuvent être établis avec un inducteur fixe et un induit mobile ou réciproquement ; il est difficile de construire des petits moteurs marchant à une faible vitesse angulaire.

Toute puissance du moteur peut être atteinte aux excitations les plus diverses, et le moteur absorbe à chacune de ces excitations, pour la même puissance, des courants d'intensités différentes. Cependant, il ne convient pas de baisser l'excitation au-dessous d'une certaine limite, car le moteur se décrocherait et s'arrêterait. La valeur minima du courant absorbé est celle qui entraîne la perte minima dans les enroulements de l'induit et dans la ligne d'amenée. Quand le courant d'excitation est plus grand que la valeur du courant maxima, que l'on peut considérer comme normale, on dit que le moteur est super ou sous-excité.

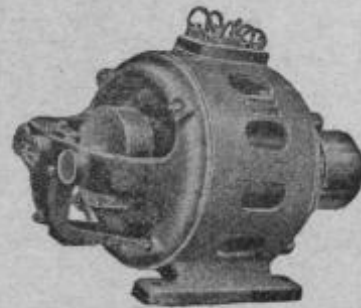


FIG. 1164. — Moteur triphasé à coupleur centrifuge automatique (Société l'Éclairage Électrique).

Pour la mise en marche des moteurs synchrones, on a généralement recours à un petit moteur asynchrone d'une puissance égale environ au dixième de celle du moteur à actionner et pouvant supporter une surcharge pendant quelques secondes. La charge à appliquer au moteur auxiliaire doit être graduellement augmentée, et, à cet effet, on commande le moteur synchrone par l'intermédiaire d'un accouplement à friction permettant d'augmenter peu à peu la vitesse angulaire jusqu'à ce qu'on atteigne celle correspondant au synchronisme.

Si le moteur est utilisé à renforcer d'autres machines motrices, on peut se servir de celles-ci pour le faire fonctionner, et lorsque le moteur, faisant partie d'un groupe convertisseur, actionne une génératrice à courant continu, en dérivation, couplée en parallèle avec d'autres machines, celle-ci est très propre à effectuer la mise en marche du moteur synchrone en la faisant fonctionner d'abord comme moteur. Pour éviter les à-coups de courant qui se produisent au moment du couplage des moteurs synchrones, on doit faire coïncider exactement la courbe de tension avec celle du réseau, et, pour cela, il faut que ces deux courbes aient même tension efficace, même fréquence et même phase. Mais il n'est matériellement jamais

possible de réaliser une coïncidence parfaite de phase et de fréquence ; aussi, en pratique, se contente-t-on de mettre la lampe en circuit à l'instant où elle est obscure, c'est-à-dire quand elle ne reçoit pas de courant.

Dans certains moteurs bien construits, les effets d'hystérésis qui se produisent dans les pièces polaires feuilletées donnent naissance à un couple moteur suffisant pour le faire démarrer à vide et l'amener au synchronisme.

Pour produire l'arrêt du moteur synchrone, on le décharge d'abord, ensuite on coupe le courant, et ce n'est que vers la fin que l'on supprime le courant d'excitation.

Quant au renversement de marche, on l'effectue en arrêtant le moteur

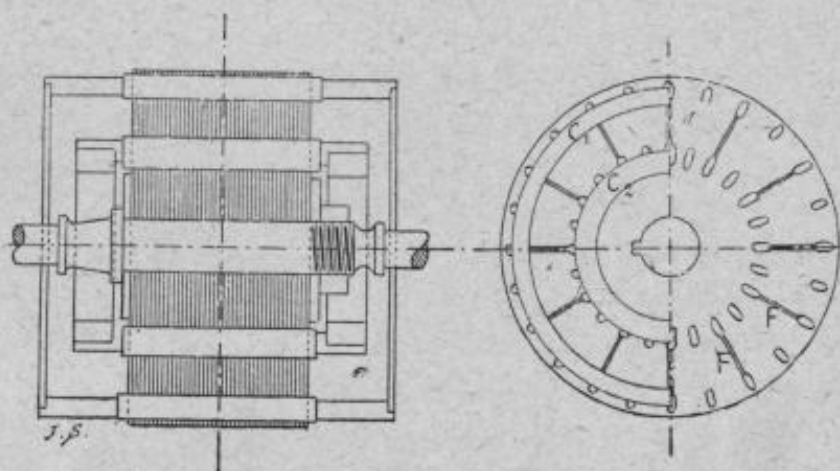


FIG. 1165. — Induit de moteur Boucherot (Gamma).

et en le remettant en marche au moyen d'un moteur asynchrone, en laissant les connexions invariables.

On peut régler arbitrairement l'intensité du courant alternatif absorbé en marche, à vide et à toute charge, en faisant varier l'excitation des électro-aimants. Pour une excitation déterminée, le courant absorbé par l'induit pour toute charge est minimum, et le courant a même phase que la tension.

Pour les moteurs de faible puissance, l'auto-excitation peut convenir pour produire le champ inducteur ; mais, dans les moteurs plus puissants, l'excitation séparée est la meilleure solution.

Lorsque l'excitation est la plus favorable, le courant et le travail à vide ne comportent que 10 et 5 0/0 de ceux de la pleine charge.

La limite de surcharge est donnée d'abord par la limite d'échauffement des enroulements, et ensuite par le décrochage amenant l'arrêt du moteur.

En raison de la qualité spéciale que possèdent les moteurs synchrones, à savoir de pouvoir amener l'intensité du courant d'alimentation en phase, ou même de la décaler en avant, on les emploie pour empêcher les effets

nuisibles de la self-induction dus à d'autres moteurs, transformateurs, génératrices ou lmpes à arc. Mais il faut que la tension aux bornes du moteur du circuit qui les alimente ne subisse pas de variations brusques. Il importe que ce genre de moteur soit muni d'amortisseurs à l'instar des alternateurs.

Le rendement des moteurs synchrones ne diffère pas de celui des bons alternateurs, puisque leur construction est identique et que les pertes sont les mêmes.

Pour reconnaître le moment où le synchronisme est atteint, on peut utiliser un dispositif stroboscopique ou des indicateurs de synchronisme constitués par des

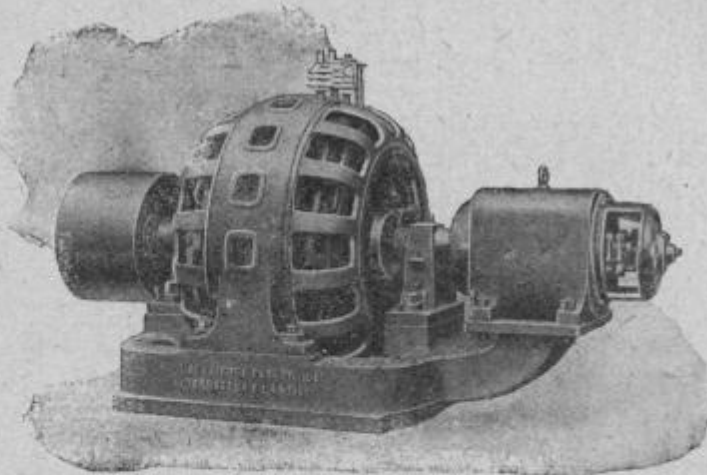


FIG. 1166. — Moteur synchrone triphasé, 50 périodes.
(Société l'Éclairage Electrique).

lampes à incandescence, dispositifs qui s'appliquent quand on effectue le démarrage avec du courant continu ou à l'aide d'un moteur auxiliaire. Dès que le moteur a commencé à démarrer, on excite faiblement l'inducteur, et l'on établit une dérivation reliant le circuit d'alimentation à l'induit à travers un groupe de lampes montées en série ; ces lampes doivent, en fonctionnement normal, exiger un voltage au moins deux fois égal à celui qui existe entre les conducteurs du circuit d'alimentation. Lorsque les battements des lampes ne se produisent plus qu'à des intervalles de quelques secondes, l'on est près de l'allure en synchronisme et, au moment précis où les lampes sont éteintes, on ferme l'interrupteur principal pour retirer la dérivation dans laquelle se trouvent les lampes, et supprimer le dispositif de démarrage. A partir de cet instant, on applique progressivement les charges.

Lorsqu'on fait fonctionner le moteur comme moteur asynchrone, il faut disposer les lampes de l'indicateur de phase en dérivation sur les bornes du circuit inducteur soumis à l'induction du flux variable de l'induit. Il est utile d'introduire dans le circuit de celui-ci une bobine de réactance réglable, afin d'éviter que le courant n'atteigne une trop grande intensité, et de fermer l'inducteur sur un circuit de très grande résistance (groupe de lampes à incandescence), pendant quelques instants, lors de la mise en marche.

MOTEURS ASYNCHRONES

468. Conditions de fonctionnement. — L'organe mobile des moteurs asynchrones triphasés n'est aimanté que par induction due à l'induit qui l'entoure, il tourne toujours à une vitesse inférieure à celle du synchronisme, écart qui constitue le glissement, et absorbe un courant dont l'intensité et la phase sont bien définies.

L'induit peut être tantôt l'organe mobile, tantôt l'organe fixe. Ces deux parties de la machine sont formées de tôles et percées de trous ou d'encoches (*fig. 1165*).

Le flux magnétique qui est produit dans l'entrefer n'est pas fixe, mais

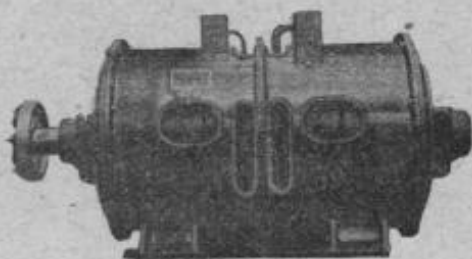


FIG. 1167. — Moteur Boucherot à grande vitesse.

se déplace avec une vitesse angulaire quelque peu supérieure à celle de l'induit lors de la marche normale. L'induction dans l'entrefer est bien inférieure à celle que l'on rencontre dans les machines à courant continu, et il en est de même pour les noyaux, pour les dents de l'inducteur et de l'induit. La per-

méabilité de ces dents conservant toujours une grande valeur, on peut négliger leur réluctance devant celle de l'entrefer.

Dans les moteurs asynchrones, le ralentissement de l'armature fait naître de forts courants induits qui produisent la force nécessaire pour vaincre la charge résistante et qui sont d'autant plus considérables que le ralentissement et la charge sont plus grands ; ces courants tendent d'ailleurs à affaiblir le champ primaire et, si l'enroulement primaire est branché sous une tension constante, il absorbe un courant d'autant plus grand que la charge est plus forte, absolument comme le primaire d'un transformateur. Ces moteurs se comportent d'ailleurs comme les moteurs shunt à courant continu.

A vide, l'organe mobile tourne presque synchroniquement avec le champ, c'est-à-dire sans glissement. Par suite de la réluctance de l'entrefer, le courant magnétique est toujours très considérable et, conséquemment, la force électromotrice de réaction due aux fuites magnétiques.

Les hautes fréquences accroissent la valeur du facteur de fuites. Pour les fréquences entre 60 et 100, on peut encore construire de bons moteurs industriels ; mais, pour des fréquences supérieures, le décalage du courant prend une grande valeur et les moteurs deviennent d'une exploitation onéreuse. L'obligation d'augmenter notablement le diamètre d'alésage entraîne un accroissement de poids des matières.

D'autre part, avec les hautes fréquences, les pertes ohmiques deviennent considérables.

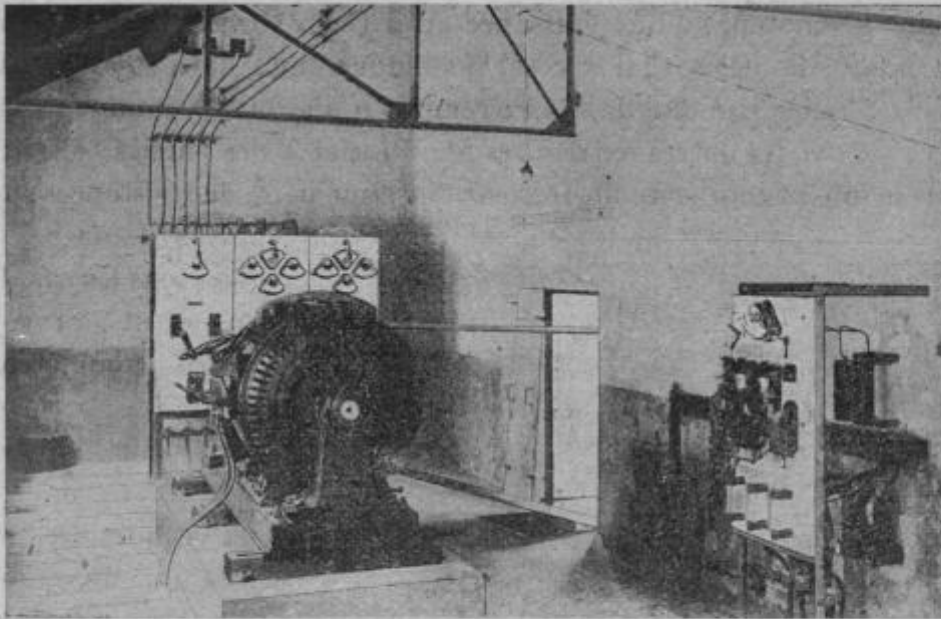


Fig. 1168. — Moteur Boucherot de 350 chevaux commandant par courroies des défibreurs (Papeteries de Domène, Isère).

Les moteurs polyphasés sont surtout avantageux aux basses fréquences

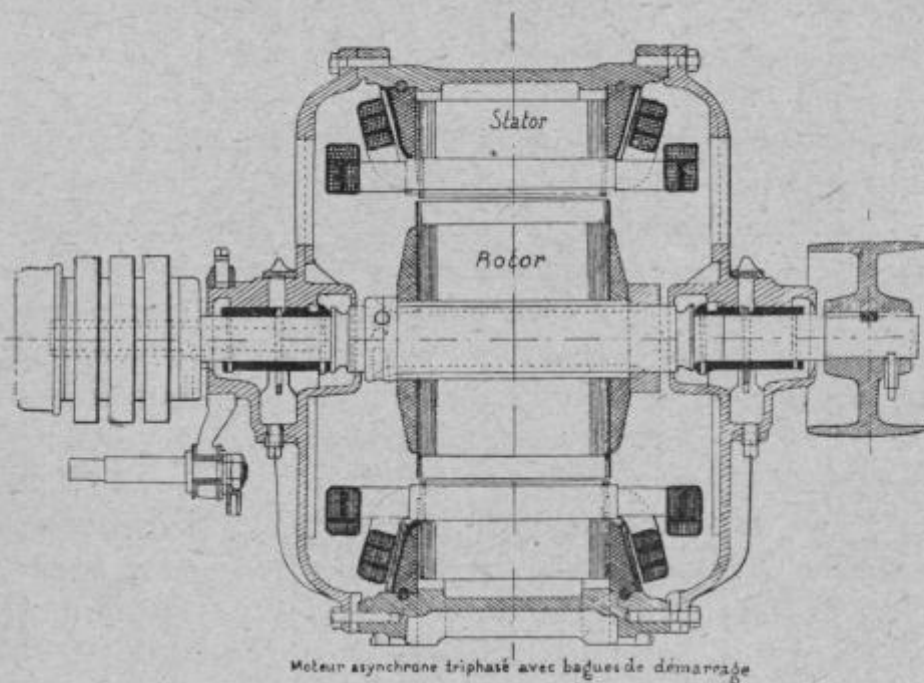


FIG. 1169.

et aux grandes vitesses de rotation, car ils demandent un faible courant à vide, avec une forte capacité de surcharge ; ils sont moins coûteux et

ont un facteur de puissance élevé. Il en est de même pour les alternateurs (surtout pour les grosses unités), mais le chiffre de 25 périodes est la limite pour le bon fonctionnement des lampes à incandescence.

Pour des moteurs d'une puissance au delà de 10 HP, l'induit possède un nombre de pôles égal à celui de l'inducteur ; dans ce cas, chaque phase est reliée par une de ses extrémités à une prise commune (centre de l'étoile), et les autres extrémités aboutissent à des bagues collectrices montées soit en court-circuit, soit par l'intermédiaire de résistances super-

posées de façon que, dans tous les cas, l'enroulement forme un circuit complètement fermé.

Lorsque le secondaire est terminé par des bagues, le rotor présente un enroulement semblable à celui du stator qui, pour un moteur triphasé, peut être arbitrairement triphasé, diphasé ou polyphasé

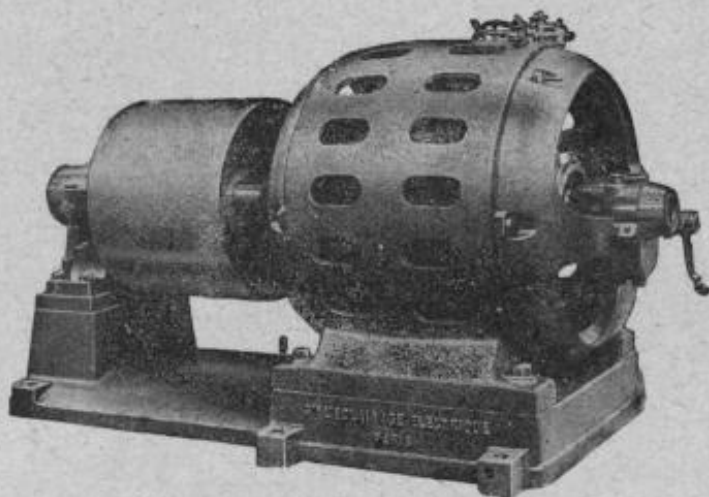


FIG. 1170. — Moteur asynchrone diphasé.
(Société l'Éclairage Électrique).

sans inconvénient. Sur ces bagues frottent des balais en liaison avec des rhéostats que l'on peut grouper en triangle ou en étoile, et que l'on manœuvre généralement avec une seule manivelle. La connexion en étoile offre l'avantage, pour l'organe fixe, d'un conducteur plus gros avec moins de spires qu'il n'en faudrait avec la connexion en triangle.

La courbe de courant a de l'influence sur les valeurs instantanées de la vitesse angulaire des champs tournants. En pratique, les bobines sont constituées par des spires enroulées dans des encoches qui chevauchent les unes par rapport aux autres, ce qui fait que les variations du stator dans sa forme comme dans sa valeur maxima sont proportionnelles aux ampères-tours du stator.

On cherche, dans les tôles estampées constituant les noyaux des organes mobiles et fixes, à maintenir aussi courte que possible la longueur du circuit magnétique, et aussi grande que possible la section transversale des dents. On ne fait pas les rainures trop larges, et on évite que leur longueur soit plusieurs fois égale à leur largeur. Les encoches ou les trous dans l'organe mobile sont plus nombreux et beaucoup plus petits que ceux de l'organe fixe, par la raison que les conducteurs dans le premier de ces organes sont constitués par du cuivre massif n'occupant

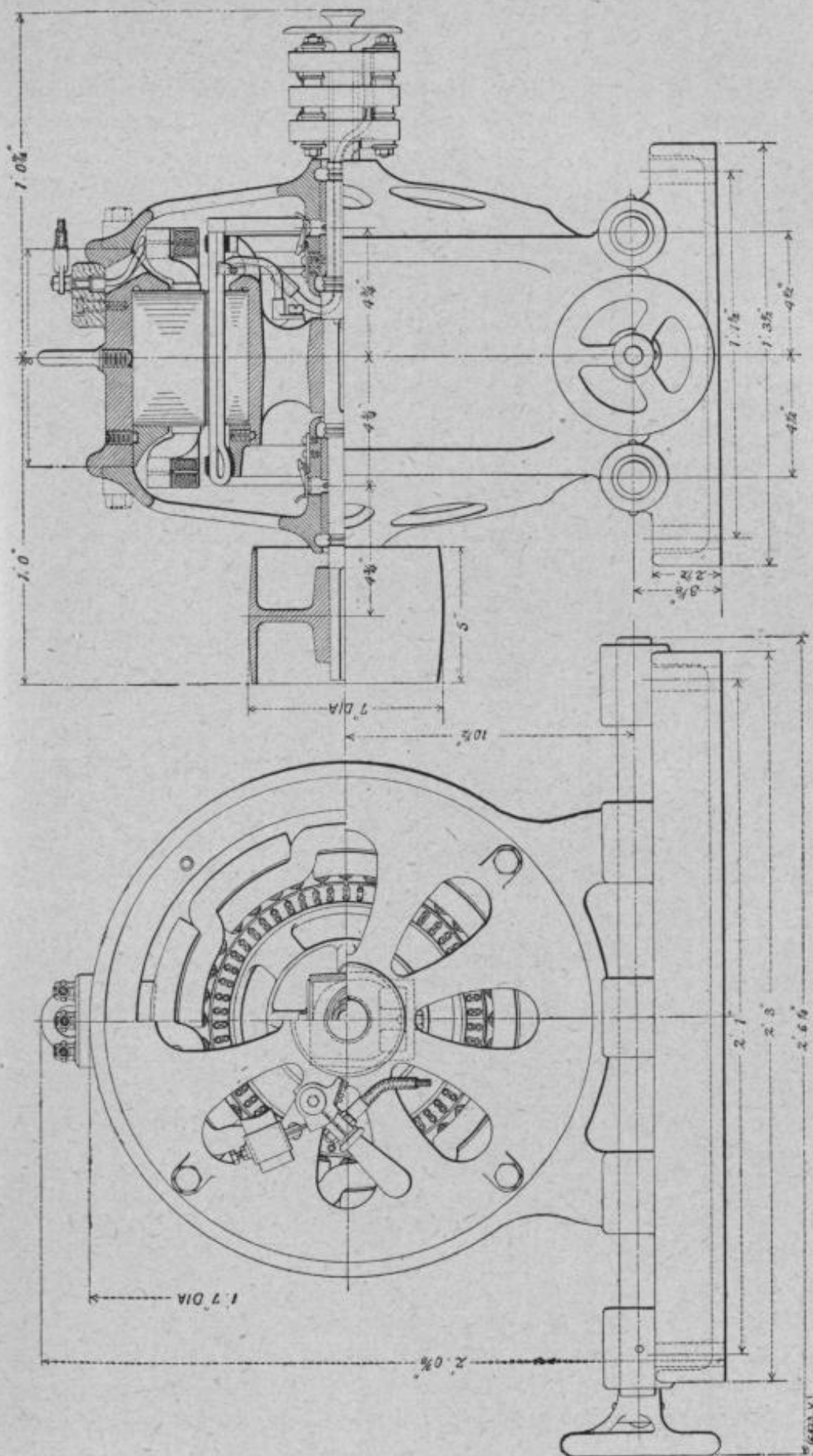


FIG. 1171. — Moteur triphasé de 5 HP, Dick, Herr et Cie.

que la moitié de l'espace exigé par l'enroulement isolé de l'organe mobile.

Les inductions généralement admises pour l'établissement des moteurs triphasés à 50 cycles sont les suivantes : fer de l'organe fixe, 6.500 à 8.000 gauss ; fer de l'organe mobile, 8.000 à 12.000 ; dents de l'organe fixe, 9.000 à 11.000 ; dents de l'organe mobile, 10.000 à 12.000. Ces chiffres correspondent à une induction comprise entre 2.500 et 4.500 gauss dans l'air.

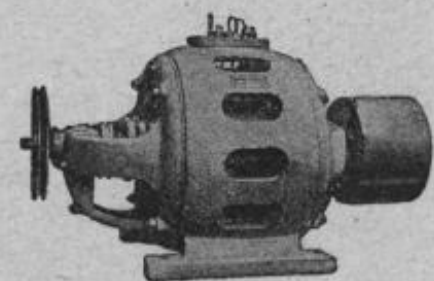


FIG. 1172. — Moteur asynchrone triphasé, 25 périodes (Société l'Éclairage Électrique).

Si, dans un moteur triphasé, on vient à diminuer l'entrefer, on diminue

l'importance des fuites ; pour diminuer l'induction, il faut augmenter le nombre de fils du stator, ce qui entraîne une diminution du courant magnétisant à vide. Il est bon alors de s'assurer, avant d'augmenter le nombre de conducteurs du stator, que la condition du couple maximum le permette.

Quand on diminue le nombre de pôles dans un moteur asynchrone, on augmente la section de l'entrefer, qui est égale, comme l'on sait, à $\frac{nDl}{\pi}$.

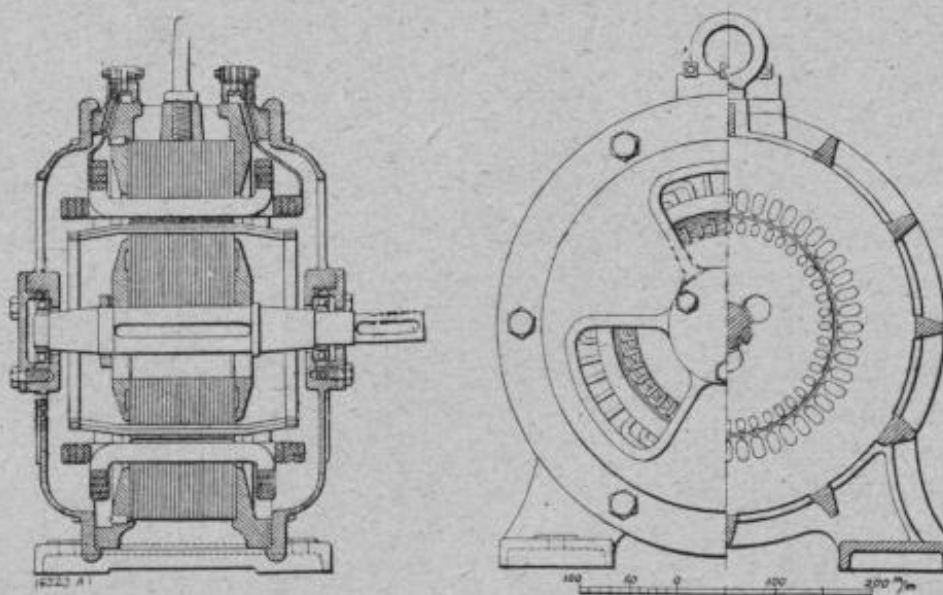


FIG. 1173. — Moteur à courant triphasé de 10 HP, construit par la Berliner Maschinenbau A.-G.

Cette augmentation entraîne par conséquent une diminution de l'induction et de la réluctance du circuit principal. Le courant magnétisant à vide diminue avec le nombre de pôles, d'où abaissement proportionnel du couple maximum. D'autre part, la vitesse angulaire ω du rotor étant

inversement proportionnelle au nombre de pôles, la puissance du moteur ne diminue pas, par suite du nombre moins grand des pôles.

La puissance maxima augmente, au contraire, en raison de l'augmentation du couple maximum due à la diminution du glissement (σ ou $\omega - \omega'$).

En augmentant le nombre des encoches, on diminue le nombre de fils par couche et par suite la force magnétomotrice par rainure, qui donne naissance au flux de dispersion se formant à travers les encoches. Mais, en augmentant outre mesure le nombre des encoches, on arrive par trop diminuer le fer des dents, ce qui conduit à des inductions et à des échauffements exagérés. M. Behrend estime que prendre cinq rainures par pôle et par phase est déjà exagéré, à moins d'avoir un pôle d'une largeur considérable comme dans les moteurs à basse fréquence. Il recommande comme maximum des ampères-conducteurs par rainure le nombre 600, et 2, comme nombre inférieur de rainures par pôle et par phase. En résumé, si on loge trop peu de conducteurs dans chaque alvéole, la saturation du champ de fuite peut ne pas être obtenue, et, de ce fait, l'avantage d'un grand nombre de rainures sera contre-balancé par la faible réluctance du champ de fuites.

Dans les induits des moteurs asynchrones triphasés, l'enroulement *progressif* est très usité en ce qu'il facilite l'exécution d'un bobinage simple et robuste ; il est assez rarement employé pour les inducteurs. Ce genre de bobinage est constitué par un enroulement ondulé ordinaire, étudié pour autant de pôles que le champ doit en produire, et il suffit d'ouvrir ce bobinage, qui est fermé sur lui-même en trois points à 120° , pour obtenir un schéma triphasé. On obtient ainsi six extrémités qu'il est plus facile de disposer dans l'induit que dans l'inducteur où un enroulement de ce genre n'est pas avantageux. Pour produire un tracé fermé sur lui-même, il faut satisfaire à la relation $y = \frac{S \pm 2}{\pi} = \text{nombre impair}$, et S doit être divisible par 3.

La (fig. 1175) représente un enroulement imbriqué d'induit triphasé en étoile, avec jonction commune et trois bagues de contact. La (fig. 1176)

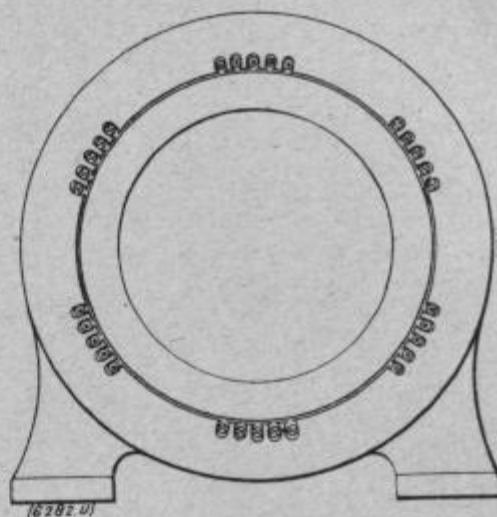


FIG. 1174. — Stator à 6 pôles, avec enroulement réparti d'un moteur asynchrone triphasé.



montre un enroulement ondulé équivalent à l'enroulement imbriqué ci-avant.

Les induits des moteurs triphasés ne sont pas toujours munis d'enroulement en tambour à bobines enchevêtrées ; ils comportent quelquefois des bobinages en anneau. Les enroulements à six bobines enchevêtrées comprennent pour chaque phase un nombre de bobines égal à la moitié de celui des pôles. Et toutes ces bobines sont identiques entre elles et peuvent être réparties dans une ou plusieurs entailles ; mais il est rare de rencontrer des moteurs ayant plus de six et moins de deux paires d'alvéoles.

L'enroulement en court-circuit ou en *cage d'écureuil* de l'organe mobile, qui permet de confiner d'une manière très simple le courant induit

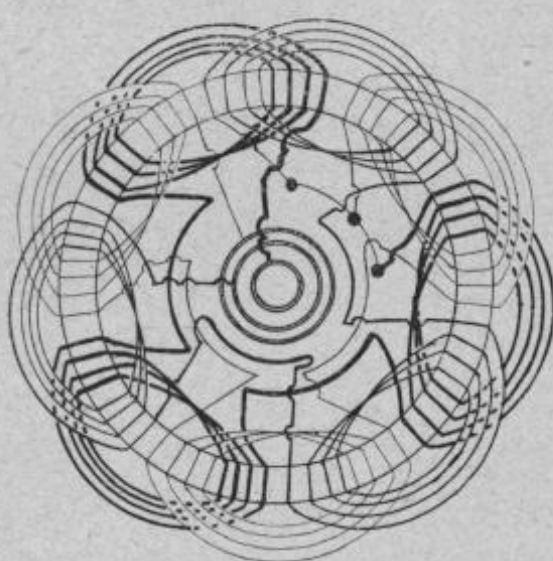


FIG. 1175.

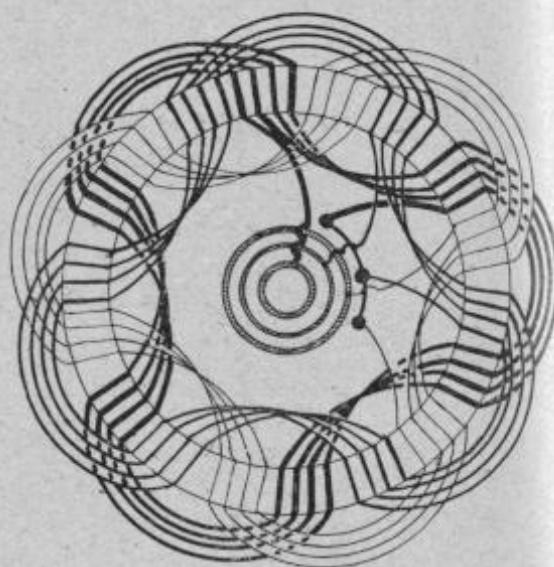


FIG. 1176.

dans des passages parallèles à l'arbre, est utilisé même dans des moteurs puissants, auquel cas le bobinage est approprié pour permettre l'introduction d'une résistance auxiliaire au moment du démarrage.

Le groupement des conducteurs, à l'effet de produire les efforts d'entraînement voulus, est fait de telle sorte que les courants traversant, de haut en bas, un champ d'une certaine polarité, retournent en allant de haut en bas, à travers un champ de polarité opposée.

Quand l'enroulement triphasé est relié en triangle, la tension aux bornes des bobines d'un circuit est la même qu'entre les conducteurs composant la ligne de ce circuit, et, s'il est connecté en étoile, la tension aux extrémités des bobines n'est égale qu'à 0,58 de la tension entre les fils de ligne.

Le montage des machines triphasées, alternateurs et moteurs, peut s'opérer selon les diverses façons suivantes : 1° génératrice en étoile et réceptrice en étoile [dans les trois circuits (générateur et récepteur), on a

une intensité i , une tension e , et la puissance totale a pour valeur $3ei$ (nous supposons nul le déphasage)]; 2^o génératrice en étoile et réceptrice en triangle (la réceptrice a, dans ce cas, une tension $e\sqrt{3}$ par circuit, une intensité $\frac{i}{\sqrt{3}}$ et la puissance $3ei$); 3^o génératrice en triangle et réceptrice en triangle (pour les deux genres de machines, on a une tension e , une intensité i et une puissance ei); 4^o génératrice en triangle et réceptrice en étoile (pour la génératrice, on a e , i et $3ei$; pour la réceptrice, la tension est $e\sqrt{3}$ et l'intensité $i\sqrt{3}$).

469. Valeurs de la force électromotrice. — Si \mathfrak{B}_{\max} est la valeur de \mathfrak{B} dans l'entrefer, la valeur maxima de la force électromotrice induite par le flux magnétique entre les extrémités de l'un des conducteurs de l'organe fixe sera : $\omega\mathfrak{B}_{\max}l \times 10^{-8}$ volts, et pour l'organe mobile ($\omega - \omega'$) $\mathfrak{B}_{\max}l \times 10^{-8}$ volts, ω étant la vitesse linéaire en centimètres par seconde du flux dans l'entrefer, ω' la vitesse du conducteur de l'organe mobile et ($\omega - \omega'$) la vitesse avec laquelle les conducteurs traversent le flux.

Si ω est la fréquence du courant provenant de la génératrice ou de la ligne d'alimentation, celle du courant induit dans les conducteurs de l'organe mobile sera :

$$\omega_i = \frac{\omega - \omega'}{\omega} \omega.$$

La tangente de l'angle de décalage est alors : $\frac{\omega' L_2}{r_2}$, qui est aussi la tangente de l'angle de retard, r_2 étant la résistance du conducteur de l'enroulement. Si la tension aux bornes du moteur est maintenue constante (\mathfrak{B}_{\max} restant à très peu près constant sous toutes les charges normales), le courant de l'organe mobile et la force électromotrice induite déterminée par ce courant varieront presque proportionnellement à la charge et au glissement.

La force électromotrice peut être mise sous la forme :

$$E = K \times z \times \mathfrak{B} \times v \times 10^{-8} \text{ volts};$$

z , nombre de conducteurs groupés en série d'une même phase; v , vitesse en centimètres par seconde du champ par rapport aux conducteurs et K , facteur qui varie selon le mode d'enroulement adopté.

Les valeurs de ce coefficient, sont pour les divers bobinages, celles ci-après : enroulements imbriqués, enchevêtrés ou en anneaux, K varie de 1 à 0,955 pour un nombre de rainures de 1 à 8; enroulements ondulés en trois phases, $K = 0,826$ et pour les enroulements ondulés en six phases, $K = 0,955$.

La valeur de la force électromotrice alternative E_a par rapport à celle d'un induit à courant continu possédant le même nombre de fils, tous montés en série, est donnée par l'expression :

$$E_a = \frac{K \times C \times \mathfrak{B}' \times S \times N \times p \times n}{60} 10^{-8} \text{ volts.}$$

Les traités spéciaux donnent les valeurs des coefficients K et C , le premier ayant trait au rapport de l'induction maxima \mathfrak{B}' à l'induction moyenne et le second dépendant du mode d'enroulement adopté.

470. Couple moteur. — Le couple exercé par ce genre de moteur est proportionnel au produit du courant induit dans le rotor en court-circuit

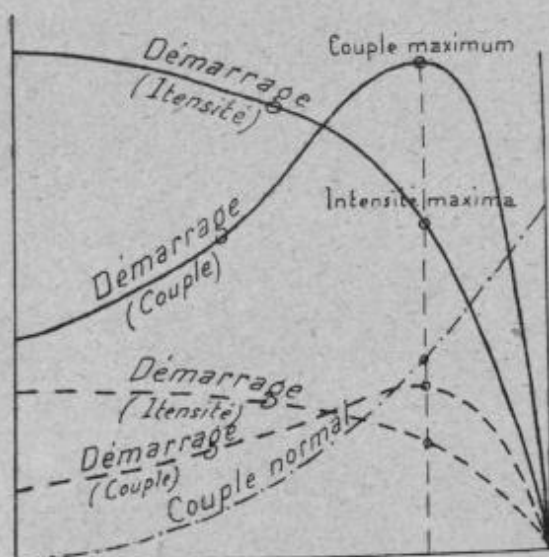


FIG. 1177. — Courbes du couple moteur d'un moteur triphasé asynchrone. Les traits pleins se rapportent au rotor couplé en triangle; les traits pointillés, au rotor couplé en étoile.

et du flux magnétique; il est aussi proportionnel à la vitesse du glissement au-dessus ou au-dessous du synchronisme. Pour le calcul du couple, une simplification notable consiste à substituer au champ réel du stator un champ sinusoïdal. Or le courant circulant dans chaque phase du rotor engendre un couple perpendiculaire à la direction des lignes de force qui est proportionnel au produit de l'intensité du champ par celle du courant, et, comme l'intensité du courant du rotor est fonction de la largeur de chaque côté de bobine, le couple dé-

pend de cette valeur, c'est-à-dire du nombre de paires d'encoches par bobine.

On doit donc rechercher pour chacune des positions des bobines un coefficient K_c que l'on arrive à déterminer en exprimant les distances des rainures en fonction d'une période.

Le couple, qui s'exerce sur un fil de longueur l dans le quel passe un courant d'intensité I et tournant dans un champ \mathfrak{B} , est donné en kilogrammètres par la formule :

$$C = 10,2 \mathfrak{B} l \times 10^{-8}; l \text{ en centimètres et } I \text{ en ampères.}$$

Le couple maximum sera donc dans un moteur à champ tournant, en tenant compte du coefficient K_c :

$$C = 10,2 K_c \mathfrak{B}' I' N \times 10^{-8};$$

N , nombre de conducteurs ; \mathfrak{B}' et I' , l'induction et le débit qui suivent la loi sinusoïdale.

Et le couple moyen pendant une demi-période a pour valeur :

$$C_m = 0,707 \times 10,2 K_c \mathfrak{B}' I' N \times 10^{-8}.$$

Le moment du couple est proportionnel à l'intensité du courant produit et, par suite, au glissement (σ). En effet, soient I_2 et r_2 , l'intensité et la résistance de l'induit, on a :

$$C = \frac{\Phi n I_2 p}{2 \sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{\Phi p (\omega_1 - \omega_2)}{r_2 2 \sqrt{2}} = \frac{\Phi p (\sigma)}{r_2 2 \sqrt{2}}.$$

$$\text{Faisons : } \frac{np}{2 \sqrt{2}} = c \text{ et } \frac{p}{2 \sqrt{2}} = K.$$

On obtient :

$$C = c \Phi I_2 \quad \text{et} \quad I_2 = K \Phi \frac{\sigma}{r_2}.$$

Quand on tient compte de la dispersion, on a pour la valeur du couple :

$$C = c K N_0^2 \frac{\frac{\sigma}{r_2}}{\left(1 + m K \frac{\sigma}{r_2}\right)^2},$$

où N_0 est le nombre des lignes de force à vide qui passent dans l'induit et m est le coefficient de dispersion. Si $m = 0$, on a : $C = c K N_0^2 \frac{\sigma}{r_2}$ ⁽¹⁾. La dispersion diminue le couple pour tous les glissements ; avec de très faibles glissements, le couple C est proportionnel à σ .

Les moteurs bien construits doivent être calculés de telle sorte que le couple soit supérieur à la charge limite admise pour l'échauffement des enroulements pour qu'ils ne se décrochent pas sous une faible surcharge,

(1) La formule la plus connue pour le calcul du facteur de dispersion est celle de M. Behrend :

$$\sigma = C \frac{\delta}{\tau};$$

δ , entrefer ; τ , la division polaire, et C , un coefficient qui varie de 5 à 20 et dont la valeur dépend du rapport entre la longueur axiale du fer et la division polaire, du nombre d'encoches par pôle et par phase et de la forme des encoches.

surtout pour les moteurs soumis pendant un court intervalle de temps à une charge normale. Dans ce cas, il faut travailler avec des champs N_0

aussi forts que possible.

On peut mesurer la valeur du glissement d'un moteur au moyen des procédés stroboscopiques déjà indiqués. Si on emploie un moyen basé sur la mesure de la fréquence et que l'enroulement du rotor soit accessible (moteurs à bagues) on mesure le glissement soit à l'aide d'un ampèremètre, d'un télé-

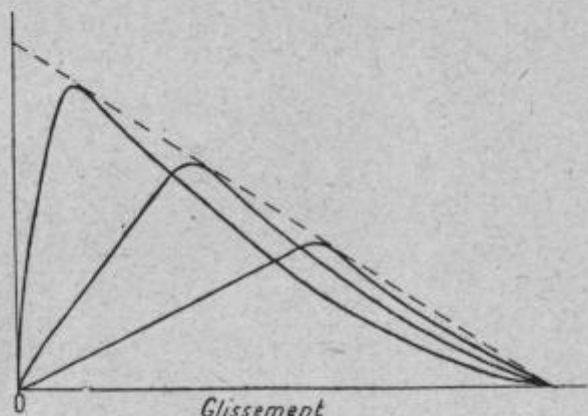


FIG. 1178.

phone ou d'un wattmètre, ou, si l'enroulement du rotor n'est pas accessible, on utilise la méthode de Seilet* et ses variantes qui utilisent le principe bien connu de l'ondographe Hospitalier.

471. Fuites magnétiques. — L'on a vu que, dans un moteur à champ tournant, on est en présence de deux courants antagonistes, l'un dans le rotor, l'autre dans le stator, qui amènent une grande induction dans les dents et une distorsion du champ qui produit une obliquité des lignes de force dans l'entrefer. Les fuites magnétiques sont constituées par celles de ces lignes qui, appartenant seulement soit au rotor, soit au stator, n'apportent aucun concours aux forces d'entraînement du système, mais, au contraire, tendent à s'opposer aux courants respectifs qu'elles entourent. Les fuites ont aussi lieu par les flancs de la machine, et alors elles ont pour effet de diminuer le couple mécanique et d'affecter le rendement d'ensemble du moteur. Le coefficient de dispersion ou de fuite est un des facteurs les plus importants à connaître pour le calcul et l'étude des moteurs d'induction ; mais sa détermination n'étant pas susceptible de se faire d'une façon rigoureuse, on se contente de formules empiriques.

Appelons Φ_1 le flux qui, produit par le stator, traverse le rotor ; pour cela, il faut faire pénétrer dans le stator un flux $\nu_1 \Phi_1$, ν_1 étant le coefficient de dispersion du stator. De même, si Φ_2 est le flux que le rotor envoie dans le stator, il sera indispensable de produire dans le rotor un flux $\nu_2 \Phi_2$, ν_2 étant le coefficient de dispersion dans le rotor. Si les flux Φ_1 et Φ_2 sont symphasiques, le flux résultant dans chacun des deux organes primaire et secondaire sera : $\nu_2 \Phi_2 - \Phi_1$ dans le rotor et $\nu_1 \Phi_1 - \Phi_2$ dans le stator.

Mais, les courants du rotor étant produits par l'induction du stator, il

en résulte qu'ils sont décalés l'un par rapport à l'autre, si bien que les flux résultants sont les différences géométriques de ces quantités au lieu d'être leurs différences arithmétiques.

A l'inspection de la (fig. 1179), on voit que les flux réels, qui sont la résultante de $v_1\Phi_1$ et de Φ_2 dans le primaire et de $v_2\Phi_2$ et de Φ_1 , dans le secondaire, sont représentés par $OC_1 = F_1$ et $OC_2 = F_2$; de plus, l'angle des flux $F_2\Phi_2$ est droit, puisque c'est la variation du flux F_2 qui induit le courant du rotor et, par suite, le flux Φ_2 . Si maintenant on admet que le flux F est constant, ce qui est sensiblement vrai, le lieu du point B est une circonférence ayant son centre sur le prolongement de OC_1 .

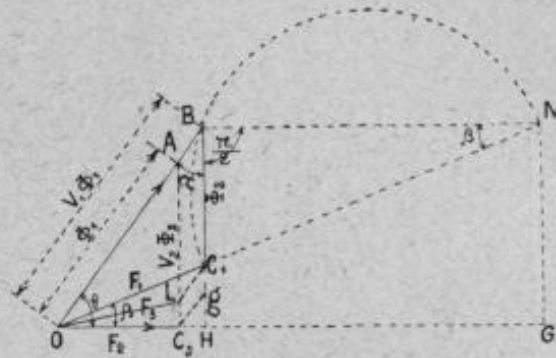


FIG. 1179.

Le point B se trouve toujours sur la circonférence décrite sur C_1M comme diamètre, puisque l'angle C_1BM est droit.

Par suite :

$$\frac{\tan \beta}{\tan \theta} = 1 - \frac{1}{v_1 v_2} = \sigma,$$

quantité constante, puisque v_1 et v_2 sont les coefficients de dispersion du primaire et du secondaire.

Pour déterminer le flux dans l'entrefer, il suffit de mener par le point C_1 la droite C_1L égale et parallèle à $AB = [\Phi(v_1 - 1)]$, la droite HC_2 étant égale à $\Phi_2(v_2 - 1)$.

La méthode graphique dite du *diagramme du cercle* pour le calcul des moteurs asynchrones, due aux travaux de MM. A. Blondel, B. Behrend et Heyland, permet, à l'aide d'une figure unique, de déterminer avec autant d'exactitude que de rapidité toutes les conditions de marche entre le synchronisme et le démarrage. Cette méthode conduit, en outre, au moyen de considérations simples, à des relations analytiques relatives au rôle important de la dispersion magnétique.

Proposons-nous, par exemple, de déterminer le courant magnétisant à vide pour une phase d'un moteur triphasé à l'aide de l'épure circulaire du diagramme du cercle. Nous prenons un moteur de 10 HP à 6 pôles avec $\cos \varphi = 0,87$.

Nous traçons (fig. 1180) en O deux vecteurs ON et OP perpendiculaires, faisant entre eux un angle φ de $29^\circ 30'$ correspondant à $\cos \varphi = 0,87$; puis

nous portons sur OP, à une échelle quelconque, une longueur OB représentant la valeur de I_1 donnée par la formule :

$$I_1 = \frac{P}{q\rho E \cos \varphi} = \frac{736 \times 40}{3 \times 0,87 \times 110 \times 0,87} = 29,5 \text{ ampères,}$$

la tension d'alimentation entre fils de ligne du moteur étant de 110 volts.

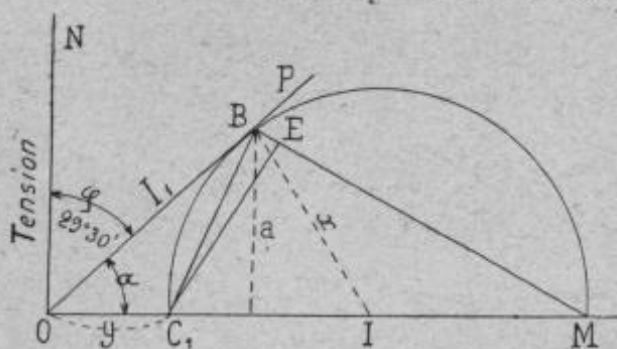


FIG. 1180.

Ensuite nous menons OM perpendiculaire à ON ; la droite OB doit être tangente en B à la circonférence qui est le lieu des extrémités des vecteurs figurant le courant primaire lorsque le coefficient de dispersion m est maximum.

Le centre de la circonférence doit se trouver sur OM, c'est-à-dire qu'elle passe par B et coupe OM en deux segments, tels que :

$$\frac{MC_1}{OC_1} = \frac{1-m}{m} = z, \text{ par exemple } = \frac{2x}{y}.$$

La valeur de y ou OC_1 est donnée par l'expression :

$$(1) \quad y = \frac{b \cos \alpha (z + 2)}{2(z + 1)},$$

dans laquelle formule b représente OB et $\alpha = (90^\circ - 29^\circ 30') = 60^\circ 30'$.

Connaissant le point C_1 , il suffit d'abaisser une perpendiculaire au milieu de C_1B jusqu'à sa rencontre avec OM, et on détermine ainsi le point I, centre du cercle cherché. La circonférence détermine en OC_1 le courant magnétisant du moteur, courant que l'on détermine à la même échelle que pour le courant primaire. En mesurant, on trouve qu'il est égal à 7,65 ampères.

Comme vérification, reprenons la formule (1) et remplaçons les lettres par leurs valeurs, on obtient :

$$y = \frac{29,5 \times 0,492 \times 15,5}{2 \times 14,5} = 7,7 \text{ ampères.}$$

La valeur de z qui figure dans cette expression se tire de l'équation :

$$\cos^2 \alpha (z^2 + 4z + 4) = 4z + 4;$$

en remplaçant il vient :

$$0,242z^3 + 0,968z + 0,968 = 4z + 4$$

ou :

$$0,242z^2 - 3,032 - 3,032z = 0,$$

trinôme du second degré dont la plus grande racine est la seule convenable, d'où $z = 13,5$.

La méthode graphique de M. A. Behrend, ou *diagramme polaire*, est basée sur l'assimilation du moteur d'induction au transformateur statique, avec cette différence que le premier se présente avec des fuites considérables et avec un grand courant magnétisant. Aussi longtemps que dure l'immobilité de l'armature, l'analogie entre le moteur triphasé et le transformateur apparaît clairement, et la théorie de celui-ci trouve son application.

M. Boucherot a imaginé un moteur constitué par un primaire identique à celui des moteurs asynchrones usuels, mais le secondaire ou organe mobile comporte deux cages d'écureuil concentriques dont les actions se superposent. Au voisinage du synchronisme, le moteur fonctionne comme un moteur usuel à cage d'écureuil ; aux vitesses intermédiaires entre la marche à vide et celle en pleine charge, les deux cages travaillent simultanément, la prépondérance restant à la cage intérieure. Dans le cas de surcharge, la cage extérieure agit immédiatement, et le moteur, tendant à surmonter le couple résistant accidentel, reprend de lui-même sa vitesse de régime, dès que la cause de surcharge disparaît ; le courant est limité, dans ces conditions, au courant de démarrage.

La mise en marche d'un tel moteur s'opère par la simple fermeture de l'interrupteur ; il est donc approprié à la commande à distance.

472. Démarrage des moteurs asynchrones. — Le rôle des dispositifs de démarrage est de réduire l'intensité du courant de mise en marche à celle absorbée par le moteur, en développant la même puissance. Au démarrage, le couple moteur est directement proportionnel à la résistance de l'organe mobile. Si l'on veut démarrer avec le couple de pleine charge, en n'absorbant également que le courant de pleine charge, il faut augmenter la résistance de l'organe mobile dans le rapport de la vitesse de synchronisme au glissement de pleine charge. Lorsqu'on ne veut démarrer qu'après la mise en vitesse et que l'on a en vue un bon rendement, on est conduit à n'avoir au démarrage qu'un couple suffisant pour vaincre les résistances passives du moteur à vide, et le glissement est beaucoup plus faible que dans le cas précédent. Le moteur alors fonctionne à une vitesse à peu près constante.

Pour que le moteur puisse prendre rapidement sa vitesse, il faut qu'au démarrage le couple moteur soit 1,5 à 2 fois supérieur au couple normal. Il y a donc lieu de limiter la valeur du courant par l'introduction de résistances dans le circuit secondaire au moment du démarrage, résistances qu'on enlève du circuit lorsque le moteur a atteint sa vitesse de régime, de façon à ne pas augmenter le glissement du rotor, c'est-à-dire à ne pas diminuer le rendement du moteur.

L'enroulement le plus approprié consiste à grouper les conducteurs en

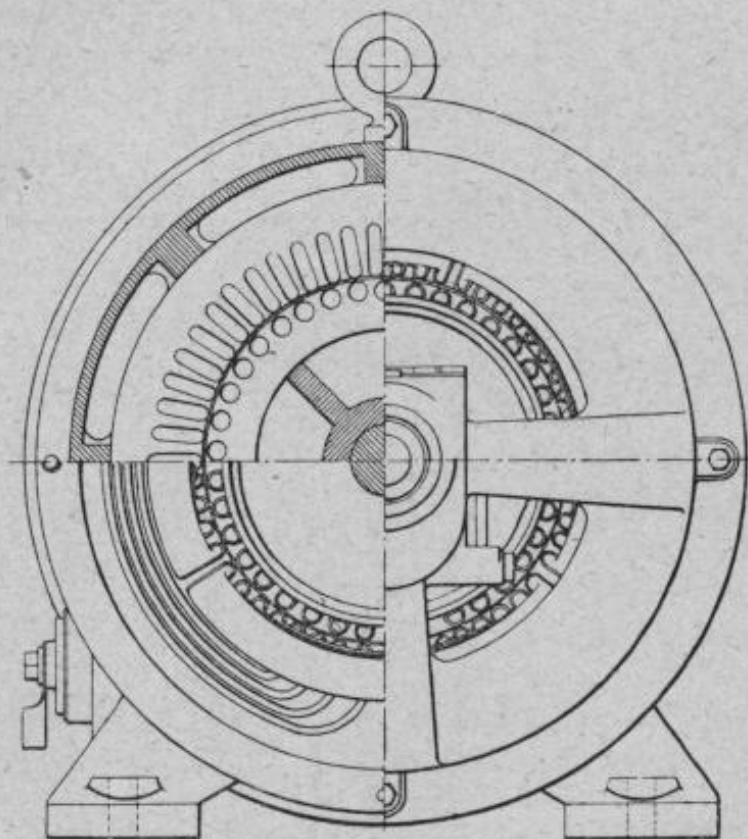


FIG. 1181. — Moteur triphasé de 25 HP, Brown-Boveri, à bagues.

trois circuits indépendants, ordinairement en étoile, chacun des bouts libres étant relié à une bague de contact montée sur l'arbre. Des trois balais de contact correspondants partent des fils qui, après avoir passé par trois résistances individuelles variables, aboutissent à une jonction extérieure commune. On réduit les résistances par fractions, dans les trois circuits, en agissant successivement et progressivement sur chacun d'eux.

Pour le démarrage à vide des moteurs asynchrones de grandes dimensions, on relie les bornes du moteur à démarrer aux bagues d'un moteur asynchrone tournant à vide, le primaire de ce moteur étant relié au réseau ; en freinant mécaniquement ces moteurs, le glissement augmente ainsi que la tension et le courant dans le rotor, et par suite dans le pri-

maire du moteur principal dont la vitesse augmente avec le glissement du moteur auxiliaire ; quand ce dernier est arrêté, le moteur principal se trouve dans les mêmes conditions que s'il était directement relié au réseau ; il est donc possible de substituer ce dernier à l'enroulement du rotor du moteur auxiliaire.

Quand les moteurs ont à démarrer en charge, on augmente la résistance de l'induit en donnant à ce dernier un enroulement à trois phases et en le pourvoyant de bagues, de balais frotteurs et d'un rhéostat de réglage.

Le plus simple des procédés de démarrage est de mettre directement les moteurs sous courant ; cela est praticable lorsque leur puissance est inférieure à $1/20$ ou $1/25$ de la puissance totale de la station qui les alimente.

Les secteurs d'électricité de Paris, de Grenoble, de Marseille et de Nice n'admettent plus de moteurs à cage d'écureuil au-dessus de 5 HP et même de 3 HP, à moins qu'on les fasse démarrer sur poulie folle. Si la puissance du moteur est importante par rapport à l'énergie fournie par la ligne, et si le moteur démarre avec une charge égale à la moitié de la charge normale, on fait le groupement en étoile pour le démarrage, de façon à avoir un flux plus intense et, par suite, un couple plus élevé ; le groupement en triangle réalisé ensuite divise l'intensité par $\sqrt{2}$.

Lorsque les moteurs sont à bagues (au-dessus de 20 HP), le démarrage se fait avec un rhéostat dans le circuit du rotor. Pour les moteurs puissants, on emploie des résistances liquides.

On peut aussi, au moyen de ces rhéostats, réduire la valeur de l'intensité du courant de démarrage à celle que le moteur possède en pleine marche normale. Si le démarrage se faisait sous charge double, l'intensité du courant serait environ le double. Les dispositifs de mise en court-circuit des enroulements du rotor après le démarrage, notamment par l'effet de la force centrifuge, sont très souvent employés. Ils ont, entre autres, l'avantage de protéger les moteurs contre les surcharges dangereuses.

Comme procédé de démarrage, M. Gorges partage l'enroulement induit en plusieurs autres fonctionnant en parallèle, le démarrage ayant lieu en un seul enroulement et les autres étant ensuite fermés successivement à mesure que la vitesse augmente (rhéostats liquides, solution de soude

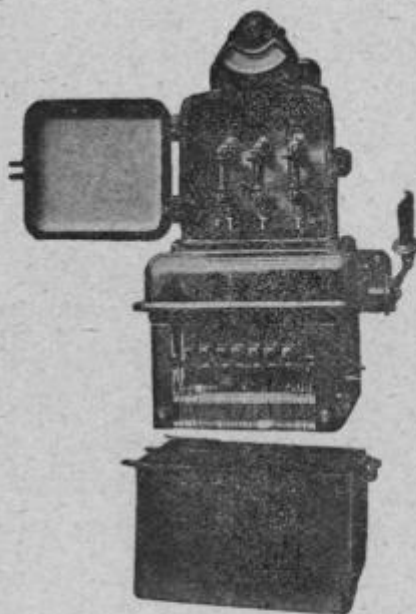


FIG. 1182. — Commutateur étoile-triangle pour démarrage de moteurs asynchrones.

ou de potasse). La disposition de M. Gorges dispense de l'emploi des bagues.

M. Boucherot préconise un double bobinage d'induit et une double cage d'écureuil. On augmente le couple de démarrage en disposant deux circuits inducteurs en quantité pour le démarrage, et en tension pour la marche normale. Assez souvent on munit le rotor des moteurs en cage

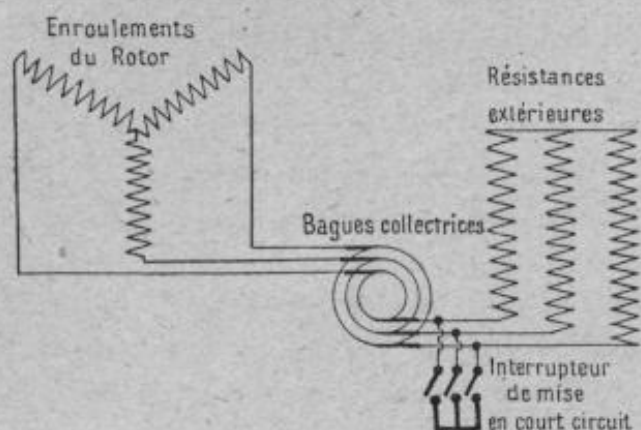


FIG. 1183. — Schéma de l'installation d'un moteur d'induction avec résistances intérieures de démarrage.

d'écureuil de résistances intérieures (fig. 1183).

M. Fischer-Hinnen dispose d'une façon permanente deux résistances en dérivation sur chacun des circuits du rotor ; l'une de ces résistances est très grande, non inductive, et l'autre est très faible et possède une grande self-induction.

Lindstrom et Zanif font emploi de bobines de

self intercalées d'une façon permanente dans le circuit secondaire.

La maison Siemens et Halske munit le rotor de deux enroulements triphasés distincts, l'un d'eux ayant un nombre de spires inférieur à celui de l'autre. Les deux enroulements sont montés en étoile et, lors du démarrage, ils sont réunis par le point neutre, et les spires correspondantes des deux enroulements sont, dans chaque phase, reliées par leurs extrémités libres.

Le démarrage effectué, les connexions sont modifiées de la même manière par le jeu d'un commutateur, de façon que les forces électromotrices des deux enroulements parallèles s'ajoutent en mettant en court-circuit les extrémités de chaque paire d'enroulements.

La maison Ganz fait varier le nombre des pôles de l'inducteur, et le rotor est muni de résistances qui deviennent actives ou inactives, suivant le nombre de pôles de l'inducteur. Ce système de démarrage permet de supprimer les bagues de contact et les balais, mais il exige une manœuvre à faire sur l'inducteur, que l'on peut rendre automatique avec un dispositif à force centrifuge comme dans le dispositif Siemens et Halske.

Dans les petits types de moteurs diphasés ou triphasés, l'induit est construit simplement en cage d'écureuil.

Cependant on a établi des moteurs de grande puissance en utilisant cette disposition avec dispositif auto-transformateur pour le démarrage.

Les trois bobines de self B , B' et B'' sont branchées en dérivation par une de leurs extrémités sur les conducteurs du réseau (fig. 1184), et les autres extrémités sont attachées à un point commun formant le centre d'un groupement en étoile. Les points b , b' et b'' du moteur sont reliés à des prises se déplaçant le long des bobines, qui permettent ainsi de régler à volonté la tension sous laquelle le courant est fourni au moteur. En choisissant convenablement la position des prises, on arrive à ne prendre sur le réseau qu'un courant égal à celui qui correspond à la marche normale, tout en ne faisant le démarrage qu'avec un courant sensiblement égal à celui que fournirait la tension totale.

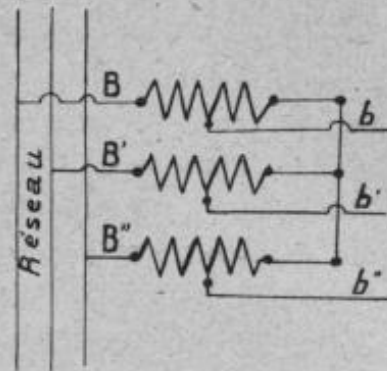


FIG. 1184.

On peut, d'après Hobart ⁽¹⁾, éviter d'une manière satisfaisante l'emploi

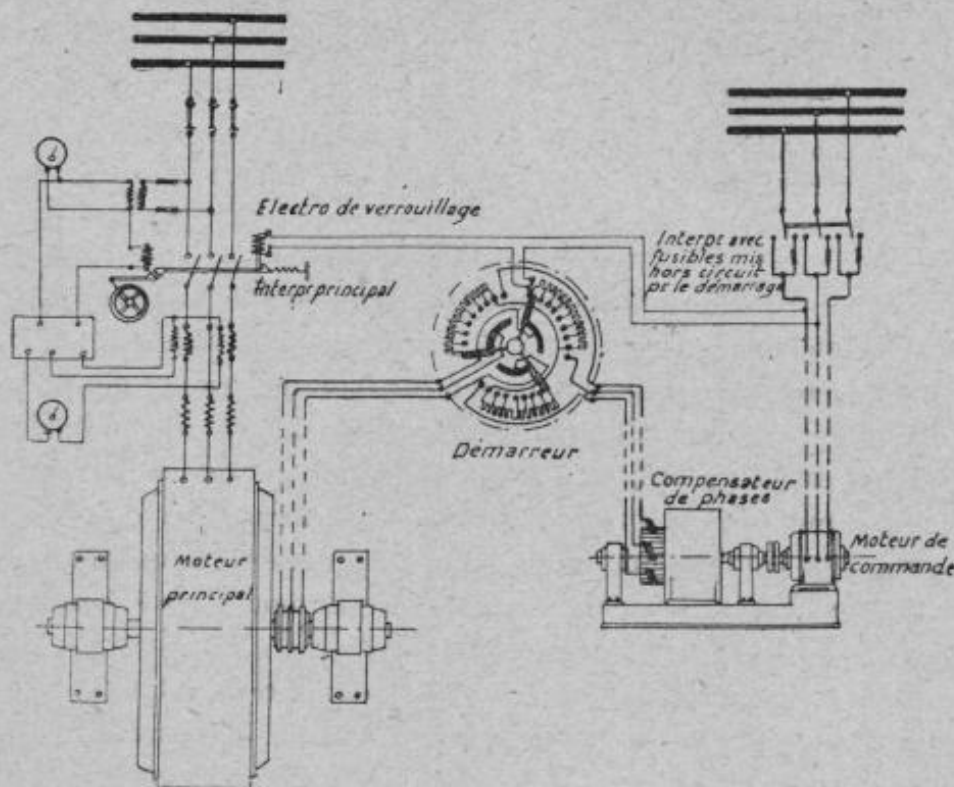


FIG. 1185. — Schéma des connexions d'un moteur d'induction avec compensateur de phases.

d'un compensateur avec les cages d'écureuil, en prévoyant le moteur pour un fonctionnement normal en triangle ; les trois phases, au moment du

⁽¹⁾ *Les Moteurs électriques à courants continu et alternatif*, par H. M. Hobart, traduction de M. Achard. Dunod et Pinat, éditeurs, Paris.

démarrage, sont montées temporairement en étoile et l'appel du courant sur la ligne est réduit au tiers de la valeur correspondante.

La Société Schuckert emploie pour le démarrage des moteurs à cage d'écureuil un accouplement hydraulique où le moteur démarre à vide et ne reçoit la charge que lorsqu'il a atteint sa vitesse normale ; le découplément se fait automatiquement, si la vitesse tombe à zéro ou devient inférieure à une valeur déterminée.

Dans le moteur à induit en court-circuit, qui est un excellent moteur, on doit surtout s'attacher à diminuer la valeur du courant de démarrage et à donner une bonne valeur au couple de démarrage.

Le premier inconvénient est atténué jusqu'à un certain point, comme



FIG. 1186. — Moteur triphasé à induit bobiné (Société l'Éclairage Électrique).

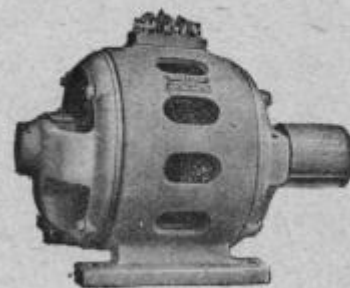


FIG. 1187. — Moteur triphasé à cage d'écureuil (Société l'Éclairage Électrique).

nous l'avons vu, par une commutation convenable de l'enroulement (étoile-triangle, par exemple), par l'intercalation de résistances dans le stator ou bien en utilisant un transformateur de démarrage, mais ces procédés réduisent encore d'une assez grande valeur le couple de démarrage et ne sont bien utilisés que pour les moteurs de courant à faible charge. Les moteurs en court-circuit avec transformateurs de démarrage sont aussi plus coûteux que les moteurs à bagues avec démarreur ; mais, dans les constructions bipolaires, ils sont néanmoins très employés à cause de leur sécurité de fonctionnement.

On sait que, pour augmenter le couple de démarrage, il faut augmenter le courant à vide ou la résistance du rotor, mais le premier procédé diminue le facteur de puissance et le second influence sensiblement l'échauffement et le rendement.

La force de traction d'un moteur triphasé augmentant graduellement depuis le démarrage pour atteindre un maximum et redescendre ensuite rapidement à zéro, on a eu l'idée de munir les moteurs à court-circuit d'un accouplement basé sur la force centrifuge, n'entrant en jeu qu'à une certaine vitesse et permettant au moteur le démarrage à vide.

Les dispositifs de ce genre sont aujourd'hui assez nombreux ; nous nous

bornerons à citer les principaux : accouplements Morelli, Allmäna-Svenska-Elektriska-Atkiebolaget, Wellekanoff, Blakeslee, Wüst, Oerlikon-Fischer-Hinnen. Ce dernier est représenté par la (fig. 1188). En deux points diamétralement opposés de la couronne du manchon entraîneur, on a fixé deux courroies de cuir qui, sous l'action de la force centrifuge, viennent presser fortement la couronne de l'autre manchon, et entraînent celui-ci par frottement. Lorsque le manchon entraîneur a acquis une certaine vitesse, l'air emprisonné entre les courroies et la couronne de frottement est chassé peu à peu ; il se produit un certain vide, et la pression due à la force centrifuge est augmentée de la pression beaucoup plus considérable due à l'air atmosphérique, de telle façon qu'en fonctionnement normal le glissement reste inférieur à 0,2 jusqu'à 0,3 0/0. Une qualité remarquable de cet accouplement est, en

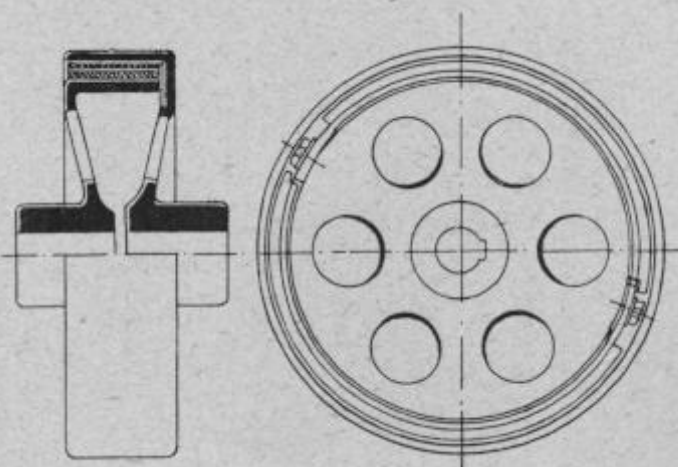


FIG. 1188.

outre, sa grande simplicité, sa complète indifférence pour les petits décentrement des axes ou leurs écarts de la ligne droite.

Dans les moteurs à bagues, il est aujourd'hui d'une pratique courante d'employer, pour les moteurs de quelque puissance, des mécanismes de relevage des balais et dispositifs permettant de mettre intérieurement les bagues en court-circuit lorsque le moteur a pris sa vitesse ⁽¹⁾.

Dans un moteur en cage d'écureuil, la courbe du courant de démarrage, obtenue en faisant varier le voltage, suit sensiblement l'allure de la caractéristique en court-circuit.

En vue de calculer la résistance de démarrage convenable pour un mo-

⁽¹⁾ Les ateliers de construction Oerlikon emploient pour le démarrage des moteurs à induit en court-circuit de faible puissance un interrupteur à cylindre. Pour les moteurs devant démarrer à pleine charge, la commande est faite de telle façon que le courant de démarrage ne circule pas dans les fusibles.

Si le démarrage n'exige qu'environ $\frac{1}{3}$ du moment de torsion normal on peut faire usage de moteurs à enroulements spéciaux munis de 6 bornes que l'on connecte en étoile pour le démarrage et en triangle pour la marche normale.

Pour le démarrage des induits à bagues collectrices on fait usage de démarreurs avec ou sans huile. Ces appareils n'ont pas de connecteur ; ils servent simplement à faire varier la résistance du circuit du rotor.

Dans les dispositifs à relevage de balais, les tiges forment contact entre l'enroulement et les bagues sont fixes. La mise en court-circuit de l'enroulement rotorique et le relevage des balais s'opèrent au moyen d'un levier auquel on imprime deux mouvements différents ; un axial vers la machine établit le court-circuit et l'autre (de gauche à droite) opère le relevage des balais.

teur de résistance déterminée, il est utile de tracer une courbe représentant les ampères et les volts dans l'armature, en fonction de la résistance de démarrage (Dr Behn). Cette propriété permet de trouver la résistance nécessaire au démarrage, en divisant la puissance absorbée dans l'induit par le carré du courant correspondant.

Lorsqu'on relie soudain un grand moteur à un réseau, l'augmentation de l'intensité donne naissance dans les génératrices à une force magné-

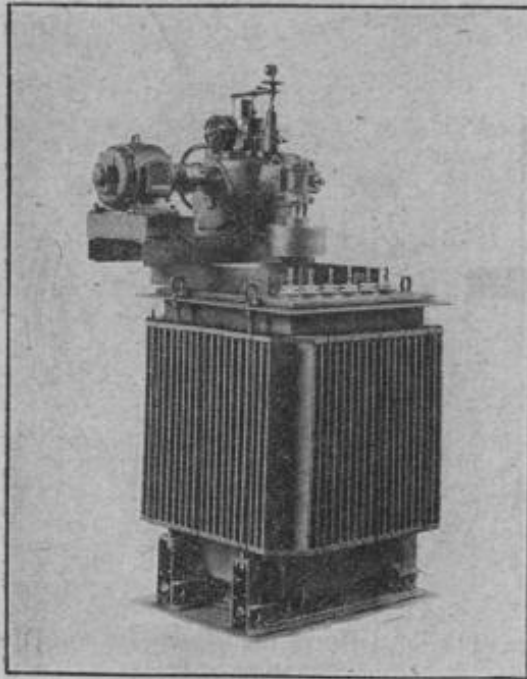


FIG. 1189. — Régulateur d'induction à bain d'huile, avec régulateur à action rapide. (C^{ie} Electro-Mécanique).

tique de freinage et produit une secousse dans les machines motrices qui commandent ces dernières, ce qui a pour conséquence une chute brusque de la tension, qui est encore accrue par l'élévation de perte de la tension dans les conducteurs, causée par l'augmentation d'intensité. Mais les moteurs supportent assez facilement ces à-coups en raison de leur inertie. Lorsqu'il y a de l'éclairage sur le réseau, on constate des oscillations de lumière ; aussi, dans ce cas, les secteurs prescrivent la puissance maxima des moteurs qu'ils admettent à être reliés au réseau sans dispositifs spéciaux pour le démarrage et ne tolèrent, pour le démarrage

en pleine charge, que des moteurs à court-circuit de très faible puissance, comme il a été déjà expliqué.

Il est préférable, quand cela est possible, d'avoir deux génératrices séparées, pour la lumière et pour la force, sinon il faut employer, même pour les petits moteurs, des dispositifs de démarrage pour en réduire l'intensité.

Dans les moteurs triphasés, pour changer le sens de marche, on permute entre elles deux phases, c'est-à-dire que l'on interchange deux quelconques des fils extrêmes, que le moteur soit monté en étoile ou en triangle. Ces changements de connexions s'entendent pour la partie du moteur qui reçoit le courant alternatif du réseau.

On peut reconnaître si les connexions sont bien exactement faites, au moyen d'une lampe branchée entre deux bagues de l'armature (moteur avec bagues au rotor) ; la lampe doit briller uniformément tant que le rhéostat de démarrage est coupé, quelle que soit la position de l'armature,

puisque le champ tourne à une vitesse uniforme autour de l'armature au repos. S'il vient à se produire une coupure dans l'armature même, lorsque le primaire est branché sur le réseau et les balais soulevés, il n'y a pas de tension entre la bague correspondante et les deux autres, et la lampe ne s'allume pas ou le voltmètre ne dévie pas.

Pour éviter des courants trop intenses, au moment du démarrage, dans les moteurs à induits à bagues de grande puissance, il faut les arrêter d'abord et renverser la marche en se servant simultanément des rhéostats de démarrage et de réglage de la vitesse. On combine, à cet effet, un seul appareil composé d'un interrupteur et d'un commutateur et en utilisant un levier tripolaire pour l'interruption des trois courants, lequel établit en ces deux différentes positions les deux différentes liaisons entre les bornes de la génératrice et du moteur.

Pour les applications ne nécessitant au démarrage qu'un couple relativement faible, on peut utiliser le moteur Meyer, qui permet de profiter à la fois des avantages des moteurs rotor bobiné et de ceux avec cage d'écureuil. L'induit de ce moteur possède deux enroulements, l'un en cuivre comme dans les rotors bobinés ordinaires, et l'autre en barres de fer logées dans des encoches en dessous de l'enroulement en cuivre. Les barres de fer sont réunies des deux côtés de l'induit par des bagues et forment ainsi une cage d'écureuil solide. Les extrémités de l'enroulement sont reliées à un coupleur prévu en bout de l'induit et qui permet de court-circuiter l'enroulement en cuivre soit à la main, soit au moyen d'un dispositif à force centrifuge. Ce moteur ne possède ni bagues, ni balais et ne nécessite aucun rhéostat de démarrage ; il démarre avec couple normal sans que le courant, absorbé au démarrage, atteigne une valeur sensiblement plus élevée que celle qu'on admet couramment avec le moteur à bagues et rhéostat.

M. V. Kübler a proposé de débrancher le moteur de son réseau brusquement, au moment où on veut l'arrêter, et de relier à un autre réseau qui produit des courants alternatifs de fréquence plus petite ; mais cette méthode, inapplicable économiquement à des moteurs fixes, peut convenir à la traction des véhicules.

Un compensateur de démarrage pour la limitation du courant absorbé au démarrage est constitué par un enroulement inductif pourvu de prises de tension et complété d'un interrupteur facilitant les divers branchements au moteur, ce commutateur devant être maintenu dans sa position de démarrage jusqu'à ce que le moteur ait atteint sa pleine vitesse, après quoi il est placé dans sa position normale.

Le freinage ne peut être réalisé que par des forces mécaniques ou électro-magnétiques extérieures qui n'ont aucun rapport avec les propriétés mêmes des moteurs. On peut utiliser aussi le contre-courant ou le renver-

sement de marche. La récupération de l'énergie du moteur s'opère en faisant tourner l'induit artificiellement dans le sens du champ tournant et plus rapidement que ce dernier. Le moteur absorbe, lorsqu'il fonctionne comme générateur de courant, un couple égal à celui qu'il développerait en qualité de moteur, les glissements étant, dans les deux cas, égaux et de sens contraire.

473. Régulation des moteurs asynchrones. — L'induit des moteurs asynchrones prend le même nombre de tours, à environ 3 0/0 près (petits moteurs) et 1,5 0/0 (moteurs de grande puissance) dans la marche à vide et dans celle à pleine charge.

On peut faire varier la vitesse du moteur en faisant varier celle de la génératrice. Un deuxième moyen de réglage a lieu par la variation du nombre de pôles ($2p$) des moteurs. Si on double le nombre de pôles, on diminue de la moitié la vitesse du synchronisme, et, sous une charge donnée quelconque, la valeur relative du glissement peut rester la même que précédemment. Mais une variation constante et continue de la vitesse ne sera réalisée qu'en intercalant des résistances dans le circuit de l'induit (*fig. 1190*); dans ce cas, on réduit le rendement du moteur, et, en outre, cette méthode a l'inconvénient de ne pas permettre une augmentation de la vitesse.

Deux autres modes de régulation sont encore utilisés par réglage de la tension primaire et réglage par insertion d'une tension déterminée dans le rotor.

On doit naturellement s'efforcer d'atteindre les couples demandés avec le glissement minimum possible, c'est-à-dire donner à l'induit un enroulement tel que les courants induits soient considérables même pour de faibles glissements. La (*fig. 1191*) représente un dispositif dans lequel l'induit est constitué par deux enroulements séparés, en donnant aux bobines une largeur égale au quart d'un pas polaire, et reliés à des résistances spéciales r et r_1 . On peut, comme dans la (*fig. 1192*), ne prendre qu'un fil pour le retour commun. Le nombre des bagues, de cette manière, est réduit à 3. Le réglage des résistances est opéré par une manivelle commune de rhéostat, qui est reliée au conducteur de retour.

On pourrait encore utiliser la surface de l'induit mieux que ci-avant, en disposant trois bobines par demi-pas polaire. Les trois résistances sont réglées à l'aide de frotteurs reliés au centre, qui constitue le point neutre. Ce dispositif est le plus employé dans le cas où l'on relie des résistances de réglage à l'induit (*fig. 1193*).

Pour obtenir un bon rendement, on doit faire fonctionner le moteur à une vitesse angulaire se rapprochant le plus possible de celle du synchronisme; de là l'emploi des champs tournants multipolaires.

Il existe un grand nombre d'applications des moteurs électriques pour

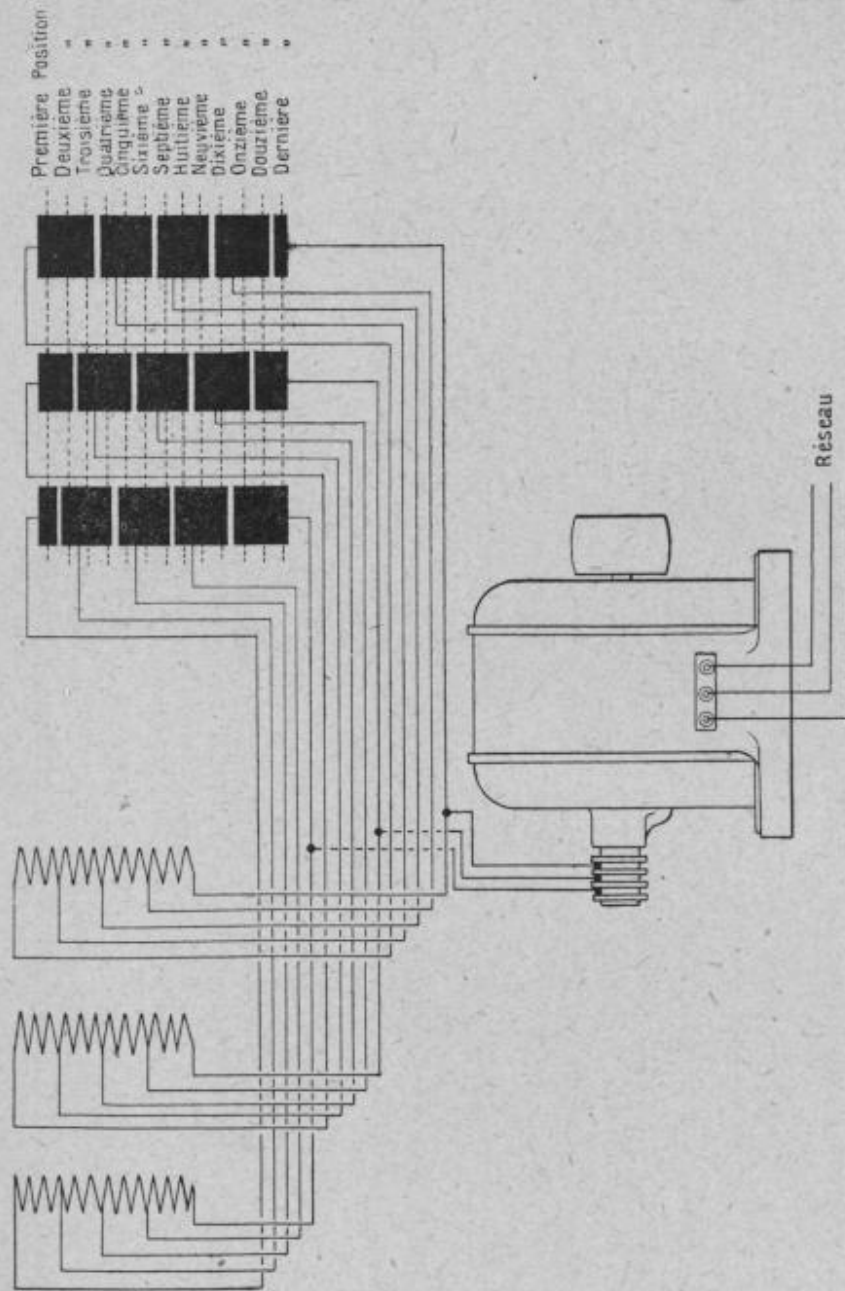


Fig. 1190. — Schéma pour le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone par insertion successive de résistances dans les trois phases. (Hobart.)

lesquelles il est important de pouvoir disposer de plusieurs vitesses sans trop sacrifier du rendement. À cet effet, les ateliers d'Oerlikon ont établi un enroulement formé de $6p$ sections ou groupes de section (p étant le plus petit nombre de paires de pôles à obtenir), qui peuvent

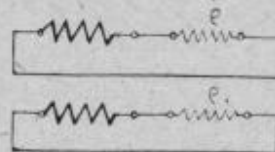


FIG. 1191.

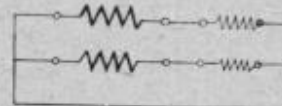


FIG. 1192.

être connectés de façon à donner p ou 2 paires de pôles, deux groupes étant pour chaque phase réunis en parallèle pour p paires de pôles, et en série pour $2p$.

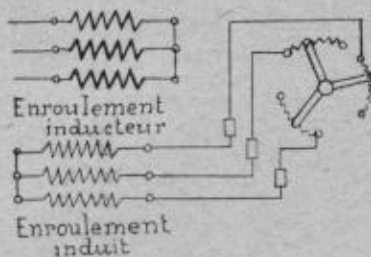


FIG. 1193.

La combinaison de ce système avec le dispositif consistant à placer deux enroulements distincts dans les mêmes encoches, tant sur le rotor que sur le stator, permet facilement de porter à quatre le nombre des vitesses. Le moteur est alors pourvu

de deux enroulements séparés dont chacun peut être groupé pour deux nombres de pôles différents dans le rapport de 1 à 2.

L'appareil de manœuvre est formé par la combinaison de deux commutateurs tripolaires et il est disposé pour que les vitesses se suivent d'une façon continue. Des moteurs réalisés et construits pour des vitesses dans le rapport de 1 à 2 ont les mêmes dimensions, la même puissance spécifique, le même rendement et le même facteur de puissance que les moteurs construits pour une seule vitesse; avec quatre vitesses, l'augmentation de volume et de prix est peu importante.

Les moteurs triphasés réglés par variation du nombre de pôles sont plus économiques en tant que fonctionnement, et malgré le dédoublement de leurs enroulements statoriques et

la complication de leur appareil de commande, ils ont sur les moteurs triphasés à induit bobiné réglés au moyen de résistances extérieures l'avantage d'un rotor plus robuste.

Le tableau ci-après, qui donne les caractéristiques d'un moteur de

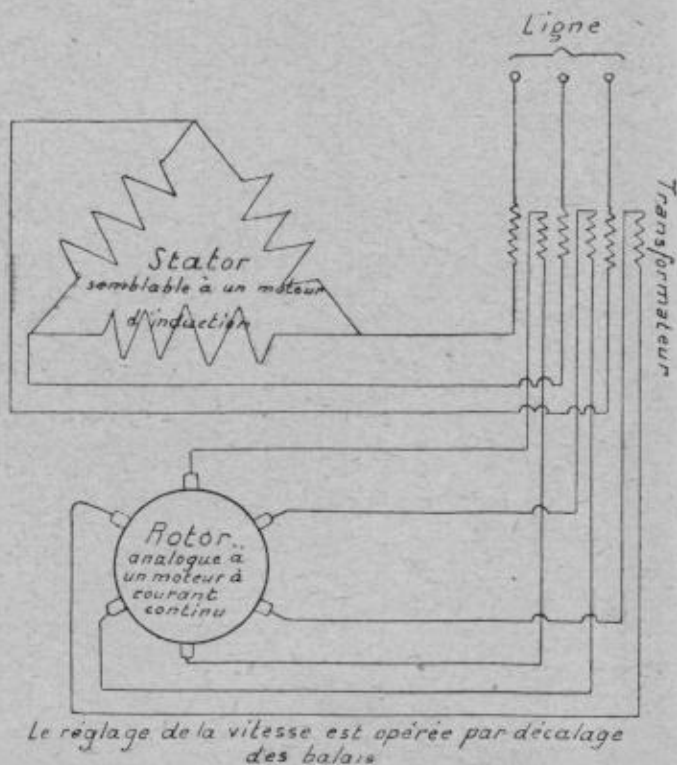


FIG. 1194. — Dispositif de réglage de la vitesse d'un moteur-série à collecteur. (Société de constructions électriques de Charleroi.)

500 HP, à 4 vitesses, construit par les ateliers d'Oerlikon, montre l'efficacité de ce mode de réglage.

Vitesse en tours par minute.....	367	294	183	147
Puissance normale correspondante.....	500	400	250	200
Rendement en pleine charge en centièmes.....	93	90	89	88
Facteur de puissance à pleine charge en centièmes.	90	85	82	80
— — demi-charge —	85	80	74	70

En ce qui concerne les indications industrielles générales, pour apprécier complètement l'intérêt des moteurs triphasés à vitesse variable, on

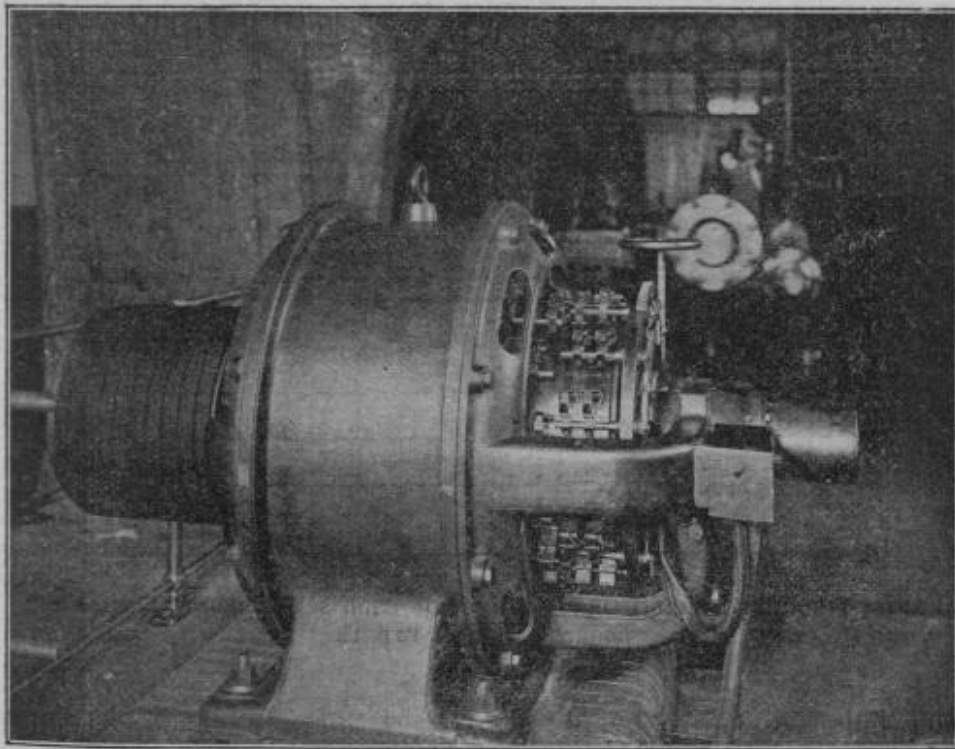


FIG. 1195. — Moteur triphasé à collecteur 75-90 chevaux, 50 périodes, 640 tours.
(C^{ie} Electro-Mécanique).

doit tenir compte de ce que, fréquemment, les distributions étant faites par courant triphasé, on serait forcé, faute de moteurs de ce genre, ou bien de recourir à des transmissions mécaniques compliquées, ou bien d'intercaler des groupes transformateurs rotatifs entre le réseau d'alimentation et les moteurs.

C'est dans cet esprit que les ateliers d'Oerlikon ont établi des moteurs à 5 et à 6 vitesses.

Le moteur à cinq vitesses est muni d'un stator à trois enroulements distincts : il est calculé pour une fréquence de 42 périodes par seconde. Abstraction faite de quelque pour cent de glissement, on obtient les

vitesses de 210, 420, 630, 840 et 1.260 tours par minute avec les nombres des pôles de 24, 12, 8, 6 et 4. Deux des enroulements statoriques peuvent être commutés chacun pour deux nombres de pôles différents, dans le rapport de 1 : 2. Ils sont, à cet effet, composés de bobines élémentaires régulièrement réparties sur la périphérie et divisées en $6 \frac{p}{2}$ groupes (p , nombre de pôles minimum), qui sont connectés en parallèle pour le nombre de pôles $2p$ et en série pour le nombre de pôles p . Le troisième enroulement n'est prévu que pour un seul nombre de pôles. Les trois systèmes de bobines sont logés dans les mêmes encoches du stator : les bobines correspondant à 12 et 24 pôles sont les plus rapprochées de l'en-

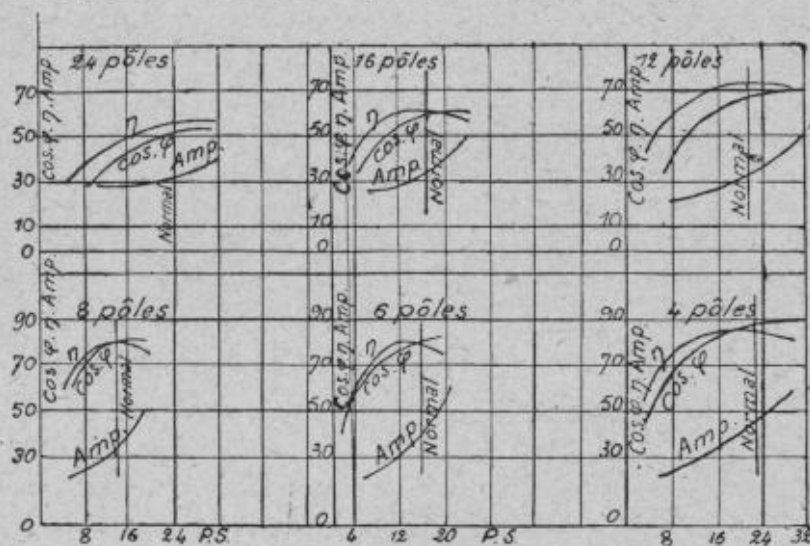


FIG. 1196. — Caractéristiques du moteur triphasé Oerlikon à 6 vitesses pour 280 volts et 42 p. : s.

trefer, puis viennent les bobines pour 4 et 8 pôles, tandis que les bobines pour 6 pôles sont logées au fond des encoches. La puissance du moteur à la tension normale de 280 volts est de 23 chevaux avec 4 pôles et de 6 chevaux quand le moteur marche avec 24 pôles. L'enroulement rotorique est à cage d'écureuil et barres logées dans des encoches et réunies aux extrémités par des anneaux de court-circuit en laiton.

La commutation exige en tout 15 bornes, dont 6 pour chacun des deux enroulements à deux nombres de pôles et 3 pour l'enroulement à 6 pôles.

Ce moteur permet de commuter un même enroulement de manière à obtenir à volonté trois nombres de pôles dans le rapport 4, 6, 8 ou 6, 8, 12. A cet effet, l'enroulement destiné à donner 4, 6 et 8 pôles est divisé en $6 \frac{2}{p}$ groupes de bobines élémentaires, et l'on réunit chaque entrée et chaque sortie de groupe à une borne. On obtient de cette façon 24 bornes pour un enroulement à 4, 6 et 8 pôles. Pour 4 et 8 pôles, la distribution des bobines

à la périphérie est symétrique tant par rapport aux pôles que par rapport aux phases ; par contre, pour 6 pôles, les bobines élémentaires sont distribuées irrégulièrement ; sur l'espace d'un premier pôle, la phase I comprend deux bobines en série, les phases II et III une seule bobine chacune ; au pôle suivant, c'est la phase II qui comporte deux bobines, les phases I et III n'en ayant chacune qu'une seule. Au total chaque phase est composée d'un même nombre de bobines.

La subdivision des bobines de l'enroulement pour 12, 16 et 24 pôles est analogue à celle de l'enroulement pour 4, 6 et 8 pôles ; il y a en tout 36 bobines avec 72 terminaisons. La disposition des phases étant absolument la même sur les deux moitiés du moteur, les bobines peuvent être mises en série 2 par 2, de façon permanente, de sorte que toutes les commutations nécessaires s'établissent avec 36 terminaisons seulement. On peut, en outre, épargner 12 terminaisons, aussi bien pour l'enroulement à 4, 6 et 8 pôles que pour l'enroulement à 12, 16 et 24 pôles, en remarquant que chaque bobine restant ouverte aux deux extrémités, on peut prendre des bornes communes à 12 de ces extrémités. Pour pouvoir obtenir tous les degrés de vitesse prévus, il faut donc 48 bornes.

Si la succession des degrés de vitesse se fait dans l'ordre naturel, ce qui est généralement le cas, le commutateur de pôles est relativement simple. Les plots de contact sont rangés sur le cylindre du combinateur de façon à éviter tout croisement des fils de connexion au-dessous des diverses surfaces de contact, et l'on évite ainsi tout danger de court-circuit entre ces fils de connexion. La disposition des autres parties, notamment des touches de contact, est conçue dans le but de réduire autant que possible les dimensions de l'ensemble.

Les touches de contact sont au nombre de 51, dont 3 pour l'arrivée du courant et 48 pour la commutation des pôles du moteur ; l'interruption du courant se fait toujours aux mêmes touches de contact, au nombre de 2 ou 3, qui sont pourvues de pièces auxiliaires de contact aisément interchangeables.

Dans le tableau suivant sont consignés, pour les différents nombres de pôles, le rapport entre l'intensité normale du courant et l'intensité du courant de court-circuit qui se produit au démarrage, ainsi que le rapport entre le couple normal et le couple de démarrage.

Nombre des pôles	Rapport de l'intensité normale à l'intensité de démarrage (court-circuit)	Rapport du couple normal au couple de démarrage.
24	1 : 2	1 : 1,87
16	2,31	1,51
12	3	1,46
8	4,3	1,45
6	5,5	1,83
4	8,88	1,455

On voit que le moteur à 24 pôles développe au démarrage un couple égal à 1,87 fois le couple normal pour la vitesse correspondante, tout en n'absorbant que le double du courant normal correspondant. En commutant sur un nombre de pôles moins élevé, c'est-à-dire à une vitesse plus grande, l'intensité croît, d'après les expériences, jusqu'à 50 et 60 0/0 environ de l'intensité du courant de court-circuit correspondant à ce nombre de pôles, ce qui, dans le cas le plus défavorable, d'après le tableau précité, pourra donner un courant égal à 4,5 fois environ le courant normal.

Dans le cas où le moteur devrait démarrer directement avec la plus grande vitesse, l'intensité de courant de démarrage atteindrait 8,8 fois la valeur normale ; mais on ne procède pas de cette façon, et c'est en passant par les différents degrés de vitesse que l'on met en marche ou à l'arrêt.

Le grand nombre des fils de connexion à juxtaposer, dans le cas des moteurs à deux enroulements, entre le moteur et le manipulateur, peut devenir gênant lorsqu'on ne peut placer le régulateur sur le moteur même.

On peut, dans ce cas, obtenir un réglage de vitesse à cinq degrés avec environ $1/3$ des terminaisons, et éventuellement un réglage à 6 degrés avec 24 terminaisons, moyennant l'emploi de trois enroulements. Mais, dans ce cas, on devrait augmenter les dimensions des perforations et des tôles statoriques, afin de pouvoir loger le troisième enroulement. De plus, il faudrait dépenser environ $1/3$ de cuivre de plus. Les moteurs à trois enroulements sont des plus encombrants, plus lourds et plus chers, sans que leurs qualités électriques soient meilleures.

Pour le reste, la marche des moteurs à cinq ou six vitesses est la même, sous tous les rapports, que celle des moteurs à deux et à quatre pôles construits jusqu'à présent. Le constructeur peut, à volonté, par l'emploi du montage en série ou du schéma en parallèle, obtenir à volonté soit la constance du couple à toutes vitesses, soit celle de la puissance, ou encore, en dimensionnant différemment les deux enroulements, fixer une puissance variable selon la vitesse de régime ⁽¹⁾.

Les moteurs d'induction construits par la Société Westinghouse comprennent trois types : moteurs à vitesse constante et démarrage par résistances dans le circuit induit ; moteurs à vitesse variable réglable par résistances dans le circuit induit et moteurs à vitesse constante et induit en court-circuit.

Les équipements du contrôle à résistance liquide qu'emploie la Société

(1) Ces moteurs ont été appliqués avec succès à la traction (Tunnel du Simplon). Un premier enroulement statorique sert à produire 6 ou 12 pôles correspondant à des vitesses de 70 et 35 kilomètres à l'heure aux locomotives. Un second enroulement, 8 et 16 pôles donne des vitesses de 52 et 26 kilomètres à l'heure.

Westinghouse pour les moteurs à bagues réversibles, employés à des services très durs, et pour des puissances de 200 HP au moins avec une tension primaire ne dépassant pas 5.000 volts et des voltages au secondaire allant jusqu'à 600 volts, se composent : de deux réservoirs superposés, d'un petit moteur électrique avec pompe centrifuge de circulation, d'un inverseur type à huile, et quelquefois d'un interrupteur principal de secours. Le réservoir supérieur contient trois électrodes fixes connectées aux bagues collectrices du moteur et une vanne mobile. Le réservoir inférieur contient la résistance liquide, étant pourvu de serpentins de refroidissement au moyen d'une circulation d'eau.

La solution formant la résistance liquide est remontée dans le réservoir supérieur par la pompe à circulation à commande par moteur électrique et retombe dans le réservoir inférieur, en franchissant la vanne qui est dans sa position la plus basse quand le levier de commande de l'opérateur est à la position *arrêt*. En manœuvrant ce levier de commande, l'opérateur ferme en premier lieu l'interrupteur de changement de marche

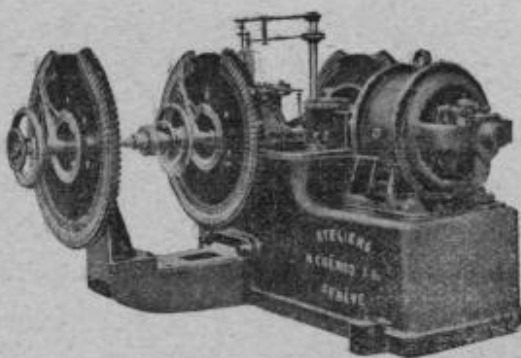


FIG. 1197. — Régulateur automatique extra-rapide à pression d'huile pour 3 alternateurs en parallèle (C^{ie} H. Guénod, S. A.).

sur le circuit primaire du moteur principal, d'un côté ou de l'autre, suivant le sens de rotation demandé, et soulève ensuite la vanne. Cette dernière opération a pour résultat de faire monter le niveau du liquide dans le réservoir supérieur, et, par suite, de diminuer la résistance entre les barres collectrices. La vanne peut être arrêtée à n'importe quelle hauteur ou peut être amenée immédiatement au point le plus élevé de sa course suivant la position donnée au levier de commande par l'opérateur. Cependant, comme le liquide ne peut suivre la levée de la vanne plus vite que la pompe ne peut remonter l'huile dans le réservoir supérieur, il en résulte qu'une certaine accélération maxima du moteur, due à la rapidité de la décroissance de la résistance dans le circuit du rotor, ne peut être dépassée, quoique toute accélération inférieure puisse être obtenue. On obtient cette valeur d'accélération par le réglage d'une valve placée sur le tuyau de refoulement de la pompe.

Dans les petits modèles de ces contrôleurs, c'est-à-dire pour des moteurs jusqu'à environ 1.000 HP, l'interrupteur primaire de changement de marche et la vanne sont commandés directement par le levier de l'opérateur ; mais dans les grands modèles, pour des moteurs de 1.500 ou 2.000 HP et au-dessus, les masses deviennent trop considérables pour être manœu-

vrées à la main, et un servo-moteur à air comprimé transmet la commande du levier au mécanisme de contrôle.

Le procédé préconisé par M. H. Schultze pour la mesure du glissement des moteurs asynchrones présente à la fois une grande facilité et une précision remarquable. Il repose sur la connaissance des phénomènes des ondes capillaires engendrées électriquement sur les diélectriques fluides.

Le rotor du moteur asynchrone à essayer porte un disque stroboscopique présentant autant de fentes que le moteur a de pôles, et on envoie à travers ces fentes sur la nappe liquide d'un électrolyte (dont l'une des électrodes est en étain exempt de zinc, et l'autre un fil de platine dont la pointe se présente à peu près au milieu de la surface liquide ; en reliant les électrodes aux pôles d'une source alternative, il se développe à la surface du liquide, à partir de la pointe de platine, un système d'anneaux superficiels progressant sous forme d'ondes à une fréquence double de celle du courant alternatif qui les engendre), un faisceau parallèle de lumière ; lorsque le rotor tourne synchroniquement avec le champ tournant engendré par les courants alternatifs d'alimentation, le faisceau de lumière a une fréquence double de celle de ces derniers et le système des anneaux produits par les ondes capillaires semble immobile.

Si a est le nombre de cercles atteignant par seconde le repère indiqué préalablement, on a pour expression du glissement à la fréquence $\frac{1}{T}$ des courants alternatifs d'alimentation :

$$\sigma = \frac{a}{\frac{1}{T}} 100.$$

Les glissements sont parfaitement mesurables jusqu'à 8 0/0.

L'eau distillée convient pour des tensions comprises entre 200 et 4.000 volts, et l'huile de térébenthine pour des tensions de 5.000 à 8.000 volts.

L'appareil Andrault pour la mesure du glissement des moteurs d'induction est basé sur l'utilisation des propriétés du papier télégraphique *Bain*.

Le papier chimique découpé en forme de disque est appliqué sur un disque en cuivre de même diamètre, entraîné par le moteur avec une vitesse a fois plus petite que la sienne propre. Le disque de cuivre communique électriquement avec l'une des bornes du moteur par l'intermédiaire d'une résistance de protection appropriée, lampe à incandescence par exemple. Sur le disque en papier, appuie légèrement une pointe mousse en fer communiquant avec une autre des bornes du moteur.

Quand le disque tourne, cette pointe trace, comme on le sait, des traits

bleus, chaque trait correspondant à une période. En déplaçant lentement la pointe le long d'un rayon du disque, on peut faire en sorte que les traits bleus s'échelonnent le long d'une spirale.

Soit t le nombre de traits bleus pour un tour du disque. Ce nombre t peut être déterminé très exactement, car il suffit de compter, sur la spirale, le nombre de traits correspondant à 6, 8 ou 10 tours, et à diviser par le nombre des tours.

Connaissant t , on en déduit le coefficient de glissement g par la formule :

$$g = \frac{t - ap}{t},$$

formule très facile à établir et dans laquelle p désigne le nombre de paires de pôles.

Pratiquement, l'appareil a été disposé comme un vulgaire compteur de tours, et s'emploie de même, en appuyant une pointe de caoutchouc contre le bout de l'arbre du moteur.

Cet appareil se suffit à lui-même. Il est inutile de connaître la fréquence du courant. On n'a pas besoin non plus de compteur de temps.

Le problème du réglage de la vitesse des moteurs triphasés a été résolu par la construction des moteurs triphasés à collecteur et par le montage dit en cascade. Dans le moteur de Görges, le système de réglage de la vitesse consiste dans l'application aux balais d'une force électromotrice extérieure que l'on fait varier, suivant les besoins, au moyen d'un transformateur. Le moteur Brown Boveri, à double collecteur, n'est autre chose qu'une combinaison de deux moteurs Déri à courant monophasé.

Dans le moteur en dérivation Winter-Eichberg et dans le moteur série on applique la méthode de la compensation du facteur de puissance.

Le montage en cascade consiste en une utilisation de l'énergie du moteur principal que l'on dirige sur une seconde machine, à vitesse réglable, qui la restitue sous la forme d'énergie mécanique à l'arbre du moteur principal, soit au réseau des distributions sous forme d'énergie électrique.

On distingue trois modes de montage : 1° la seconde machine est un moteur à collecteur directement accouplé au moteur principal ; 2° la seconde machine est un moteur à courant continu auquel l'énergie de glissement est transférée au moyen d'un convertisseur ; 3° la seconde machine est un moteur à collecteur accouplé à un générateur asynchrone qui fait passer au réseau de distribution l'énergie de glissement.

On sait que la principale cause d'affaiblissement du facteur de puissance dans une centrale est la présence sur le réseau des moteurs d'induction.

Pour obtenir une compensation aussi parfaite que possible aux faibles charges et pour ne pas atteindre un décalage en avant trop grand aux fortes charges, il faut que le compensateur fonctionne très saturé, et comme la machine ne possède pas de stator, il n'est possible de régler la commutation et la marche sans étincelles que par un dimensionnement convenable de la dite.

Il est donc absolument nécessaire de demander à ceux-ci de fonctionner avec le facteur de puissance le plus élevé possible, si l'on ne veut pas avoir recours à l'un des artifices préconisés pour créer une force électromotrice décalée en avant et compensant le décalage en arrière produit par l'ensemble des moteurs asynchrones fonctionnant sur le réseau. Les moteurs synchrones surexcités, utilisés dans ce but, conduisent à des connexions compliquées et de plus favorisent les risques de décrochage.

Le système de compensation par compensateurs séparés, qui offrent le moyen d'un décalage en avant, est en outre avantageux pour la construction des moteurs d'induction. Avec de tels moteurs à vitesse lente établis en tenant compte de la compensation du décalage, il est possible d'arriver à une diminution de poids de 10 à 20 0/0.

Le compensateur de décalage Brown Boveri est remarquable par sa simplicité et le peu de matière nécessitée par sa construction.

L'induit se compose d'un anneau cylindrique en fer; dans les encoches se trouve logé un enroulement diamétral qui est réuni à un collecteur, sur lequel frottent des balais dont le nombre varie suivant le nombre de phases du système.

Les balais sont fixes et l'induit est animé d'un mouvement de rotation. Si l'on fait passer dans une des paires de balais du courant continu ou du courant alternatif à basse tension, on fait naître une force électromotrice entre les balais diamétralement opposés.

Si l'on relie les quatre balais du compensateur aux quatre bagues du rotor d'un moteur d'induction, le maximum de tension entre chaque paire de balais a lieu lorsque le courant entre ces balais est nul, et inversement le minimum de tension se produit quand le courant est maximum. Et comme la tension et le courant sont à chaque instant perpendiculaires l'un à l'autre, une telle machine, abstraction faite des pertes, ne doit pas absorber de puissance wattée.

474. Rendement des moteurs asynchrones. — Le courant à vide, dont la valeur est notable, constitue un désavantage appréciable du moteur triphasé par rapport au moteur à courant continu.

Les pertes d'énergie dans les enroulements primaire et secondaire augmentent avec la puissance du moteur et croissent comme le carré des intensités; celles dans le fer de la carcasse primaire et dans le fer de l'induit

dépendent de la vitesse ; mais la première de ces pertes dans le fer est constante et indépendante de la charge.

Si T est le travail nécessaire pour vaincre les résistances mécaniques (qui peut être considéré comme constant) et T_u la puissance pouvant être recueillie sur l'arbre du moteur triphasé, celui-ci absorbera dans chacune de ses phases primaires une puissance satisfaisant à l'équation :

$$3T_t = 3I_1^2 r_1 + nI_2^2 r_2 + \epsilon + T + T_u;$$

I_1 , courant primaire ; r_1 , résistance de l'enroulement primaire ; r_2 et I_2 , résistance et courant dans l'enroulement de l'induit ; ϵ , somme des pertes dans le fer.

Dans la marche à vide, l'équation ci-dessus devient :

$$3T_0 = 3I_0^2 r_1 + \epsilon + T.$$

Malgré la grande intensité du courant à vide, qui est presque la moitié de celle en pleine charge, la puissance T_t n'est que de 10 0/0 de la puissance normale en raison de la faible résistance de chaque phase primaire.

Le rendement est donné par l'expression :

$$\eta = \frac{T_u}{3T_t} = \frac{T_u}{\epsilon + T + T_u}.$$

Cette équation en fonction de T_u représente une hyperbole asymptote à la droite $\eta = 1$ (courbe *og*, fig. 1198). Les pertes dans les enroulements deviennent plus sensibles avec l'augmentation de la puissance du moteur, et le rendement peut même, pour des charges très grandes, décroître à cause des valeurs considérables de I_1 et de I_2 , comme le montre la courbe en traits pleins (*of*).

Le rendement maximum d'un bon moteur correspond à la charge normale, et la courbe *of* doit être, dans le voisinage de ce point, assez aplatie pour que le rendement ne varie que très peu entre les 3/4 et les 5/4 de la charge.

Dans un bon moteur où $\cos \varphi$ est voisin de 0,90, le courant à vide varie du 1/5 au 1/4 du courant de pleine charge. Avec les petits moteurs, on va au 1/3 pour $\cos \varphi = 0,80$ à 0,85.

La (fig. 1199) renseigne d'une façon très complète sur l'allure économique d'un moteur de 300 HP, 1.950 volts, 375 tours et 50 périodes, sortant des célèbres ateliers d'Oerlikon.

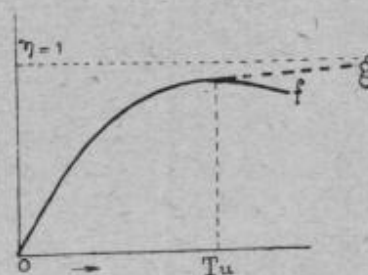


FIG. 1198.

Pour les conditions générales visant les essais des moteurs triphasés, elles sont, pour la plupart, identiques à celles que nous avons déjà spécifiées, en ce qui concerne les durées de ces essais, les limites d'échauffe-

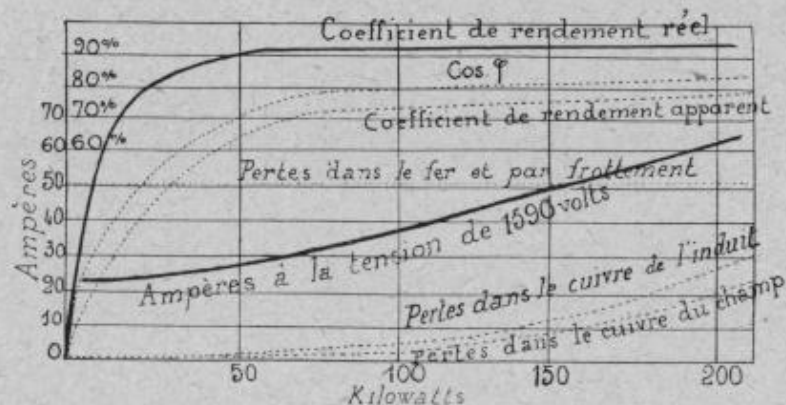
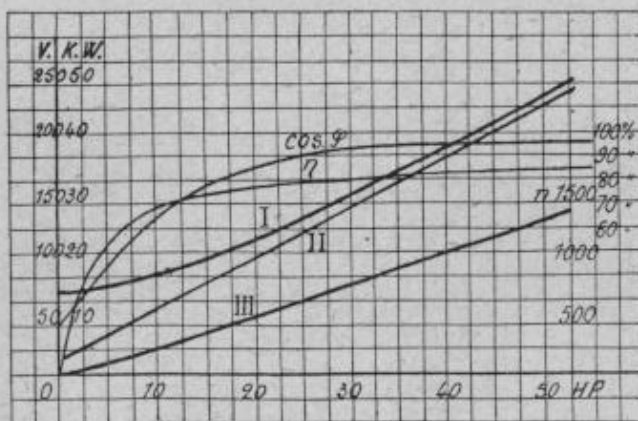


FIG. 119).

ment, la mesure des températures, les essais de surtension et d'isolement. La variation de vitesse, en passant de la marche normale à la marche à vide, doit être faite en maintenant la tension constante aux bornes.

On sait combien est pénible la détermination des différentes pertes d'un moteur asynchrone. La méthode suivante due à M. Boulardet, bien

qu'approximative, n'en est pas moins susceptible de rendre quelques services. Elle ne s'applique qu'à des moteurs dont le fer n'est pas saturé.



- I, tension constante aux bornes.
- II, intensité en ampères.
- III, puissance en kilowatts, η rendement, $\cos \varphi = 0/0$.

FIG. 120). — Alternomoteur Oerlikon de 35 HP, fonctionnant comme moteur série à tension constante, de 1.000 volts, 22 périodes.

leur dans les enroulements du stator par la circulation du courant d'excitation, on obtient, pour toutes les valeurs de la tension d'alimentation, les puissances perdues en hystérésis et courants de Foucault dans le stator et le rotor.

Le stator étant excité à la tension normale, on fait démarrer le moteur et, quand la vitesse de régime est atteinte, les enroulements du rotor sont mis en court-circuit ; le moteur marche à vide, il a seulement à vaincre les frottements de l'arbre dans ses coussinets, les frottements dus à la ventilation ainsi que ceux des balais sur les bagues.

La tension d'alimentation étant diminuée progressivement, la puissance consommée diminue également jusqu'à un minimum correspondant à la tension d'alimentation juste suffisante pour entretenir le mouvement. Si l'on déduit de cette puissance les pertes en chaleur dans le stator dues à la circulation des courants, on peut considérer le reste comme étant la puissance nécessaire pour vaincre les frottements, car les pertes en hystérésis et courants de Foucault dans le stator sont négligeables à la tension considérée ⁽¹⁾.

Les conditions d'établissement et de fonctionnement des moteurs s'améliorent pour des vitesses croissantes en alternatif, et l'inverse a lieu en continu. On doit donc éviter les moteurs alternatifs à faible vitesse et les moteurs à courant continu à grande vitesse. Les moteurs triphasés à allure lente sont trop coûteux aux fréquences de 50 ou 60 périodes, leur fonctionnement peu satisfaisant et le facteur de puissance faible. On préfère la marche à 25 ou 33 périodes.

La tendance actuelle est de ne pas augmenter les tensions de fonctionnement des moteurs. En dessous de 50 HP, l'emplacement nécessaire pour les isolants entraîne, pour des tensions élevées, à des moteurs gros et coûteux, et la construction des petits moteurs, surtout à 25 périodes, devient d'autant plus délicate et leur rendement d'autant plus faible que la tension aux bornes de ces moteurs est plus élevée.

⁽¹⁾ On peut augmenter le rendement des moteurs triphasés à enroulement induit fermé sur lui-même en réalisant une disposition par laquelle une grande partie de la puissance perdue dans les résistances, qu'on introduit dans le circuit induit pour réduire la vitesse de ces moteurs, est restituée au réseau. Alors on arrive à faire fonctionner le moteur à vitesse réduite avec un rendement sensiblement égal à son rendement à vitesse normale et le démarrage a lieu sans perte d'énergie exagérée.

La Société alsacienne de Constructions mécaniques emploie pour obtenir ce résultat des moteurs asynchrones dont le rotor joue le rôle de transformateur de fréquence ; sur le collecteur frottent trois balais décalés à 120° qui sont, par l'intermédiaire d'un transformateur à nombre de spires variables ou d'un survolteur à tension secondaire variable, connectés au réseau. On voit aisément que si cette tension variable est de sens contraire à la tension induite dans le rotor, la vitesse doit baisser de ce fait et que l'énergie qui, dans le cas du réglage par résistances est perdue, est ici rendue au réseau par l'intermédiaire du transformateur ou du survolteur. Si la tension appliquée au rotor est de même sens que la tension induite on envoie de l'énergie à la fois dans le stator et dans le rotor, ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse et de lui faire prendre des valeurs supérieures à celle du synchronisme.

Si l'on ne veut obtenir qu'une faible variation de vitesse, on y arrive par un simple décalage des balais sans avoir recours à un appareil auxiliaire. Avec ce procédé il est possible de faire varier la vitesse de 25 0/0 au-dessous à 30 0/0 au-dessus du synchronisme. Les valeurs du cos et du rendement sont peu différentes dans toute l'étendue du réglage.

Nous donnons ci-après les règles concernant l'échauffement, la surcharge et les épreuves d'isolement des machines électriques, établies en commun par l'Union des syndicats de l'électricité, le syndicat professionnel des industries électriques et le syndicat professionnel des usines d'électricité. Comme durée des essais, on peut admettre une durée de 1 heure à charge normale pour des machines à service intermittent, et 10 heures pour des machines à marche continue. La température ambiante est admise à 35° C. Si l'essai est effectué à une température inférieure, les

limites d'échauffement seront réduites dans le rapport $\frac{1}{1 + 0,005(35 - \theta)}$,

θ étant la température ambiante durant les essais. Si la machine est appelée à fonctionner dans un local où la température ambiante doit être supérieure à 35° C., les limites d'échauffement seront réduites dans le rap-

port $\frac{1}{1 + 0,005(\theta' - 35)}$, θ' étant, en service, la température présumée

du local. Enfin si, durant l'essai, la température ambiante varie, on prendra pour sa valeur la moyenne présumée du local. Le thermomètre indiquant la température ambiante devra être placé sur le trajet de l'aspiration à 1 mètre environ de la machine et à l'abri de toute influence étrangère.

Les températures mesurées au thermomètre devront être prises sur la partie accessible la plus chaude : pour les inducteurs compound, si le circuit en série est extérieur au circuit dérivé, la moyenne de la température du circuit dérivé sera déterminée par comparaison des résistances de celle lue au thermomètre sur le circuit en série ; lorsque le circuit en série inaccessible est placé sous le circuit dérivé, la température de ce dernier est déterminée par comparaison des résistances ⁽¹⁾.

(1) La formule donnant l'échauffement s'établit en ramenant toutes les résistances à zéro.

En appelant θ_0 la température ambiante lors de la mesure de la résistance à froid $R\theta_0$ au début de l'essai, θ_f la température ambiante à la fin de l'essai lorsque la résistance a pris la valeur $R\theta_f$, R_0 la résistance à 0° C., θ l'échauffement au-dessus de la température ambiante, a le coefficient de température du cuivre, on a les relations :

$$R\theta_0 = R_0(1 + a\theta_0); R\theta_f + \theta = R_0[1 + a(\theta_f + \theta)];$$

d'où, en posant :

$$K = \frac{R\theta_f + \theta}{R\theta_0},$$

$$\theta = \frac{R\theta_f + \theta}{R\theta_0} \left(\frac{1 + a\theta_0}{a} \right) - \left(\frac{1 + a\theta_f}{a} \right) = K \left(\frac{1}{a} + \theta_0 \right) - \left(\frac{1}{a} + \theta_f \right).$$

Si $\theta_0 = \theta_f$, il vient :

$$\theta = (K - 1) \left(\frac{1}{a} + \theta_0 \right).$$

La valeur de a , coefficient de température, peut être prise égale à 0,004.

La température des induits est déterminée comme suit, après 5 minutes d'application et avec le thermomètre ne contenant pas plus de 1 centimètre cube de mercure : *a)* sur le fer, au point accessible le plus chaud ; *b)* sur les fils de l'induit, par trois thermomètres, dont deux à la sortie des encoches, aussi près que possible du fer, sans le toucher, l'un du côté collecteur, l'autre du côté opposé, le troisième au milieu des encoches et aussi près que possible du fer, sans le toucher. On prend comme résultat la température la plus élevée des trois lectures. Si le troisième thermomètre ne peut être appliqué, on majore de 3 0/0 la lecture la plus élevée des deux thermomètres utilisés.

Les limites admises pour les élévations de température sont spécifiées comme suit : la température maxima d'une machine ou d'un transformateur doit être compatible avec la conservation des isolants. La différence entre la température mesurée et la température ambiante (35° C.) ne devra pas dépasser :

a) Enroulements mobiles : avec isolement au coton, 50° C. ; avec isolement au papier, 60° C. ; avec isolement au mica ou à l'amiante, ou préparations équivalentes, 80° C. ;

b) Enroulements fixes : mêmes valeurs que *a* augmentées de 10° C. ;

c) Transformateurs : enroulements haute et basse tension, immergés ou non avec isolement au coton, 60° C. ; avec isolement au papier, 70° C. ; avec isolement au mica, à l'amiante ou préparations équivalentes, 90° C. ;

d) Fers et pièces conductrices nues, fers des circuits magnétiques (au thermomètre), 90° C. ;

e) Collecteurs (au thermomètre), 60° C. ;

f) Paliers, 45° C. ;

g) Machines à collecteurs, en service continu de jour et de nuit, et machines de plus de 2.000 volts (à l'exclusion des transformateurs), les limites ci-dessus seront abaissées de 5° C. ;

h) Machines à service intermittent suivant stipulations du congrès de Milan ; échauffement limite non exagéré admis au-dessus de la température ambiante après 10 heures de marche, avec air ambiant à 25° C., à puissance permanente ⁽¹⁾ ou après une heure à puissance normale ⁽²⁾ :

a) pour enroulements isolés au coton, 70° C. ; pour enroulements isolés au papier, 80° C. ; pour enroulements isolés au mica, à l'amiante ou autres isollements ayant mêmes qualités d'isolement et d'incombustibilité, 100° C. ; *b)* pour collecteurs, 80° C. ; *c)* pour parties métalliques dans les-

⁽¹⁾ Puissance permanente = puissance susceptible d'être développée pendant 10 heures sous tension normale, sans échauffement exagéré dont les limites sont définies plus haut.

⁽²⁾ Puissance normale = puissance susceptible d'être développée durant 1 heure sans échauffement exagéré dont les limites sont aussi définies plus haut.

quelles sont noyés les enroulements, valeur correspondant à celle indiquée pour les enroulements, suivant la matière de l'isolement utilisée ; d) enroulements à isollements combinés ; on prendra la limite inférieure.

La tolérance accordée au-dessus des limites fixées est de 3° C., et comme limites de refus, 10° C., au-dessus des limites d'échauffement.

Pour les surcharges, les conditions à imposer aux constructeurs ont été établies comme suit :

Sauf détérioration (et sans étincelles nuisibles pour les machines à collecteurs), augmentation minima de courant ou de couple : a) 20 0/0 pendant $\frac{1}{10}$ de la série d'essai normale ; b) 30 0/0 pendant 5 minutes. (Ces conditions de surcharge ne s'appliquent pas aux moteurs synchrones et asynchrones à courant alternatif simple.) L'état des collecteurs ne devra pas être altéré au point de nuire ultérieurement au fonctionnement à puissance normale.

Pour les moteurs de traction ou à marche intermittente : 25 0/0 pendant 15 minutes et 50 0/0 pendant 5 minutes.

Pour les alternateurs la surcharge sera réalisée avec le facteur de puissance prévu, l'excitatrice devant pouvoir y suffire.

Enfin, pour les transformateurs, les surcharges consécutives seront : 20 0/0 pendant 1 heure, 30 0/0 pendant 30 minutes et 50 0/0 pendant 5 minutes.

Relativement aux épreuves de surtension, les circuits des machines et des transformateurs devront pouvoir être soumis, sans inconvénient, pendant 3 minutes, si aucune considération mécanique ou électrique ne s'y oppose, à une tension supérieure de 30 0/0 à celle agissant en régime normal.

Les tensions d'épreuve sont fixées comme suit :

Tension normale	Tension d'épreuve	
	à chaud :	à froid :
Jusqu'à 5.000 volts.....	Le double de la tension normale, minimum 110 volts.	Le triple de la tension normale, minimum 500 volts.
5.000 à 10.000 volts.....	La tension normale augmentée de 5.000 volts.	La tension normale augmentée de 10.000 volts.
Au delà de 10.000 volts.	Une fois et demie la tension normale.	Double de la tension normale.

Leur application aura lieu, entre les différents circuits, d'après la tension efficace la plus élevée des circuits essayés ensemble, et entre les circuits et la masse, d'après la tension efficace la plus élevée à produire ou à supporter, exception faite pour les circuits d'excitation sur source indé-

pendante. La durée pour l'essai à chaud sera de 30 minutes et de 5 minutes pour celui à froid. Ces tensions d'épreuve s'entendent avec le genre de courant alimentant les circuits en service normal ; lorsque l'épreuve des circuits à courant continu sera faite avec courant alternatif, les tensions à appliquer seront réduites aux $7/10$, et quand l'épreuve des circuits à courant alternatif aura lieu avec du courant continu, les tensions d'épreuve spécifiées seront majorées de $40\ 0/0$.

Nous complétons ces règles par quelques données concernant la fourniture et la réception des machines et transformateurs qui ont fait l'objet d'instructions élaborées par le syndicat professionnel des industries électriques.

1^o *Puissance*. — La puissance pour laquelle la machine a été vendue doit être mentionnée sur une plaque fixée à la machine ; elle est exprimée :

a) Pour les génératrices à courant continu, à courant alternatif et les transformateurs statiques, en kilowatts aux bornes ;

b) Pour les réceptrices, en kilowatts ou en chevaux de 75 kgm : s. disponibles sur l'arbre.

2^o *Indications des constantes*. — On inscrira, en outre, sur la plaque de la machine :

a) Le facteur de puissance, à la puissance normale, des machines ou appareils présentant un déphasage. Lorsque le facteur de puissance des génératrices n'aura pas été spécifié, il sera supposé égal à $0,8$, et la puissance des excitatrices sera déterminée par cette condition ;

b) Pour la marche continue, à la puissance normale, la vitesse de rotation en tours par minute, la fréquence, le rapport de transformation, la tension (composée en cas de courants triphasés ou hexaphasés ; primaire et secondaire en cas de transformation), le courant (primaire et secondaire en cas de transformation) ;

c) Pour la marche à régime variable, les limites de la tension et du courant ;

d) Pour les machines à marche intermittente (pont roulant, grue, ascenseur, etc.), la puissance pour une durée de fonctionnement d'une heure, en ajoutant la mention : « marche intermittente ».

3^o *Entretien des collecteurs*. — A toute puissance comprise entre la marche à vide et celle à la puissance normale, les balais étant placés dans la position la plus favorable et rodés sur le collecteur par une marche préalable, les machines avec collecteur doivent pouvoir fonctionner sans qu'on soit obligé de passer le collecteur au papier de verre ou d'employer tout autre procédé de nettoyage, pendant la durée d'essai spécifiée plus haut.

4^o *Autorégulation*. — L'autorégulation est définie par le rapport des

variations maxima de tension et de vitesse, en passant de la puissance normale à la marche à vide, aux tensions et vitesse à puissance normale.

La variation de tension sera mesurée en passant de la puissance normale à la marche à vide, à vitesse constante, dans les conditions ci-après :

Génératrices à courant continu : auto-excitatrices, en maintenant constante la résistance dans le circuit inducteur dérivé ; à excitation séparée, en maintenant constant le courant d'excitation.

Dans cet essai, et à moins de conventions contraires, la position des balais sera maintenue fixe à la position sans étincelles à puissance normale.

Génératrices à courant alternatif : en maintenant constant le courant d'excitation.

Commutatrices et moteur générateur : en maintenant constantes la fréquence et la tension aux bornes réceptrices, et en se rapprochant autant que possible d'un facteur de puissance égal à l'unité.

Transformateurs. — Pour les transformateurs, la variation de tension sera mesurée en passant de la puissance normale à la marche à vide au secondaire, à fréquence et tension constante au primaire.

La variation de tension, pour les génératrices à courant alternatif et pour les transformateurs, sera spécifiée pour la puissance normale exprimée en kilovolts-ampères :

- a) Avec un facteur de puissance égal à l'unité ;
- b) Avec le facteur de puissance minimum prévu ou, à son défaut, avec le facteur 0,8.

La variation de vitesse sera mesurée en passant de la marche à puissance normale à la marche à vide, en maintenant constantes aux bornes :

La tension, pour les moteurs à courant continu ;

La tension et la fréquence, pour les moteurs à courant alternatif.

L'autorégulation des moteurs d'induction pourra être définie par le glissement, c'est-à-dire par le rapport de la variation de vitesse à la vitesse du synchronisme.

5° *Rendement.* — Le rendement est le rapport de la puissance utilisable à la puissance absorbée.

Toutes les fois que les deux puissances désignées ci-dessus ne pourront être mesurées directement, le rendement sera déterminé par la méthode des pertes séparées.

Ces pertes se décomposent comme suit :

Pertes mécaniques. — a) Frottement des paliers en ventilation.

b) Frottement des balais sur les collecteurs et bagues.

Pertes électriques. — Hystérésis et courants de Foucault.

Effet Joule dans les circuits (inducteurs, induits, circuits primaires et secondaires).

Les pertes par effet Joule seront calculées avec les courants et résistances à chaud des circuits.

Les autres pertes seront représentées par la puissance nécessaire au fonctionnement à vide de l'appareil, déduction faite des pertes par effet Joule dues à ce fonctionnement à vide, les forces électromotrices étant égales, durant la détermination de ces pertes, aux forces électromotrices agissant pendant le fonctionnement à la puissance pour laquelle le rendement est envisagé.

La détermination des pertes par la mesure de la puissance nécessaire à vide se fera, pour les génératrices et réceptrices, à la vitesse et à la tension de régime aux bornes, cette dernière étant augmentée ou diminuée de la chute de tension due aux résistances de l'induit et aux circuits d'excitation en série avec celui-ci.

Les mesures de rendement devront être faites ou ramenées à la température atteinte après l'essai de fonctionnement défini plus haut.

Le rendement sera indiqué pour la puissance normale, les trois quarts et la moitié de cette puissance, en y comprenant les pertes afférentes aux appareils auxiliaires tels que rhéostats, excitatrices, ventilateurs, pompes de circulation, faisant partie intégrante de la fourniture.

Le rendement des génératrices à courant alternatif, à la puissance normale, sera indiqué :

- a) Pour un facteur de puissance égal à l'unité ;
- b) Pour le facteur de puissance minimum prévu, ou, à son défaut, pour un facteur de puissance égal à 0,8.

Pour les transformateurs, on indiquera également le rendement au quart de la puissance normale, ainsi que le facteur de puissance et la consommation à vide.

6° *Facteur de puissance.* — Alternomoteurs destinés à être employés sur les réseaux de distribution publique. — Le facteur de puissance normale, sous une tension ne différant pas de plus ou moins 5 0/0 de la tension normale, ne devra pas être inférieur aux valeurs indiquées par le tableau ci-après, sauf dérogation expressément autorisée :

Puissance disponible sur l'arbre, en chevaux	Facteur de puissance	
	Moteurs à courant polyphasé	Moteurs à courant alternatif simple
0 à 0,5	0,60	0,55
0,5 1	0,65	0,60
1 1,5	0,70	0,65
1,5 5	0,75	0,70
5 10	0,77	0,75
10 15	0,80	0,77
15 20	0,82	0,80
au delà de 20	0,85	0,82

475. Spécifications et conditions moyennes de fonctionnement des moteurs asynchrones. — Moteur triphasé de 400 HP, 2.800 volts, 25 périodes, construit par la Société alsacienne de Constructions mécaniques de Belfort.

Nombre de pôles	25	
Vitesse correspondant au synchronisme	125 t. m.	
Montage des phases	en étoile	
Tension par phase	1.615 volts	
	Stator	Rotor
Diamètre extérieur des tôles	2.800	2.434,5
Canaux de ventilation	2 de 13 mm.	2 de 13 mm.
Pas polaire T	319	
Nombre d'entailles	216	504
Entailles par pôle et par phase	3	7
Profondeur des entailles	51	35
Longueur d'une entaille	21	9,5
Largeur d'ouverture d'une entaille	3	2
Épaisseur maxima des dents	16	5,6
Poids des tôles	3.640 kg.	2.450 kg.
Conducteurs par entaille	12 (24 fils)	2
Nombre de tours par phase et par pôle	18	7
Section d'un conducteur	29 mm ²	81,1
Résistance d'une phase à 60° C. en ohms	0,588	0,0168
Poids du cuivre	666 kg.	735 kg.
Dimension de l'entrefer		2,725
Longueur utile du rotor		299
Induction moyenne dans les dents	8.880	3.890
— maxima — —	15.100	6.600
— dans la couronne	4.470	10.500
Hauteur radiale de la couronne	129	110
Pertes dans le fer, en watts	4.350	80

FACTEUR DE PUISSANCE ET COURANT DE PLEINE CHARGE

Rapport de la longueur entre flasques au pas polaire	1,21
Degré d'ouverture des entailles	presque fermées
Facteur de puissance maximum	0,87
Rendement à pleine charge	91,5
Puissance absorbée en volts-ampères	371.000
— absorbée à pleine charge, en watts	322.000
— apparente absorbée par phase, en volts-ampères	123.670
Courant dans l'enroulement primaire en pleine charge	77 amp.
Densité de courant	2,65

COURANT A VIDE ET DE COURT-CIRCUIT

Nombre de tours par phase.....	432
Tension induite par phase.....	1.570
Flux par pôle.....	$3,46 \times 10^6$
Facteur d'épanouissement.....	1,15
Induction moyenne dans l'entrefer.....	3.510
Ampères-tours par pôle et par phase.....	735
Amplitude du courant à vide.....	40,9 amp.
Intensité eff. du courant à vide.....	29
Coefficient de dispersion.....	0,075
Courant de court-circuit.....	416 amp.
Nombre de conducteurs du stator.....	2.592
— — rotor.....	1.008
Rapport de transformation.....	2,4
Densité de courant.....	4,42

PERTES

Dans le cuivre primaire par phase.....	3.475 watts
— secondaire par phase.....	2.160 —
Au contact des bagues et des balais.....	520 —
Glissement en 0/0.....	2,3
Pertes par frottements et ventilation.....	3.500 watts
— variables.....	17.400 —
— constantes.....	7.930 —
— totales.....	25.330 —
Puissance utile.....	294.000 —
Poids total de cuivre du moteur.....	1.401 kg.
— — des tôles.....	4.921 —
— des matières actives.....	6.322 —
Coefficient de Kapp.....	1,04

Dans les moteurs Westinghouse le glissement, tant pour les moteurs à cage d'écureuil que pour ceux à bagues, est d'environ 7 0/0 pour les petites puissances et 4 0/0 pour les grandes puissances. Pour un fonctionnement normal, ils produisent un couple au moins égal à 2 fois 1/2 le couple de pleine charge sans se décrocher.

Les moteurs à cage d'écureuil sont capables de démarrer sous un couple approximativement égal à deux fois le couple de pleine charge. Lorsqu'ils démarrent sous ce dernier couple, le courant pris à la ligne n'excède pas 2 fois 1/2 le courant de pleine charge.

Les moteurs triphasés au-dessus de 5 HP peuvent démarrer avec appareils étoile-triangle. Lorsqu'ils sont connectés en étoile, ils fournissent un couple d'environ 0,4 à 0,6 du couple normal de pleine charge et prennent environ 1,7 à 2 fois le courant normal de pleine charge, le moteur étant connecté en triangle dans la position de marche. En démarrant avec un

auto-démarreur, pour le même couple de démarrage, le courant pris à la ligne est approximativement le même qu'avec un démarreur étoile-triangle, mais le premier possède l'avantage que le voltage demandé au démarrage peut être augmenté pour obtenir des couples de démarrage plus importants, s'il y a lieu. Cependant, lorsque le couple demandé n'excède pas 40 0/0 du couple de démarrage normal, le démarreur étoile-triangle est beaucoup meilleur marché tout en fonctionnant d'une façon très satisfaisante.

Les moteurs diphasés au-dessus de 5 HP peuvent démarrer pour combinaison série-parallèle, les moteurs étant connectés en série au démarrage et en parallèle dans la position de marche. Avec les enroulements connectés en série, ces moteurs démarrent sous un tiers du couple de pleine charge, avec un courant de démarrage d'environ 1 fois $1/4$ le courant de pleine charge.

Les moteurs à bagues peuvent développer un couple de démarrage beaucoup plus important. Ils sont indiqués pour les cas où il est essentiel de réduire le courant de démarrage emprunté à la ligne ou lorsque la durée du démarrage est très longue. Dans ce cas le couple normal de pleine charge peut être obtenu avec 1 fois $1/4$ le courant de pleine charge ou deux fois le couple de pleine charge avec 2 fois $1/2$ le courant de pleine charge.

Les moteurs normaux peuvent fonctionner sous des voltages 10 0/0 supérieurs ou 5 0/0 inférieurs à leurs tensions de régime. Ces limites peuvent être dépassées et le couple maximum est augmenté ou diminué de 2 0/0 pour chaque pour cent d'augmentation ou de diminution de voltage.

La Société l'Éclairage Électrique indique pour l'intensité absorbée par les moteurs asynchrones de sa construction les valeurs suivantes : démarrage à vide, $I = 1/3$ intensité normale ; démarrage au couple normal, $I = 1,1$ intensité normale ; démarrage au double du couple normal, $I = 2,2$ intensité normale et démarrage au triple du couple normal, $I = 3,5$ fois l'intensité normale.

La Société l'Éclairage Électrique garantit les valeurs suivantes au point de vue des échauffements au-dessus de la température ambiante de 50° maximum au cuivre et au fer pour une marche indéfinie en pleine charge, la température ambiante ne dépassant pas 35° et les mesures étant faites au thermomètre. Pour les surcharges, elle admet : 10 0/0 pendant trois heures, 20 0/0 pendant une heure, 50 0/0 pendant quinze minutes et 100 0/0 instantané, sans décrocher et sans que les élévations de température atteignent des valeurs dangereuses pour les isolants. Les moteurs peuvent supporter une variation de voltage de 5 0/0, une variation de fréquence de 3 0/0 en plus ou en moins des valeurs normales, à

condition que lorsque les deux variations sont simultanées elles se produisent dans le même sens.

Pour les moteurs asynchrones à cage d'écureuil la Société l'Éclairage électrique garantit d'une façon absolue les conditions spécifiées dans le tableau ci-après :

NATURE du démarrage	CONSEILLÉ	INTENSITÉ ABSORBÉE quelque soit le couple résistant	COUPLE MOTEUR	NATURE des applications
Simple fermeture de l'interrupteur.	Jusqu'à 10 HP.	3 à 4 fois l'intensité normale.	1,5 à 2,4 fois le couple normal.	Toutes applications.
Étoile-triangle.	Jusqu'à 60 HP.	1,5 à 2,5 fois l'intensité normale.	0,5 à 0,8 fois le couple normal.	Transmission d'atelier, pompe, ventilateur centrifuge démarrant à orifice fermé.
Auto transformateur.	A partir de 20 HP.	Intensité normale dans la ligne.	Couple constant, 1/3 du couple normal.	Groupes convertisseurs. Transmission commandée par poulies folles.
			Couple variable faible au début, normal à la fin du démarrage.	Appareils centrifuges à couple variant avec la vitesse démarrant à orifice fermé.

Les moteurs diphasés construits par la Société l'Éclairage Électrique, à 10 et 12 pôles ne se font qu'avec mise en court-circuit et relevage des balais et ne se font pas avec balais dans les deux sens. Les moteurs à quatre pôles ne s'établissent que pour accouplement direct. Jusqu'à la puissance de un cheval inclusivement on peut faire démarrer les moteurs directement sans intervention d'organes spéciaux. Au-dessus de un cheval (moteur à cage d'écureuil) on intercale un dispositif de démarrage de façon que le courant ne puisse dépasser trois fois le courant de pleine charge pendant une durée maximum de trois secondes (moteur à coupleur centrifuge). Au-dessus de 10 HP le démarrage ne doit pas prendre un courant supérieur à celui de la pleine charge (moteur à bagues) ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ La Société « l'Éclairage Électrique » a été absorbée par la C^{ie} Thomson-Houston, qui continue la fabrication des types créés par la Société l'Éclairage Électrique.

Conditions moyennes de fonctionnement des moteurs asynchrones (Fréquence de 50 périodes par seconde)
(Formulaire Hospitalier-Roux)

ÉLÉMENTS	COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES Puissances en kilowatts					COURANTS ALTERNATIFS POLYPHASÉS Puissances en kilowatts				
	2	5	10	25	50	2	5	10	25	50
Courant à vide	40	35	30	28	25	30	28	25	22	20
Courant en charge	7	6	5	4	3	7	6	5	4	3
Coefficient de glissement, en pour 100	73	77	83	86	89	73	79	85	87	90
Rendement en pleine charge, en pour 100	72	75	80	83	85	78	80	85	87	88
Facteur de puissance à pleine charge, en pour 100	52	40	30	28	28	36	26	25	18	18
Poids puissance approximatif, en kilogrammes par cheval	10	10,5	11	11,5	12	10	10,5	11	11,5	12
Induction magnétique maxima, en kilogauss :	12	12,5	13	13,5	14	12	12,5	13	13,5	14
Dans l'inducteur	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Dans les dents de l'induit	100	120	140	160	180	100	120	140	160	180
Dans l'entrefer										
Densité linéaire de courant dans l'inducteur à pleine charge										
en ampères-tours par centimètre de périphérie										

Vitesse périphérique de l'induit, en m : s..... 20-35

Diamètre de l'induit en centimètres	Entrefer en millimètres
5-10	0,25
11-20	0,35
22-30	0,50
35-50	0,8
68-80	1,5
100-150	3,0

CHAPITRE XXIII

MACHINES TRANSFORMATRICES DES COURANTS

476. Systèmes de transformation des courants. — Le procédé le plus simple consiste à alimenter par le courant alternatif un moteur synchrone ou asynchrone qui actionne une génératrice à courant continu (*groupe moteur-générateur*) ; mais alors le rendement est plutôt faible. Pour améliorer ce dernier, on a recours à une machine unique constituée par un moteur alternatif et une dynamo ne comportant qu'un seul système inducteur et deux enroulements distincts sur le même noyau d'induit, l'un parcouru par le courant alternatif, l'autre où se développe le courant continu et qui est muni d'un collecteur ordinaire. Cette machine a reçu le nom de *commutatrice*. Le rendement de cette dernière reste encore supérieur à celui d'un groupe moteur-générateur, même lorsqu'il subit une diminution du fait de l'abaissement de la tension du courant d'alimentation, qui doit être ramenée, à l'aide de transformateurs statiques, dans les limites de celle sous laquelle on veut obtenir du courant continu.

Les commutatrices peuvent être simplifiées en disposant sur l'induit un enroulement unique dont les extrémités sont, d'un côté, reliées à deux bagues de contact et, de l'autre, à un collecteur ordinaire.

Les moteurs-générateurs et les commutatrices, que l'on désigne aussi sous le nom générique de « convertisseurs rotatifs », sont généralement employés pour transformer du courant alternatif polyphasé en courant continu et rarement pour effectuer la transformation inverse. Ces machines fonctionnent sans donner pratiquement de réaction d'induit, c'est-à-dire sans produire une distorsion du champ inducteur et, par conséquent, sans production d'étincelles aux balais.

I. — MOTEURS GÉNÉRATEURS

477. Fonctionnement des moteurs-générateurs. — Un moteur triphasé accouplé à une dynamo à courant continu constitue donc un moteur générateur. Dans ce système, on donne le plus souvent la préférence aux

moteurs asynchrones à rendement élevé et à glissement faible pour que la vitesse de rotation varie peu entre les limites extrêmes de la charge.

Le moteur synchrone comme les commutatrices a l'inconvénient de se décrocher, si un court-circuit se produit sur la ligne, ce qui exige une nouvelle mise en route. Le moteur asynchrone est plus souple, et ne s'arrête pas dans ces conditions, si le court-circuit ne dure pas ; il peut, de plus, se remettre en marche beaucoup plus facilement dès que le courant est rétabli.

Avec les moteurs-générateurs, la transformation du courant est indirecte, et l'appareil procède des propriétés inhérentes aux deux engins mécaniques accouplés. L'emploi des moteurs-générateurs s'impose lorsque la fréquence du courant est trop élevée et la puissance à transformer très grande, ainsi que lorsque la distribution est soumise à des variations brusques de charge qui occasionnent des variations brusques de tension. Cependant une variation de fréquence de même importance provoque dans un groupe moteur-générateur une beaucoup plus grande variation sur la tension à courant continu.

Dans ce dernier cas, si on installe une batterie d'accumulateurs en dérivation sur le circuit, on a intérêt à employer un moteur synchrone.

Sur les réseaux où on a besoin d'un réglage parfait (lampes à incandescence, par exemple), des moteurs-générateurs qui comportent deux armatures et deux champs inducteurs sont préférables.

Quand l'installation permet la suppression du transformateur, le moteur-générateur présente de plus grandes limites de régulation de la tension du courant que celles que l'on peut obtenir avec une commutatrice.

Un moteur-générateur — si le moteur est synchrone — peut toujours fonctionner avec un facteur de puissance égale à l'unité, ce qui n'est pas toujours possible avec une commutatrice et il peut marcher pour n'importe quelle fréquence.

Dans les installations de lumière électrique, les moteurs-générateurs offrent un avantage indéniable sur les commutatrices, qui est de permettre de faire varier le voltage aux bornes de la dynamo génératrice dans des proportions aussi larges qu'avec une machine ordinaire.

Avec les moteurs-générateurs, pour que le facteur de puissance conserve la même valeur pour différentes charges en continu, il faut un réglage continu du courant d'excitation, à l'effet d'éliminer à chaque instant la composante déwattée du courant. La tension du côté continu peut, d'ailleurs, être réglée à volonté indépendamment de la tension alternative, et la méthode de réglage présente une grande simplicité.

Le rendement à pleine charge d'un groupe générateur avec transformateur-abaisseur est de 85 0/0 dans les meilleures conditions ; il est de

0,89 pour un groupe moteur synchrone-dynamo, et 0,88 pour un groupe moteur d'induction-dynamo.

Les moteurs-générateurs conduits par des moteurs d'induction ne donnent pas lieu à des pompages dans la marche en parallèle ; mais il est difficile d'obtenir un démarrage rapide sans un afflux assez considérable de courant de la ligne. On remédie en partie à cet inconvénient, en employant un moteur d'induction auxiliaire servant à lancer les machines.

En résumé, il y a peu de cas où l'on doive donner le pas aux moteurs-générateurs sur les commutatrices ; cependant quelques techniciens préconisent leur emploi dans les cas des longues transmissions d'énergie et des réseaux très étendus où la tension primaire varie dans de larges limites, et aussi quand on veut une machine robuste et de grande endurance.

Un groupe moteur-générateur est de 40 0/0 environ plus coûteux d'achat qu'une commutatrice.

II. — COMMUTATRICES

478. Fonctionnement des commutatrices. — Ces machines ont pour but la transformation du courant alternatif simple ou polyphasé en courant continu et réciproquement mais exceptionnellement. Si elles sont commandées mécaniquement par un moteur, elles peuvent fonctionner comme génératrice polymorphe, c'est-à-dire débiter simultanément ou séparément du courant continu et du courant alternatif. Le rapport de transformation à vide dans le cas d'une tension alternative rigoureusement sinusoïdale est donné par la formule :

$$\frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{cont}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m},$$

m , nombre de phases.

Pratiquement on peut adopter les valeurs suivantes indiquées par Kapp :

RAPPORT DES TENSIONS	MONOPHASÉE	DIPHASÉE	TRIPHASÉE	HÉXAPHASÉE
Pièces polaires couvrant les 2/3 de l'espace interpolaire	0,750	0,530	0,630	0,370
Pièces polaires couvrant la 1/2 de l'espace interpolaire	0,820	0,560	0,710	0,440

La vitesse de ces machines n'a pu suivre la progression atteinte dans la construction des dynamos ; la vitesse périphérique peut à peine dépasser 40 mètres, étant donné qu'il faut une surface de 4 centimètres carrés

par ampère débité (balais en charbon) au minimum, ce qui pourrait donner lieu à une longueur axiale de l'arbre trop grande au point de vue de la vitesse critique.

Les commutatrices (fig. 1201) ont leur inducteur toujours disposé à l'extérieur, du type à pôles alternés et excités en dérivation ou en compound au moyen du courant continu pris aux balais. L'induit, pourvu d'une part d'un collecteur, de l'autre de bagues de contact, est placé dans un champ magnétique multipolaire. Il est presque toujours du type en tambour. Le collecteur est muni d'autant de balais qu'il y a de pôles, et les points

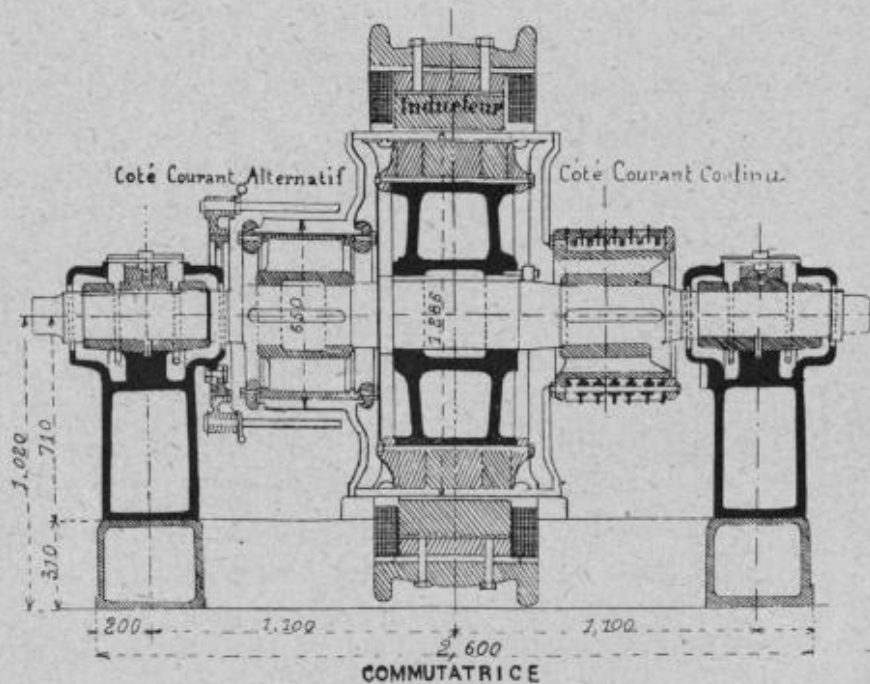


FIG. 1201.

de jonction des bagues avec l'axe sont doubles, s'il y a quatre pôles ; triples, s'il y a six pôles (commutatrices triphasées). La différence de potentiel E_0 alternative entre deux bagues collectrices successives, ou tension polygonale d'une commutatrice triphasée, est donnée par la relation :

$$E_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} E = 0,613E;$$

E , force électromotrice continue.

Le courant efficace dans la ligne est égal à $\frac{2\sqrt{2}}{3} = 0,943$; celui entre deux bagues adjacentes, $\frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 0,545$, et enfin celui dans une phase, $\frac{4\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 1,08$.

La tension étoilée ou la d. d. p. entre chaque bague et le point neutre est :

$$E_0 = \frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,354.$$

Le rapport entre le courant efficace I_0 circulant entre deux bagues et le courant continu I est :

$$I_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I = 0,817 I.$$

Ces valeurs ne sont relatives qu'au cas où la force électromotrice alternative varie suivant une loi sinusoïdale (hypothèse pratiquement admissible), où le décalage est nul entre cette force électromotrice et l'intensité,

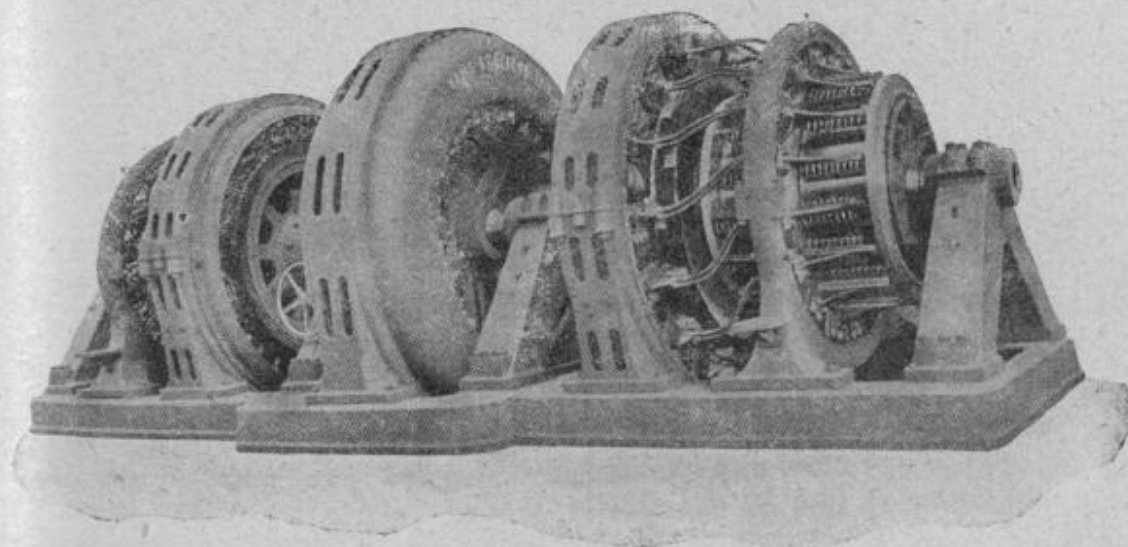


FIG. 1202. — Groupe convertisseur 10.000 ampères sous 65 volts.

où le calage des balais est tel que l'angle de déphasage $\varphi = 0$, et où enfin on néglige les pertes de puissance dues aux fuites magnétiques, aux frottements, aux courants de Foucault, à l'hystérésis et à l'échauffement de l'induit (1).

Dans la pratique, il intervient des connexions par l'obtention d'une onde de la tension plus ou moins déformée par l'influence de la résistance intérieure de l'armature et du décalage du courant.

(1) Soient φ l'angle de déphasage, I_0 le courant de watt et $\frac{I_0}{\cos \varphi}$ le courant total, le courant résultant qui circule dans un élément de bobinage de la commutatrice a pour expression :

$$\frac{I_0 \sqrt{2}}{\cos \varphi} \sin (\omega t - \varphi - \theta) - \frac{1}{2};$$

θ distance angulaire variable entre deux éléments de l'enroulement induit.

D'après les données ci-dessus, si on alimente une commutatrice avec du courant continu à 100 volts, on obtient du courant triphasé à 61,3 volts

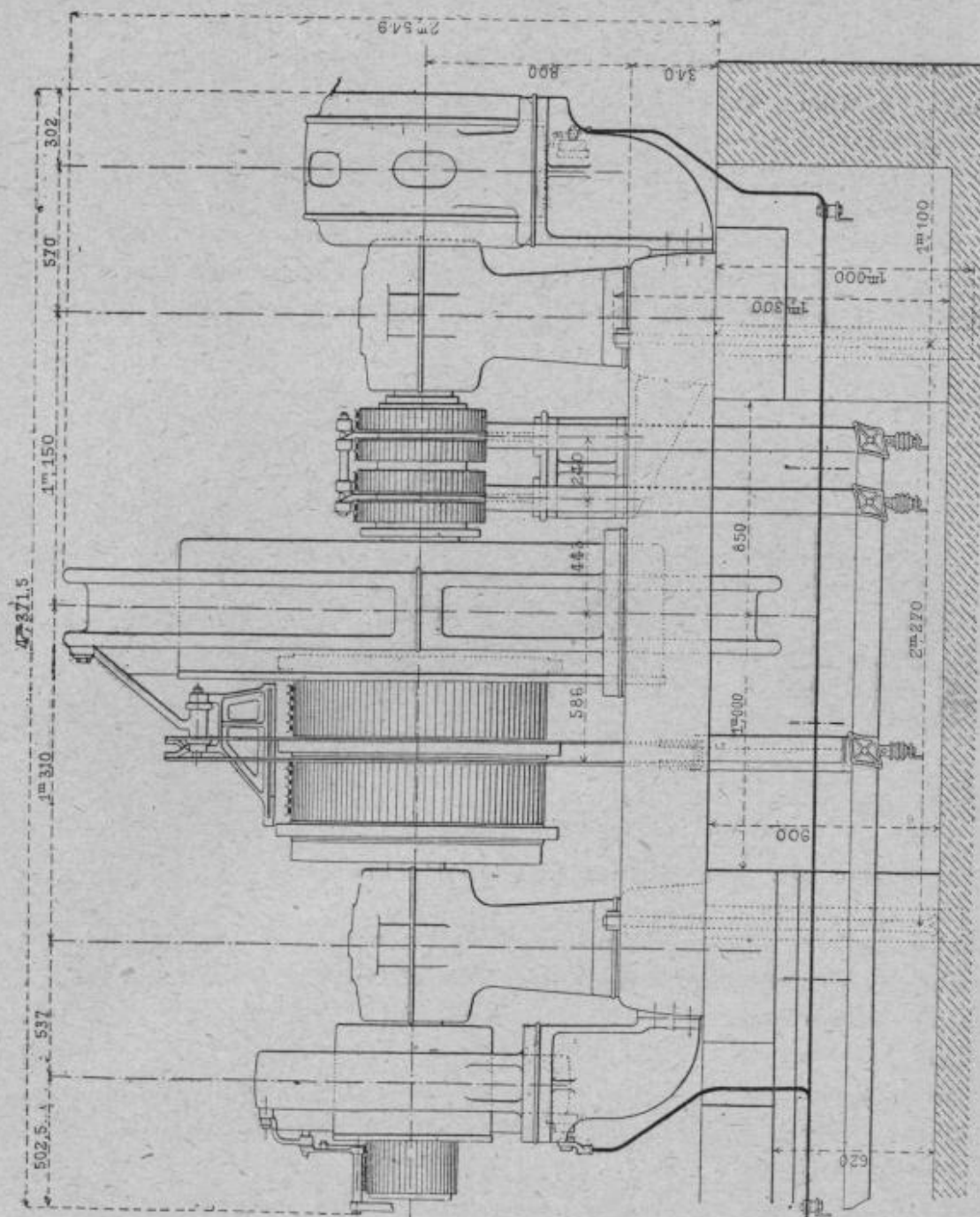


Fig. 1203. — Survolleur, commutatrice de 750 k. w., moteur de démarrage (Cie Parisienne de Distribution d'Electricité). — Matériel Thomson-Houston.

efficaces, et, si on veut du courant continu à 700 volts, par exemple, il faut fournir du courant triphasé à $700 \times 0,613 = 430$ volts.

Quand une commutatrice est alimentée par du courant alternatif, elle fonctionne comme moteur synchrone, et sa vitesse angulaire dépend de

la fréquence du courant et du nombre des champs polaires ⁽¹⁾. Les commutatrices conviennent bien pour les basses fréquences (25 à 30 pé-

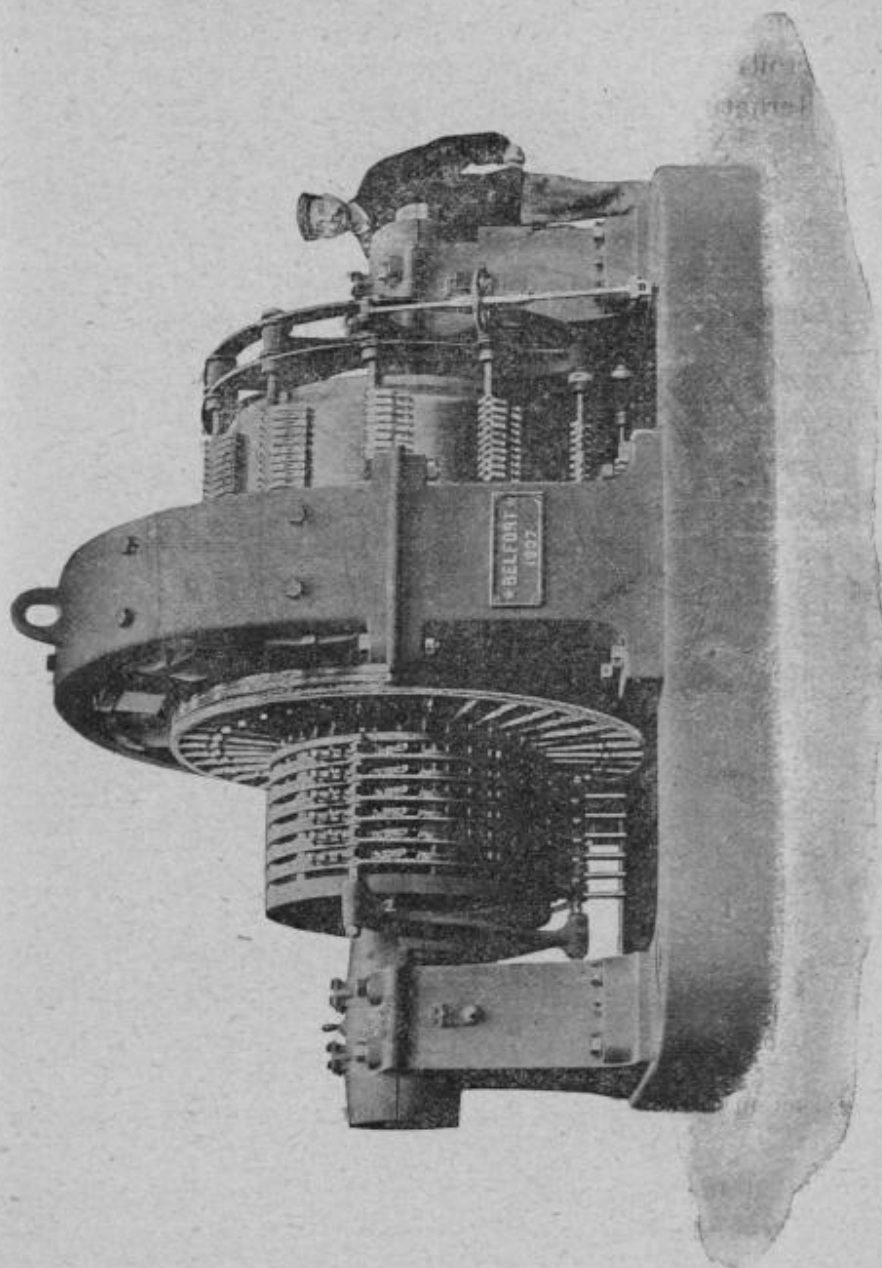


FIG. 1204. — Commutatrice de 650 à 1.200 kw., à 850 volts. (Société Alsacienne de Constructions Mécaniques).

riodes) ; à partir de 40 périodes déjà, on ne peut atteindre qu'une puissance et une tension relativement faibles.

Lorsqu'une commutatrice reçoit le courant d'un réseau de distribution à potentiel constant (ce qui est le cas le plus fréquent), pour régler la ten-

⁽¹⁾ La méthode appliquée par M. A. Blondel, pour le calcul des moteurs synchrones (diagramme bipolaire) est applicable aux commutatrices ; elle permet une représentation graphique des conditions générales de leur fonctionnement.

sion, il faut décaler l'intensité en avant ou en arrière de la tension en intercalant en série sur chaque conducteur une bobine de réactance.

On peut rendre aussi le système auto-régulateur en compensant le champ de la commutatrice par un enroulement en série.

Pour faire croître la tension du courant continu, il faut augmenter celle du courant alternatif alimentant la commutatrice. Alors, si cette dernière

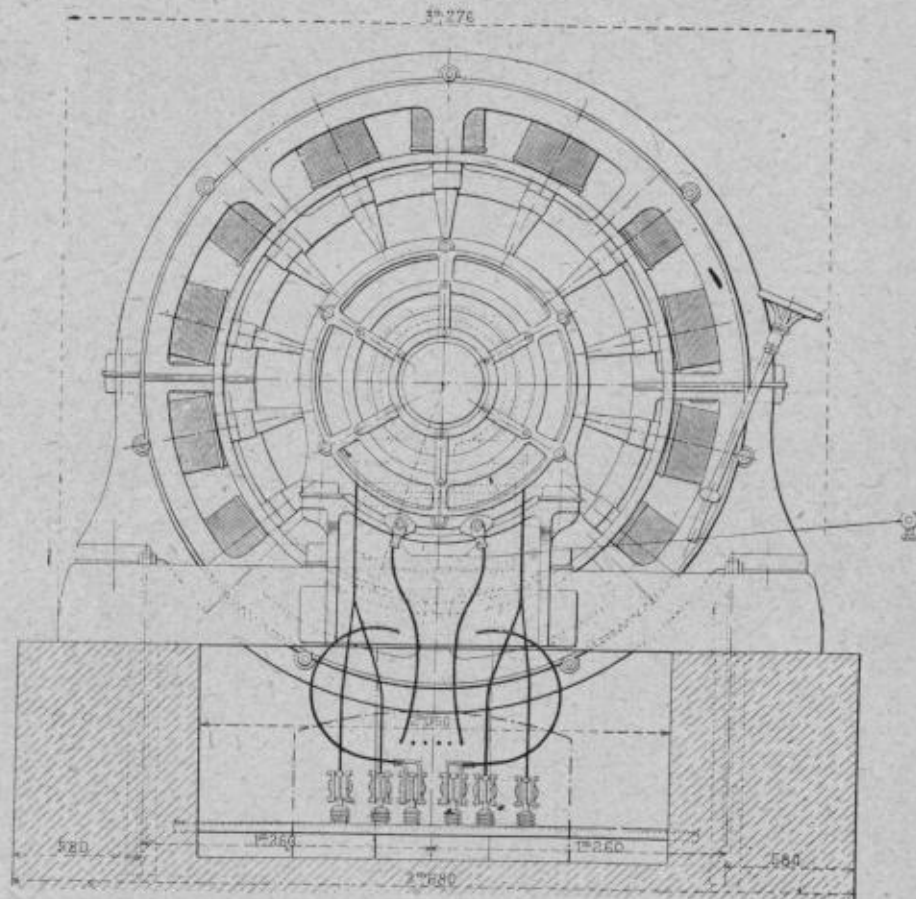


FIG. 1205. — Commutatrice de 750 kw., (coupe côté continu) C^{ie} Thomson-Houston.

reçoit le courant d'une seule génératrice, on augmente graduellement le voltage de l'alternateur à mesure que la charge augmente, tandis que l'excitation de la commutatrice est réglée de façon à conserver au facteur de puissance ($\cos \varphi$) la valeur de 1, ce dont on s'assure au moyen d'un phase-mètre.

On peut aussi arriver au même résultat en agissant sur l'excitation de la commutatrice ; lorsque la charge est faible, on maintient l'excitation à une valeur peu élevée, ce qui produit un décalage en retard de l'intensité et, par suite, un abaissement de la tension du courant d'alimentation. Quand la charge augmente, on élève d'autant la valeur du courant d'excitation, donnant lieu à une avance de phase, qui augmente l'intensité du

champ de l'alternateur et, par suite, la tension. On pousse l'excitation jusqu'à ce que $\cos \varphi$ devienne égal à l'unité.

Enfin il est possible d'effectuer le réglage de la tension au moyen d'un transformateur aménagé spécialement, c'est-à-dire muni de prises de courant en divers points de circuit secondaire, permettant ainsi de faire varier la tension selon le nombre de prises actives.

Si on craint des surcharges trop brusques, ainsi que de trop grandes variations de tension, il est bon de recourir à une batterie d'accumulateurs.

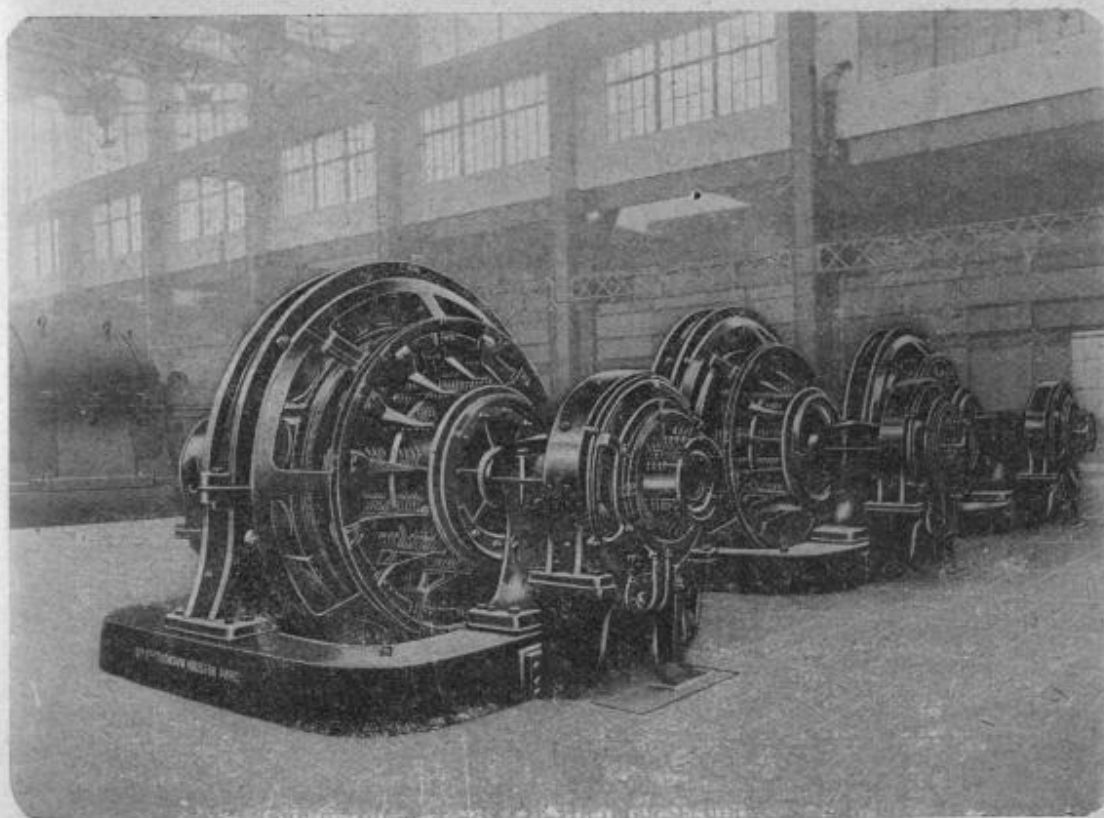


FIG. 1206. — Ensemble des groupes convertisseurs de 750 kw. Thomson-Houston.
(C^{ie} Parisienne de Distribution d'Électricité).

On sait que le rapport de transformation qui existe entre la tension alternative et la tension continue d'une commutatrice peut être modifié en changeant la largeur des pièces polaires. Le système Woodbrige tire partie de cette propriété. Chaque pôle inducteur est sectionné en trois parties sur chacune desquelles sont bobinés deux enroulements ; l'un de ces derniers est le bobinage inducteur principal monté en dérivation, l'autre est l'enroulement de réglage ; tous les enroulements principaux sont reliés en série et excités à la manière ordinaire ; pour les enroulements de réglage, les connexions sont différentes : ceux des deux sections extérieures de tous les pôles sont reliés en série entre eux, et ceux des sections

centrales sont aussi reliés en série. On fait croître la tension continue de la commutatrice en excitant toutes les sections extérieures des pôles de façon à renforcer le champ principal, et en fournissant aux sections centrales une excitation égale à celle des sections extérieures, mais de sens contraire au champ principal. En faisant l'inverse, on abaissera la tension continue. Il suffit d'insérer un rhéostat de champ dans les circuits inducteurs de réglage.

On se demande naturellement quel est l'effet de ce dispositif sur le fac-

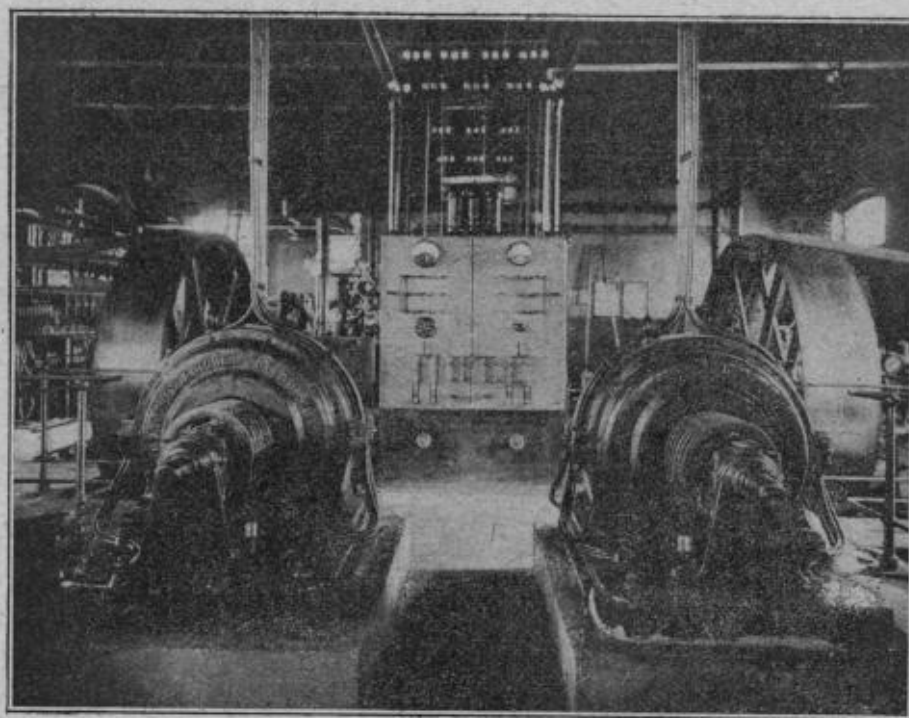


FIG. 1207. — Commutatrices hexaphasées de 150 kw., 50 périodes, 550 volts côté continu, 1.500 tours. (C^{ie} Électro-Mécanique).

teur de puissance. On a constaté, sur un certain nombre de machines construites de cette manière et mises en fonctionnement, qu'on peut maintenir constant le facteur de puissance à toutes charges, tout en disposant des variations désirées pour la tension.

Une autre méthode encore plus simple a été proposée depuis ; elle est due à M. J.-L. Burnham. Chaque pôle est sectionné en deux parties, et chaque partie porte un seul enroulement. La section la plus grosse porte l'enroulement inducteur principal, et le réglage s'obtient entièrement en faisant varier dans un sens ou dans l'autre l'excitation de la plus petite section.

Les pôles additionnels sont particulièrement indiqués pour les transformateurs, qu'ils soient homomorphiques (courant continu en courant

continu) ou polymorphiques (courant alternatif en courant continu). Ils permettent, en effet, de faire varier dans des limites déterminées le rapport de transformation, c'est-à-dire le rapport de la tension secondaire à la tension primaire.

Dans les machines homomorphiques à une seule carcasse d'induit, ou machine à courant continu munie de deux enroulements séparés aboutissant à deux collecteurs différents, l'emploi des pôles additionnels permet de compounder la dynamo et d'atteindre le rapport de transformation désiré, avantages qui rendent maintenant plus acceptables les machines homomorphiques.

Si, dans ce cas, les pôles additionnels sont munis d'un enroulement shunt en relation avec un régulateur, il est possible de faire varier à volonté la tension de la dynamo et si l'on emploie un enroulement série qui puisse être excité par le courant du moteur ou par le courant du générateur, la dynamo a la caractéristique d'une machine compoundée ou hypercompoundée. Un bobinage compound des pôles additionnels offre le moyen de régler la tension à vide et de maintenir sa constance pour les différentes charges.

Lorsque les pôles additionnels ont un enroulement série, on peut employer une partie de leur champ à la commutation de l'un ou l'autre jeu de balais (partie dynamo et partie motrice), de sorte que le pôle additionnel agisse en même temps comme pôle de commutation. Dans les machines polymorphiques l'emploi des pôles additionnels est très important car ils permettent d'obtenir directement des variations du rapport de transformation dans un sens ou dans l'autre.

Les avantages présentés par l'addition de pôles supplémentaires aux commutatrices peuvent être résumés comme suit : pour une capacité déterminée et pour des charges très variables, possibilité de construire une machine moins encombrante par suite de la réduction de son diamètre ; la capacité de la machine n'est plus limitée que par son échauffement, la commutation ne devenant plus une cause limitative de la charge.

Quand une commutatrice est alimentée par du courant continu à tension constante, en modifiant l'intensité du champ, on modifie en sens inverse la vitesse angulaire, et le rapport entre les tensions reste invariable ; seule la fréquence du courant alternatif change. Mais, si la machine reçoit du courant alternatif à potentiel constant et à fréquence invariable, la vitesse angulaire reste constante, et l'appareil fonctionne comme moteur synchrone.

Ordinairement, la ligne triphasée qui alimente les sous-stations est à un haut voltage que l'on amène à une valeur modérée à l'aide de transformateurs statiques, et on associe à la commutatrice un groupe de démar-

rage. Pour maintenir la tension constante, malgré les variations de charge, on utilise soit des bobines de self, soit des survolteurs. On intercale entre le réseau polyphasé et la commutatrice un survolteur polyphasé, ou entre le réseau continu et la commutatrice un survolteur à courant continu. La machine survoltrice peut être indépendante de la commutatrice ou montée sur le même arbre. L'introduction d'une self-induction variable dans le circuit du courant alternatif avec compoundage de la commutatrice présente l'inconvénient de faire varier le facteur de puissance avec la charge, ce qui peut obliger à prévoir une ligne de transmission plus

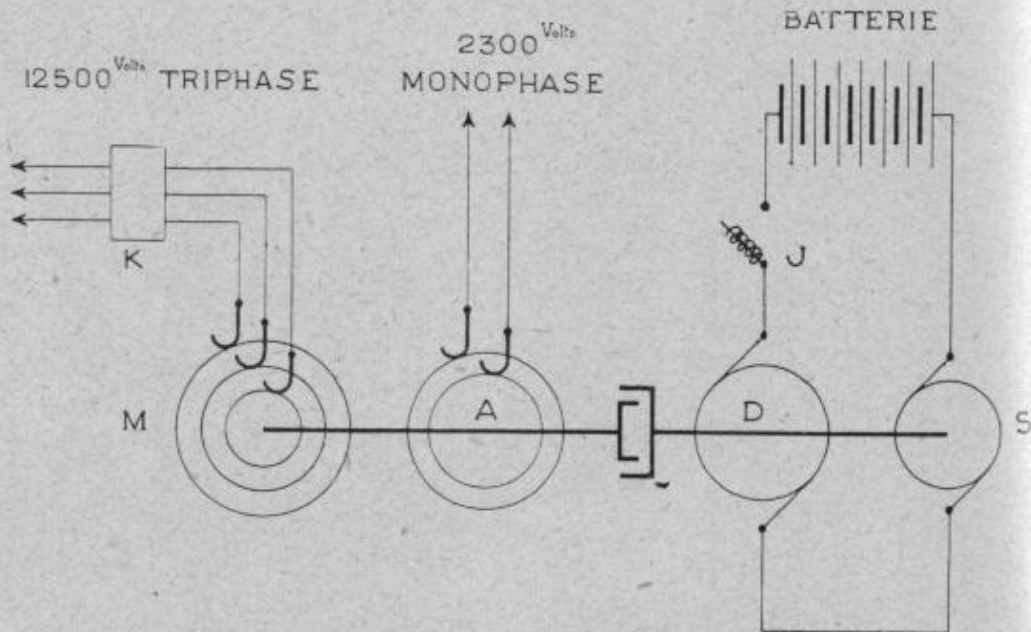


FIG. 1208. — Schéma montrant le principe du système de secours pour groupes convertisseurs. (Système Thomson-Houston).

A, Alternateur; — K, Interrupteur automatique; — J, Disjoncteur;
M, Moteur synchrone; — S, Survolteur.

forte qu'il est nécessaire. Quand les connexions de l'induit sont établies suivant le système à double triangle — système dans lequel le rapport de transformation est égal à 0,613 comme dans le cas du simple montage en courant triphasé — chaque transformateur doit être divisé en deux sections indépendantes. Mais, si on a recours au montage diamétral, il n'est plus nécessaire de subdiviser les bobines secondaires du transformateur, et le rapport de transformation est égal à 0,707.

Le survolteur est parfois un convertisseur spécial dont le primaire constitué par stator de moteur asynchrone, est branché en dérivation sur le réseau et le secondaire, formé par le rotor, est intercalé entre le réseau et la commutatrice et pouvant se déplacer par une commande à main d'un angle correspondant à un double champ du stator. Les forces élec-

tromotrices produites dans le rotor par le champ tournant du stator ont une situation variable suivant la position du rotor.

Les commutatrices présentent un rendement plus avantageux que les moteurs-générateurs ⁽¹⁾, surtout aux faibles charges, et il est d'autant plus accentué que la machine fonctionne à des fréquences plus basses ; une commutatrice avec son transformateur-abaisseur donne un rendement moyen de 91 à 92 0/0. Elles possèdent une plus grande puissance par kilogramme de matériaux actifs que les moteurs-générateurs de même force et une plus grande souplesse au point de vue de la capacité de surcharge ou de l'échauffement. Autrement dit la commutatrice est supérieure au moteur-générateur ; de plus, dans la première, l'échauffement n'est nullement fonction du couple mécanique. Au point de vue du pompage, les dispositifs amortisseurs de M. M. Leblanc donnent de bons résultats avec les commutatrices ; mais, lorsque celles-ci sont à fréquence élevée, elles y sont plus sensibles que les moteurs-générateurs.

La fréquence est généralement supérieure à 15 cycles, et inférieure à 45 cycles par seconde.

Les commutatrices n'exercent pas de couple appréciable sur leur arbre ; pour un champ constant, le facteur de puissance est pratiquement indépendant de la charge sur le côté continu. Quand un réglage précis est nécessaire (réseau d'éclairage), on emploie un appareil du genre d'un régulateur d'induction réglé à la main, ou un survolteur-dévolteur permettant de faire varier la tension alternative.

A Paderno, pour maintenir constante la tension des circuits de distribution pour l'éclairage des villes et villages, la maison Siemens et Halske a constitué le régulateur de tension en insérant en série dans chacun des conducteurs d'alimentation les trois circuits d'un moteur triphasé, dont le rotor immobilisé est excité en dérivation. Le rotor est plus ou moins décalé par rapport au stator, par un dispositif mécanique. Le nombre d'alternances est d'autant plus bas que la tension est plus élevée. Pour des tensions de 500 à 600 volts, la fréquence la plus convenable est voisine de 25 périodes. A cette dernière alternance, les machines à 4 pôles font 750 tours, à 8 pôles 375 tours, et à 10 pôles, 300 tours.

Pour les machines de traction, on obtient un bon résultat en employant des enroulements inducteurs compounds et en installant une réactance convenable entre la commutatrice et les transformateurs qui l'alimentent.

479. Démarrage et réglage des commutatrices. — Si la commutatrice est destinée à transformer de l'alternatif en continu, la machine

⁽¹⁾ Le rendement à pleine charge d'une commutatrice de 500 kilowatts atteint sensiblement 0,95.

se comporte comme un moteur synchrone, et il faut la faire démarrer à vide ; dès que le synchronisme est atteint, on ferme le circuit d'excitation, puis le circuit extérieur à courant continu.

Pour faire démarrer les commutatrices comme moteurs à courant continu, on a le plus souvent recours aux accumulateurs, et on procède suivant les règles ordinaires de la mise en marche de ce genre de moteurs.

On fait parfois usage d'un petit groupe moteur d'induction-dynamo ou d'une autre commutatrice voisine, cette dernière ayant dû être accrochée au réseau par un procédé différent, dans lequel cas il faut prendre soin de couper les connexions aux secondaires des transformateurs-abaisseurs.

Le démarrage des commutatrices est le plus souvent effectué par le côté continu, et l'accrochage sur le courant triphasé est fait au moment où la machine est en phase avec le réseau.

La mise en marche d'une commutatrice, sa synchronisation et son couplage sur le tableau sont très rapides (une minute et demie à deux minutes). Une seule petite génératrice à courant continu peut suffire pour toute l'usine.

Si l'on ne dispose pas de courant continu pour le démarrage, on effectue celui-ci sur le courant triphasé. On peut faire tourner la machine comme moteur synchrone, ou bien la lancer au moyen d'un petit moteur asynchrone, n'ayant pas autant de pôles que la commutatrice elle-même et d'une puissance d'environ le dixième de celle du convertisseur.

Ce système offre l'inconvénient que la commutatrice peut ne pas démarrer si la tension alternative fournie au moteur d'induction est un peu faible (20 0/0 seulement) par suite d'un trouble quelconque à la centrale ou sur la ligne primaire. D'autre part, tout accident au moteur de démarrage immobilise la commutatrice correspondante.

Lorsqu'on démarre les commutatrices du côté alternatif en moteur asynchrone, on n'a aucune dépense d'installation et d'entretien d'appareils accessoires et la mise en marche et en couplage est très rapide : de 95 à 120 secondes suivant que la puissance de la machine varie de 300 à 1.500 kilowatts. Le courant employé au démarrage, à cause de la tension appliquée, ne dépasse pas la valeur du courant normal. Dans la mise en vitesse en moteur asynchrone, des forces électromotrices élevées prennent naissance dans les bobines des inducteurs ; on y obvie en coupant les enroulements inducteurs en plusieurs points. On atteint le synchronisme tout naturellement sans avoir à faire des réglages de vitesse ; mais, si une baisse subite de fréquence survient pendant l'opération, par l'effet d'un court-circuit ou du dérèglement d'un régulateur de machines à vapeur, des oscillations prennent naissance dans le convertisseur et peuvent même l'arrêter. L'inconvénient le plus sérieux de la méthode est de ne pas permettre l'emploi de commutatrices comportant sur les inducteurs des amor-

tisseurs, car ils deviendraient au démarrage le siège de courants induits trop intenses.

Lorsque la puissance de la commutatrice n'est pas hors de proportion avec la puissance moyenne de la station centrale, on peut brancher directement cette machine sur le réseau en la faisant démarrer en moteur synchrone à vide.

Quelquefois on utilise un démarreur spécial monté en bout de l'arbre

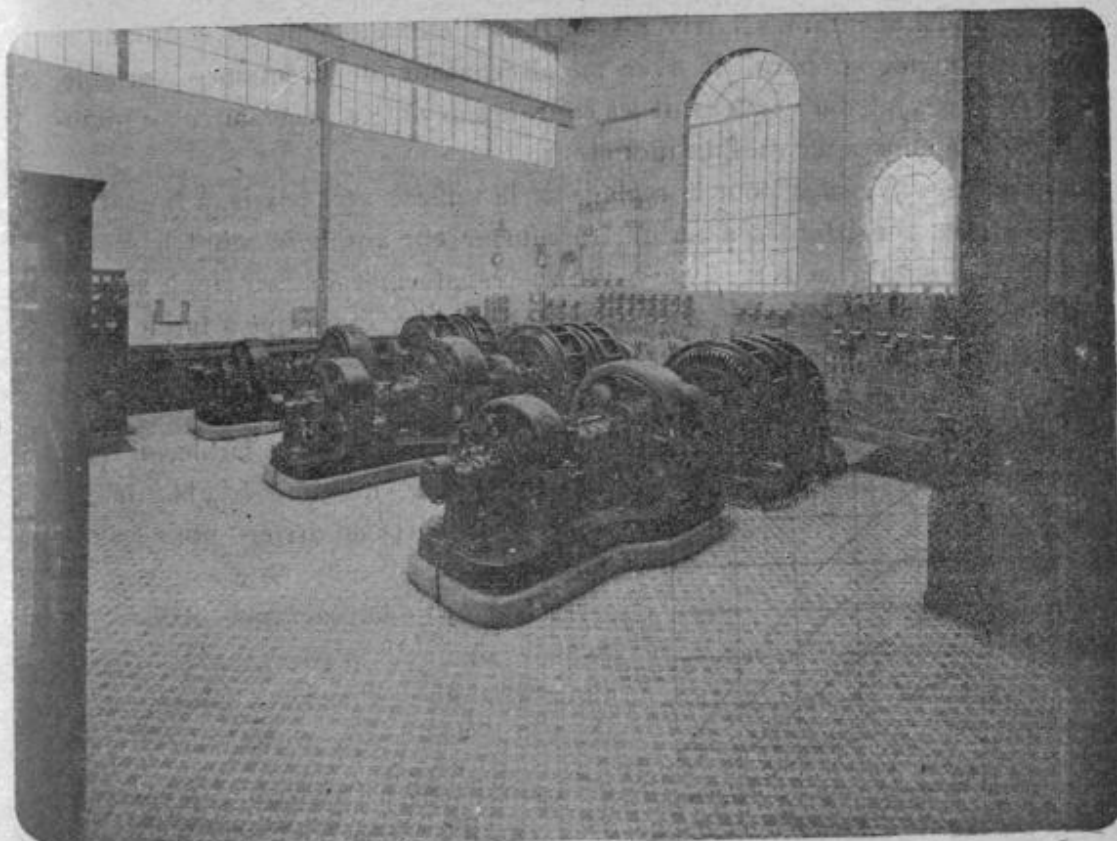


FIG. 1209. — Groupes convertisseurs pour éclairage et tramways.
(C^{ie} Thomson-Houston).

de la commutatrice ; alors le moteur démarreur possède un nombre de pôles légèrement inférieur à celui de la commutatrice. On produit ainsi dans le démarreur un champ à vitesse angulaire plus élevée que dans la commutatrice, et on fait démarrer celle-ci à vide au moyen du démarreur qui l'entraîne à une vitesse supérieure à celle du synchronisme. Enfin on excite la commutatrice, puis l'on supprime l'alimentation du moteur. Quand le synchronisme existe entre le réseau et le courant produit par la commutatrice, moment qui s'observe au moyen des lampes de phase, on ferme celle-ci sur le réseau de l'alternatif.

Le plus souvent les sous-stations possèdent plusieurs commutatrices ;

on intercale alors un groupe générateur-moteur, et l'on utilise le courant continu pour le démarrage. Si la self-induction du courant qui alimente une commutatrice est négligeable, la commutatrice reste complètement insensible aux variations de l'excitation.

Le démarrage des appareils à courant alternatif alimentés par la commutatrice exige des courants déwattés et décalés de 90° en arrière de la tension, d'où une tendance à la diminution du champ et à l'emballement pour le moteur à courant continu constitué par la commutatrice.

On peut, néanmoins, arriver à détruire l'emballement en couplant la commutatrice en parallèle avec un alternateur de fréquence variable. Dans ce cas, ce dernier fournit les courants déwattés nécessaires au maintien de la constance du flux inducteur.

Les moyens usités pour le réglage de la tension aux balais, à la station réceptrice, consistent soit en un transformateur auxiliaire dont le secondaire est monté en série avec celui du transformateur principal, soit en un régulateur d'induction, ou enfin en une bobine inductive à faible résistance ohmique et à forte réactance.

Le facteur de charge, quand il s'agit de réseaux à débit variable (traction) étant généralement faible, on règle l'excitation de manière à obtenir un courant déwatté en arrière pour les débits faibles.

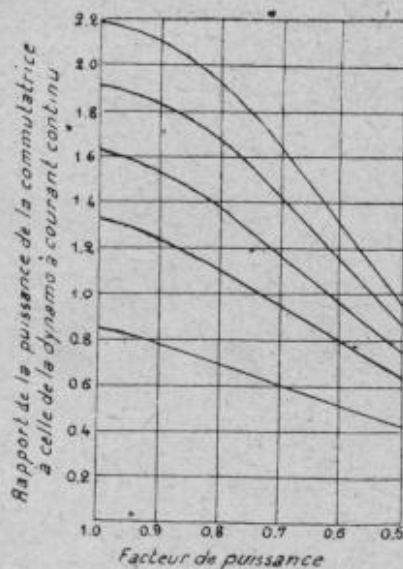


FIG. 1210. — Variation de la capacité des commutatrices en fonction du nombre de bagues, suivant le facteur de puissance.

La valeur de la réactance utilisée est fréquemment de 15.0 /0, taux qui évite l'introduction d'écarts inadmissibles du facteur de puissance entre le générateur et le convertisseur. En divisant chaque pôle de la commutatrice en plusieurs sections munies respectivement d'enroulements inducteurs susceptibles de modifier la distribution du flux à travers la face polaire, il devient possible de faire varier le rapport ci-dessus et de régler ainsi le voltage continu, selon des valeurs déterminées à l'avance, sans autre dispositif complémentaire.

Dans le réglage non automatique, le principe d'application du déphasage obéit aux variations du champ provoquées par la manœuvre du rhéostat d'excitation.

On compte généralement sur l'inductance des appareils pour empêcher un courant trop intense de passer dans les commutatrices, entre le mo-

ment où un court-circuit se produit et celui où le disjoncteur coupe le circuit. M. S.-W. Athie conseille de ne pas s'en tenir à ce mode seul de protection, pas plus que sur les accumulateurs, lorsqu'il y a une batterie-tampon en parallèle sur les barres omnibus, mais de mettre en circuit avec les disjoncteurs une bobine de faible résistance et de forte inductance.

C'est surtout au compoundage que l'on applique la méthode de régulation par réglage de l'excitation aux machines ordinaires, non munies de pôles auxiliaires pour compenser la perte entre les sous-stations ou même la perte en amont des sous-stations (traction électrique). L'effet ne dépasse guère en pratique 15 0/0.

Quand on veut compounder ou hypercompounder faiblement une commutatrice on place une bobine de self en série sur le courant alternatif. En faisant croître l'excitation avec le courant débité par l'adjonction de bobines inductrices placées en série sur le circuit à courant continu, on surexcite aux fortes charges la machine. Dans ces conditions le courant alternatif se décale en avant de la tension et la bobine de self produit une augmentation de la tension alternative d'alimentation. En combinant convenablement la self et les spires série de l'induit on peut compenser exactement le voltage perdu par réaction d'induit et réaliser le couplage parfait de la machine. Et l'hypercompoundage s'obtient en augmentant l'action de la bobine de self.

Pour sous-compounder, c'est-à-dire augmenter la chute de tension d'une commutatrice on emploie une bobine de self, mais en inversant les connexions des bobines inductrices série. On utilise ce système quand la commutatrice doit fonctionner en parallèle avec une batterie tampon.

Au point de vue économique, on doit naturellement faire travailler les commutatrices à charge sensiblement constante. A cet effet, l'emploi de batteries couplées en parallèle est très utile et se répand de plus en plus. Dans ce cas, on recharge la batterie à l'aide d'un survolteur-dévolteur. Le circuit inducteur de cette dernière machine est branché en dérivation sur une portion de la batterie, et la résistance du rhéostat varie automatiquement à mesure que le courant continu, débité par les barres omnibus, augmente. Quand les commutatrices sont hyperexcitées, elles peuvent débiter du courant déwatté, permettant de relever le facteur de puissance et, par suite, d'améliorer le rendement de la ligne.

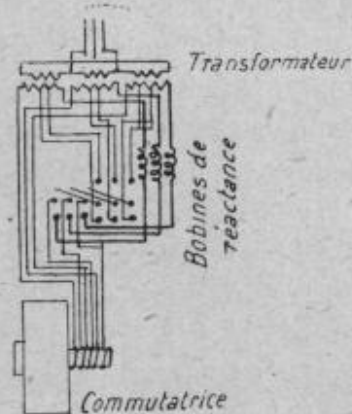


FIG. 1211. — Montage d'une commutatrice hexaphasée avec bobines de réactance et démarrage par le courant alternatif.

L'installation faite par la Compagnie *Hamburg Metropolitan and Suburban Railway* — qui comporte trois machines susceptibles de fonctionner comme génératrices ou motrices, suivant les cas et les besoins des divers services alimentés qui sont : 1° un service de traction par du courant alternatif simple à 25 périodes par seconde et 3.200 volts ; 2° un service d'éclairage par du courant alternatif simple à 50 périodes par seconde ; 3° enfin, un service de courant continu à 220 volts pour l'excitation des machines et les services accessoires — montre tout le parti que l'on peut tirer des convertisseurs rotatifs.

Chaque groupe convertisseur comprend une dynamo et deux alternateurs. Ces derniers sont à inducteurs tournants disposés très voisins, et comportant respectivement 8 et 16 pôles saillants, nombres qui correspondent, pour les fréquences 25 et 50, à la vitesse de 375 tours par minute.

Grâce à cette disposition des inducteurs, le convertisseur a l'apparence extérieure d'une machine double, dont les alternateurs occupent à peu près la moitié, et la dynamo à courant continu avec le collecteur et les porte-balais plus encombrants l'autre moitié, séparée de la première par un palier. Du côté des alternateurs, la même carcasse induite correspond aux deux inducteurs.

Les deux groupes affectés au service ont des puissances différentes, ce qui permet de fonctionner dans des conditions plus économiques :

A. L'un comporte deux alternateurs de 600 kilowatts en génératrice, et 900 chevaux en moteur, tension 6.300 volts, et une machine à courant continu de 250 kilowatts, tension 220 volts.

B. Un alternateur de 250 kilowatts à 25 périodes par seconde, 6.300 volts, donnant 380 chevaux comme moteur ; un alternateur à 50 périodes par seconde, de 150 kilowatts ou 200 chevaux et une machine à courant continu de 250 kilowatts à la tension de 220 volts.

On voit que non seulement la puissance des alternateurs a été changée dans ce groupe, mais aussi leurs proportions, pour répondre aux besoins du service.

La condition particulièrement intéressante de leur fonctionnement est la résolution des trois cas suivants, envisagés :

1° La machine à 25 périodes par seconde doit emprunter de l'énergie au circuit de traction et fournir de l'énergie mécanique aux deux autres machines qui la restituent sous forme de courant alternatif au circuit d'éclairage, et de courant continu à la batterie d'accumulateurs ;

2° La machine à 50 périodes par seconde peut, au contraire, travailler à son tour comme moteur, en communiquant de l'énergie mécanique à l'alternateur alimentant le circuit de traction, et à la machine à courant continu pour charger la batterie ;

3° Enfin, la dynamo à courant continu emprunte à la batterie du courant, que les autres machines peuvent restituer sous forme de courant alternatif, éventualité qui comprend comme cas particulier, et de beaucoup, plus fréquent, la mise en marche et la synchronisation.

480. Synchronisation des commutatrices. — a) *Commutatrices monophasées.* — L'opération de la synchronisation consiste, comme l'on sait, à amener la commutatrice approximativement à la vitesse du synchronisme et à la même tension que celle du réseau qui doit l'alimenter.

Les lampes de phase peuvent être directement reliées aux circuits intéressés ou être montées sur les secondaires de transformateurs montés en dérivation. Dans le premier cas les lampes restent éteintes au moment où les tensions des machines à accoupler ont la même valeur et sont de même sens par rapport au circuit extérieur. Au contraire, à tout autre instant, cette condition n'est pas réalisée et un courant circule entre les deux machines et les lampes l'indiquent par leur éclat. L'éclairement est maximum lorsque les tensions, étant égales, sont de sens opposé par rap-

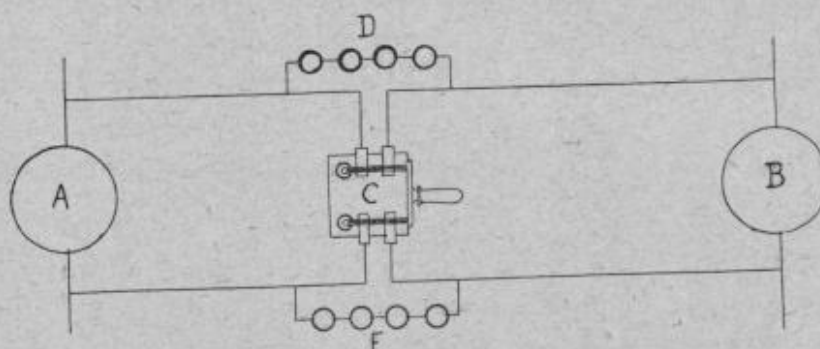


FIG. 1212. — Montage sans transformateur d'une commutatrice monophasée.

port au circuit de travail. Lorsque les vitesses angulaires des deux machines sont très différentes, il se produit des battements dans les lampes, d'autant plus répétés que les machines s'éloignent du synchronisme.

Dans le second cas, les lampes sont au maximum ou au minimum d'éclat lorsque les forces électromotrices sont en concordance de phase. Généralement, dans la pratique, les connexions s'établissent de manière à obtenir le minimum d'éclat des lampes lorsque le synchronisme est atteint. Pour déterminer si le couplage doit se faire lors de l'extinction ou de l'allumage des lampes, pour des connexions données des transformateurs, on soulève les balais des bagues de la commutatrice et on ferme l'interrupteur de couplage. Les primaires des deux transformateurs se trouvent alors branchés en parallèle sur la ligne, et le circuit de synchro-

nisation fonctionne dans les mêmes conditions que si l'interrupteur principal était ouvert et la commutatrice en phase avec la ligne.

Dans le but de remédier aux inconvénients des lampes, qui, entre autres, n'indiquent pas si la vitesse de la commutatrice est trop faible ou trop grande, la Société Westinghouse a réalisé un instrument qui comporte une aiguille indicatrice dont les déplacements par rapport à l'index vertical de l'appareil, à droite et à gauche, sont proportionnels aux écarts angulaires des deux machines, suivant que la vitesse angulaire de la machine à coupler est supérieure ou inférieure à celle de la génératrice. Lorsque la fréquence de la commutatrice est égale à celle de la génératrice, l'aiguille s'arrête dans une position déterminée et, quand la com-

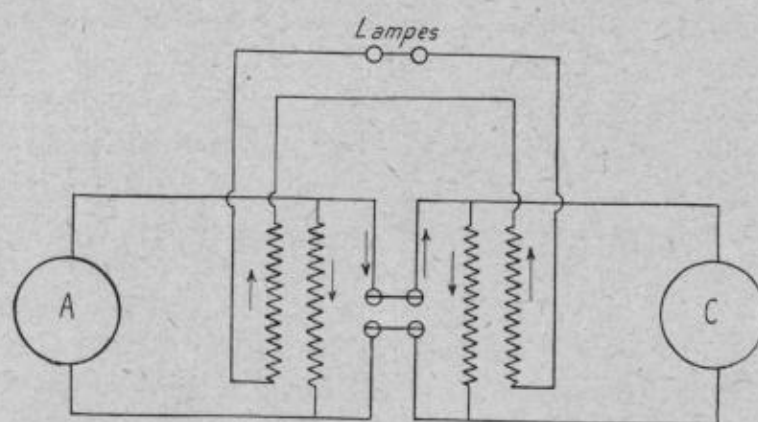


FIG. 1213. — Montage avec transformateur d'une commutatrice monophasée.

mutatrice est en concordance de phase, l'aiguille vient en regard de l'index vertical et à ce moment on peut effectuer le couplage. L'instrument précité est relié aux barres omnibus par l'intermédiaire de deux transformateurs montés en dérivation et à la machine à coupler par un troisième transformateur.

On évite toute incertitude résultant du couplage effectué à la main par l'emploi des synchroniseurs automatiques, constitués par deux solénoïdes dont les noyaux mobiles sont suspendus à leur partie supérieure aux extrémités d'un fléau pivotant autour de son centre, comme un fléau de balance. Les connexions des enroulements des deux solénoïdes sont telles qu'au moment du synchronisme, celui de droite reçoit un courant maximum et celui de gauche un courant minimum. Le premier est relié comme des lampes installées pour le couplage à l'allumage, le second comme des lampes disposées pour le couplage à l'extinction. Avec cet instrument, les commutatrices ne peuvent être couplées qu'autant que les tensions sont approximativement égales, que les machines sont en concordance de phase et que leurs fréquences sont les mêmes.

b) *Commutatrices polyphasées.* — Pour déterminer l'ordre des phases d'une commutatrice triphasée, le moyen le plus pratique consiste à relier les trois câbles de la commutatrice à l'interrupteur sans se préoccuper de leur ordre, et de rectifier, au besoin, les connexions en se servant d'un indicateur de synchronisme.

Si les lampes de synchronisme sont branchées directement sur l'interrupteur principal, il faut trois séries de lampes, à moins que l'installation comporte des interrupteurs séparés pouvant être fermés indépendamment les uns des autres. Dans ce dernier cas, on peut brancher les lampes sur deux des interrupteurs et fermer le troisième.

Si l'on a recours à des transformateurs, il suffit d'avoir deux séries de lampes, puisque chaque transformateur est branché sur deux câbles du circuit triphasé. On fait l'essai sur chacune des deux séries de lampes, en procédant comme on l'a déjà indiqué, afin de s'assurer qu'elles s'éteignent lorsque le synchronisme est atteint.

Quand la commutatrice est convenablement couplée sur la ligne, les lampes doivent s'allumer et s'éteindre en même temps, sinon il faut interchanger les paires de câbles. Dès que l'on a la certitude que toutes les lampes fonctionnent d'une façon identique, une seule série suffit pour synchroniser la commutatrice.

c) *Commutatrices diphasées.* — On commence par reconnaître les circuits principaux de la commutatrice, que l'on relie à l'interrupteur, de manière qu'ils correspondent dans les deux machines et, pour s'assurer que les connexions sont bien établies, on place sur chacune des deux phases un indicateur de synchronisme disposé comme dans les cas du courant alternatif simple. Si l'on utilise des transformateurs avec des lampes, il faut essayer séparément chacune des séries de lampes pour s'assurer qu'elles s'éteignent au moment où le synchronisme est atteint. Si les connexions sont bien établies, les deux séries de lampes brillent et s'éteignent en même temps, et la commutatrice est synchronisée.

481. Couplage en parallèle des commutatrices. — Le couplage en parallèle des commutatrices s'effectue aisément tant sur le côté continu que sur le côté alternatif.

a) *Couplage sur le côté continu.* — Pour coupler en parallèle plusieurs commutatrices devant alimenter en courant continu un même réseau, on procède comme pour les dynamos shunt ou compound, et la charge se répartit entre les machines suivant leur tension. Pour les commutatrices compound, on doit, avant tout, fermer le circuit sur le fil d'équilibre pour ne pas inverser la polarité des inducteurs. Dans le cas de deux commutatrices fortement compoundées, il convient de mettre en court-circuit les bobines-série de la seconde machine au moment de brancher

cette dernière sur le réseau à alimenter. En effet, dans la première machine, l'intensité du champ augmente par suite du partage de la charge, tandis que la valeur du champ diminue dans la seconde, qui donne lieu à un courant de circulation considérable entre les machines, lequel peut déterminer un changement de polarité de la commutatrice, qui supporte la charge ou un fort afflux de courant dans les feeders alternatifs.

Un relais, qui fait ouvrir le disjoncteur à courant alternatif lorsque le courant continu tend à s'inverser dans la commutatrice, donne une sécurité qui n'existe pas en son absence ; il oblige l'opérateur à apporter plus d'attention dans le couplage des machines.

Le réglage de la tension s'effectue en agissant sur la tension alternative, soit en réglant l'excitation de manière à compenser les chutes de voltage dans l'induit, soit en déplaçant les balais sur le collecteur de façon à obtenir moins que le maximum de tension.

b) *Couplage sur le côté alternatif*. — Il faut éviter de coupler plusieurs commutatrices sur le même secondaire d'un transformateur, lorsque ces machines alimentent un même réseau, à cause des courants de circulation considérables auxquels donne lieu ce mode d'opérer. Il est préférable d'alimenter chaque commutatrice par un transformateur séparé, ou tout au moins par des secondaires distincts lorsqu'on utilise une série de transformateurs.

Quand on a une commutatrice à faire fonctionner en parallèle avec une autre, il est préférable de coupler la machine au moment où la charge de la première est minima et, si la charge de celle-ci est considérable et constante, et si son compoundage est important, il est bon de mettre en court-circuit les enroulements série des deux commutatrices. Pour réduire au minimum la dépense de courant alternatif, on règle au minimum le rhéostat d'excitation.

Pour la mise en parallèle d'une commutatrice avec plusieurs autres, les opérations et précautions à observer sont les suivantes : brancher le moteur de démarrage au moyen de l'interrupteur comme on le ferait pour un moteur indépendant ; relier les conducteurs alternatifs aux barres omnibus ; caler les balais et relier les conducteurs à leurs interrupteurs respectifs qui correspondent aux barres positives, négatives et égalisatrices communes aux autres commutatrices ; s'assurer que le circuit d'excitation est constitué de la même manière que dans les autres machines ; vérifier les connexions du voltmètre ainsi que le circuit des lampes de synchronisme, puis enfin faire démarrer la commutatrice en fermant l'interrupteur du moteur de démarrage. Lorsque la commutatrice a atteint la vitesse angulaire normale, on excite la machine à l'aide du rhéostat. Si la tension s'établit dans le sens voulu, on synchronise d'après l'examen des lampes et l'on couple au moment propice. La synchroni-

sation étant obtenue, on charge la commutatrice sur le côté continu et on vérifie le sens des bobines-série en les court-circuitant et en examinant les indications du voltmètre. La commutatrice est alors prête à fonctionner en parallèle par ses deux côtés.

Quand on veut retirer une commutatrice du circuit, on commence par ouvrir les disjoncteurs du côté continu, à l'effet de supprimer la charge de la machine, puis on ouvre successivement les interrupteurs du côté continu, les disjoncteurs du côté alternatif et, enfin, les interrupteurs du côté alternatif. On amène ensuite le rhéostat à sa résistance maxima, en s'assurant que toutes les fiches de synchronisme sont enlevées, et on essuie le collecteur avant que la commutatrice soit arrêtée.

Au point de vue du réglage de la tension, nous avons vu que, pour faire varier le voltage aux bornes du courant continu, on pouvait employer un survolteur alternatif, constitué par un alternateur calé à une des extré-

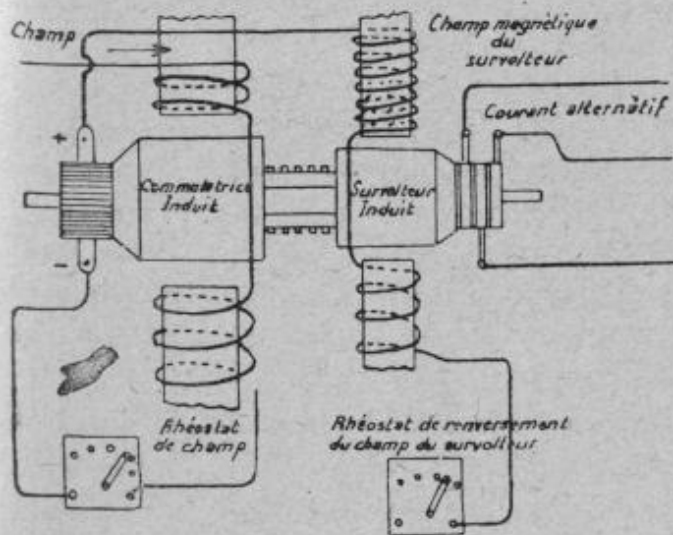


FIG. 1215. — Schéma de commutatrice avec survolteur.

mités de l'arbre de la commutatrice et monté en série avec le courant alternatif alimentant la commutatrice. On peut aussi, en combinant la réactance de la ligne d'alimentation et la valeur de l'excitation de la commutatrice, faire varier la tension aux bagues alternatives de la commutatrice et, par suite, celle du courant continu débité par la machine.

Par une combinaison judicieuse de la valeur de la réactance du transformateur alimentant la commutatrice et de celle des enroulements compound, on arrive à ne pas dépasser 10 à 12 0/0 entre la marche à vide et celle à pleine charge d'une commutatrice.

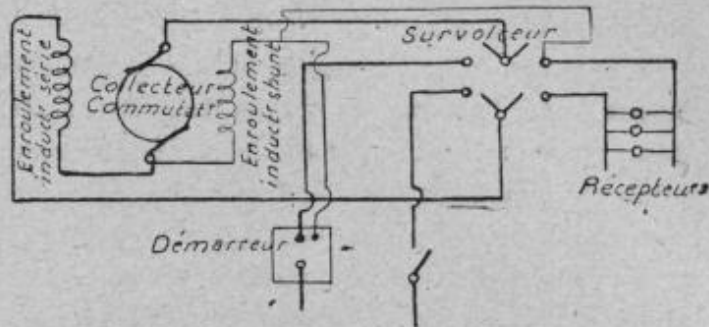


FIG. 1214. — Schéma de commutatrice avec survolteur.

482. Rendement des commutatrices. — En concentrant le champ magnétique, c'est-à-dire en donnant un plus faible développement aux épanouissements polaires, ce qui a pour effet de diminuer les fuites magnétiques, on augmente le rendement.

Dans le cas de moteurs-générateurs, si le moteur alternatif est à basse tension, une batterie de transformateurs statiques est indispensable. Alors, en admettant un rendement de 0,95 pour chacune des machines et un rendement moyen de 0,96 pour les transformateurs, on obtient pour le rendement total $(0,95 \times 0,95 \times 0,96) = 0,86$, rendement inférieur à celui de l'ensemble constitué par un transformateur et une commutatrice, car le convertisseur peut dépasser à lui seul 94 0/0.

Mais, dès que l'on emploie les systèmes survolteurs, le rendement tombe vite pour se rapprocher de celui des moteurs-générateurs. Les prix s'identifient aussi.

Les commutatrices triphasées à 6 bagues sont supérieures à toutes les autres ; on a obtenu des rendements de 96 0/0 et plus à pleine charge et 93 0/0 à demi-charge, les cycles variant de 25 à 60.

En ce qui concerne les pertes par frottements, hystérésis, courants de Foucault, ainsi que par effet Joule dans l'inducteur, la commutatrice fonctionne à cet égard dans les mêmes conditions qu'une dynamo de construction identique. Mais, relativement aux pertes par effet Joule dans l'induit, l'échauffement est d'autant moindre que le nombre de phases du courant alternatif est plus grand, ce qui entraîne une plus faible intensité du courant dans les conducteurs.

L'influence du facteur de puissance est mise en évidence par les chiffres suivants, dans l'hypothèse d'un flux réparti sur les $2/3$ de l'espace polaire. La puissance relative pour $\cos \alpha = 1$, $\cos \varphi = 0,9$, $\cos \varphi = 0,8$ a respectivement pour valeurs : 1,38, 1,28 et 1,17. Ces rapports doivent être affectés dans la pratique d'une diminution de 10 0/0.

En mesurant directement la tension entre deux bagues et l'intensité du courant dans la ligne, on en déduit les valeurs du facteur de puissance.

Le rendement des commutatrices se détermine par l'une des méthodes précédemment décrites : directe, d'opposition ou des pertes séparées ⁽¹⁾.

Dans la méthode d'opposition, si on a deux commutatrices identiques, un procédé très simple et ne nécessitant ni grande dépense d'énergie, ni grande puissance disponible, consiste à relier doublement les deux machines par les bagues et par les balais, en interposant une dynamo sur-

⁽¹⁾ M. Sacerdote a réalisé industriellement un genre de convertisseur à rendement élevé, où l'induit est fixe ainsi que le stator. Ce dernier entoure le rotor, et l'entrefer peut être supprimé. Les balais actionnés par un petit moteur synchrone tournent synchroniquement avec le champ.

voltrice du côté courant continu. Le rendement d'une commutatrice ne peut être déterminé à sa vraie valeur que sur le réseau auquel elle est destinée.

Les commutatrices étant des moteurs synchrones, la variation de l'intensité efficace varie en fonction du courant inducteur, variation qui est donnée à chaque régime par une courbe en V (fig. 1216) comme dans les moteurs synchrones. Si l'essai en charge de la commutatrice est possible on pourra facilement tracer ces courbes. On peut, en même temps, déterminer la caractéristique externe de la machine : tension aux bornes du courant continu en fonction de l'intensité débitée. Cette courbe a la même forme que celle d'une dynamo shunt. Elle permet de vérifier l'efficacité des dispositifs employés pour le maintien de la tension constante aux bornes du courant continu.

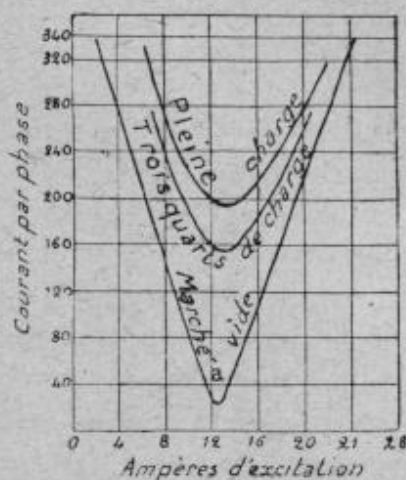


FIG. 1216.

483. Commutatrices en cascade. — Nous avons vu que les commutatrices ont un rendement plus élevé que les moteurs-générateurs, un prix de premier établissement inférieur à ceux-ci, et qu'elles conviennent très bien aux installations de traction. De plus, les commutatrices sont réversibles. D'autre part, les moteurs-générateurs se plient à toutes les tensions et à toutes les fréquences, ce qui les rend particulièrement propres aux installations d'éclairage, mais ils ne peuvent fournir du courant alternatif d'une façon pratique en les alimentant par du courant continu.

Enfin, les moteurs-générateurs peuvent démarrer du côté alternatif, ce qui n'est pas possible avec les commutatrices ; ils n'offrent, en outre, aucun danger de renversement de polarité de la machine à courant continu pendant le démarrage, ne se décrochent pas et sont moins délicats de fonctionnement que les commutatrices.

Les propriétés du convertisseur en cascade tiennent à la fois de celles de la commutatrice et de celles du moteur-générateur. Le démarrage en alternatif, moins facile que celui du moteur-générateur, est néanmoins beaucoup plus commode que pour une commutatrice. Il en est de même pour le démarrage en continu moins aisé qu'avec le moteur-générateur-synchrone, mais susceptible d'être obtenu sans à-coups de courant au démarrage, comme c'est le cas de la commutatrice. La mise en parallèle de plusieurs convertisseurs en cascade ne présente aucune difficulté, et la tension continue ne subit pas de variations du fait de celles de la tension

ou de la fréquence du réseau alternatif. L'action des harmoniques supérieurs est peu sensible et la commutation peut être rendue très bonne par l'adjonction de pôles auxiliaires. Le rendement du convertisseur en cascade est inférieur à 1 ou 2 0/0 à celui d'une commutatrice, mais il reste supérieur à celui du moteur-générateur, surtout aux marches à charge réduite.

La (fig. 1217) représente le schéma des connexions d'un convertisseur en cascade. En principe cette machine est constituée par un moteur d'induction, dont le rotor est muni d'un enroulement polyphasé et d'une dynamo couplés électriquement et mécaniquement.

Admettons, tout d'abord, pour plus de simplicité, que les deux machines aient le même nombre de pôles et que le nombre de tours du groupe soit la moitié de celui qui correspond au synchronisme du moteur asynchrone. Le courant primaire produit un champ tournant qui tourne, par

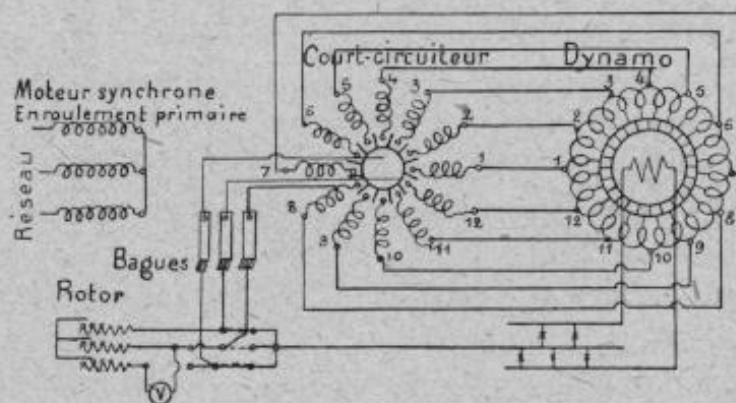


FIG. 1217.

rapport au rotor, avec une vitesse égale au demi-synchronisme ; ce champ induit dans le rotor des f. é. m. dont le nombre de périodes est la moitié de celui du courant primaire. Les f. é. m. envoient des courants polyphasés dans la machine à courant continu ; ces courants produisent un champ tournant, dont la vitesse, par rapport à l'arbre, est la moitié de celle correspondant au synchronisme.

Si les phases du rotor sont connectées de telle manière que le champ tournant tourne en sens inverse de celui de la rotation de l'arbre, ce champ est fixe par rapport à l'espace ; c'est pourquoi la machine, à ce nombre de tours, travaille comme machine synchrone.

Le côté alternatif travaille, moitié comme moteur asynchrone, moitié comme transformateur ; le côté continu, moitié comme générateur à courant continu, moitié comme commutatrice.

Si le côté alternatif et le côté continu n'avaient pas le même nombre de pôles, le convertisseur en cascade ne marcherait plus au demi-synchronisme, mais avec un nombre de tours qui est inversement proportionnel à la somme du nombre de pôles.

Le démarrage du convertisseur en cascade est très simple.

On peut voir (*fig. 1217*) que la machine non excitée peut démarrer comme un moteur asynchrone ordinaire.

En général, il suffit pour cela de relier les trois phases, au moyen de trois bagues, à une résistance de démarrage ordinaire ; quand la vitesse du groupe est suffisante, la machine à courant continu s'excite ; dans les enroulements tournants se superposent des courants dont le nombre de périodes est différent. Quand le groupe s'approche du synchronisme, les nombres des périodes des f. é. m. induites par le champ tournant dans le rotor du moteur asynchrone d'une part, et par l'excitation dans l'induit de la machine à courant continu d'autre part, sont presque égaux.

Ces f. é. m. s'additionnent et se retranchent alternativement. L'aiguille d'un voltmètre, placé entre deux bagues, oscillera donc d'autant plus lentement que le groupe sera plus près du synchronisme. Lorsque ces oscillations seront très lentes et que, de plus, le voltmètre indiquera une déviation minimum, la résistance de démarrage pourra être mise en court-circuit et le court-circuiteur fermé sur les autres phases.

A partir de ce moment, la marche du groupe est synchrone.

Pour l'éclairage, on emploie souvent les convertisseurs en cascade excités en dérivation. Ils ont une chute de tension d'environ 5 0/0 entre la marche à vide et la pleine charge ; le facteur de puissance est pour toutes les charges sensiblement égal à 1.

Le rendement est élevé, surtout pour les faibles charges (dans ce cas environ 86 0/0 pour un quart de la charge normale). Des convertisseurs d'une puissance de 1.500 kilowatts ont donné 93,5 0/0 à pleine charge.

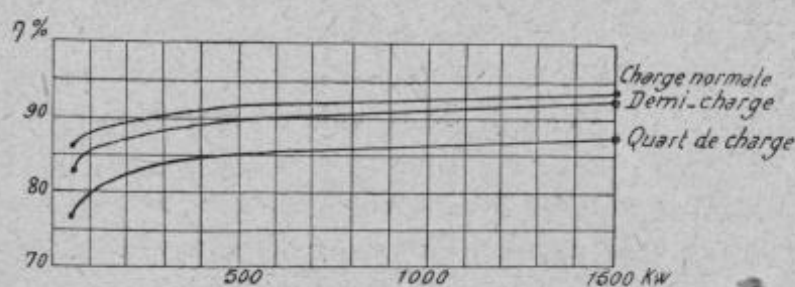


FIG. 1218.

Les courbes de la (*fig. 1218*) représentent le rendement de convertisseurs en cascade de différentes puissances et pour différentes charges.

Comme pour les générateurs à courant continu ordinaires, les convertisseurs peuvent être aussi munis d'un enroulement compound. Quelquefois une très forte chute de tension est exigée, par exemple, si la machine doit travailler en parallèle avec une batterie d'accumulateurs, ce qu'on obtient par une excitation hypercompound.

Pour les machines munies de pôles auxiliaires, ce résultat s'obtient facilement en décalant dans le sens de rotation les pièces polaires de ces pôles, ainsi que les balais. De ce fait, la réaction d'induit est augmentée sans que pour cela la commutation en souffre. De cette manière, on a obtenu des convertisseurs possédant 20 0/0 de chute de tension et qui fonctionnent parfaitement.

Pour des exploitations de traction, on emploie le plus souvent des convertisseurs en cascade hypercompound.

Les convertisseurs munis de pôles auxiliaires supportent de fortes surcharges momentanées ; l'assurance que la polarité de la machine reste la même lors du court-circuitage est aussi un gros avantage de ces convertisseurs dans les installations de trawmays ou de chemins de fer.

Pour ne pas obtenir un grand courant déwatté, on est obligé d'augmenter la réactance de la machine dans de fortes proportions, ce qui a l'inconvénient de réduire la capacité de surcharge du convertisseur. Il serait donc avantageux pour de faibles charges d'avoir une grande réactance et pour de fortes charges une faible réactance ; on peut obtenir ce résultat en employant des encoches fermées pour l'enroulement du stator. Un flux de dispersion se ferme par le pont de l'encoche ; ce flux est d'abord proportionnel au courant, puis, à la saturation, il ne croît plus que lentement ; quand la saturation est complète, l'effet de ce pont est le même que celui de l'air. Par ce moyen, on a donc le gros avantage que, pour les petites charges, les courants déwattés peuvent être maintenus très faibles, même si le facteur de puissance à pleine charge doit être égal à 1.

On exige aussi quelquefois d'un convertisseur qu'il puisse travailler sur un réseau de lumière de 400 à 450 volts aussi bien que sur un réseau de chemin de fer de 500 à 550 volts. Des convertisseurs analogues ont été construits par la Centrale de la ville de Manchester et travaillent avantageusement.

Si l'on exige pour toutes les charges un facteur de puissance presque égal à 1, les groupes devront être munis de survolteurs. Ces derniers sont connectés entre le rotor et l'induit continu et sont en tous points semblables aux survolteurs employés avec les commutatrices ordinaires.

Le convertisseur en cascade peut aussi servir à transformer du courant continu en courant alternatif ; l'augmentation de vitesse pour une charge inductive est petite.

Ici une machine d'excitation n'est pas nécessaire, comme c'est le cas pour les transformateurs rotatifs ordinaires. Si un réglage de la tension alternative est exigé, le convertisseur doit être muni d'un survolteur.

La Compagnie générale électrique de Nancy a réalisé un genre de machine qui démarre toute seule, soit du côté alternatif, soit du côté

continu, et, une fois en vitesse, marche au synchronisme ; le côté courant continu peut être adapté à toutes les applications usuelles des dynamos

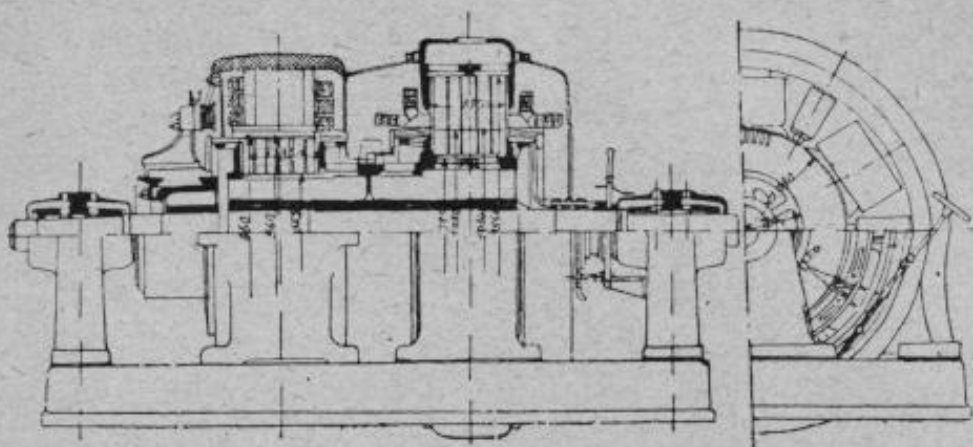


FIG. 1219. — Commutatrice en cascade de 500 kw., 230 volts (continu), 500 tours minute.

et, en particulier, à la distribution à trois fils. Les renversements de polarités y sont impossibles et le rendement est à peu près équivalent à

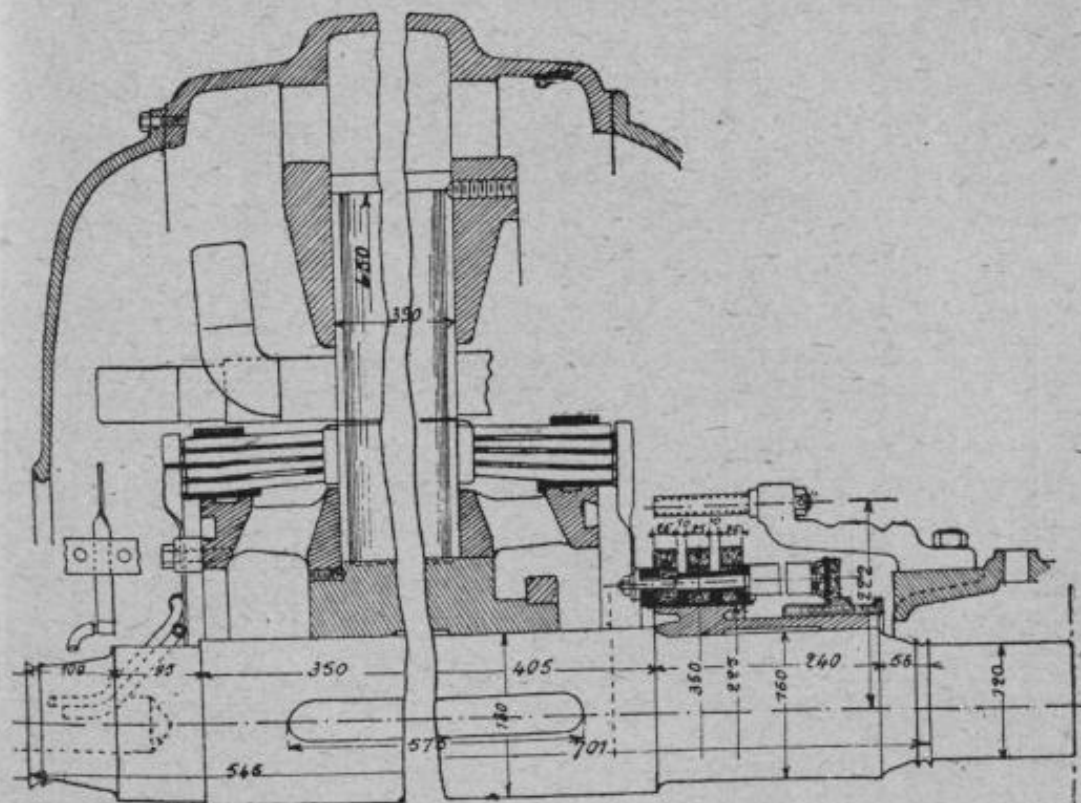


FIG. 1220. — Commutatrice en cascade Arnold, coupe longitudinale du moteur.

celui d'une commutatrice avec son transformateur. Quant aux prix de la machine, il est inférieur à celui d'un moteur-générateur ordinaire de même puissance.

La machine démarre comme un moteur polyphasé ordinaire à rotor bobiné, et, en même temps, le côté courant continu excite son champ. On règle le voltage par le champ côté continu, comme pour un moteur-générateur. Le réglage est suffisant pour la charge des accumulateurs. Enfin la machine peut être compoundée et, lorsque le côté courant continu est réglable à 10 et 12 0/0, le facteur de puissance atteint 0,98.

Les convertisseurs en cascade sont presque toujours à 12 phases. Si p_a désigne le nombre de paires de pôles de l'enroulement alternatif, p_c le nombre de paires de pôles de l'enroulement continu, le rapport $\frac{p_a}{p_a + p_c}$ est égal, pour les types usuels de convertisseurs en cascade, à 0,5 ou 0,6.

Soit V le rapport des pertes par effet Joule dans l'enroulement continu d'une même machine fonctionnant successivement comme convertisseur et comme dynamo à courant continu, le rapport $\sqrt{\frac{1}{V}}$ est le nombre par lequel il faut multiplier la puissance du générateur pour obtenir celle du convertisseur en supposant que les pertes par effet Joule qui se produisent dans les enroulements soient égales. Les valeurs du facteur $\sqrt{\frac{1}{V}}$ pour les convertisseurs usuels sont les suivantes :

Valeurs de $\sqrt{\frac{1}{V}}$ pour les commutatrices et convertisseurs en cascade

DONNÉES GÉNÉRALES						COMMUTATRICE			CONVERTISSEURS EN CASCADE	
φ_1	$\cos \varphi_1$	COURANT DÉWATTÉ en centièmes	ψ	$\cos \psi$	COURANT DÉWATTÉ en centièmes	$m_2 = 3$	$m_2 = 4$	$m_2 = 6$	$\frac{p_a}{p_a + p_c} = 0,5$	$\frac{p_a}{p_a + p_c} = 0,6$
0	1,0	0	11	0,981	20,0	1,33	1,62	1,93	1,57	1,73
5	0,996	8,75	16	0,961	28,8	1,32	1,60	1,90	1,55	1,70
10	0,985	17,6	20	0,940	36,4	1,29	1,56	1,84	1,53	1,66
15	0,966	26,8	25	0,906	46,6	1,24	1,49	1,73	1,50	1,60
20	0,940	36,1	30	0,866	57,8	1,17	1,41	1,61	1,46	1,54

Dans cette table, φ désigne le décalage entre la tension et le courant du réseau, et ψ le décalage intérieur de la machine. Il ressort de ces chiffres qu'un convertisseur en cascade construit pour un rapport $\frac{p_a}{p_a + p_c}$ égal à 0,6 n'accuse pas de pertes sensiblement élevées que celles d'une commutatrice hexaphasée, si les deux machines débitent au réseau un courant déwatté d'environ 30 0/0.

Les convertisseurs en cascade des types normaux servant à l'alimentation des réseaux d'éclairage ne présentant pas de brusques variations de charge sont construits pour une chute de tension entre la marche à vide et la marche en charge faible d'environ 5 0/0. Si pour une raison quelconque cette chute de tension doit être augmentée, il suffit d'adjoindre à l'enroulement principal un deuxième enroulement compound ou de déplacer les balais dans le sens de rotation. Certains convertisseurs en service atteignent ainsi une chute de 20 0/0.

Les types de traction sont, avons-nous dit, d'ordinaire hypercompoués ; leur facteur de puissance est égal à 1, à 3/4 de charge ; à vide le courant absorbé est en retard ; à pleine charge le convertisseur débite au réseau du courant magnétisant en avance. Grâce à ce réglage le facteur de puissance du réseau peut être considérablement amélioré et la tension à la centrale maintenue constante. Ces convertisseurs sont susceptibles de fortes surcharges et leur rendement atteint 93 0/0.

484. Montage des commutatrices. — Quand on fait démarrer une commutatrice comme moteur shunt par le côté collecteur, on doit disposer un inverseur sur l'induit comme indiqué (*fig. 1213*), de façon que la machine soit convenablement excitée pour son fonctionnement ultérieur en génératrice à courant continu. Lorsque les commutatrices sont alimentées par l'intermédiaire de transformateurs statiques simples associés par trois, ce groupement donne une moins bonne utilisation des matériaux et augmente les pertes ; de plus, il ne permet pas l'équilibrage des tensions qu'on obtient dans une certaine mesure avec les transformateurs triphasés, où les flux restent sensiblement égaux dans les trois noyaux reliés. Mais, avec les transformateurs monophasés associés on diminue l'échauffement, ce qui est important pour les appareils de grande puissance. Dans ce cas, et pour parer aux interruptions de service, il suffit d'avoir un quatrième transformateur en réserve qui ne coûte que le tiers du prix des premiers appareils.

On peut aussi recourir au dispositif de transformation Scott, qui n'exige que deux transformateurs monophasés appropriés (montage en T).

Les connexions de transformateurs simples associés se font de deux sortes, soit que chaque appareil ait un seul enroulement secondaire donnant deux fois le voltage étoilé et que les extrémités de chacun de ces secondaires se trouvent reliées par l'intermédiaire de deux bagues collectrices à deux points opposés de l'armature, soit que chaque transformateur contienne deux secondaires indépendants, que l'on groupe trois par trois en deux ensembles triphasés dont les connexions sont ouvertes.

Dans le premier cas, le système hexaphasé (on sait que le fonctionnement des commutatrices est d'autant meilleur qu'il y a plus de phases)

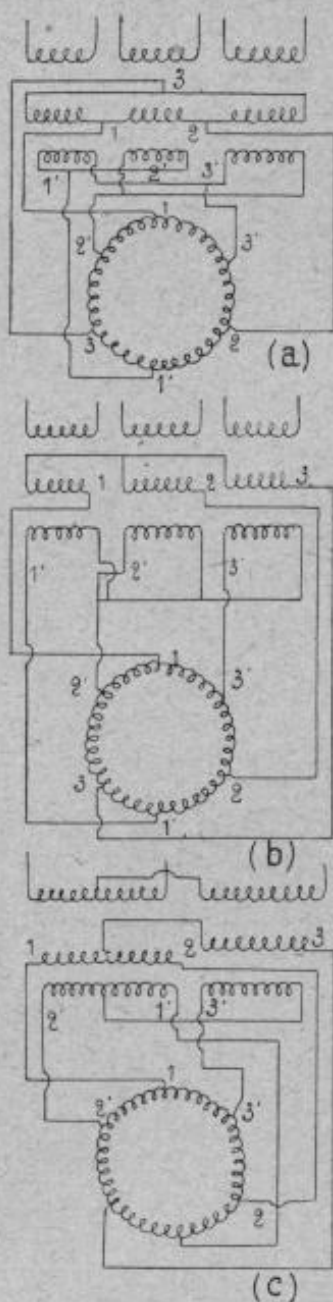


FIG. 1221.

est réalisé par un montage diamétral ou en hexagone, et le rapport de la tension continue au voltage des transformateurs est de 0,707. Dans le second cas, avec des transformateurs portant deux secondaires, on peut constituer divers montages spéciaux, le rapport de la tension continue à la tension des transformateurs étant alors, comme dans la commutatrice triphasée, c'est-à-dire 0,612 : connexions en double triangle (fig. 1221 a); connexions en étoile (fig. 1221 b), ou connexions en T (fig. 1221 c). Dans ces montages, si on rapporte la tension continue au voltage entre deux bagues voisines, on a toujours 0,354.

Les commutatrices de faible puissance construites par les Établissements Oerlikon (jusqu'à 150 à 200 kilowatts) sont pourvues de trois bagues (triphasées); celles de puissance supérieure sont pourvues de six bagues (hexaphasées). Cette disposition présente un avantage considérable en diminuant les pertes dans le cuivre de l'induit, grâce à une répartition plus favorable du courant, d'où il résulte une augmentation de puissance et de rendement. D'autre part, les pulsations de la tension côté continu se trouvant très affaiblies, la commutation est meilleure et la surcharge peut être plus élevée.

Un enroulement amortisseur placé dans les épanouissements des pôles, évite les oscillations et l'induit reçoit des connexions équipotentielles sur toute sa circonférence.

485. Spécification d'une commutatrice triphasée moderne. — Machine de 900 kilowatts, 25 périodes, de la « General Electric Company ».

Tension continue à pleine charge.....	300 volts
— — à vide.....	500 —
Courant continu à pleine charge.....	1.800 ampères
Vitesse angulaire.....	250 t. m.

INDUIT

Diamètre extérieur.....	213 ^{cm} ,35
— au fond des dents.....	207 ^{cm} ,00
— intérieur.....	137 ^{cm} ,47
Nombre des canaux de ventilation.....	3
Épaisseur des tôles.....	0 ^{mm} ,4
Rapport $\frac{\text{longueur nette de fer}}{\text{longueur totale du noyau}}$	0,79
Nombre d'encoches.....	288
Largeur d'une encoche.....	1 ^{cm} ,12
Profondeur d'une encoche.....	3 ^{cm} ,17
Largeur d'une dent à la périphérie.....	1 ^{cm} ,20
Largeur d'une dent à la base.....	1 ^{cm} ,14
Dimensions du conducteur.....	$\left. \begin{array}{l} 3^{\text{mm}},17 \times 10^{\text{mm}},1 \\ = 32 \text{ mm}^2 \end{array} \right\}$
F. é. m. totale.....	513 volts
Enroulement.....	tambour multiple
Nombre de circuits en parallèle.....	12
— de conducteurs en série entre balais.....	96
— — extérieurs.....	1.152
— — par encoche.....	4
Disposition des conducteurs par encoche.....	2 par 2
Rapport $\frac{\text{section du cuivre}}{\text{section de l'encoche}}$	0,36
Nombre de conducteurs en parallèle par voie d'enroulement.....	1
Nombre total de spires.....	576
— de spires en série entre balais.....	48
Vitesse périphérique.....	27,93 met./sec.
Force centrifuge appliquée à 1 gr. masse du conducteur.....	74 grammes
Résistance entre balais à 60° C.....	0,00493 ohm
Rapport K des pertes par effet Joule dans le fonctionnement en commutatrice et celui en dynamo ($\cos \varphi = 0,95$).....	0,65
Intensité à considérer au point de vue de l'effet Joule : 1.800 \times 0,8.....	1.440 ampères
Chute de tension dans l'armature à 60° C.....	7,1 volts
Flux dans l'induit.....	$10,4 \times 10^6$ C. G. S.
Induction $\frac{10,4 \times 10^6}{1,250 \text{ cm}^2}$	8.230 C. G. S.
Nombre de dents correspondant à une pièce polaire...	17
Induction apparente dans la denture.....	20.600 C. G. S.
Largeur moyenne de la dent de l'entaille.....	1,17
Largeur de l'entaille.....	1,12
Valeur corrigée de l'induction dans la denture.....	19.800 C. G. S.

SYSTÈME INDUCTEUR

Nombre de pôles.....	42
Longueur moyenne de la pièce polaire suivant l'axe....	30,5
— — — de l'arc polaire.....	40,32
Entrefer.....	4 ^{mm} ,75
Pas polaire.....	56,4
Diamètre d'alésage des épanouissements.....	214,3
Nature du métal des pièces polaires.....	tôle de 1 millimètre vernée sur une face
Dimensions du noyau magnétique.....	
Longueur radiale du noyau.....	30 cm × 30 cm 25 ^{cm} ,2
Courant amortisseur.....	Feuille de cuivre de 3 ^{mm} formant pont entre 2 pôles voisins
Diamètre extérieur de la culasse.....	
— intérieur de la culasse.....	312 à 290 cent. 267 cent.
Épaisseur de la culasse.....	11,4 cent.
Section de la culasse.....	877 cm ²
Coefficient de fuites.....	1,2
Flux émanant d'un pôle.....	12,5 × 10 ⁶ C. G. S.
Champ dans l'entrefer $\frac{10,4 \times 10,6}{1,220}$	8.350 C. G. S.
Induction dans le noyau inducteur $\frac{12,5 \times 10^6}{870}$ (tôle d'acier).....	14.365 C. G. S.
Induction dans la culasse $\frac{12,5 \times 10^6}{1,754}$ (acier coulé).....	7.125 C. G. S.

AMPÈRES-TOURS POUR UN PÔLE

Ampères-tours par centimètre pour l'armature.....	6,4
— — — pour la denture.....	456
Longueur d'une dent.....	3 ^{cm} ,17
Ampères-tours par centimètre pour l'entrefer.....	6.752
— — — pour le noyau inducteur.....	20,9
— — — pour la culasse.....	11,60
— totaux.....	5.800

ENROULEMENT INDUCTEUR SHUNT

Nombre de spires par pôle.....	912
Diamètre du fil inducteur shunt.....	2 ^{mm} ,3
Longueur du conducteur shunt par pôle.....	1.340 mètres
Volts aux bornes de l'enroulement par pôle.....	36
Intensité dans l'enroulement shunt.....	6,3 ampères
Résistance de l'enroulement à 20° C.....	5,7 ohms
Nombre de couches de fil.....	23
Nombre de spires par encoche.....	40

ENROULEMENT INDUCTEUR SÉRIE

Ampères-tours à pleine charge par pôle.....	3.630
Courant débité à pleine charge.....	1.800 ampères

Intensité dans le shunt de l'enroulement en série.....	350 ampères
Nombre de spires par pôle.....	2,5
Dimensions du conducteur $63,5 \times 1,9$	120 mm ²
Nombre de conducteurs en parallèle.....	8
Résistance totale à 20° C.....	0,00081 ohm

COLLECTEURS, BAGUES ET FROTTEURS

Diamètre du collecteur.....	137,15
Nombre de lames.....	576
— — par encoche.....	2
Épaisseur de l'isolant entre lames.....	1 mm,4
Diamètre des bagues collectrices.....	61
Nombre de bagues.....	3
— de balais au collecteur.....	96
— de balais par tige.....	8
Densité du courant sous les balais (côté continu).....	5,35 amp./cm ²
Nombre de frotteurs du côté alternatif.....	24
Densité du courant sous les balais (côté alternatif).....	24 amp./cm ²

COMMUTATION

Voltage moyen entre lames.....	10,4 volts
Fréquence de la commutation.....	407 cycl./sec.
Spires mises simultanément en court-circuit par un balai.....	3
Réactance d'une section.....	0,039 ohm
F. é. m. de réactance d'une section.....	5,8 volts
Chute de tension dans l'armature à 60°.....	7,1 volts
— — dans l'enroulement série.....	16
— — au contact des balais.....	2,1
Pertes rI^2 à 60° C. dans le fer de l'armature.....	19.850 watts
Pertes rI^2 à 60° C. dans l'armature.....	9.700 watts
Dissipation de la chaleur.....	0,64 w./cm ²
Pression des balais.....	80 gr./cm ²
Coefficient de frottement des balais.....	0,3
Vitesse périphérique du collecteur.....	18 m./sec.
Pertes par courants de Foucault dans le cuivre du collecteur.....	600 watts
Pertes totales au collecteur.....	7.180 —
— — dans les enroulements inducteurs à 60° C.	4.860 —
— mécaniques, résistance de l'air.....	5.100 —
Total des pertes.....	49.460 —
Puissance utile à pleine charge.....	900.000 —
Puissance absorbée totale.....	949.460 —
Rendement à pleine charge.....	95 0/0
Poids de l'armature.....	6.563 kg.
— du collecteur.....	2.510 —
— du noyau inducteur et des bobines.....	5.300 —
— de la culasse, socle, paliers, supports.....	15.550 —
Poids total de la machine.....	29.923 kg.

III. — SOUS-STATIONS TRANSFORMATRICES

486. Équipements des sous-stations transformatrices. — L'emploi des appareils de transformation du courant alternatif en courant continu va toujours en augmentant. Actuellement plus de 60 0/0 des courants alternatifs produits sont convertis en courant continu. La plupart des grands réseaux de traction à courant continu possèdent des installations de convertisseurs rotatifs ; pour les travaux électrolytiques, le convertisseur rotatif deviendra à l'avenir d'un grand usage.

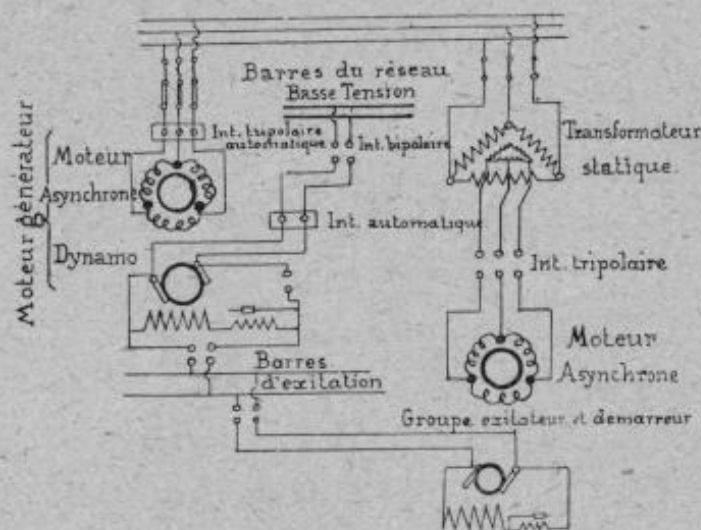


FIG. 1222.

tion équipée avec un moteur asynchrone à haute tension attelé à une génératrice en dérivation, pourvue de son rhéostat (moteur-générateur). Un transformateur statique alimente un petit moteur asynchrone entraînant une dynamo auxiliaire.

Pour la mise en marche, on ferme d'abord le circuit du moteur asynchrone du groupe d'excitation sous une fraction de son voltage normal (la moitié par exemple), puis sous ce voltage. La génératrice de ce groupe exciteur est couplée sur la génératrice du groupe principal, qui démarre alors lentement en moteur si la vitesse s'accroît progressivement.

En agissant sur l'excitation, on lui fait aisément dépasser sa vitesse normale, ainsi qu'au moteur asynchrone qui lui est accouplé. Cette vitesse de synchronisme dépassée, on ferme brusquement le circuit de haute tension sur le moteur en vitesse, en même temps qu'on coupe le circuit reliant la petite génératrice à l'induit de la génératrice principale, tout en continuant à laisser fournir par la petite génératrice le courant nécessaire à l'excitation de la génératrice du groupe moteur-générateur ou groupe électrogène. Celle-ci, poursuivant son mouvement dans le sens, on peut débiter dans le circuit. On continue à agir sur le champ de la

Les transports de force comprennent toujours dans leurs réseaux une ou plusieurs sous-stations « de groupes générateurs » ou de « commutatrices » pour la transformation du courant alternatif en courant continu. La (fig. 1222) donne le schéma d'une sous-sta-

grosse génératrice jusqu'à ce que le voltage atteigne enfin sa valeur normale, qui correspond au voltage de la petite génératrice ; on coupe alors l'excitation.

La (fig. 1223) montre une sous-station équipée avec une commutatrice pour usine de tramways. Le côté « courant alternatif » comporte des transformateurs statiques. Les interrupteurs T sont ceux pour la haute tension, et ceux x_1, x_2, \dots pour la basse tension. Le côté « courant continu » est commandé par les rhéostats G et R , le premier pour la modification du champ inducteur en marche et suivant la charge, le second servant de résistance de démarrage à la commutatrice fonctionnant automatiquement entre la manette de la résistance R et la borne positive du tableau à courant continu.

Quand une installation comporte plusieurs sous-stations, il convient d'établir un service tel que la mise en circuit des conver-

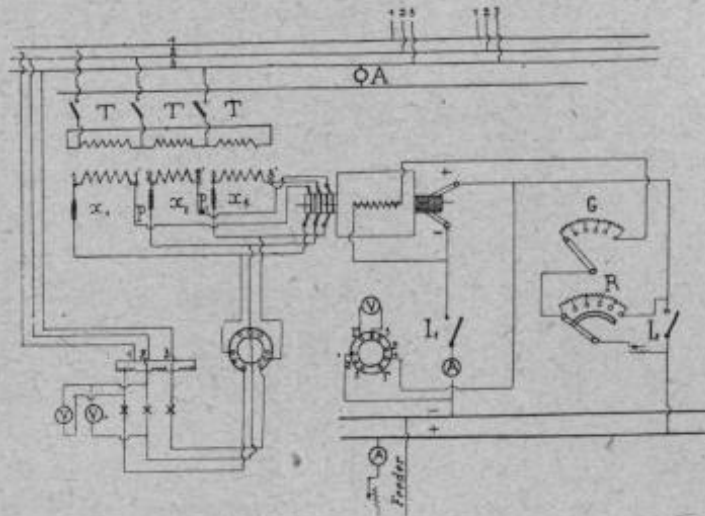


FIG. 1223.

tisseurs se fasse de façon que les machines en action travaillent toujours dans le voisinage de pleine charge et qu'il n'y ait pas, par exemple, des convertisseurs surchargés dans une sous-station et d'autres travaillant à faible charge dans une station quelconque. Lorsque les appareils de commande ou de contrôle des machines sont placés au même étage que celles-ci, cette disposition entraîne une économie de personnel, mais l'installation y perd en sécurité.

Lorsque les appareils de distribution sont disposés sur une galerie surélevée, l'installation exige plus de frais d'exploitation et est plus coûteuse, mais elle assure davantage le bon fonctionnement de la sous-station.

Les convertisseurs sont reliés aux transformateurs soit par un transformateur polyphasé (les enroulements primaires et secondaires connectés en étoile ou en triangle), soit par des transformateurs simples associés par trois. Cette dernière méthode ne permet pas d'équilibrage des tensions et donne une moins bonne utilisation des matériaux, mais elle diminue l'échauffement.

Dans un grand réseau, le courant de charge des câbles ne peut être

négligé, de sorte que le courant déwatté fourni par les commutatrices n'est pas, dans ce cas, proportionnel à la charge.

Il peut alors y avoir avantage à installer des commutatrices compound munies de régulateurs automatiques de tension agissant sur l'excitation shunt. Les régulateurs agissant sur la tension d'un même groupe d'alternateurs sont asservis à fonctionner ensemble de façon à ne pas pouvoir rendre différentes les excitations en dérivation des diverses commutatrices.

En Amérique, on tend à multiplier les sous-stations, car il n'y a pas de comparaison entre leur coût et celui de la station à vapeur équivalente. Beaucoup de ces stations ne fonctionnent que pendant la période de forte charge. Le personnel est très réduit ; souvent il n'y a qu'un homme par sous-station ; il est en communication téléphonique avec l'usine ou un centre déterminé d'où on lui donne toutes les instructions en cas de besoin.

L'augmentation du nombre des stations a pour effet une réduction des feeders, laquelle réduction compense les frais des bâtiments exigés par les sous-stations, et il y a grand avantage de ce fait, car le capital engagé en bâtiments se déprécie infiniment moins vite que le capital employé pour les feeders. On rattrape ainsi largement les frais du matériel. De plus, dans les sous-stations, le matériel de rechange est très réduit, car une sous-station, en cas d'avarie, peut être secourue par les sous-stations voisines.

Le plus souvent l'équipement d'une sous-station se présente au rez-de-chaussée du bâtiment qui l'abrite, disposition très convenable sous tous les rapports pour la meilleure organisation du matériel et de sa surveillance. On établit généralement pour le courant continu, et pour le courant alternatif primaire, deux systèmes de barres omnibus ; sur les premières sont branchés les convertisseurs ainsi que les différents feeders que l'on veut alimenter. De même l'autre jeu de barres associe en parallèle les transformateurs-abaisseurs, mais par leurs primaires seulement. Le grand encombrement de l'appareillage à haute tension exige parfois une installation étagée ; dans tous les cas, l'appareillage à haute tension doit être complètement isolé de celui à basse tension à l'effet d'éviter tout danger pour le personnel.

On dispose des disjoncteurs à maxima au départ de chaque feeder et entre chaque commutatrice et les barres omnibus. Les interrupteurs, à l'arrivée du courant alternatif, sont aussi à déclenchement automatique. L'installation se trouve ainsi protégée contre les courts-circuits qui peuvent se produire sur le réseau.

L'avantage qu'offrent les convertisseurs de pouvoir transformer du courant continu est utilisé parfois dans les installations où l'on distribue

simultanément du courant alternatif et du courant continu. Telle, par exemple, une usine de distribution de lumière à courant continu qui éclaire une localité éloignée, en réalisant un transport d'énergie à haute

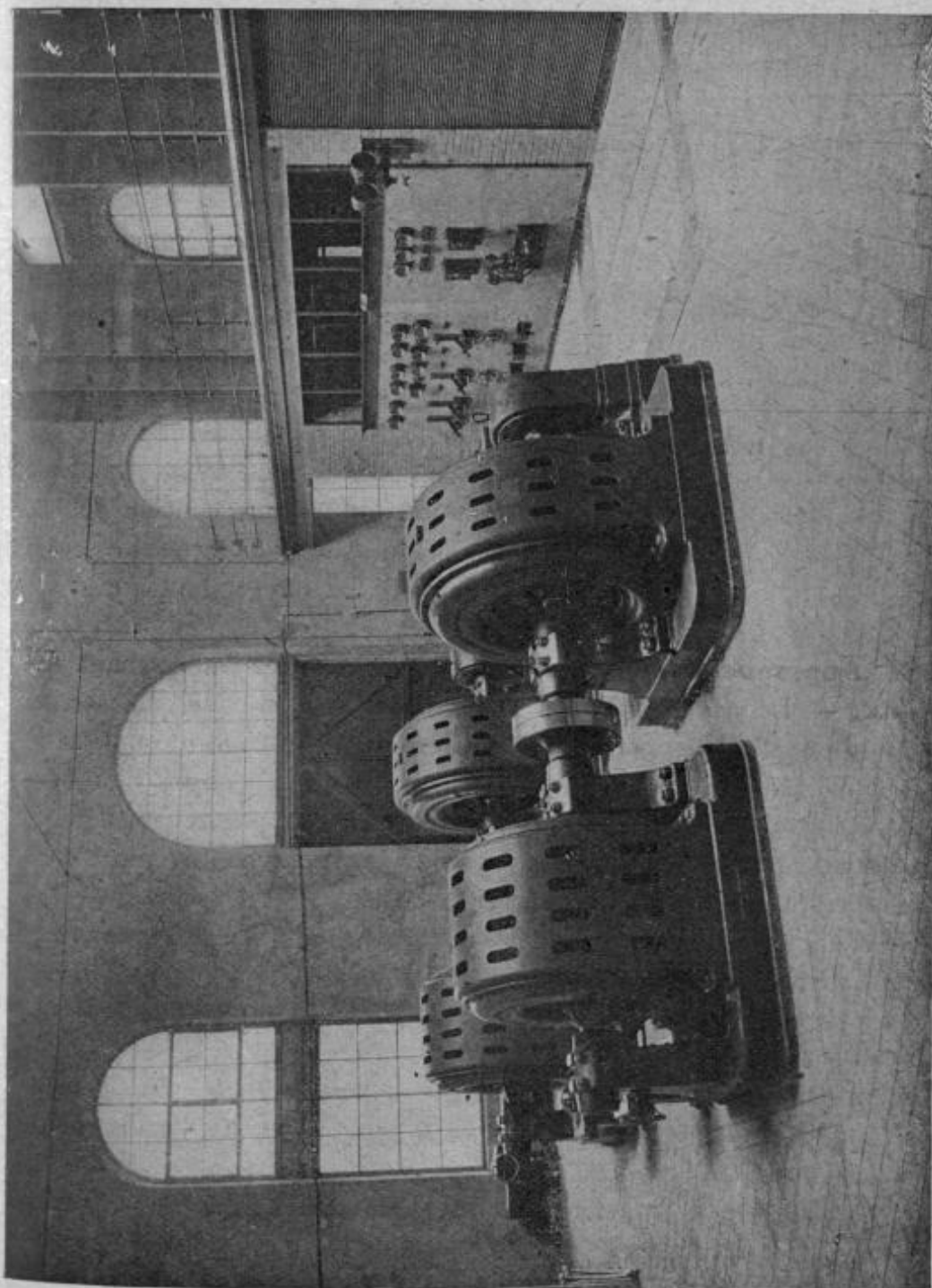


FIG. 1224. — Sous-station des chemins de fer électriques du Haut-Rhin (Société Alsacienne de Constructions mécaniques).

tension au moyen de deux commutatrices, dont l'une est inversée, et de transformateurs statiques. Pour parer au danger d'emballement du convertisseur dans ce cas, il faut exciter séparément la commutatrice inver-

sée à l'aide d'une dynamo, à circuit magnétique peu saturé, qu'elle entraînera directement.

Pour se rendre compte de la bonne marche de l'installation, il convient de tracer la caractéristique à circuit ouvert de chaque commutatrice,

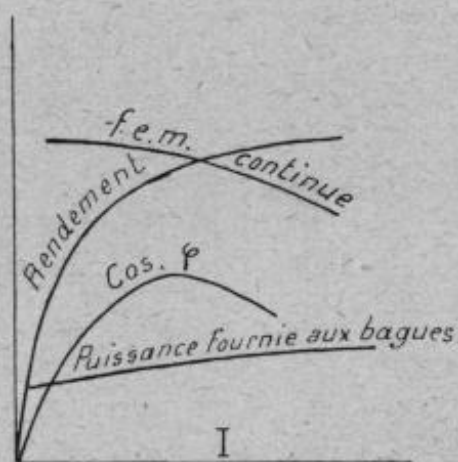


FIG. 1225.

la courbe en V qui donne, pour la charge nulle, les variations du courant déwatté en fonction de l'excitation, laquelle fait connaître, en particulier, le point de marche sans décalage ; enfin, on vérifie par les procédés oscillographiques ou par l'emploi simultané d'un voltmètre thermique et d'un voltmètre électromagnétique que la f. é. m. continue ne présente pas des ondulations trop accentuées, car les phénomènes d'oscillations interviennent pour abaisser le rendement. On trace

aussi les courbes qui donnent, en fonction du courant continu débité, les valeurs de la puissance fournie aux bagues, du rendement et de $\cos \varphi$ (fig. 1225).

487. Appareils transformateurs et redresseurs du courant alternatif. — Le *panchachuteur* Leblanc, dont il a été fait un certain nombre d'installations, permet la transformation du courant continu en courant alternatif et réciproquement. Étant donné un noyau d'un courant continu d'intensité I , supposons que N varie proportionnellement aux ordonnées d'une sinusoïde. Le courant passant successivement dans chacune des bobines avec une intensité constante, la variation de $4\pi NI$, c'est-à-dire du flux, sera sinusoïdale. Alors une spire placée sur le même noyau deviendra le siège d'une force électromotrice sinusoïdale. Par des combinaisons de circuits on peut très facilement obtenir des courants mono, di et triphasés.

Les principales difficultés auxquelles les ingénieurs se sont heurtés dans l'application de cet appareil ont été la commutation et l'usure rapide des collecteurs.

On peut réaliser la transformation de courants à l'instar des commutatrices à l'aide d'appareils très différents ne comportant pas d'organes fixes.

La permutatrice Rougé et Faget ne diffère pas par son principe de l'appareil Leblanc. Elle se compose d'un commutateur redresseur en relation avec un transformateur fixe. Le noyau de celui-ci est annulaire et denté et est parcouru par un flux tournant. Il présente l'inconvénient

d'avoir des balais mobiles, mais sa disposition verticale réduit de beaucoup l'encombrement de la machine.

Le *redressement* d'un courant alternatif peut, comme l'on sait, être affecté en intercalant sur son chemin des *soupapes* ou clapets électriques ne se laissant traverser que dans un seul sens ; une combinaison de soupapes électriques permet ainsi d'avoir des courants toujours de même sens dans un circuit alimenté par du courant alternatif.

Le phénomène observé est le suivant : lorsque l'on fait passer un courant dans une cuve électrolytique dont les électrodes sont l'une en aluminium et l'autre en plomb, on observe que le courant circule facilement lorsque l'électrode aluminium est cathode (pôle négatif) et au contraire que le courant est interrompu quand l'aluminium est anode (pôle positif). Une couche d'alumine se forme instantanément, opposant une très grande résistance au passage du courant. Le principe de la soupape électrolytique a été établi par Buff en 1887.

Le redresseur « Cooper-Hewitt », qui sert pour la charge à forte intensité des accumulateurs, est établi de façon que le passage du courant est relativement facile, d'une électrode de fer à une électrode de mercure, tandis qu'il ne peut s'effectuer dans le sens inverse sous la même tension. Le redresseur « Fleming » utilise la propriété que possède un filament incandescent de laisser écouler plus facilement les charges négatives que les charges positives. Le redresseur « Max Buttner » est formé d'une lame d'aluminium plongeant dans une solution de borate d'ammonium.

L'appareil « de Faria » appartient au même type ; chacune des soupapes de ce redresseur se compose d'un cylindre d'aluminium et d'un cylindre en plomb antimonie, percé d'ouvertures allongées, et ces deux électrodes plongent dans une solution de phosphate de soude. Le rendement du transformateur de Faria, pour les modèles de 10 ampères sous 110 volts, est de 60 à 65 0/0 en watts calculés et de 60 0/0 environ en watts réellement utilisés ; pour des appareils de 50 ampères, le rendement est de 70 à 80 0/0. Le redresseur « Polack » est aussi du type électrolytique.

L'appareil « Franz Pawlowski » est formé par une lame d'aluminium en contact intime avec une lame de sous-sulfure de cuivre, et aucun liquide n'est nécessaire pour le fonctionnement. Le redresseur de « M. A. Blondel » consiste en un interrupteur à jet de mercure mû par un moteur synchrone : le jet de mercure ferme le circuit d'utilisation pendant la durée d'une alternance, l'autre alternance du courant n'étant pas utilisée. Cet appareil est particulièrement remarquable par la façon dont a été résolue l'automatisme du moteur et par son faible encombrement.

Dans le redresseur pour courant alternatif simple de « Koch », le courant continu est obtenu au moyen d'un relais polarisé qui vibre synchroniquement et en phase avec la tension du réseau et qui ouvre et ferme un

contact inséré dans le circuit principal. Une intéressante application de ce dispositif a été faite pour utiliser les courants alternatifs en galvanoplastie.

Le redresseur à collecteurs « Schneider et C^{ie} » pour courants alternatifs simples a l'avantage de supprimer les bagues réceptrices du courant redressé. On le construit pour alternateurs d'un nombre quelconque de paires de pôles.

Le redresseur « Soulié » est composé d'organes purement mécaniques sans aucun phénomène d'électrolyse. Un ressort vibre sous l'action d'un électro traversé par le courant alternatif et établit la connexion seulement au moment voulu dans chaque période. Un transformateur a d'abord ramené la tension alternative à la valeur convenable.

Le redresseur de courant de la « General Electric Co » est basé sur les propriétés de la lampe à vapeur de mercure. Les ampoules en verre présentent une chambre de condensation de grande capacité, deux anodes en graphite et une cathode auxiliaire en mercure ; cette dernière sert pour l'allumage de l'appareil, qui se fait par simple agitation.

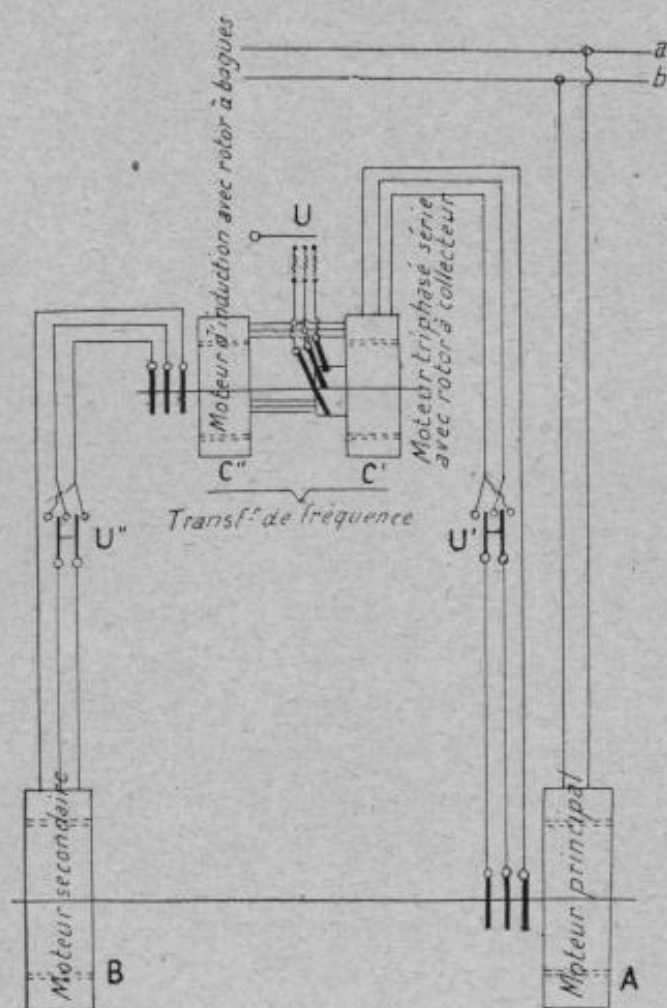


FIG. 1226.

488. Convertisseurs de fréquence. — Un système transformateur de fréquence peut être constitué par deux machines synchrones couplées, de fréquence correspondant à celle de chacun des réseaux à faire travailler en parallèle ; de ces deux machines, l'une agit comme moteur et l'autre comme génératrice. Il peut aussi être constitué par un moteur asynchrone et un générateur synchrone ou bien *vice versa*, ou bien enfin par deux machines asynchrones.

M. Heyland a aussi proposé l'emploi d'un ensemble composé d'un moteur d'induction combiné avec un moteur à collecteur ; dans

ce cas, la meilleure disposition consiste à composer la machine principale

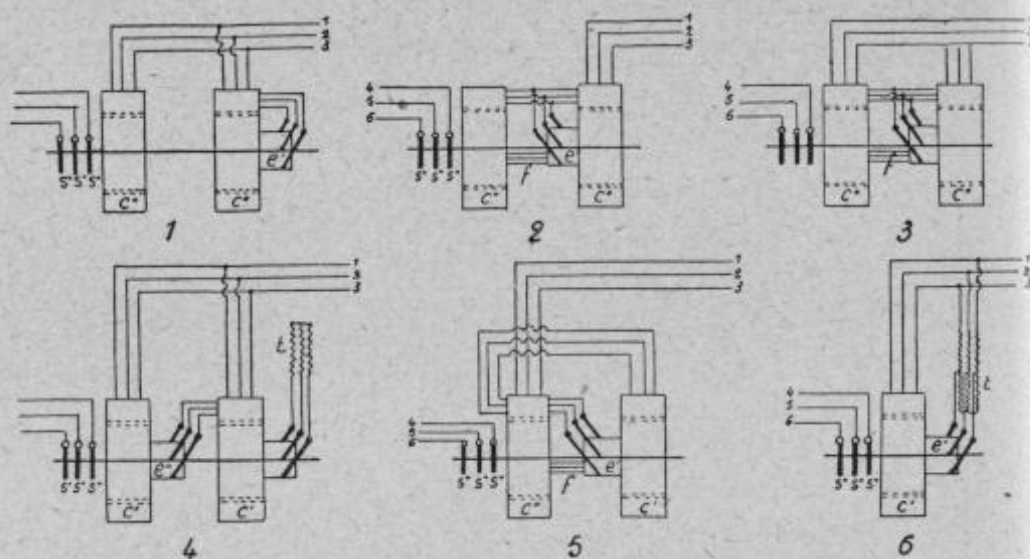
de deux moteurs en cascade, en plaçant le convertisseur entre les deux moteurs (*fig. 1226*).

Le transformateur de fréquence Heyland est constitué, en principe, par un moteur à collecteur et par un moteur à bagues, reliés de manière qu'une partie de l'énergie électrique qui leur est fournie soit transformée directement en courant à la fréquence désirée et que le reste de cette énergie ayant la périodicité du réseau d'alimentation soit transformée indirectement à la même fréquence désirée.

Les (*fig. 1227 et 1228*) montrent les divers dispositifs employés pour obtenir ce résultat. Ils peuvent être utilisés pour transformer la fréquence de n'importe quel courant alternatif simple ou polyphasé, en une fréquence différente donnée ou réglable, indépendamment de celle du circuit primaire qui peut être constante ou variable. Ils trouvent une application immédiate pour obtenir le démarrage et les variations de vitesse angulaire des moteurs d'induction en court-circuit. Ils permettent aussi d'employer ces transformateurs pour effectuer le démarrage des moteurs principaux commandant deux ou plusieurs moteurs montés en cascade, en reliant électriquement le transformateur de fréquence à deux moteurs principaux placés de part et d'autre.

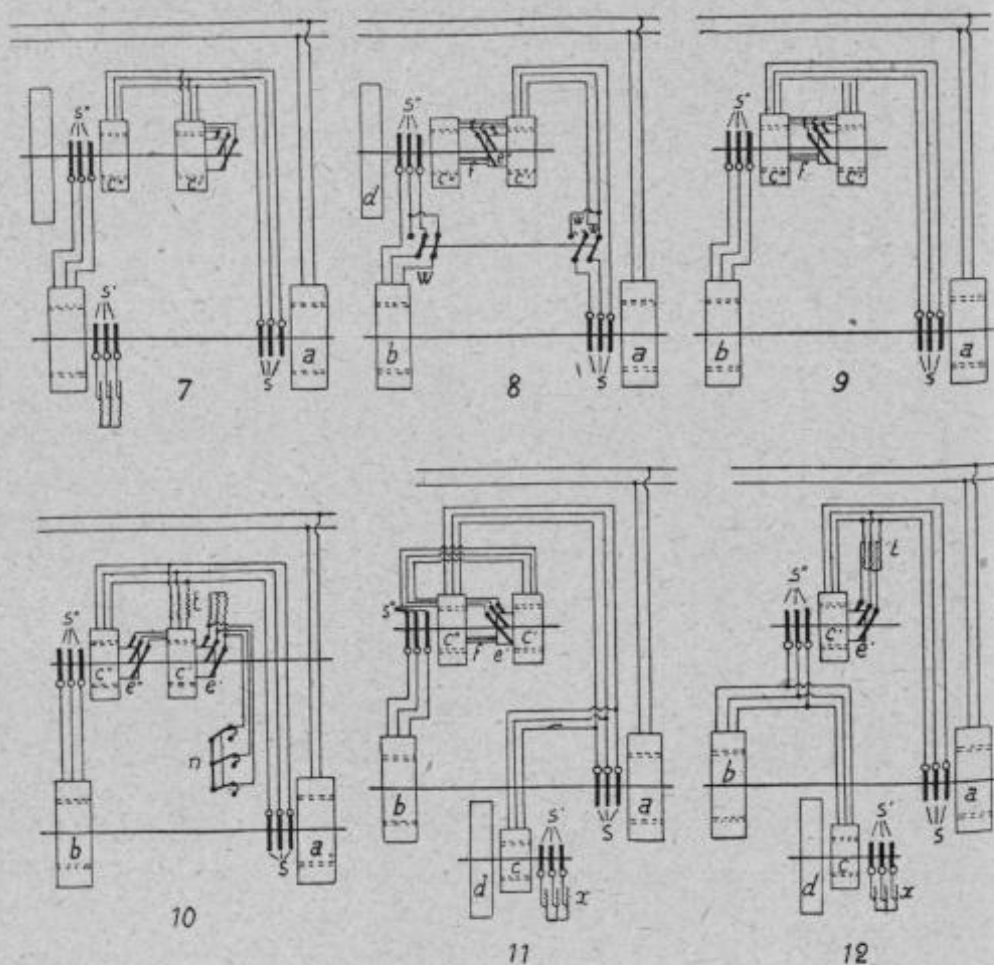
Chacun de ces systèmes a ses avantages et ses inconvénients. Le transformateur de fréquence synchrone possède les avantages des machines synchrones en général, en particulier d'avoir un facteur de puissance favorable, grâce à l'excitation à courant continu. Les machines synchrones surexcitées peuvent fournir un courant magnétisant et, par suite, décharger les machines et la ligne et ainsi diminuer la chute de tension. Comme désavantages, on doit utiliser un moteur auxiliaire pour amener une machine synchrone à sa vitesse normale. En outre, le transformateur doit être branché en parallèle sur les deux réseaux, ce qui exige relativement beaucoup de temps et une grande attention, et cela d'autant plus que le transformateur n'est pas à la station génératrice ; car alors on ne peut agir sur la fréquence ni de l'un, ni de l'autre réseau. Un autre désavantage est, qu'en général, un moteur synchrone cale plus facilement qu'un moteur asynchrone et que la remise en marche exige un certain temps.

Le type de convertisseur, moteur asynchrone et génératrice synchrone, ou *vice versa*, offre cet avantage que l'on n'a pas besoin de coupler en parallèle ou que l'on a, au plus, un couplage à effectuer. En outre le moteur asynchrone a moins de tendance à caler et n'exige pas une installation de moteur pour son démarrage. Enfin, en intercalant une résistance réglable dans le circuit du rotor, le transformateur est indépendant, dans de certaines limites, de la variation relative de fréquence des deux réseaux, et cela automatiquement. Cette résistance est relativement meilleur marché que l'installation d'un moteur synchrone. Comme désavantage, il y a



c' , moteur à bagues collectrices. — e' et e'' , collecteurs. — e' , moteur à bagues collectrices. — s , s' et s'' , bagues collectrices. — 1, 2 et 3, bornes primaires reliées au réseau fournissant le courant d'une fréquence quelconque. — f , connexions. — t , transformateurs.

FIG. 1227. — Dispositifs de transformation de fréquence, selon le système Heyland.



a et b , moteurs principaux montés en cascade (a , moteur primaire, et b , moteur secondaire). — d , volant du transformateur de fréquence. — u et w , interrupteurs principaux. — n , interrupteur inverseur. — x , résistances réglables.

FIG. 1228. — Dispositifs de transformation de fréquence, selon le système Heyland.

l'obligation, pour la machine asynchrone, d'emprunter son excitation au réseau, et par cela d'augmenter l'intensité du courant et par conséquent les pertes dans la canalisation et la chute de tension, ou respectivement d'augmenter les dimensions de la canalisation. Ce désavantage double quand on emploie deux machines asynchrones.

Ce n'est donc que dans peu de cas que l'on fait usage du convertisseur purement asynchrone, d'autant plus que l'on peut en réaliser presque tous les avantages au moyen d'un groupe moteur asynchrone et génératrice synchrone. Il faut ajouter, en outre, que le générateur asynchrone ne peut fonctionner que quand il est en parallèle avec des génératrices synchrones.

Suivant les circonstances, les avantages et les défauts signalés ci-dessus se font plus ou moins sentir ; en général cependant, ces considérations ne sont pas suffisantes pour que l'on puisse en tirer une conclusion sur l'emploi du système le plus convenable ; il faut encore éclairer certains points qui sont en relation intime avec le genre d'utilisation, c'est-à-dire la transmission d'une certaine puissance d'un réseau à un autre.

Il s'agit principalement de la manière dont se comportent les deux groupes de machines par rapport aux variations de fréquence et de puissance, tant dans un réseau que dans l'autre, et de l'influence de ces variations sur le fonctionnement. La solution de cette question est possible sous une forme élémentaire, et les quelques considérations suivantes suggérées par M. Pfiffner peuvent faciliter la détermination du choix des machines à adopter suivant le cas.

Dans ce but, l'auteur fait quelques suppositions, plus ou moins réalisées dans la pratique. En premier lieu, il admet que les deux centrales à coupler sont de puissances très différentes, de sorte que la tension et la fréquence dans le réseau le plus important, qu'il désigne sous le nom de grand réseau, ne sont pas influencées par le petit réseau. En outre, le grand réseau doit fournir de l'énergie au petit réseau. M. Pfiffner considère le rapport de la puissance du transformateur à celle de la petite centrale comme une variable ; la puissance du transformateur est, en général, plus faible que celle de la petite centrale.

Il admet que, pour une cause quelconque, la fréquence dans le grand réseau varie ; en réalité, ce fait se produit le plus souvent dans les faibles installations ; mais cependant, dans une grande installation, il peut se produire quand elle fournit de l'énergie, par exemple, pour la traction. On peut négliger l'influence de la variation de fréquence du petit réseau sur celle du grand, c'est-à-dire considérer la variation du grand réseau comme indépendante.

Afin que des alternateurs puissent être couplés en parallèle d'une manière satisfaisante, il faut que, dans le cas de régulation automatique,

les régulateurs de vitesse aient des qualités statiques, c'est-à-dire qu'à chaque position du contrepoids corresponde une vitesse angulaire donnée, de sorte que les générateurs, entre la marche à vide et à pleine charge, aient une chute de 3 à 6 0/0, qui peut être ensuite modifiée à la main.

Dans le cas d'un transformateur avec moteur et génératrice synchrones, si le transformateur est relativement de faible puissance vis-à-

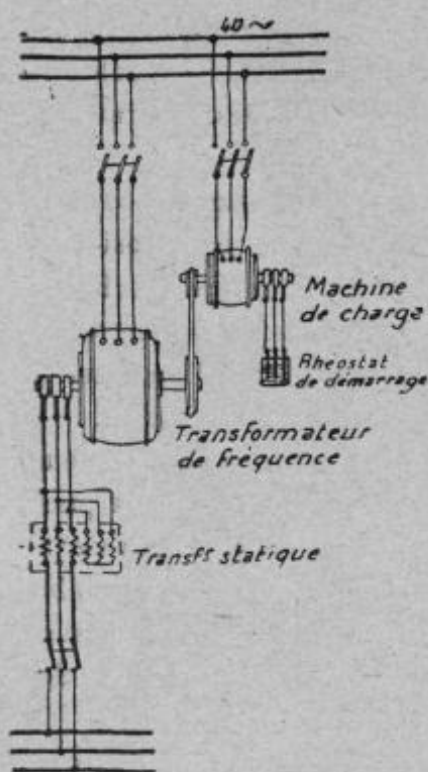


FIG. 1229. — Schéma de montage d'un transformateur de fréquence et d'une machine de charge asynchrone.

vis de celle du petit réseau, il peut, dans le cas de variations, même faibles, de la fréquence du grand réseau, travailler dans de mauvaises conditions. Si la chute de vitesse entre la marche à vide et à pleine charge des génératrices du petit réseau est forte, cela a une influence avantageuse. Quand le transformateur a à peu près la même puissance que les génératrices du petit réseau, celles-ci peuvent fonctionner avec les turbines complètement ouvertes sans régulation.

Lorsque la fréquence du grand réseau ne varie pas et la charge du petit réseau varie, dans le cas où la charge du petit réseau diminue, comme la fréquence de ce réseau est maintenue fixe par le transformateur (réglé par le grand réseau), la vitesse des générateurs ne peut varier. Les régulateurs de vitesse ne peuvent entrer en fonctionnement, et l'énergie débitée par les génératrices ne varie pas.

La variation de charge se fait simplement sentir au transformateur. Si la chute de charge du petit réseau est plus grande que la puissance du transformateur, celui-ci travaille négativement et fournit de l'énergie au grand réseau.

Quand le transformateur de fréquence est constitué par un moteur asynchrone actionnant une génératrice synchrone, lorsque la fréquence du grand réseau varie, par exemple, augmente, comme le couplage entre les deux réseaux n'est plus, comme dans le cas précédent, pour ainsi dire absolument rigide, la fréquence du petit réseau n'a pas besoin de suivre aussitôt la variation de celle du grand réseau. En premier lieu, le glissement du moteur asynchrone augmente, de sorte qu'il absorbe plus de puissance. Comme la charge du petit réseau ne varie pas, la puissance fournie par les générateurs diminue. Par suite de cette diminution de

puissance, la vitesse des générateurs augmente peu à peu, et il se produit alors un nouvel état d'équilibre.

Le cas d'un transformateur comportant deux machines asynchrones ne diffère pas beaucoup du précédent.

La conclusion est que le transformateur asynchrone est moins sensible que le transformateur synchrone aux variations de fréquence et aux différences de régulation des deux réseaux. Cela ne veut pas dire que, dans tous les cas, le transformateur synchrone travaille plus mal que le transformateur asynchrone. Dans le cas où le grand réseau a une fréquence bien régulière, que le petit réseau est relativement faible, que la puissance du transformateur est relativement grande, les considérations précédentes tombent, ou tout au moins perdent de leur importance, spécialement dans le cas de transformateurs puissants, où le facteur de puissance joue un certain rôle.

La charge d'un transformateur rotatif de fréquence peut avantageusement être réalisée par une machine électrique que l'on relie soit comme moteur, soit comme génératrice, à l'un des deux réseaux de fréquences différentes ; elle peut être, selon les cas, synchrone, asynchrone ou à collecteur. Il convient de choisir une machine à grande vitesse et de la relier au transformateur par courroie. Les dimensions de cette machine seront d'autant plus faibles que le rapport des deux fréquences se rapproche davantage de l'unité. Si ce rapport est exactement égal à 1, la vitesse angulaire et la puissance de la machine de charge sont nulles ; on peut donc alors supprimer cette machine et la remplacer par un dispositif destiné à recevoir le couple qui s'exerce entre le stator et le rotor du transformateur rotatif de fréquence.

Pour la transformation des courants diphasés en courants triphasés le système Scott ⁽¹⁾ repose sur l'emploi d'un circuit magnétique diphasé auquel on substitue le plus souvent deux circuits magnétiques monophasés. Le bobinage du côté diphasé ne présente rien de spécial. Du côté triphasé, on a à établir entre trois bornes A, B, C (*fig. 1230*), des différences de potentiel, qui, sur le diagramme des tensions, devront être situées au sommet d'un triangle équilatéral. On établit entre B et C la tension voulue par un bobinage fait sur le circuit de la première phase diphasée, et au point milieu du bobinage BC

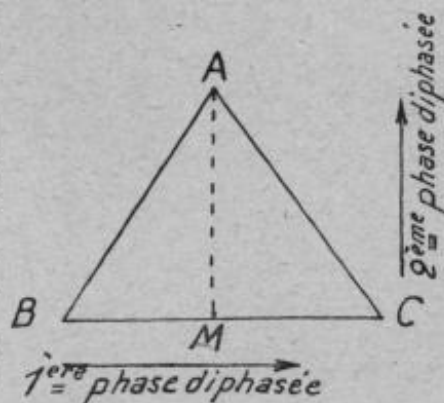


FIG. 1230.

⁽¹⁾ La Société Alsacienne de Constructions Mécaniques a pris les 8 et 9 mars 1912 des brevets pour des simplifications au montage Scott.

on relie un bobinage fait sur le circuit magnétique de la deuxième phase diphasée. Si le nombre de spires est convenablement choisi, le triangle épouse la forme équilatérale, c'est-à-dire qu'il faut que le rapport des tensions BC et MA soit dans le rapport de 2 à $\sqrt{3}$. Le seul point délicat à résoudre dans la construction est d'appliquer la tension MA en un point AM qui soit bien réellement au potentiel moyen des points B et C. En pratique, sur un transformateur à noyaux, on prend chaque demi-bobinage BM ou MC à la fois sur les deux noyaux. Si on ne veut pas imbriquer le côté triphasé, il suffit de coupler en parallèle les deux colonnes diphasées.

Le transformateur *Leblanc* ne comportant qu'un seul appareil possède un rendement inférieur au transformateur Scott, mais il a l'avantage d'être moins encombrant et moins coûteux. De plus, le système Leblanc permet un équilibrage plus efficace des chutes de tension.

Il semble cependant que le système Scott s'impose dans les distributions diphasées à basse tension, pour l'électrochimie et l'électrometallurgie par exemple, à cause de la trop grande complication des connexions dans le système Leblanc ; ce dernier s'imposerait au contraire dans les distributions triphasées à bas voltage.

En tout cas l'un et l'autre système peuvent fonctionner en parallèle.

CHAPITRE XXIV

TRANSFORMATEURS STATIQUES

489. Puissance d'un transformateur. — Les transformateurs constituent un des organes les plus importants et les plus utiles pour le transport de l'énergie électrique.

Dans un transformateur, le flux dû au courant magnétisant du circuit primaire produit dans le circuit secondaire de l'appareil la force électromotrice utile, laquelle tend à baisser avec l'augmentation de charge. Pour que la force électromotrice reste constante, il faut donc augmenter la tension du courant d'alimentation aux bornes du circuit primaire.

Dans les limites de la pratique, on peut dire néanmoins que ces appareils fonctionnent d'une façon autorégulatrice.

Tous les transformateurs sont à circuit magnétique fermé.

Les appareils dits « cuirassés », toutes choses égales d'ailleurs, nécessitent pour la production du champ magnétique un nombre d'ampères-tours plus faible que dans les transformateurs à noyaux, et, par suite, moins de cuivre et une plus grande quantité de fer, mais ils se prêtent moins bien à la ventilation que ceux à noyaux.

Le type à noyaux est moins coûteux. Les bobines primaires et secondaires peuvent être placées les unes au-dessus des autres ou placées concentriquement. Ce dernier dispositif est plus économique et offre plus de facilité pour l'isolement des deux enroulements (*fig. 1232*).

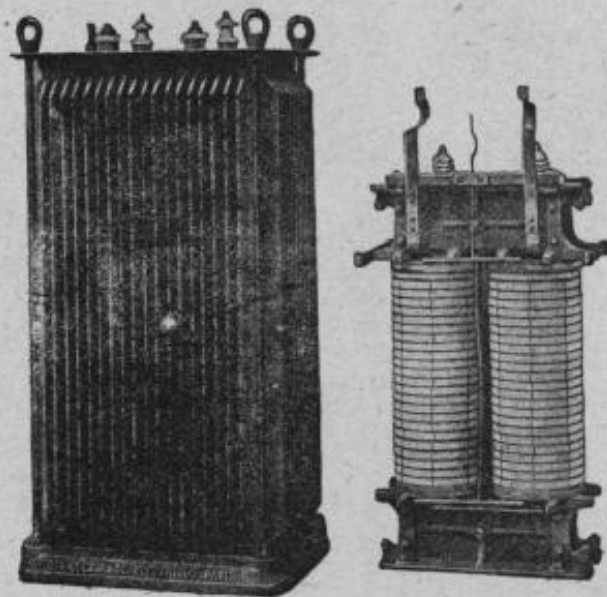


FIG. 1231. — Transformateur monophasé à bain d'huile (Société l'Éclairage Électrique).

Le flux, traversant le noyau et les deux circuits, produit dans ces derniers des forces électromotrices d'induction qui sont entre elles comme

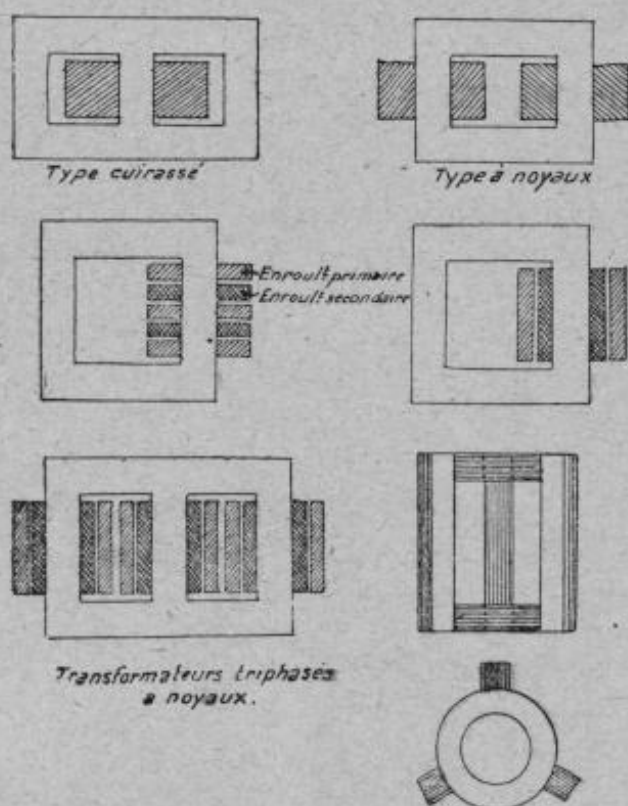


FIG. 1232.

les nombres de spires des bobines, ce qui permet de faire varier à volonté les forces électromotrices primaire et secondaire. La force électromotrice induite dans le secondaire est de même forme sinusoïdale et de même période que celle du circuit primaire.

Si E et I , puis E' et I' sont les forces électromotrices et les intensités dans les circuits primaire et secondaire, on a toujours :

$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'}$$

n et n' , nombre de spires.

Comme $EI = E'I'$, il s'ensuit que : $\frac{E}{E'} = \frac{I}{I'} = \frac{n}{n'}$.

Le rapport $\frac{n}{n'}$ porte le nom de coefficient de transformation. |

Les valeurs des f. é. m. primaire et secondaire sont respectivement :

$$E = \frac{4,44NN' \sim}{10^8} \text{ volts ; } E' = \frac{4,44NN'_i \sim}{10^8} \text{ volts ;}$$

N , nombre de lignes de force ; N' et N'_i , nombre de spires primaires et secondaires.

D'autre part, soient μ la perméabilité du fer, l la longueur, s la section du noyau formant le circuit magnétique fermé, les coefficients d'induction mutuelle (L_m) et de self-induction du circuit primaire (L_s) ont pour valeurs :

$$L_m = 4\pi \cdot n \cdot n' \cdot \mu \cdot \frac{s}{l} \quad \text{et} \quad L_s = 4\pi \cdot n^2 \cdot \mu \cdot \frac{s}{l}$$

Quant à la puissance dissipée dans le transformateur, elle est donnée par l'expression :

$$P \text{ watts} = v \left(\frac{\omega h \mathfrak{B}^{1/6}}{10^7} + \frac{1,234 \omega^2 e^2 \mathfrak{B}^2}{10^{13}} \right).$$

dans laquelle v est le coefficient dit de Steinmetz (compris entre 0,002 et 0,003), e l'épaisseur de la tôle en millimètres et ω la fréquence du courant égale à $\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)$.

La puissance utile P_u a pour valeur : $P_u = E'I' \cos \varphi = RI'^2$;

D'où l'on tire :

$$I' = \frac{P_u}{E' \cos \varphi} \quad \text{et} \quad R = \frac{(E' \cos \varphi)^2}{P_u}.$$

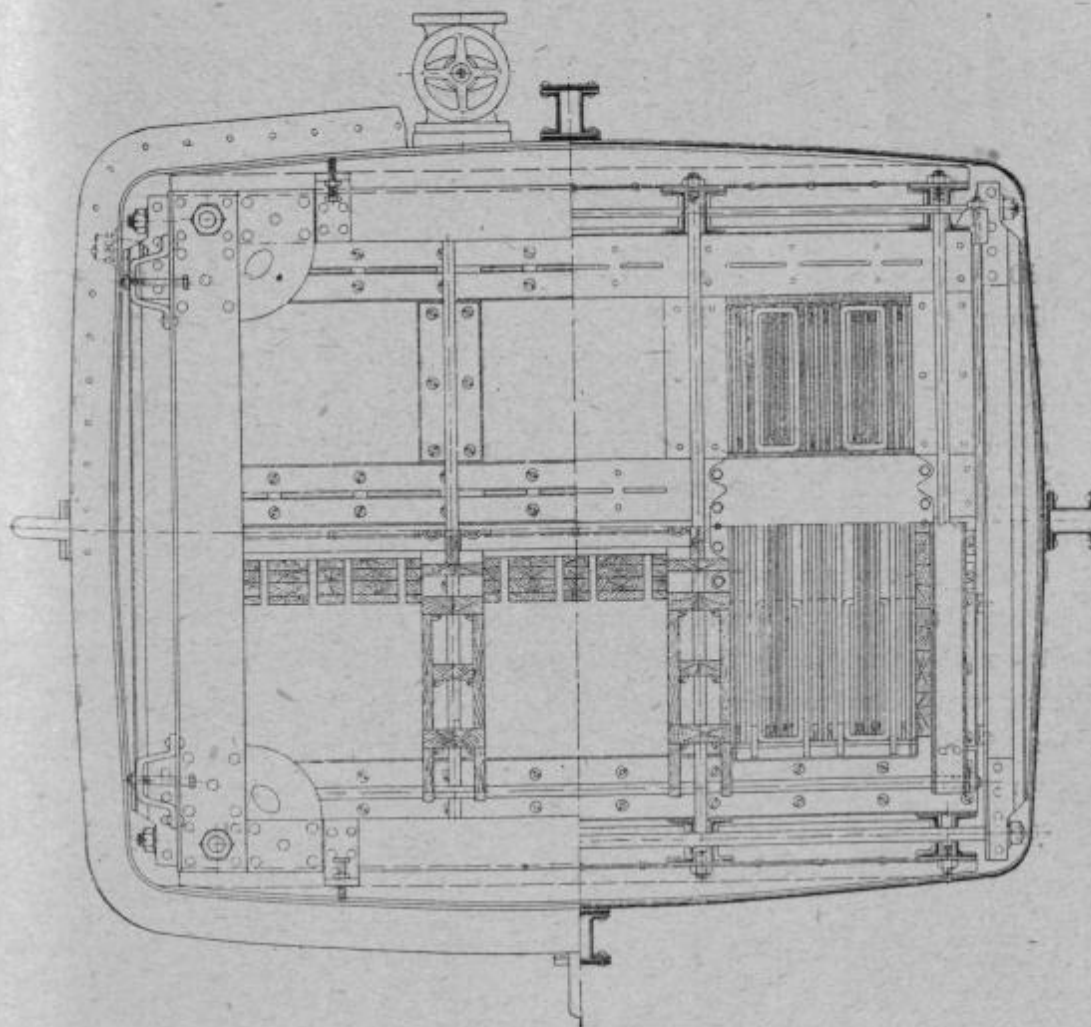


FIG. 1233. — Transformateur de 7.000-70.000 volts à bain d'huile et circulation du liquide.

Pour un transformateur triphasé, on obtient :

$$P_u = E'I' \sqrt{3} \cos \varphi = 3RI'^2.$$

Par suite :

$$I' = \frac{P_u}{E' \sqrt{3} \cos \varphi} \quad \text{et} \quad R = \frac{(E' \cos \varphi)^2}{P_u}.$$

- La puissance que peut fournir un transformateur est limitée par l'accroissement de température admissible, température qui ne peut dépasser 80° dans les transformateurs avec conducteurs isolés au coton et 120° avec ceux isolés au mica.

La quantité d'air nécessaire au refroidissement se tire de la formule :

$$Q = \frac{(1 - \eta) P}{1,1 (t - t_0)};$$

Q, volume d'air en mètres cubes par seconde ; P, puissance du transformateur en kilowatts ; η , rendement du transformateur, et $(t - t_0)$, élévation de température admise.

Dans un transformateur, les pertes dans le fer sont pratiquement constantes, tandis que celles par effet Joule dans le cuivre augmentent proportionnellement au carré de la charge.

490. Calcul de la chute de tension dans un transformateur travaillant sous charge inductive. — *Méthode de M. P. Boucherot.* — On sait que cette méthode est basée sur la considération des puissances mises en jeu dans un circuit alternatif, à savoir les puissances réelles (ou actives), qui correspondent, dans une période, à une certaine quantité d'énergie produite ou dépensée, et les puissances compensées (ou réactives), qui servent à produire des flux de force magnétique dont l'intégrale est nulle dans la période et même dans la demi-période.

La solution du problème suppose connues les fuites magnétiques respectives du primaire et du secondaire, d'où l'on déduit facilement les forces contre-électromotrices développées par ces fuites dans leurs circuits respectifs, f. é. m. en retard de un quart de période sur le courant et donnant lieu à des puissances compensées (magnétisantes), dont on a la valeur en multipliant les f. c. é. m. par les courants traversant les circuits respectifs dans lesquels elles se développent.

Appelons :

U_1 et U_2 , les différences de potentiel primaire et secondaire ;

E_1 et E_2 , les f. é. m. développées dans les circuits ;

P_1 et P_2 , les puissances réelles ;

\mathcal{Q}_1 et \mathcal{Q}_2 , les puissances compensées (magnétisantes dans le cas particulier) ;

P_f , la perte par hystérésis et courants de Foucault dans le fer ;

P_{1app} et P_{2app} , les puissances apparentes dans chacun des circuits ;

r_1 et r_2 , les résistances réelles des enroulements ;
 φ_1 et φ_2 , les résistances fictives correspondant aux fuites magnétiques
 des circuits et donnant lieu à des puissances compensées.
 La puissance réelle totale dans le secondaire est :

$$P_{2\text{tot}} = P_2 + r_2 I_2^2.$$

La puissance compensée (magnétisante) totale dans le secondaire est

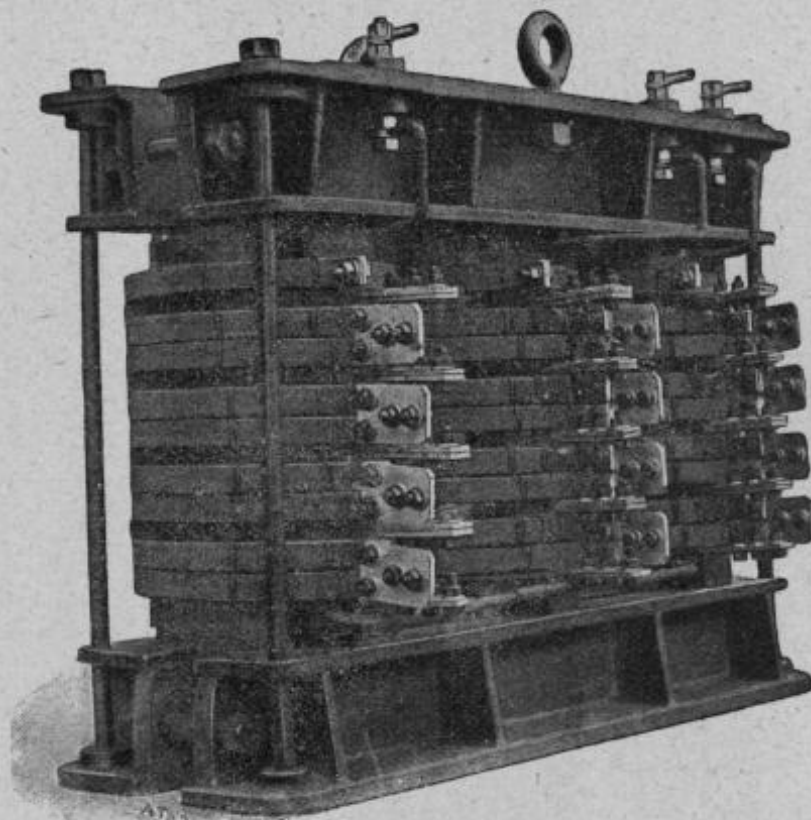


FIG. 1234. — Transformateur sectionné de réglage (Construction H. Guénod, S. A.).

la somme de la puissance compensée qu'il débite, plus celle due aux fuites magnétiques du secondaire :

$$Q_{2\text{tot}} = Q_2 + \varphi_2 I_2^2.$$

La puissance apparente totale dans le secondaire est donc :

$$P_{2\text{app}} = \sqrt{P_{2\text{tot}}^2 + Q_{2\text{tot}}^2}.$$

La force électromotrice correspondante :

$$E_2 = \frac{P_{2\text{app}}}{I_2}.$$

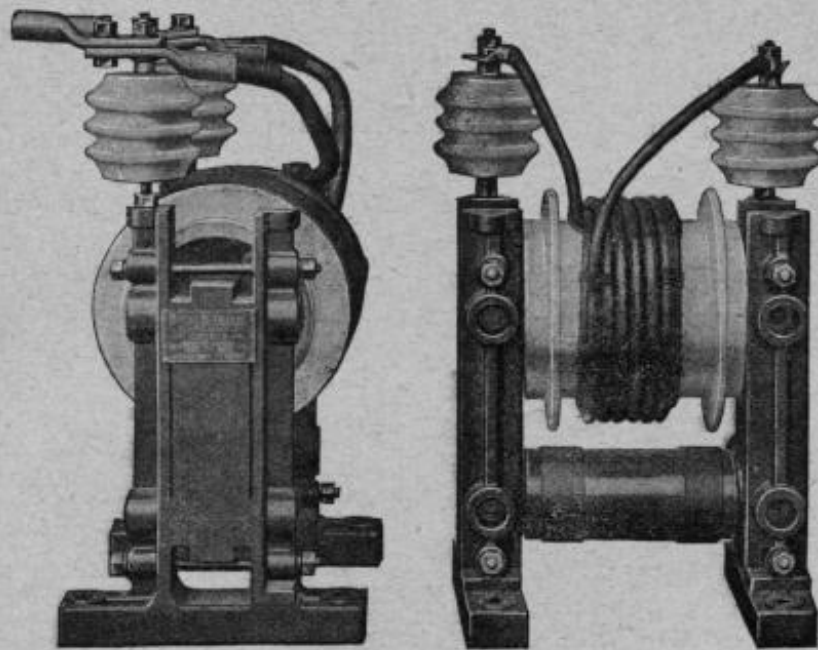


FIG. 1235. — Transformateur d'intensité à air libre, tension 5.000 volts
(Construction H. Guénod, S. A.).

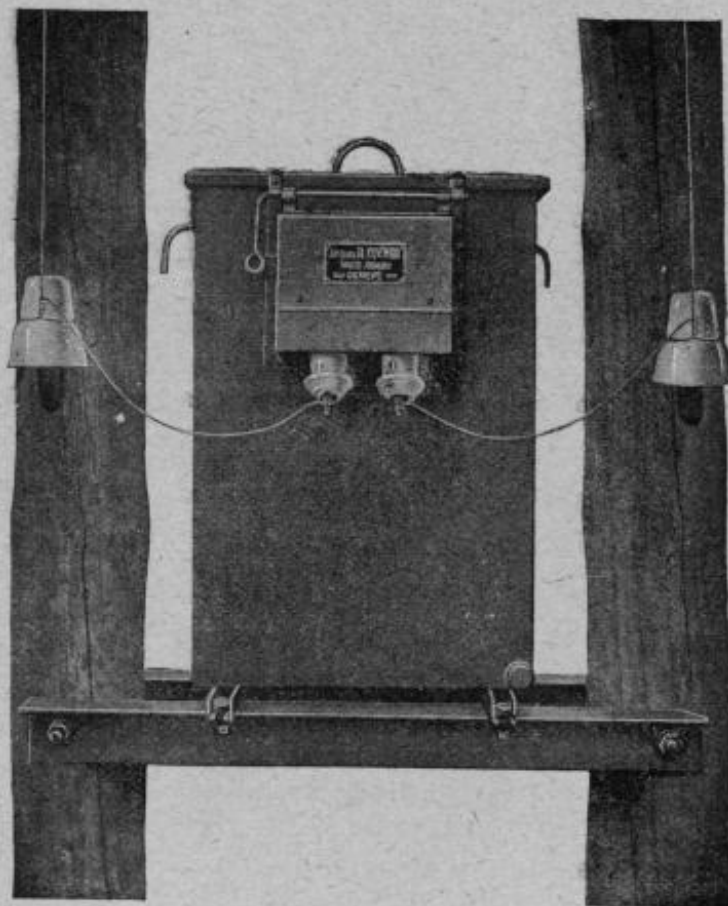


FIG. 1236. — Transformateur à bain d'huile pour montage sur 2 poteaux
(Construction H. Guénod, S. A.).

Du rapport du nombre de spires primaires et secondaires, on déduit facilement la force électromotrice primaire E_1 .

Désignons par P_f la puissance perdue dans le fer (hystérésis et courants de Foucault), et par \mathcal{P}_f la puissance compensée (magnétisante) nécessaire pour produire le flux dans le fer du transformateur, on aura pour la puissance apparente totale développée dans le primaire :

$$P_{app} = E_1 I_1 = \sqrt{(P_{2tot} + P_f)^2 + (\mathcal{P}_{2tot} + \mathcal{P}_f)^2}.$$

La puissance réelle aux bornes du primaire sera :

$$P_1 = P_{2tot} + P_f + r_1 I_1^2.$$

La puissance compensée (magnétisante) aux bornes du primaire est :

$$\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_{2tot} + \mathcal{P}_f + r_1 I_1^2.$$

La puissance apparente aux bornes du primaire est :

$$P_{app} = \sqrt{P_1^2 + \mathcal{P}_1^2},$$

et la tension aux bornes du primaire :

$$U_1 = \frac{P_{app}}{I_1}.$$

On fait un premier calcul de U_1 en donnant à P_2 et \mathcal{P}_2 des valeurs nulles, ce qui correspond à la marche à vide, et un second calcul en donnant à P_2 et \mathcal{P}_2 leurs valeurs respectives en charge. On obtient ainsi deux valeurs de U_1 correspondant à celles qu'il faudrait lui donner pour que U_2 reste constant. Le rapport de ces deux valeurs diffère extrêmement peu du rapport réel entre les différences de potentiel aux bornes du secondaire à vide et en charge, et il lui est pratiquement égal.

La chute de tension en charge se calcule aussi par la méthode classique de Kapp, mais elle nécessite au préalable la connaissance des coefficients de self induction des circuits primaire et secondaire lesquels peuvent être définis par comparaison avec des types déjà existants. Si l'enroulement comporte n spires primaires et n_1 spires secondaires et qu'il y ait sur le noyau (se succédant alternativement) m et m_1 bobines distinctes, on prendra pour lesdits coefficients λ et $\lambda_1 = k = ml$ et $k^2 = m^2 l$;

$$\lambda = ml \text{ et } \lambda_1 = m_1 l_1 ;$$

l et l_1 se déterminant par les formules suivantes :

$$l = 4\pi \frac{n}{m} \frac{S}{a + \sqrt{a^2 + \mathcal{L}^2}} 10^{-9}$$

et

$$l_1 = 4\pi \frac{n_1}{m_1 a_1 + \sqrt{a_1^2 + \mathcal{L}_1^2}} 10^{-3};$$

a et a_1 rayons des spires primaires, S et S_1 les surfaces embrassées par les spires moyennes et \mathcal{L} et \mathcal{L}_1 les longueurs des mêmes spires.

Arnold, pour bobines concentriques, donne la formule (fig. 1237) pour la conductance de fuite de chaque bobine :

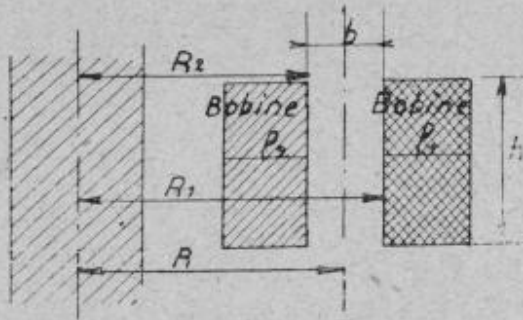


FIG. 1237.

$$c = \frac{2\pi}{h} \left[bR + \frac{e_1}{6} (3R_1 + e_1) \right]$$

$$c_1 = \frac{2\pi}{h} \left[bR + \frac{e_2}{6} (3R_2 - e_2) \right]$$

et les coefficients cherchés λ et λ_1 par les formules :

$$\lambda = 4\pi n^2 c 10^{-9}; \quad \lambda_1 = 4\pi n_1^2 c_1 10^{-9}$$

Pour une chute de tension donnée, le meilleur moyen de diminuer les pertes dans le noyau consiste, d'après Hobart, à augmenter le nombre de spires de l'enroulement, en distribuant convenablement les bobines primaires et secondaires, suivant que la charge est plus ou moins inductive, et à diminuer en même temps la section et le poids du fer dans le circuit magnétique. On demande généralement de garantir une chute de tension de 2 0/0 entre 0 et la pleine charge.

Abaque pour la chute de tension des transformateurs. — M. A. Blondel a enrichi l'électrotechnique d'un abaque résolvant très simplement la question du calcul de la chute de tension des transformateurs dans les conditions d'approximation que l'on admet ordinairement, c'est-à-dire en négligeant en charge l'influence du courant d'excitation ⁽¹⁾.

Principe. — M. A. Blondel admet les relations simplificatrices usuelles :

$$n_1 I_1 = n_2 I_2;$$

$$n_1 U_2 = n_2 U_1$$

en appelant $\frac{n_1}{n_2}$ le rapport de transformation, I_1 , I_2 les courants, U_1 , U_2 les tensions aux bornes.

Le transformateur se comporte comme un simple filtre qui présente au passage du courant une certaine résistance et une certaine self-induction ; si on rapporte tout, par exemple, au circuit secondaire, le transformateur est équivalent à une résistance :

$$R_2 = r_2 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 r_1$$

⁽¹⁾ La Lumière électrique, 12 mars 1910.

présentant une self-induction :

$$L_2 = l_2 \sigma,$$

en appelant σ le coefficient de dispersion dont la valeur est :

$$\sigma = 1 - \frac{M_2}{l_1 l_2}.$$

Si on rapporte au contraire tout au circuit primaire, on devra lui attribuer les constantes :

$$R_1 = r_1 + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 r_2,$$

$$L_1 = \sigma l_1.$$

L'impédance correspondante Z a pour valeurs respectivement, suivant le cas :

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega \sigma l_2)^2};$$

ou

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega \sigma l_1)^2};$$

et le facteur de réactance :

$$\tan \alpha = \frac{\omega \sigma l_2}{R_2} = \frac{\omega \sigma l_1}{R_1}.$$

Portons en M_1O (fig. 1238 et 1239) la tension aux bornes, U_2 . Soit OA le

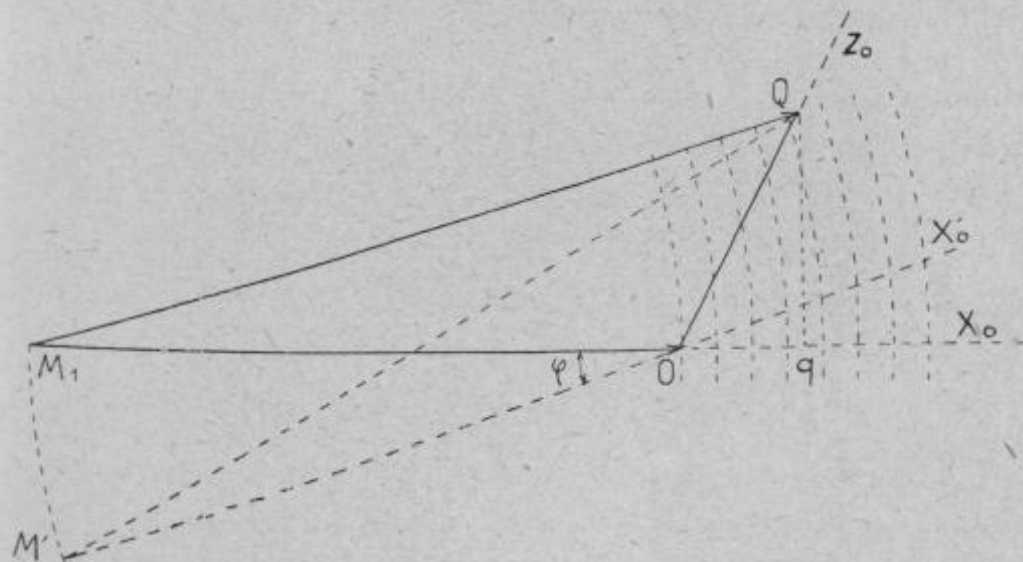


FIG. 1238. — Premier problème. — Principe de la construction d'un abaque de la tension primaire U_1 , pour différents régimes, pour maintenir une tension U_2 constante aux bornes secondaires.

courant de charge I_2 , décalé par exemple de l'angle φ ; il donne lieu à une chute par impédance, $OQ = Z_2 I_2$, décalée de α en avance sur I .

La force électromotrice à vide (correspondant théoriquement à la tension primaire aux bornes U_1) $E_2 = \frac{n_2 U_1}{n_1}$, est représentée par la résultante $M_1 Q$. La chute de tension $E_2 - U_2$ produite par la charge peut être représentée par le segment obtenu en traçant un arc de cercle avec M_1 comme centre.

Cette chute de tension, qui varie avec l'intensité I_2 et le décalage φ , est maximum pour une même intensité I_2 , quand OQ vient sur l'axe horizontal $M_1 O X_0$, c'est-à-dire quand le courant est décalé d'un angle

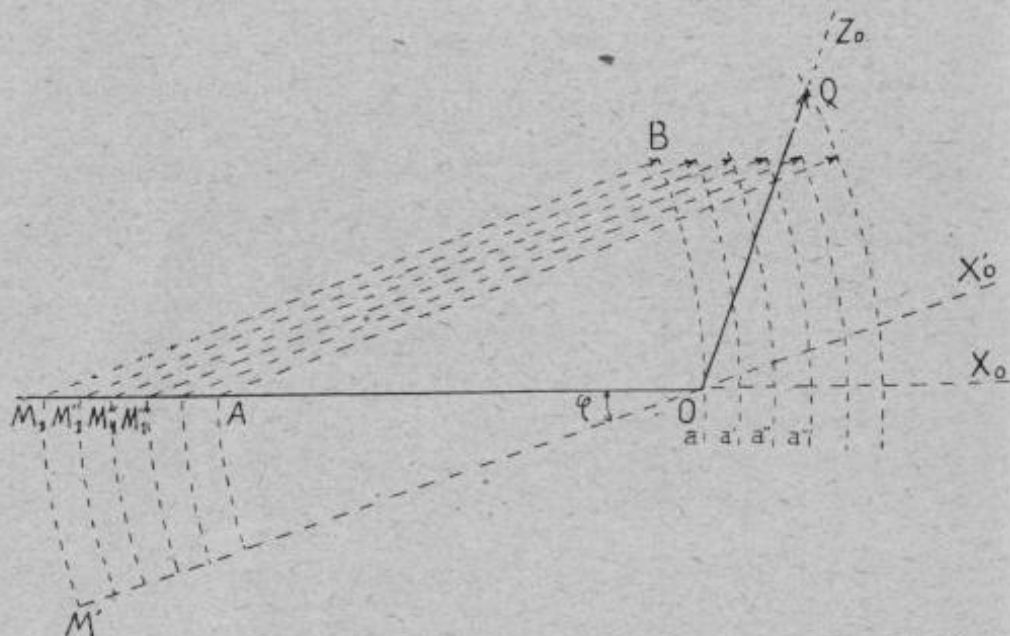


FIG. 1239. — Deuxième problème. — Principe d'un abaque pour déterminer la chute de tension secondaire U_2 aux bornes du circuit d'utilisation, en supposant la tension primaire U_1 constante.

égal à l'angle α défini plus haut. Elle a pour valeur relative en pour cent, en appelant I_{cc} le courant de court-circuit mesuré au primaire :

$$\frac{Z_1 I_{cc}}{U_1} = \frac{U_{cc}}{U_1},$$

U_{cc} étant la tension mesurée aux bornes primaires pendant le court-circuit.

Pour simplifier l'épure, M. Blondel représente le courant de charge lui-même par le vecteur $Z_2 I_2$ ou $Z_1 I_1$, en prenant une échelle de courant Z_2 ou Z_1 fois plus grande, et en comptant l'angle de phase φ du courant à partir d'une droite OZ_0 faisant un angle α en avance sur OX_1 ; ici $\varphi = 0$ sur les (fig. 1238 et 1239) ; on verra plus loin le cas général.

Cela posé, le problème de la chute de tension peut être envisagé à deux points de vue différents :

1° On peut se donner comme constante la tension secondaire aux

bornes U_2 et chercher la façon dont doit être réglée la tension primaire U_1 pour obtenir ce résultat.

2° On peut, au contraire, comme c'est le cas ordinaire, supposer la tension primaire U_1 constante (d'où E_2 constant) et chercher comment varie la tension aux bornes secondaires U_2 en fonction de la charge.

Dans le premier cas (*fig. 1238*), on pourra construire un abaque de la

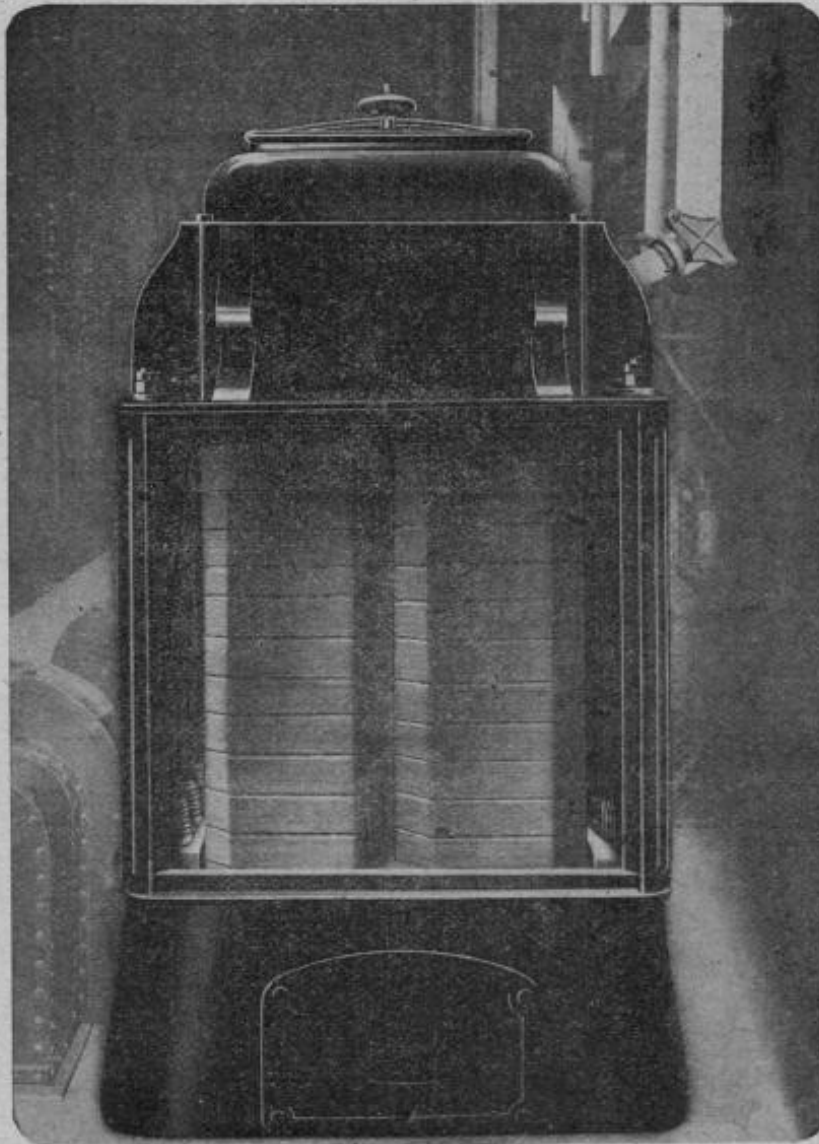


FIG. 1240. — Transformateur de 400 K. V. A. à air soufflé (Thomson-Houston).

force électromotrice E_2 en traçant du centre M_1 une série de cercles concentriques de rayons croissants et équidistants et en inscrivant sur chaque cercle les tensions correspondantes. On pourra alors évaluer à vue par simple interpolation la valeur de E_2 d'après la position du point Q , par rapport au réseau de cercles.

Dans le second cas (*fig. 1239*), on prendra un rayon constant M_1O et on

tracera des cercles d'égale tension primaire (d'où $E_2 = \text{constante}$) en prenant sur la direction MO une série de points équidistants M_1, M'_1, M''_1 , comme centres successifs de cercles a, a', a'' , ayant tous le même rayon

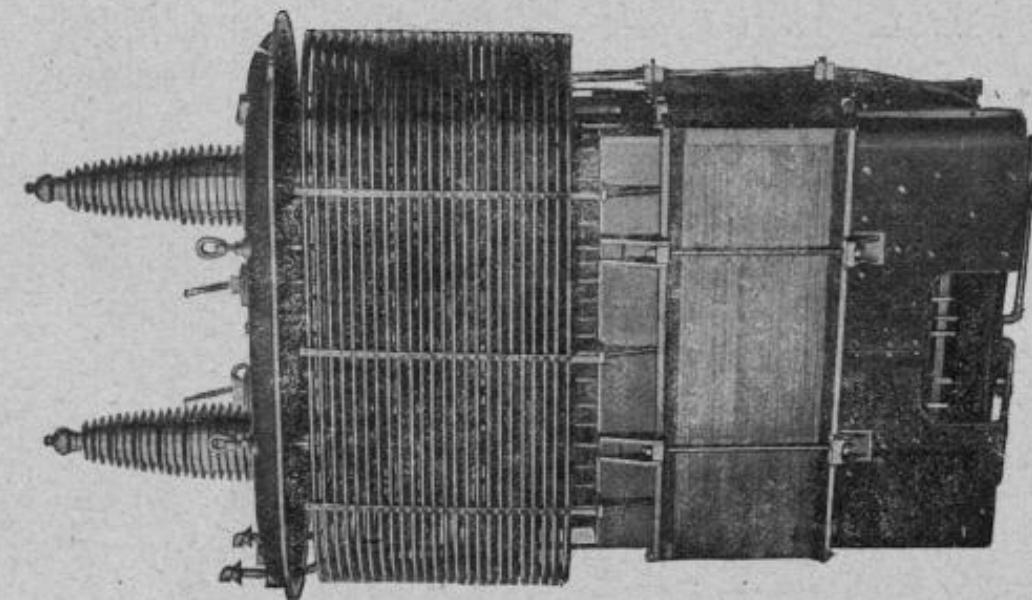


Fig. 1242. — Transformateur à 140.000 volts, refroidi par circulation d'eau. Vue intérieure montrant le serpentín (Construction Thomson-Houston).

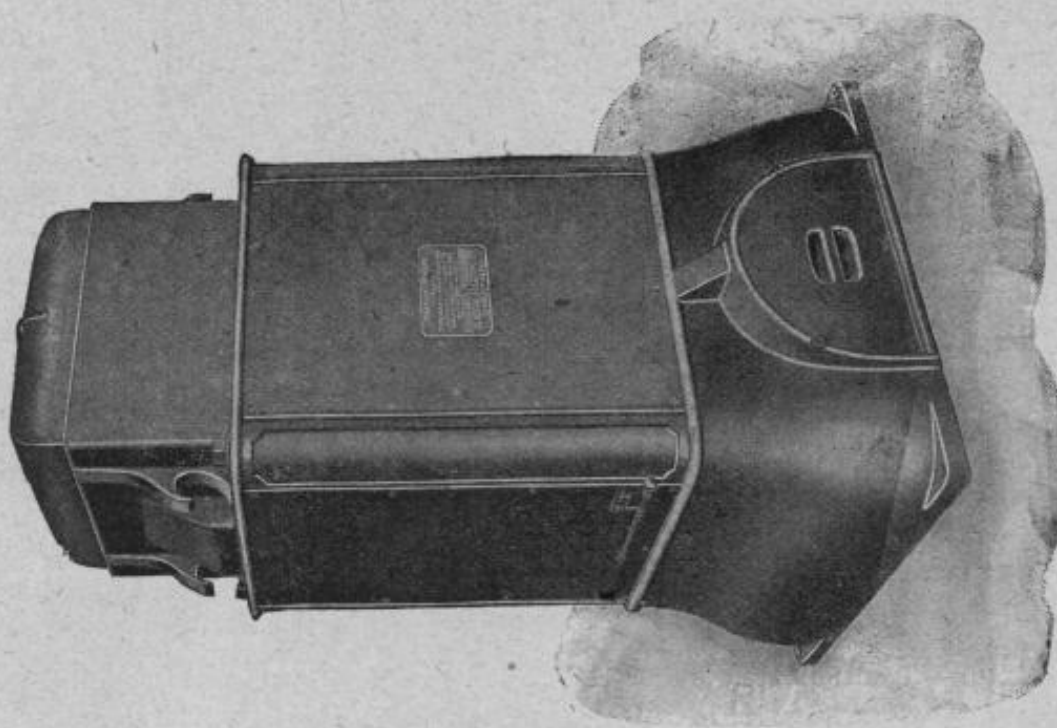


Fig. 1241. — Transformateur à insufflation d'air. (Construction Thomson-Houston).

et portant un chiffre de tension correspondant respectivement aux longueurs $M_1O, M'_1O, M''_1O, M'''_1O$, etc...

On voit que, dans le second cas, la graduation des cercles va en décroissant de gauche à droite, tandis que, dans le premier cas, elle va en croissant.

Si, comme il est rationnel, on veut faire cette graduation en pour cent de la tension à vide, on trace dans le premier cas des cercles ainsi gradués :

$$100, \quad 100 + \varepsilon, \quad 100 + 2\varepsilon, \quad 100 + 3\varepsilon, \quad \text{etc. ...},$$

et, dans le second cas, des cercles gradués :

$$100, \quad 100 - \varepsilon, \quad 100 - 2\varepsilon, \quad 100 - 3\varepsilon, \quad \text{et ...},$$

ε étant l'espacement des cercles en pour cent.

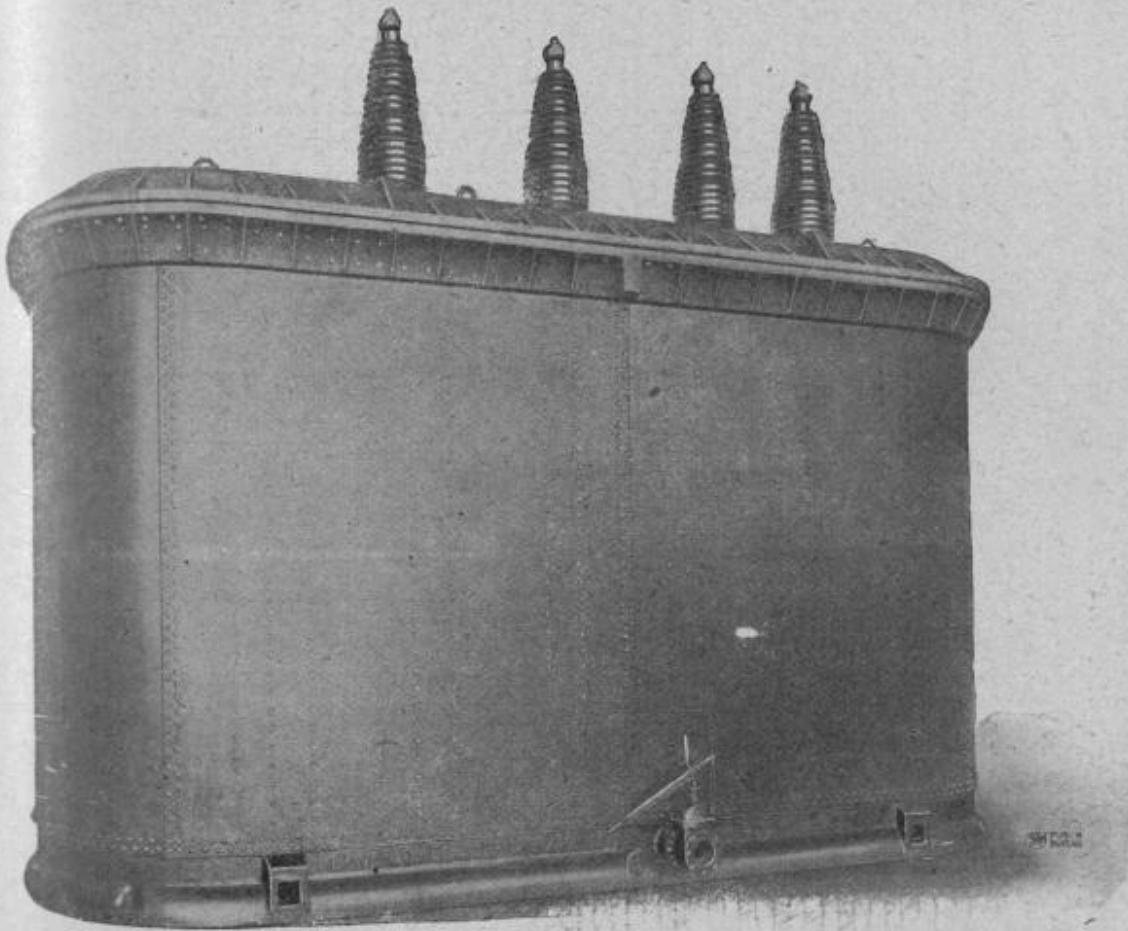


FIG. 1243. — Transformateur type cuirassé de 14.000 K. V. A., 100.000 volts.
(Construction Thomson-Houston).

De ces épures, on déduit la construction de l'abaque de la chute de tension des transformateurs comme l'abaque des lignes (*Lumière Electrique*, septembre 1909), en supprimant toute la partie de l'épure qui est à gauche de O, et en ne gardant que les cercles, les axes OX_0 et OZ_0 ; ce dernier axe est seul variable en inclinaison (et en grandeur OQ_0) suivant la construction du transformateur dont dépend le coefficient α et la chute relative par impédance $\frac{Z_2 I_2}{E_2}$ ou $\frac{Z_1 I_1}{U_1}$.

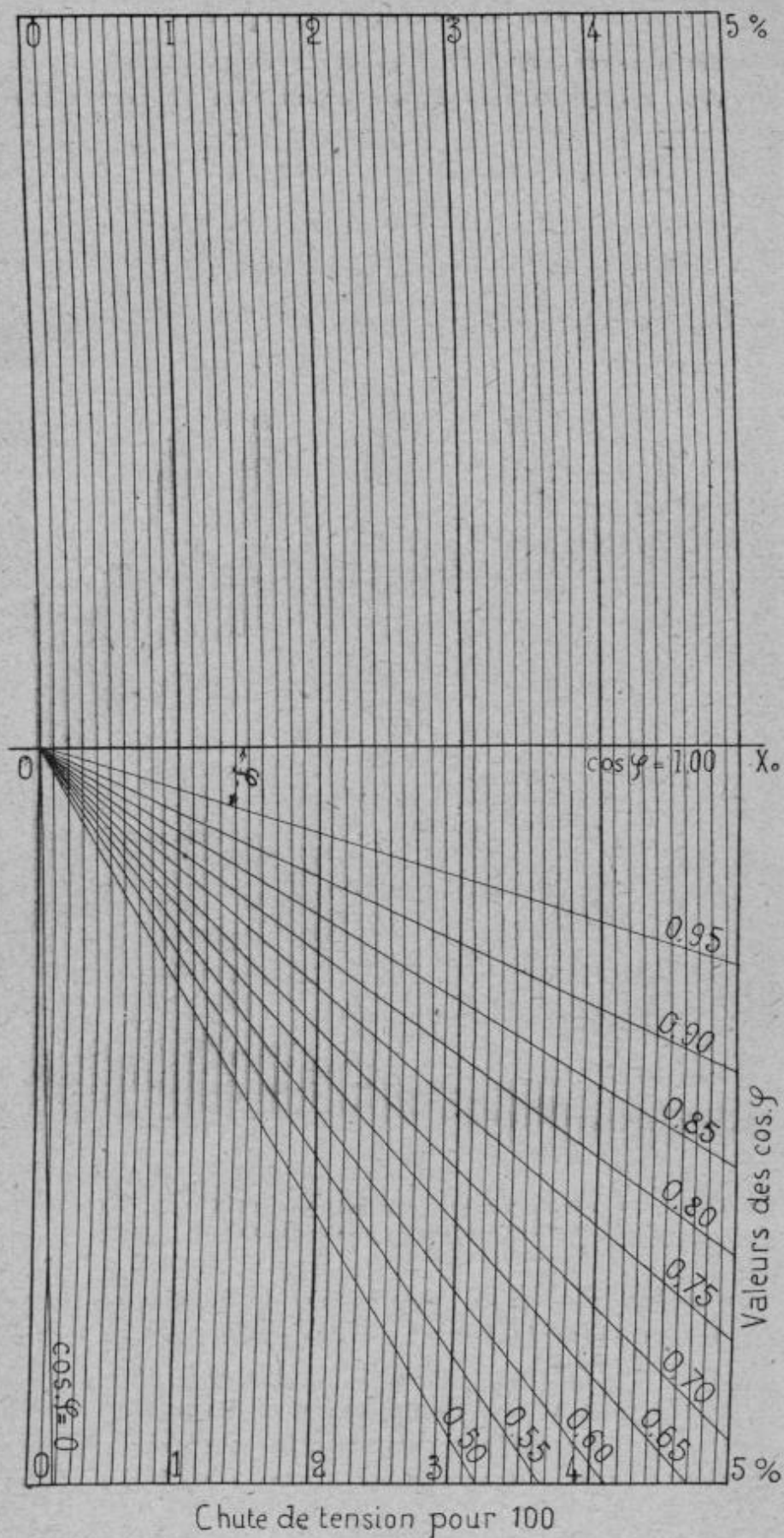


FIG. 1244. — Abaque pour la mesure des chutes de tension.

L'abaque fixe (*fig. 1244*) comprend un réseau de cercles à grand rayon, 1 mètre ou 2 mètres (donnant 1 centimètre ou 2 centimètres d'équidistance entre cercles pour une chute de tension de 1 0/0 de la tension normale ⁽¹⁾, sur lequel on a marqué le point O et l'axe OX_0 .

On n'a plus qu'à construire, pour l'étude de chaque transformateur,

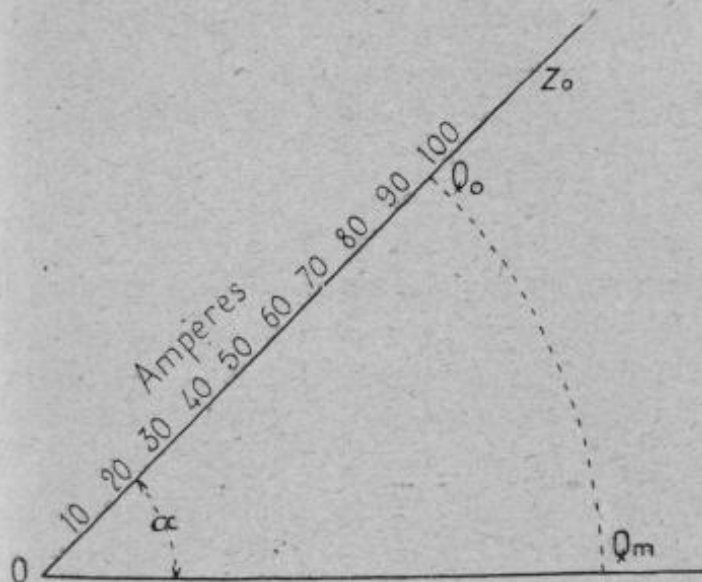


FIG. 1245. — Exemple d'abaque mobile pour un transformateur de 300 K. V. A. Le pôle O doit être appliqué sur celui de l'abaque fixe et l'abaque OX' sur l'axe de l'abaque fixe correspondant au prévu.

qu'une épure mobile sur papier calque contenant l'axe OX , le centre O et la ligne OZ_0 graduée en ampères (*fig. 1245*). Cette construction peut se faire en utilisant directement les résultats d'une mesure du courant de court-circuit. On exécute cette mesure à la manière ordinaire ⁽²⁾ et on connaît d'autre part l'angle α par des mesures directes des résistances primaire

et secondaire et par la connaissance des nombres de spires. Il peut être préférable, d'ailleurs, de mesurer α au moyen d'un bon wattmètre (fait pour l'étude des forts décalages), pour tenir compte des courants de Foucault dans la résistance apparente.

Soient I_{cc} le courant secondaire de court-circuit mesuré ; U_{cc} la tension primaire correspondante aux bornes ; on calcule en pour cent la longueur :

$$OQ_0 = \frac{U_{cc}}{U_1}$$

⁽¹⁾ Si l'on ne disposait pas d'un compas à verge pour faire ce tracé directement, rien n'est plus facile que de tracer le gabarit de l'un des cercles par points en portant en abscisses sur OX_0 les valeurs exprimées en millimètres :

$$Ob = 1\,000 (1 - \cos \beta)$$

en ordonnées :

$$bB = 100 \sin \beta$$

et en faisant varier β .

Il suffit de déplacer ce gabarit parallèlement à lui-même pour tracer tous les cercles.

⁽²⁾ L'essai de court-circuit, comme on sait, a été indiqué par Kapp ; le présent abaque peut être considéré comme une application de la méthode de Kapp, mais ne doit pas être confondu avec le diagramme des chutes de tension de Kapp.

et on gradue de manière que le chiffre correspondant au point Q_0 représente numériquement le nombre d'ampères (primaires ou secondaires, selon ce qu'on préfère) correspondant à I_{cc} mesuré.

Puis on trace sur le même calque l'axe OX' faisant l'angle α tel que :

$$\tan \alpha = \frac{L_1}{R_1}.$$

On n'a plus qu'à superposer la seconde épure à la première, le pôle O sur pôle O . On tiendra compte alors du décalage du court-circuit d'utilisation de la même manière qu'on a déjà fait pour les lignes, et que rappellent clairement les (*fig.* 1238 et 1239), c'est-à-dire qu'on déplacera l'axe OX_0 qui figure sur l'épure des cercles d'un angle φ par rapport à l'axe OX , de l'épure qui porte le segment OQ ; il est plus simple ici de déplacer la seconde épure par rapport à la première. Il est donc tracé sur l'abaque fixe des lignes de repère qui indiquent la position qu'il faut donner à l'axe OX' de l'épure mobile suivant les différents décalages.

Au lieu d'indiquer les décalages en degrés, il est beaucoup plus pratique de tracer les angles qui correspondent à des facteurs de puissance connus et ordinairement employés. C'est ainsi que M. Blondel indique les lignes de repère correspondant à $\cos \varphi = 0,95 ; 0,90 ; 0,85 ; 0,80 ; 0,75 ; 0,70 ; 0,65 ; 0,55 ; 0,50$. On pourrait en tracer d'autres si on le juge nécessaire.

Exemple d'application. — Pour tracer un exemple d'abaque mobile, nous prenons le cas d'un transformateur de 300 K. V. A. (3.000 volts, 100 ampères) dont les constantes sont les suivantes :

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,6 \text{ ohm}; \\ I_{cc} &= 100 \text{ ampères}; \\ U_{cc} &= 90 \text{ volts}; \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{90}{100} = 0,9 \text{ ohm}; \\ L_1 &= \omega \pi l_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{0,81 - 0,36} = 0,67 \text{ ohm}; \\ \frac{Z_1 I_{cc}}{U_1} &= \frac{U_{cc}}{U_1} = \frac{90}{3000} = 3 \text{ 0/0}; \\ \alpha &= \arctan \frac{0,67}{0,6} = 1,102. \end{aligned}$$

La ligne OQ_m est ainsi égale à 3 0/0 et tracée à la même échelle de longueur que l'équidistante des cercles de l'abaque fixe ; on forme l'angle $Q_0 OQ_m = \alpha$ et on trace le cercle $Q_m Q_0$, puis on gradue OQ_0 .

Ici la ligne OQ_0 correspondante à 100 ampères primaires a été graduée en 10 parties égales de 10 ampères primaires ; mais chacune de ces parties représente aussi bien, si on le préfère, 300 ampères secondaires, si la

tension secondaire est de 100 volts, par exemple ; et plus généralement $10 \frac{n_1}{n_2}$ ampères.

Supposons qu'on veuille trouver par l'abaque la chute de tension pour $\cos \varphi = 0,90$: on place OQ_m sur la droite $O - 0,90$ de l'abaque fixe et on regarde où tombe le point Q_0 par rapport aux cercles ; on voit que c'est sur le second cercle à gauche du cercle de 3 0/0 ; la chute de tension est donc 2,8 0/0.

De même, si on place la droite OQ_m sur la droite $O - 0,60$, on voit que Q tombe plus près du cercle de 3 0/0 et on lit une chute de tension de 2,96 0/0.

En résumé, l'abaque fixe donné ci-dessus permet, en partant de l'essai en court-circuit, de mesurer immédiatement toutes les chutes de tension de transformateurs quelconques, à la seule condition de tracer sur un morceau de papier calque une épure formée de deux lignes graduées, distantes d'un certain angle α , facile à calculer. Il n'y a qu'à l'appliquer sur l'abaque fixe, dont il est donné une reproduction directement utilisable.

491. Transformateurs triphasés. — Les transformateurs triphasés, du type à noyaux, comprennent trois noyaux disposés parallèlement dans un plan vertical et réunis par des culasses, ou bien trois noyaux verticaux assemblés aux trois arêtes de deux prismes triangulaires formant culasses. Sur les trois colonnes du noyau on enfile les bobines primaires et secondaires, chaque colonne correspondant à une phase. On préfère généralement ce dernier à cause des facilités de construction. Mais la réactance correspondant au noyau du milieu est plus faible que dans celle des deux autres noyaux extrêmes. Les pertes à vide sont donc différentes pour les trois circuits et elles peuvent être assez considérables.

On peut aussi utiliser trois transformateurs simples en couplant leurs enroulements soit en triangle, soit en étoile.

Pour un transformateur triphasé dont le rapport de transformation est $\frac{1}{m}$ branché sur un réseau dont la tension entre fils est U_{eff} on a au secondaire : suivant le montage adopté pour le primaire I et le secondaire II les tensions suivantes :

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} \text{I et II en étoile} \\ \text{I et II en triangle} \end{array} \right\} & \frac{1}{m} U_{\text{eff}}. \\ \text{I en étoile et II en triangle} & \frac{1}{m} \frac{U_{\text{eff}}}{\sqrt{3}} \\ \text{I en triangle et II en étoile} & \frac{1}{m} U_{\text{eff}} \cdot \sqrt{3} \end{aligned}$$

Le circuit magnétique est toujours fermé, afin que le flux passe entièrement dans le fer. Il est constitué par des paquets de tôles découpées

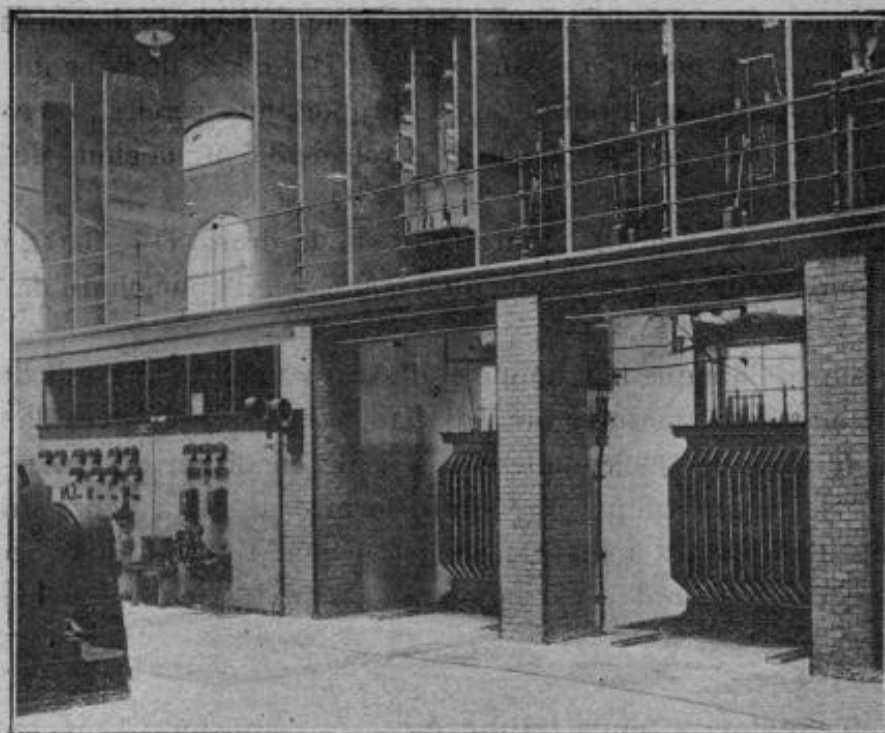


FIG. 1246. — Transformateurs et appareillage de la sous-station de Forges, près Belfort. (Société Alsacienne de Constructions mécaniques).

en forme de T, de L, d'U ou d'E, selon le mode de montage de l'appareil, et que l'on assemble au moyen de boulons en assurant leur isolement électrique. Les tôles, qui ont 0mm,5 à 0mm,3 d'épaisseur, sont séparées, ainsi que les joints, par des feuilles isolantes de 0mm,05 à 0mm,07 d'épaisseur.

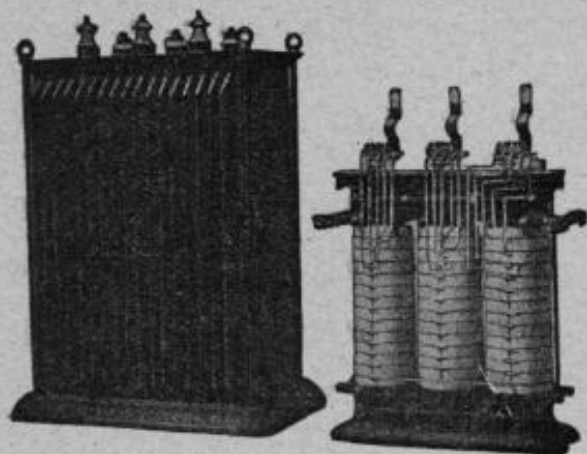


FIG. 1247. — Transformateur triphasé à bain d'huile (Société l'Éclairage Électrique).

Les transformateurs à haute tension sont généralement construits au moyen de bobines alternativement primaire et secondaire, préparées sur formes et fixées sur le noyau à l'aide de coins en bois, ce qui simplifie l'établissement de l'appareil, rend plus commodes les réparations et réduit au minimum la disper-

sion du flux. Cette disposition offre l'avantage appréciable d'avoir à la main sur une des faces du transformateur toutes les connexions des

bobines primaires reliées en tension, et sur la face opposée celles des bobines secondaires couplées en quantité.

Dans les transformateurs bien établis, la chute de tension varie de 1,5 à 3 0/0 et n'atteint 5 à 6 0/0 qu'avec une charge inductive. Si un transformateur ne doit alimenter que des lampes, il est indispensable de maintenir constante la tension aux bornes du circuit et de choisir un type dans lequel les pertes de fer soient peu inférieures, à pleine charge, à celles qui se produisent dans le cuivre. Pour les installations comportant en outre des moteurs, il faut employer un transformateur de puissance supérieure

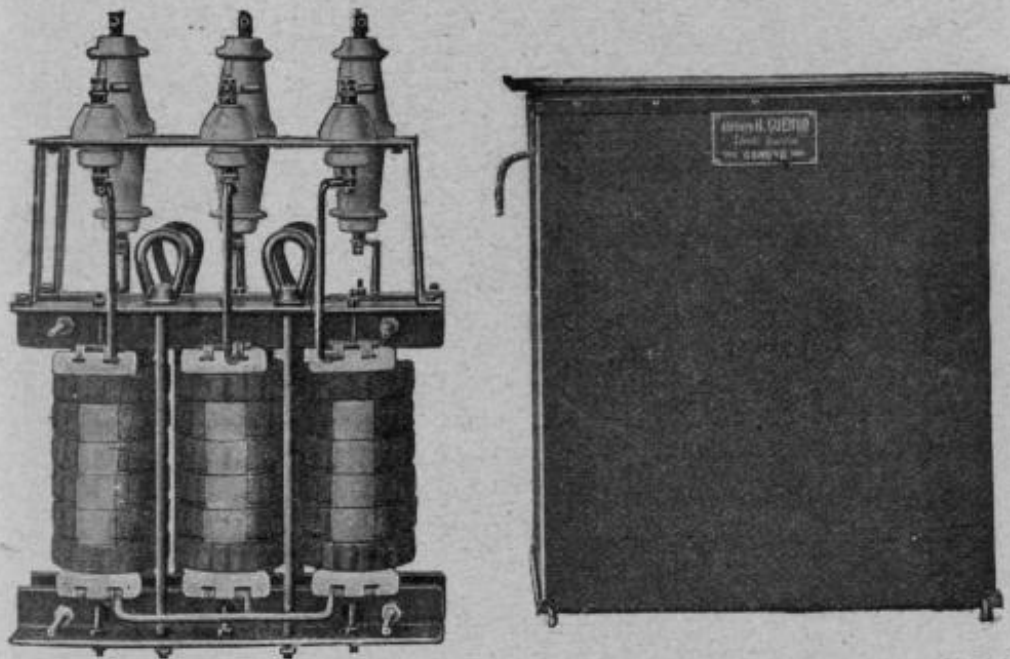


FIG. 1248. — Transformateur triphasé à bain d'huile (Construction H. Guénod, S. A.).

à celle strictement nécessaire pour que les variations de voltage ne dépassent pas 2 à 3 0/0 ; de plus, on prendra un type dans lequel les pertes de fer soient plus grandes que les pertes dans le cuivre. Dans les installations à services intermittents, on peut faire supporter une charge au transformateur sans courir le risque d'être endommagé, surtout s'il est muni d'un dispositif efficace de refroidissement.

Nous citerons, à titre de curiosité, le type de transformateur de 500.000 volts construit par M. C.-H. Thordarson, de Chicago, d'une puissance de 20 kilowatts. Les bobines du primaire et du secondaire sont enroulées sur un noyau en tôle et immergées dans l'huile. L'isolement des bornes du secondaire est assuré par du papier trempé dans la paraffine bouillante. La tension de ce transformateur peut être variée à l'aide d'un régulateur ; ainsi l'enroulement secondaire est mobile et, en manœuvrant une roue *ad hoc*, on peut le tenir plus ou moins loin du plan magnétique et, par suite, diminuer la tension.

La Société A. E. G. utilise un transformateur d'essai de 50 kilovolts-ampères, 50 périodes par seconde, pouvant donner 500.000 volts au secondaire. C'est un transformateur à noyau avec enroulements concentriques.

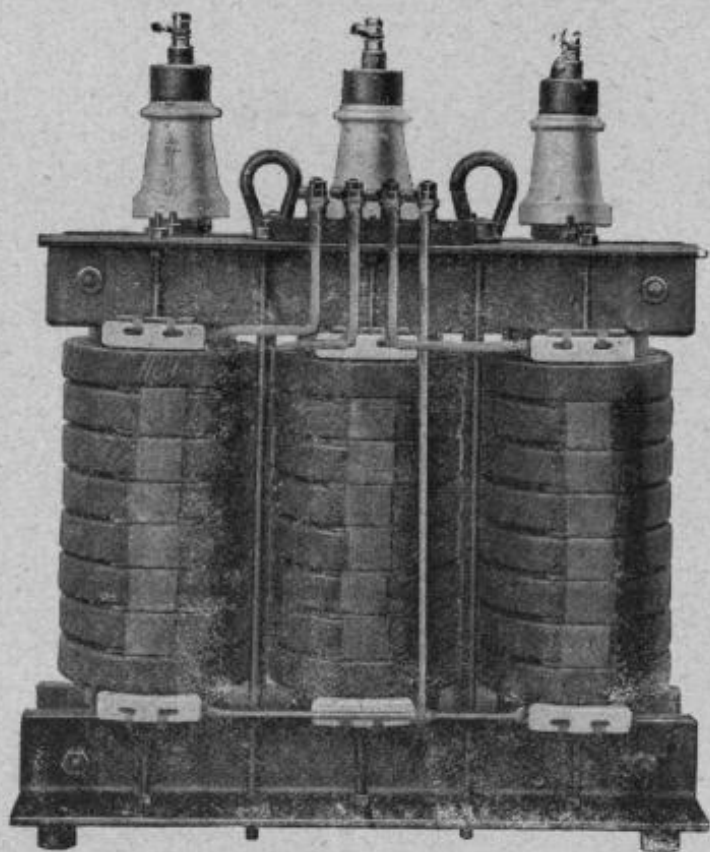


FIG. 1249. — Transformateur à air libre sans protection.
(Construction H. Guénod, S. A.).

L'enroulement à basse tension se compose de deux bobines à 1.040 volts bobinées directement sur le noyau.

Des cylindres isolants le séparent de celui à haute tension, qui comprend 20 bobines par branche, chaque bobine étant formée de 377 spires et donnant approximativement 9.000 volts, soit 24 volts par spire.

Les bornes à haute tension dépassent de 2 mètres la boîte à huile; elles sont montées sur des isolateurs de bois de 2^m,60 de hauteur.

La caisse mesure 1^m,90 × 3^m,05 × 2^m,5 et peut recevoir 8.000 kilogrammes d'huile.

Le poids total, y compris ce liquide, est de 13.000 kilogrammes.

L'étincelle de rupture a 1^m,30 de développement.

Nous avons dit plus haut que la puissance d'un transformateur était limitée par la température que peut prendre l'appareil. Cette raison fait, quand il s'agit d'unités de grande puissance, qu'on provoque leur refroidissement soit par insufflation d'air sous pression — en aménageant des canaux de ventilation entre les divers paquets de tôles — soit en les plaçant dans un bain d'huile.

On utilise efficacement, pour les transformateurs à très haute tension, des enveloppes de fer ou de fonte remplies d'huile, dans lesquelles on enferme le transformateur. L'huile est elle-même refroidie par une circulation d'eau froide ⁽¹⁾. Quelquefois, avant l'introduction de l'huile, on

⁽¹⁾ On a pu, de ce fait, porter l'induction dans le fer à une limite très élevée (13.000 gauss par centimètre carré) et augmenter la densité du courant dans les conducteurs.

fait le vide à l'aide d'une machine pneumatique et on chauffe les bobines pour en chasser l'humidité.

492. Rendement et essais des transformateurs. — Pour déterminer le fonctionnement d'un transformateur, on établit la courbe en court-circuit et celle en charge (*fig. 1250*). La première donne le courant secondaire de court-circuit en fonction de la tension primaire d'alimentation. La caractéristique en charge donne la tension aux bornes secondaires en fonction du courant secondaire débité. Elle est d'autant plus prononcée que $\cos \varphi$ pour lequel on la trace est plus faible. La formule générale du rendement est :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_h + f + cP'}{P'}}$$

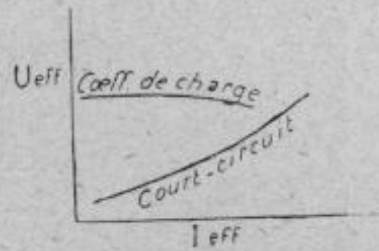


FIG. 1250.

P' puissance recueillie au secondaire, $P_h + f$ pertes dans le fer, $c P'$ perte dans le cuivre. La formule montre que le rendement est maximum quand les pertes dans le fer sont égales aux pertes dans le cuivre. Si le transformateur fonctionne souvent à moyenne charge, il faut que les pertes dans le fer à charge normale soient inférieures aux pertes dans le cuivre et, s'il fonctionne en surcharge, c'est l'inverse qui a lieu ; s'il doit fonctionner toujours à pleine charge il faut qu'il y ait égalité entre les pertes. Les transformateurs à faible perte dans le fer donnent les meilleurs rendements moyens. Le rendement industriel varie de 0,95 à 0,98 en pleine charge, selon le type et la puissance de l'appareil.

Au point de vue du rendement journalier d'un transformateur, qui dépend des conditions de marche, de la saison, de l'horaire et de la nature de la clientèle, si on a affaire à un appareil dépensant à vide 1 0/0 de sa puissance maxima à pleine charge, un rendement instantané de 97 0/0 correspond à un rendement journalier de 93 0/0 pour une utilisation de cinq heures par jour. Dans les installations importantes, on emploie souvent — pour augmenter le rendement — plusieurs transformateurs au lieu d'un seul d'une puissance égale à leur somme, et on les met successivement en circuit et à pleine charge au fur et à mesure des besoins de la consommation. Un coupleur automatique met ou retire du circuit chacun de ces transformateurs.

Pour déterminer le rendement des transformateurs, on a recours aux méthodes directe et indirecte. Dans le premier cas, on peut mesurer au moyen d'un wattmètre les puissances secondaire et primaire aux diffé-

rentes charges. Le plus souvent on détermine la puissance perdue à l'aide d'un wattmètre différentiel.

Avec la méthode indirecte, on applique le procédé des « pertes séparées », dont nous nous sommes déjà occupé (363).

A cet effet, on mesure la puissance absorbée à vide pour une tension déterminée et on calcule la puissance perdue par effet Joule dans les deux enroulements, le transformateur étant en charge.

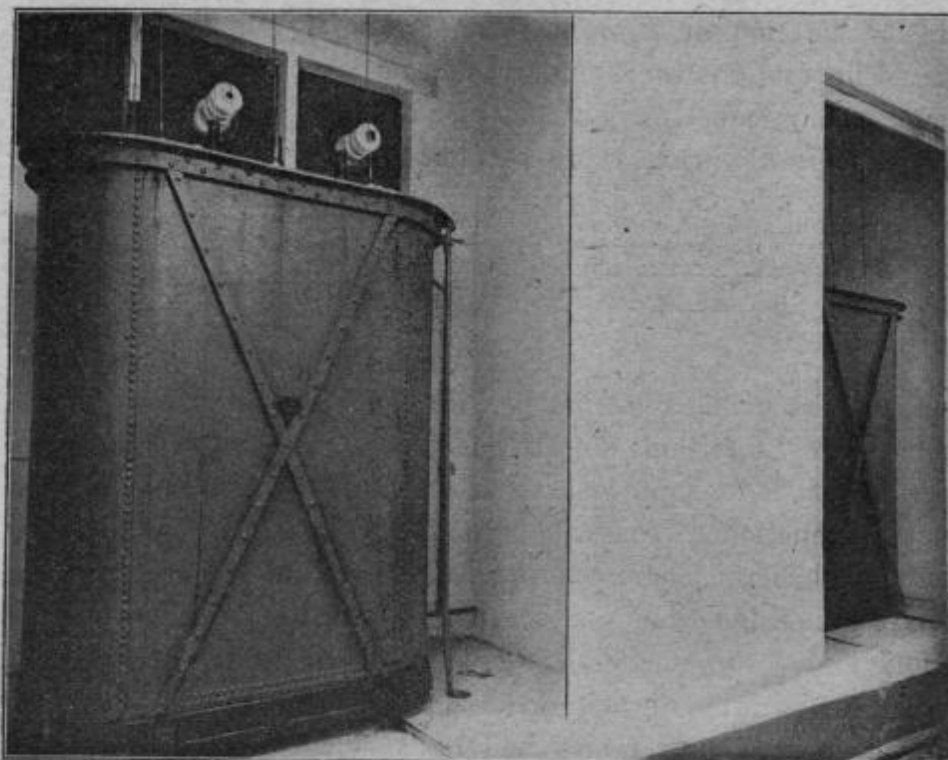


Fig. 1251. — Transformateurs triphasés à refroidissement par circulation d'eau, de 2.000 K. V. A. — 65.500 / 12.000 volts (C^{ie} Électro-Mécanique).

Pour mesurer les pertes dans le fer, on relie le circuit secondaire au circuit de l'éclairage en intercalant un wattmètre et en laissant le circuit primaire ouvert : la lecture de l'appareil donne le nombre de watts perdus dans le fer. Pour les pertes dans le cuivre, on relie l'enroulement primaire au réseau à basse tension en intercalant un wattmètre et une résistance, formée de lampes à incandescence par exemple ⁽¹⁾.

On met alors l'enroulement secondaire en court-circuit sur un ampère-

⁽¹⁾ M. Kapp a indiqué une méthode qui permet de déterminer rapidement avec une approximation très suffisante en pratique les valeurs des coefficients de self-induction et de dispersion d'un transformateur.

On met le secondaire du transformateur en court-circuit sur un ampèremètre et l'on applique aux bornes primaires une tension croissante jusqu'à obtenir dans le secondaire le courant normal de pleine charge.

mètre et on fait varier la résistance jusqu'au moment où l'ampère-mètre indique l'intensité à pleine charge du transformateur.

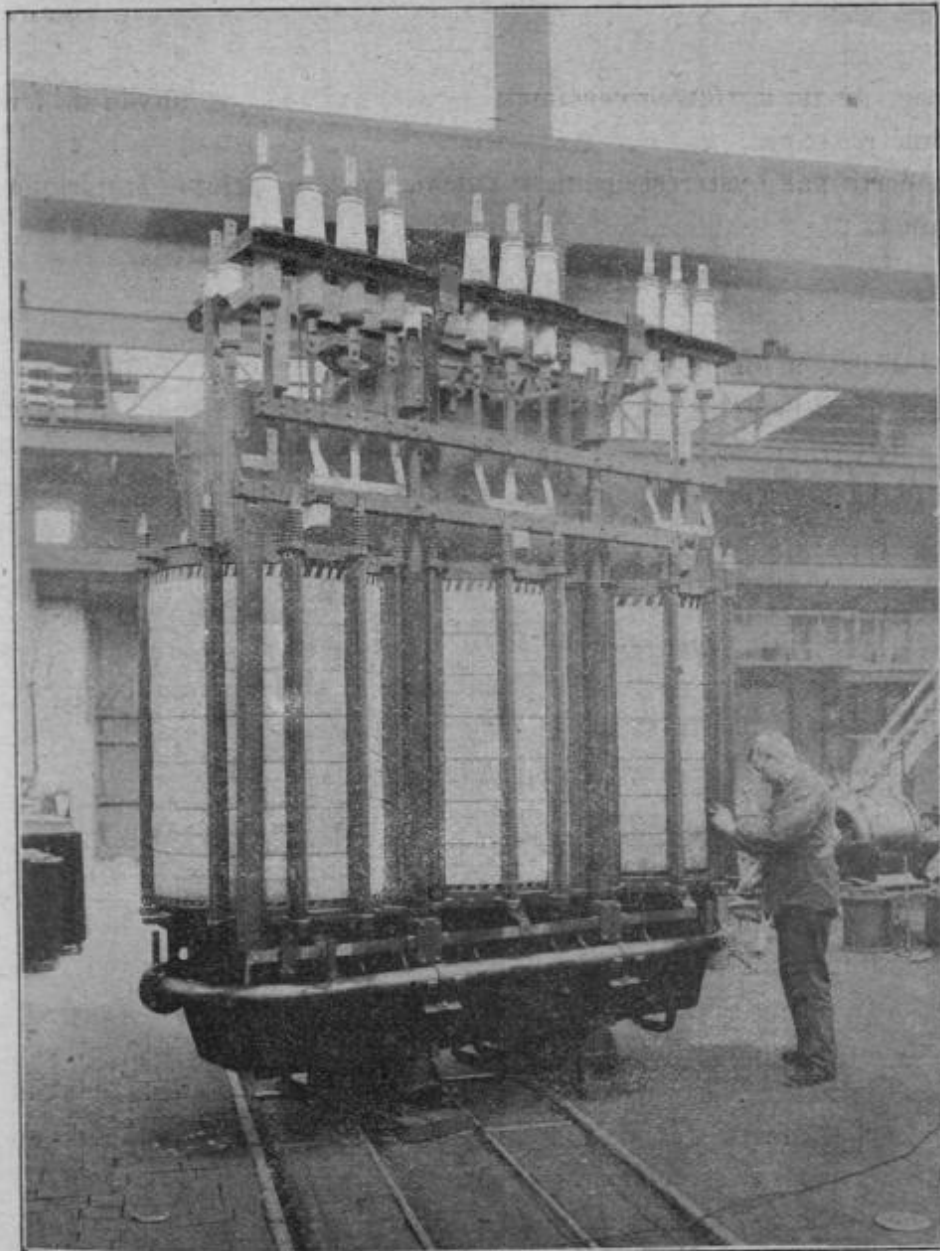


Fig. 1252. — Transformateur triphasé, 23.500 K. V. A. — 5.000 /25.500 volts, 50 périodes. (C^{ie} Electro-Mécanique).

L'appareil donne alors approximativement les pertes dans le cuivre.

Soient V_1 cette tension et I le courant secondaire ; on peut démontrer qu'on a, en négligeant la résistance ohmique :

$$X' = \frac{V_1}{1} \frac{V}{v + V}; \quad x' = \frac{V_1}{1} \frac{v}{v + V};$$

X' et x' les coefficients dont il vient d'être question, V et v les tensions primaire et secondaire.

La perte par courants de Foucault est donnée en watts par l'expression :

$$P_f = 46 \frac{(a \cdot \omega \cdot B_{\max})^2}{10^{12}} V ;$$

a , épaisseur de la tôle en centimètres, et V , volume du noyau de fer en centimètres cubes.

La perte par hystérésis peut se calculer par la formule empirique de Steinmetz :

$$P_h = 10^{-7} \omega \cdot V \cdot \eta \cdot B_{\max}^{1.6}.$$

Les traités et formulaires renseignent sur les valeurs du coefficient η .

En général la perte par hystérésis est double de celle par courants de Foucault.

La perte par échauffement des conducteurs est donnée par la relation :

$$P_c = r_1 I_1^2 \text{ eff.} + r_2 I_2^2 \text{ eff. watts ;}$$

r_1 , résistance intérieure en ohms, et I_1 , intensité efficace en ampères du circuit primaire ; r_2 et I_2 ont les valeurs correspondant au circuit secondaire du transformateur.

La perte totale P_t est donnée par la relation :

$$P_t = P_f + P_h + P_c.$$

Nous venons de voir que la détermination des conditions de fonctionnement d'un transformateur se fait à vide et en court-circuit. La précision des résultats dépend de la courbe de la force électromotrice appliquée. Les pertes dans le fer, déduites de l'essai à vide, sous fréquence et tension normales, peuvent être considérées comme constantes sous toutes les charges. Lorsque l'essai à vide donne des pertes dans le fer sensiblement exagérées, il est utile d'en rechercher la cause en séparant celles dues à l'hystérésis, séparation qui s'effectue de préférence en maintenant la tension constante et en faisant varier la fréquence.

Les courbes représentées par la (fig. 1253) ou épure générale d'un transformateur de puissance moyenne montrent que les pertes totales sont réduites au minimum et par suite le rendement minimum pour une valeur de $B = 4.500$ environ, et que, pour cette valeur de B , les pertes dans le fer et dans le cuivre sont sensiblement égales. L'épure montre en outre que le rendement reste à peu près stationnaire lorsqu'on porte B de 4.500 à 6.000 ; il passe en effet de 96,5 à 96,1. Mais, si on considère l'influence de B sur la chute de tension, on se rend compte qu'au point de vue de l'utilisation industrielle du transformateur, on a un grand intérêt

à adopter pour β une valeur supérieure à celle qui correspond au rendement maximum. Ainsi pour $\beta = 4.500$, la chute de tension = 1,70 0/0, et pour $\beta = 6.000$, elle n'est plus que de 0,95 0/0.

Pour cette dernière valeur, les pertes dans le fer sont beaucoup plus importantes que dans le cuivre, car les premières sont de 1.215 watts et 485 watts pour les secondes. Cette différence n'implique pas que l'appareil ne soit susceptible d'un bon fonctionnement, car il est tout à fait

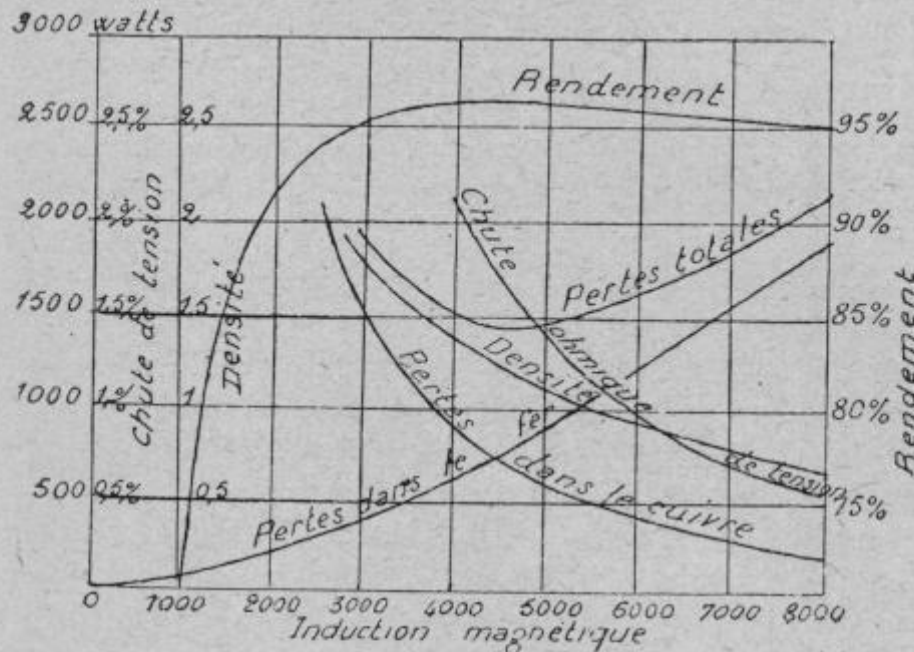


FIG. 1253.

logique de tolérer pour le fer un plus grand échauffement que pour le cuivre.

A l'effet d'éviter les pertes à vide, l'A. E. G. se sert d'un relais dont l'enroulement est monté en série avec un transformateur qui est d'ordinaire en circuit. Lorsque la charge augmente dans ce dernier au delà d'une certaine limite (pleine charge), un second ou plusieurs transformateurs sont couplés en parallèle avec le premier et prennent ainsi une partie de la charge. La mise en circuit et hors circuit des transformateurs peut être effectuée de la façon connue, au moyen d'interrupteurs à distance commandés par le relais (*fig. 1254 et 1255*).

Pour obtenir du relais en même temps une grande sensibilité et une bonne pression sur le contact, le courant pour le ou les transformateurs à mettre en circuit est dérivé directement sur l'enroulement du relais ou bien on monte, en outre, sur le relais un enroulement de court-circuit.

Si les transformateurs ne donnent que de la haute tension au primaire

comme au secondaire, de sorte que le raccord direct des enroulements du relais sur les conducteurs à haute tension occasionnerait des difficultés, on munit le relais d'un ou de deux enroulements qui, au point de vue de l'action sur le relais, répondent aux enroulements *f* et *g* et sont raccordés

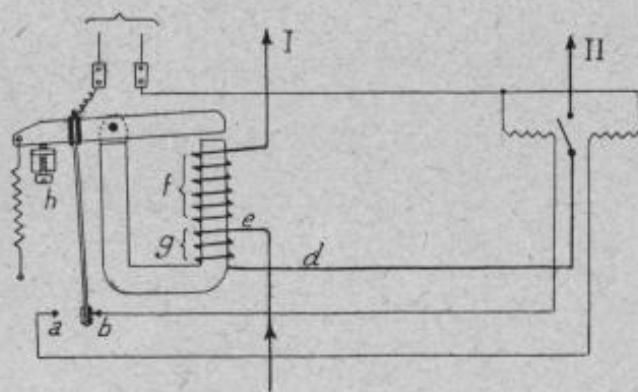


FIG. 1254.

circuit du second transformateur le magnétisme soit renforcé, on établit les connexions de telle manière que les courants s'additionnent dans les enroulements auxiliaires dont nous avons parlé ci-avant. Au contraire, s'il est nécessaire de l'affaiblir, on échange les extrémités d'enroulement entre une bobine et le transformateur correspondant, ce qui fait que les courants se soustraient.

Le procédé suivant mérite de retenir l'attention. Il consiste à diviser les deux enroulements en deux parties égales et à les monter ou en parallèle pour la pleine charge ou en série pour une charge moindre. Le rapport de transformation demeure, dans les deux cas, naturellement identique; mais, l'action se trouve, lors du montage en série, réduite de moitié, et la perte due à l'hystérésis est réduite dans une mesure

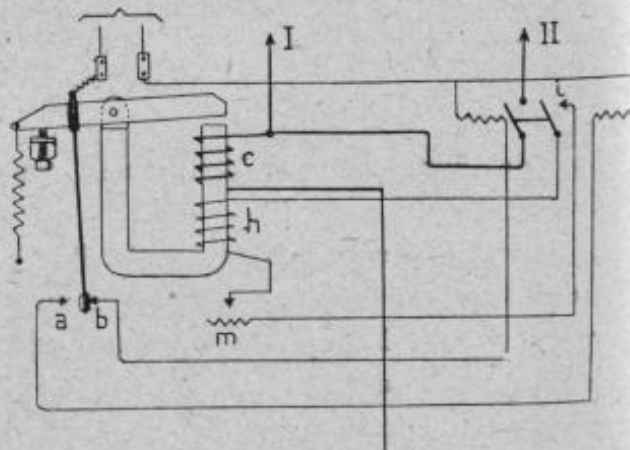


FIG. 1255.

encore plus forte. Quant à la perte due à l'échauffement des enroulements, elle se trouve sans doute sensiblement augmentée, mais elle demeure encore minime, si bien que l'on réalise invariablement, avec le procédé en question, une économie appréciable. Un procédé semblable, mais seulement applicable pour les circuits triphasés, consiste à monter les trois enroulements, une fois en triangle et une fois en étoile. Dans le premier cas, la tension, pour chaque phase, est de 73 0/0 plus grande que dans le

à deux transformateurs d'intensité, dont les enroulements primaires sont montés sur les circuits du transformateur I constamment en circuit et de celui II à coupler en parallèle, et cela sur les côtés primaires et secondaires.

S'il est par exemple nécessaire qu'après mise en

deuxième cas : par suite, il convient d'utiliser le montage en triangle pour la pleine charge et le montage en étoile pour les charges moindres et pour la charge à vide. La commutation doit avoir lieu simultanément dans le circuit primaire et dans le circuit secondaire afin d'obtenir, dans les deux cas, le même rapport de transformation.

Pour la détermination de la variation de tension (de la charge normale à la charge nulle et inversement), la méthode indirecte de Kapp est la plus connue. Quand on l'applique, on relie les bornes du circuit à basse tension à un ampèremètre de très faible résistance et sans self, et l'on alimente le circuit primaire par une source de courant ayant une différence de potentiel telle que l'intensité mesurée par l'ampèremètre se rapproche le plus possible de l'intensité normale. Un wattmètre intercalé dans le circuit à haute tension mesure la puissance absorbée.

Les essais d'isolement se font à l'aide d'un ohmètre. On demande à cet égard environ 100 megohms entre le fil fin et la masse, ainsi qu'entre les deux circuits. Entre gros fil et masse, quelques megohms suffisent. Pour se rendre compte de la résistance à la rupture du diélectrique on applique une tension alternative élevée entre enroulements et entre chaque enroulement et la masse pendant quelques minutes. Si la mesure au voltmètre n'est pas possible, on monte en parallèle avec les électrodes d'essai un intervalle à étincelles entre pointes. Les distances entre pointes pour les tensions de 30.000, 40.000, 50.000, 60.000, 80.000 et 100.000 volts sont respectivement, 41,5, 62,5, 90, 118, 180 et 244 millimètres.

Pour les mesures d'échauffement nous rappellerons que les limites admises sont de 55° centigrades pour les enroulements et 65° pour le fer, et la température s'évalue par augmentation de résistance pour les enroulements. Si l'appareil n'a pu fonctionner au préalable en charge, on peut opérer par une mesure à vide, avec une résistance en série dans le primaire, réglée sur un courant normal.

Pour la vérification du rapport du transformateur on le mesure dans les cas de charge du réseau avec 2 voltmètres étalonnés ; on appose au transformateur à essayer un transformateur étalon qui ramène la tension à une valeur facilement mesurable.

La durée des essais de réception des transformateurs est celle du fonctionnement journalier en général du réseau jusqu'à l'obtention de l'échauffement limite à la charge nominale. Le coefficient d'auto-régulation s'obtient en passant de la charge nominale à la charge nulle au secondaire en maintenant la fréquence et la tension constantes au primaire. Une surcharge de courant de 20 0/0 doit être facilement supportée par les transformateurs pendant une heure.

Voici les résultats des essais de trois transformateurs monophasés à ventilation forcée, du type à noyaux, et prévus pour une puissance de

4.450 k. v. a., 150.000 / 115-155 volts, 25 périodes, 302 / 28.700 ampères. Il s'agit de transformateurs pour l'industrie électrochimique.

L'enroulement à haute tension est à l'intérieur et comporte deux bobines en série, chaque bobine subdivisée en 21 galettes isolées avec soin les unes des autres. Des bornes permettent, au moyen de différents couplages, d'obtenir des tensions secondaires de : 115, 121, 127, 135, 145 et 155 volts.

L'enroulement à basse tension est composé de huit spires de tôle de cuivre électrolytique disposées en deux séries de quatre spires couplées en parallèle.

Le poids total du transformateur complet (fabrication Oerlikon) est de 14.600 kilogrammes, ce qui correspond à 3^{kg},24 par k. v. a. transformé ; à la fréquence de 50 périodes et sans le système de réglage étendu dont l'appareil est pourvu, la puissance possible serait double et correspondrait à un poids de 1,62^{kg} par k. v. a.

Les appareils ont été soumis à quatre série d'essais et on opérant avec du courant à 26 périodes par seconde :

1^o Essais à vide, sous 10 à 120 volts.

Perte constatée aux essais à 26 périodes en K. V. A.....	18,9
Perte évaluée pour courant à 25 périodes en K. V. A.....	17,42

2^o Essais en court-circuit.

VALEURS CONSTATÉES AUX ESSAIS POUR COURANT A 26 PÉRIODES			VALEURS CONSTATÉES AUX ESSAIS POUR COURANT A 25 PÉRIODES			TENSION DE COURT-CIRCUIT en centièmes	
Courant primaire en A	Tension de court-circuit primaire en V	Pertes en K. V. A.	Courant primaire en A	Tension de court-circuit primaire en V	Pertes en K. V. A.	Calculée	Mesurée
224 (3.300 K. V. A.)	900	43	224	865	42,5	5,78	5,75
202 (4.450 K. V. A.)	1.230	87,2	202	1.180	86	7,80	7,86

3^o Mesure des résistances.

Primaire, 2 bobines en série.....	0,27	ohm
Secondaire, 1 ^{re} bobine	0,00004443	—
— 2 ^e bobine	0,0000437	—

Par suite les pertes ohmiques sont :

Pour 3.300 k. v. a., 31^{kw},5 et pour 4.450 k. v. a., 57^{kw},4.

Et les pertes en court-circuit, respectivement : 1,27 des pertes ohmiques et 1,41.

4^e Essais de surtension. — Les bobines ont pu supporter une tension alternative de 30.000 volts entre la masse et la bobine primaire pendant dix minutes.

M. G. Sartori, dans son excellent ouvrage sur *la Technique des courants alternatifs*⁽¹⁾, donne les chiffres suivants, pour les rendements aux différents instants de la charge d'un transformateur triphasé Brown-Boveri de 150 kilowatts avec refroidissement par l'huile et circulation d'eau :

1/8 de la charge.....	87 0/0
1/3 —	94
1/2 —	97
3/4 —	97,5
Plleine charge.....	98
1,25 de la pleine charge.....	98,15

La puissance que peut supporter un gros transformateur d'une façon permanente ne dépend que de l'échauffement des matériaux actifs. Pour déterminer la puissance maxima pour une élévation de température donnée ou l'échauffement produit par une charge donnée, il faut soumettre le transformateur à un essai en charge permanente.

Pour des raisons économiques et techniques, on ne peut songer à décharger directement l'appareil ; il faut donc recourir à certaines méthodes qui permettent de charger artificiellement les transformateurs, c'est-à-dire de produire les pertes normales avec une dépense d'énergie correspondant seulement à ces pertes.

Dans quelques-unes de ces méthodes, on relie le transformateur à une source de courant alternatif pour produire les pertes normales dans le fer et on charge des bobines avec du courant continu ; en général il faut deux tensions différentes au courant continu, une pour chaque enroulement. L'essai exige donc trois machines et finalement on ne connaît pas les pertes dans le cuivre telles qu'elles existent avec le courant alternatif. Ces méthodes ne donnent pas une solution pratique du problème.

D'une autre manière, on peut atteindre à peu près exactement la température finale en faisant fonctionner le transformateur à vide pendant quelque temps sous une tension telle que les pertes dans le fer soient égales aux pertes totales normales à pleine charge. Puis on court-circuite le transformateur et on le fait fonctionner avec des pertes de même valeur dans le cuivre.

⁽¹⁾ Dunod et Pinat, éditeurs, Paris.

Ces charges alternatives agissent sur le transformateur jusqu'à ce que l'état permanent soit atteint. Là encore on fait agir deux tensions différentes et l'isolement est soumis dans la marche à vide à une tension 1,5 fois plus élevée que la normale.

Mais la meilleure méthode pour charger artificiellement consiste à accoupler deux transformateurs aussi bien par les enroulements à haute tension que par ceux à basse tension. Dans un des circuits on intercale un petit transformateur réglable, ou bien dans un enroulement du transformateur on installe une bobine d'un nombre de tours plus ou moins grand suivant la chute totale de tension des deux transformateurs.

Quand un côté est relié à un réseau de tension convenable, il se produit des inductions normales dans le fer et des intensités normales dans les enroulements ; l'état du transformateur correspond entièrement à l'état du transformateur soumis à sa charge naturelle au point de vue des pertes dans le fer et le cuivre.

La méthode s'applique aux transformateurs mono et polyphasés ; la machine génératrice fournit seulement le double environ du courant à vide sous la tension normale du transformateur. Cette méthode présente des inconvénients : il faut posséder deux transformateurs semblables ou à peu près pour faire l'essai ; en second lieu il faut un transformateur réglable capable de supporter les intensités et les tensions ou bien des bobines spéciales.

M. Gustrin est l'auteur d'une méthode permettant de charger de la même façon un seul transformateur ⁽¹⁾. Il faut trois conditions satisfaisantes : chaque enroulement doit former par lui-même un circuit fermé dans lequel le courant de charge peut circuler sans charger la machine d'alimentation ; la force électromotrice induite par le flux normal dans chaque enroulement doit être compensée presque complètement par une force électromotrice opposée ; enfin il ne doit rester qu'une faible résultante pour couvrir la chute de tension produite par un courant d'intensité normale.

Pour les transformateurs monophasés, voici comment on applique cette méthode : chaque enroulement est divisé en deux moitiés reliées en parallèle. La force électromotrice nécessaire pour produire l'intensité de courant normale dans le circuit fermé est obtenue par la suppression de quelques tours de l'une des deux moitiés de l'enroulement.

Cette suppression peut être effectuée aussi bien sur le primaire que sur le secondaire, car les ampères-tours ou les forces magnétomotrices

⁽¹⁾ *Elektrotechnische Zeitschrift*, t. XXVIII.

des deux moitiés de l'enroulement primaire donnent à l'opposé l'une de l'autre et n'ont aucune autre action sur le champ ou sur l'enroulement secondaire. Évidemment, la tension d'essai n'est que la moitié de la tension normale.

On peut employer la même méthode pour les transformateurs polyphasés en faisant sur chaque phase les connexions indiquées. Dans un triphasé il faut six bobines d'essai, ce qui est trop compliqué ; mais on peut simplifier. On groupe en triangle les deux enroulements et on réalise ainsi les circuits fermés nécessaires pour les courants de charge, dans lesquels aucune force électromotrice résultante ne se produit pour un flux normal.

Si une phase quelconque de l'enroulement secondaire a un faible nombre de tours correspondant à la chute de tension totale des trois phases des deux enroulements, le transformateur, sous la tension normale, prend la charge voulue.

L'inconvénient vient de ce que les différentes parties ou phases sont inégalement chargées. Cette inégalité n'est pas sensible pour un nombre de tours correspondant

bien à la chute de tension, et la charge moyenne exacte peut être obtenue sans difficulté. Les courants fournis par la machine d'alimentation sont peu augmentés par rapport à la valeur du courant à vide.

L'état réel de charge d'un transformateur triphasé

de 300 kilovolts-ampères à 1.000/5.200 volts, 176/34 ampères et 50 périodes de la maison Schwarz Kopf est exprimé par les chiffres suivants, le schéma étant fait comme le montre la (fig. 1256) :

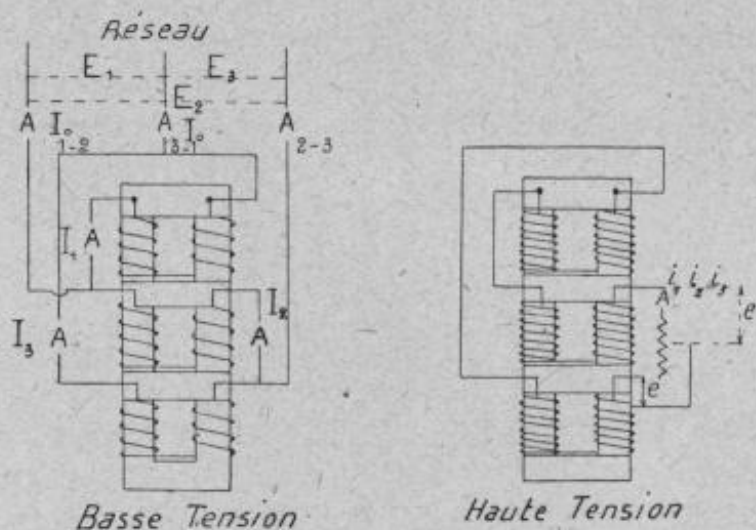


FIG. 1255.

CÔTÉ BASSE TENSION

$E_1 = 568$ volts	
$E_2 = 684$ —	
$E_3 = 542$ —	
$I_1 = 177$ ampères	$I_1^0 = 34,2$ ampères
$I_2 = 160$ —	$I_2^0 = 36$ —
$I_3 = 138$ —	$I_3^0 = 48,3$ —

CÔTÉ HAUTE TENSION

$$\begin{aligned}
 i_1 = i_2 = i_3 &= 32,5 \text{ ampères} \\
 (172 \text{ ampères réduits au côté basse tension}); \\
 e &= 368 \text{ volts} \\
 (6,8 \text{ volts réduits au côté basse tension}); \\
 e' &= 275 \text{ volts} \\
 (5,2 \text{ volts réduits au côté basse tension}).
 \end{aligned}$$

Sur l'une des huit bobines à haute tension de la phase intérieure on enleva 43 tours. On peut mentionner qu'avec la tension étoilée normale de 577 volts (tension composée 1.000 volts), le courant à vide (composé) était de 24 ampères environ.

Le système A.-F. Berry se présente comme un appareil économiseur, en ce sens qu'il permet d'améliorer sensiblement le rendement d'un réseau de postes de transformateurs secondaires.

Il comporte deux transformateurs que l'on pose côte à côte, dans chaque poste de transformation, le plus puissant (celui qui doit satisfaire à la demande maximum) restant constamment dans le circuit, l'autre (correspondant à la faible charge) étant en série avec le précédent aux heures de faible charge et est court-circuité aussi bien au secondaire qu'au primaire aux heures où la charge est considérable. Des fusibles protègent le petit transformateur, ainsi que l'ensemble du poste. Les courts-circuiteurs sont mis en mouvement par un relais.

Le tableau ci-après renseigne sur les pertes dans le cuivre et les chutes de tension en 0/0 avec $\cos \varphi = 0$ pour les transformateurs triphasés à sec et à refroidissement naturel construits par la Société l'Éclairage électrique; ces pertes sont pour la pleine charge. Pour celles différentes du plein débit, elles varient comme le carré de la charge. La puissance utile est la puissance en k. v. a. de l'appareil multipliée par $\cos \varphi$ et par le facteur de charge.

Pour obtenir la chute de tension C_φ pour une valeur quelconque de $\cos \varphi$ on se sert de la formule pratique :

$$C_\varphi = C_1 \cos \varphi + C_0 \sin \varphi,$$

formule dans laquelle C_1 désigne la chute de tension avec $\cos \varphi = 1$.

Les valeurs de C_1 varient de 87,9 à 97,8 pour des puissances en k. v. a. de 0,84 à 216 et les valeurs de C_0 sont indiquées dans le tableau. Les garanties s'entendent avec tolérances de 20 0/0 des chiffres indiqués pour les pertes et les chutes de tension.

Pour un régime intermittent, les appareils sont garantis pour dix heures en pleine charge et quatorze heures à vide pour un échauffement maximum de 55° au-dessus de l'ambiante ou de 50° après une marche de dix heures à pleine charge sans fonctionnement à vide préalable.

Pertes dans le cuivre et chutes de tension en % avec $\cos \varphi = 0$

RÉGIME CONTINU = 24 HEURES EN PLEINE CHARGE

TYPES	PERTES dans le cuivre	50 ∞				42 ∞				25 ∞				
		TS	3.000 volts	5.600 volts	10.000 volts	15.000 volts	3.000 volts	5.600 volts	10.000 volts	15.000 volts	3.000 volts	5.600 volts	10.000 volts	15.000 volts
	watts	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
54	71	1,75	—	—	—	1,58	—	—	—	1,41	—	—	—	—
56	83	1,75	—	—	—	1,58	—	—	—	1,41	—	—	—	—
58	95	1,76	1,60	—	—	1,59	—	—	—	1,41	—	—	—	—
60	110	1,77	1,60	—	—	1,59	1,44	—	—	1,40	—	—	—	—
62	127	1,77	1,61	—	—	1,6	1,46	—	—	1,40	—	—	—	—
65	147	1,78	1,65	1,81	—	1,6	1,48	—	—	1,39	1,2	—	—	—
67	169	1,79	1,69	1,88	—	1,61	1,52	1,63	—	1,39	1,28	—	—	—
70	195	1,79	1,75	1,90	—	1,61	1,56	1,66	—	1,39	1,28	0,95	—	—
80	225	1,69	1,60	1,57	1,69	1,52	1,38	1,29	—	1,22	1,00	0,93	—	—
83	260	1,72	1,65	1,63	1,72	1,55	1,43	1,38	1,38	1,23	1,07	1,02	—	—
86	300	1,74	1,75	1,75	1,8	1,57	1,50	1,48	1,52	1,24	1,15	1,11	1,01	—
93	347	1,87	1,85	1,85	1,9	1,68	1,58	1,58	1,65	1,31	1,24	1,22	1,12	—
100	400	2,01	1,96	2,01	2,1	1,81	1,65	1,70	1,78	1,38	1,32	1,32	1,23	—
107	462	2,16	2,1	2,15	2,2	1,94	1,78	1,82	1,92	1,46	1,42	1,45	1,36	—
115	533	2,32	2,25	2,3	2,4	2,09	1,92	1,95	2,07	1,56	1,52	1,55	1,49	—
124	616	2,49	2,45	2,48	2,6	2,24	2,08	2,1	2,22	1,65	1,61	1,61	1,63	—
133	712	2,67	2,65	2,65	2,8	2,4	2,28	2,27	2,38	1,77	1,75	1,78	1,80	—
143	1.010	2,88	2,80	2,85	3,05	2,6	2,50	2,45	2,57	1,96	1,88	1,91	1,97	—
154	1.270	3,25	3,1	3,1	3,35	2,93	2,78	2,65	2,81	2,21	2,02	2,05	2,20	—
165	1.600	3,66	3,3	3,3	3,65	3,3	3,06	2,86	3,05	2,51	2,18	2,21	2,42	—
178	1.970	3,70	3,55	3,55	4,0	3,33	3,38	3,2	3,33	2,54	2,35	2,40	2,67	—
191	2.390	3,74	3,75	3,76	4,4	3,37	3,75	3,3	3,62	2,57	2,52	2,60	2,95	—
205	2.950	3,79	3,99	4,1	4,8	3,41	4,10	3,52	4,1	2,60	2,71	2,79	3,25	—

493. Construction des transformateurs. — Les règles qui dominent la construction des transformateurs peuvent se résumer comme suit : isolation parfaite des spires à haute tension et des bobines aussi bien entre elles que par rapport au fer et à l'enroulement secondaire ; choix judicieux du nombre des spires secondaires ainsi que des dimensions et des connexions des bobines ; pour l'enroulement secondaire, emploi exclusif de cuivre électrolytique, bien homogène, jonctions et vis de serrage soignées : canaux de ventilation entre les bobines et sections des bobines largement calculés ; enfin grande réactance de court-circuit pour les transformateurs de grande intensité, par exemple pour les fours électriques où l'intensité atteint jusqu'à 40.000 ampères.

Les noyaux des transformateurs sont formés de tôles de 0mm,5 à 0mm,3 d'épaisseur séparées l'une de l'autre par une feuille de papier mince de 0mm,05 à 0mm,07 d'épaisseur. Les dispositions adoptées pour la division

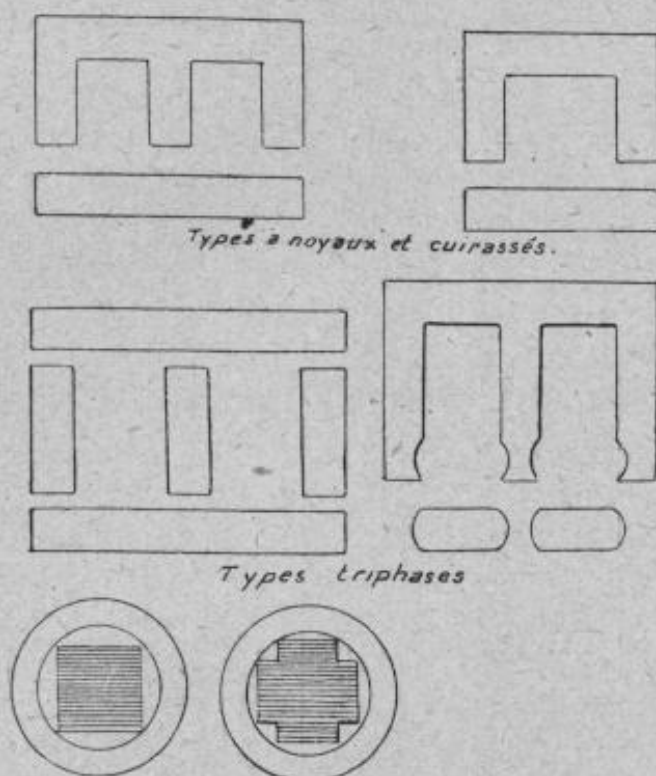


FIG. 1257.

et l'assemblage des tôles sont très variées (fig. 1257). Tantôt ce sont des tôles isolées par un vernis; tantôt les noyaux ont une forme en croix qui donne une surface de refroidissement plus grande et une surface d'enroulement moindre qu'avec la forme carrée. La Compagnie Westinghouse emploie des tôles poinçonnées d'une seule pièce, puis coupées sur un des côtés pour le passage des bobines.

On fabrique actuellement des tôles spéciales plus profitables que les

tôles communément désignées sous le nom de « tôles de dynamo ».

Elles ont un coefficient d'hystérésis très faible, une résistivité élevée (environ 50 microhoms-centimètres) et une perméabilité sensiblement plus forte. De plus, ces tôles ne semblent pas sujettes au vieillissement. Mais l'emploi de ces tôles spéciales conduit encore à des appareils sensiblement coûteux ⁽¹⁾.

Les (fig. 1258 et 1259) renseignent, d'après les fabricants, sur les propriétés magnétiques des tôles spéciales. La première de ces figures montre, pour 50 et 75 périodes et par kilogramme de métal, les pertes totales (hystérésis et courants parasites) en fonction de l'induction maxima et cela pour deux épaisseurs différentes, 0mm,5 et 0mm,35. La seconde figure présente la variation de l'induction en fonction de

⁽¹⁾ Le prix d'un transformateur passe par un minimum quand la relation suivante se trouve réalisée :

$$\frac{\text{Prix du kilog. de cuivre guipé}}{\text{Prix du kilog. de tôle poinçonnée}} = \frac{\text{Poids des câbles}}{\text{Poids du cuivre}}$$

Dans les transformateurs ordinaires, il y a trois fois plus de fer que de cuivre, et avec les transformateurs avec tôles spéciales, il n'y a que deux fois autant de fer que de cuivre.

la force magnétisante et celle de la perméabilité par rapport à l'induction.

L'induction dans le transformateur à tôles spéciales (acier au silicium ou au silico-vanadium) étant plus élevée, les dimensions et par suite la surface de refroidissement sont plus petites; on peut aussi admettre des rendements variant de 97,7 à 98 0/0. On fait travailler ces tôles jusqu'à 12.500 et 15.000 gauss par centimètre carré. L'exposant d'hystérésis ($B^{1,6}$) est environ le double de la valeur employée pour les aciers anciens.

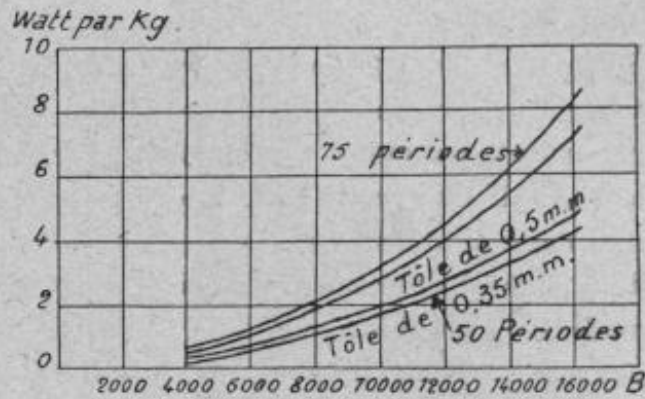


FIG. 1258.

L'économie résultant de l'emploi des tôles spéciales est surtout importante pour les appareils de faible puissance qui présentent toujours une surface de refroidissement suffisante; cette économie est faible pour les gros appareils, car là il n'est plus susceptible de compenser l'élévation du prix des tôles par une saturation beaucoup plus supérieure.

Dans tous les cas, ce sont les types allongés (grande hauteur et noyaux relativement minces) qui, à égalité de poids et de rendement, donnent la

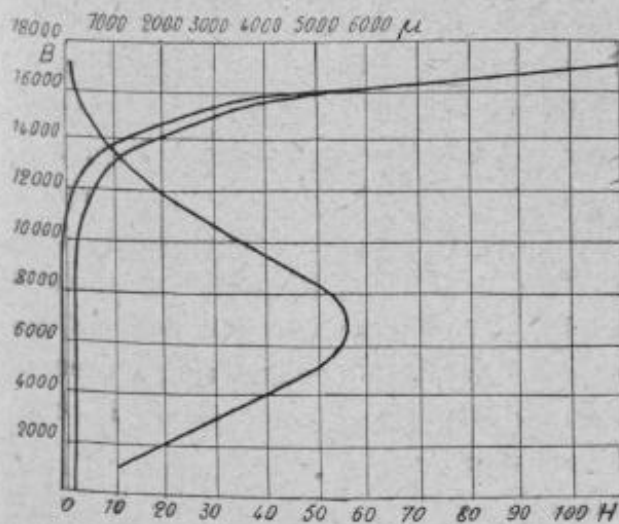


FIG. 1259.

plus grande surface de refroidissement et en même temps des résultats meilleurs quant aux effets de la dispersion du flux magnétique.

Pour que le fonctionnement d'un transformateur soit économique à vide, il faut s'attacher à avoir le moins de joints possible, et, pour éviter les vibrations et le ronflement de l'appareil, les surfaces en présence dans

les joints doivent être soigneusement dressées et les diverses parties de l'appareil solidement serrées entre elles. Les paquets de tôles (en forme de L, de U ou de E) sont assemblés à l'aide de boulons appropriés et isolés électriquement, les parties supérieures et inférieures

serrées à la presse. Pour les gros transformateurs triphasés on emploie couramment des tôles sectionnées liées entre elles et pressées. La réluctance des joints doit être réduite au minimum ; un joint bien fait peut ne présenter qu'une réluctance équivalente à celle de $\frac{1}{100}$ de millimètre d'air.

Dans les transformateurs à tension très élevée, on espace les conducteurs de façon qu'ils ne puissent se produire de décharges disruptives. Cette distance est prise égale au triple de celle de la charge. On dispose les bornes primaires aussi loin que possible des bornes secondaires et elles sont isolées avec le plus grand soin. A partir d'une certaine puissance, des canaux sont ménagés dans les assemblages des tôles pour augmenter la dispersion de la chaleur pour une circulation active de l'air ou de l'huile, suivant le mode de refroidissement adopté ⁽¹⁾. Les transformateurs à l'air libre peuvent se construire pour des tensions atteignant 11.000 volts.

L'isolement des entrées à haute tension de ces appareils est tout aussi difficile à réaliser que leur isolement intérieur. On a abandonné l'isolement par garnitures de porcelaine et par couches superposées de ruban isolant, qui suffisait pour les voltages moyens, et l'on a eu recours à l'huile, comme pour l'isolement intérieur. La tige d'entrée de l'appareil est garnie de plusieurs tubes en carton comprimé enfilés les uns dans les autres et laissant entre eux un certain intervalle, le tube extérieur étant entouré par des couronnes en matière isolante moulée, superposées les unes aux autres et séparées par des disques de carton comprimé. Les espaces compris entre les tubes à jupes sont remplis d'huile qu'on y fait circuler au moyen de conduits d'entrée et de sortie. On donne généralement à la longueur comprise entre la partie supérieure de la borne et l'enveloppe de l'appareil une valeur de 50 0/0 plus grande que la distance d'éclatement de l'étincelle pour la tension qu'on veut faire supporter à l'appareil ; quant à la longueur du trajet des fuites superficielles, elle est rendue triple de cette distance par les disques de carton comprimé. On a employé avec succès des bornes d'entrée de ce modèle pour des appareils exigeant des tensions d'essai de plus de 300.000 volts. Une de leurs qualités est la facilité qu'elles donnent de répartir convenablement la tension électrostatique ; en outre, la circulation de l'huile à l'intérieur des différents tubes empêche les échauffements locaux.

Dans la construction de ses transformateurs de 45.000 volts, la Société

⁽¹⁾ La ventilation artificielle est considérée comme suffisante pour les appareils de 2.000 kilowatts avec des tensions de 50.000 à 70.000 volts, du moment que les courants d'air peuvent se produire avec facilité. La ventilation forcée et la réfrigération au moyen de l'huile par serpentins à circulation d'eau conviennent pour des appareils de grande capacité, 5.000 kilowatts et plus. La réfrigération de l'huile à l'extérieur de la caisse se recommande spécialement pour les cas où on ne dispose pas d'une eau de réfrigération convenable.

« l'Éclairage Électrique » emploie comme support de l'enroulement primaire un manchon de porcelaine cloisonnée, avec un diamètre d'enroulement de 225 millimètres. Le fil est isolé par une couche de soie et, dans le fond de la gorge, on place une bande de papier paraffiné de 20 millimètres de largeur. Chaque cloison est munie d'une rainure, le long de laquelle on ramène à l'extérieur le bout de fil qui doit être relié à la section voisine. Le joint, très solide, est constitué au moyen d'un noyau à bord circulaire enfoncé de force dans une cavité circulaire alésée à un diamètre un peu inférieur. De loin en loin on ménage des espaces d'air de 1 centimètre entre deux tôles consécutives pour la ventilation. Dans les transformateurs de 80.000 volts construits par la « General Electric Company », les bobines à haute et basse tension sont séparées par des diaphragmes isolants qui n'empêchent pas l'huile de pénétrer dans les interstices ; l'enveloppe à recevoir l'huile est impénétrable à l'air.

La Société « La Française électrique » prend pour base de la construction des transformateurs qu'elle livre au commerce, pour la prédétermination des chutes de tension, une valeur constante de 3 0/0 pour $\cos \varphi$ égale à 0,707. Les (fig. 1260 et 1261) reproduisent l'une les courbes de

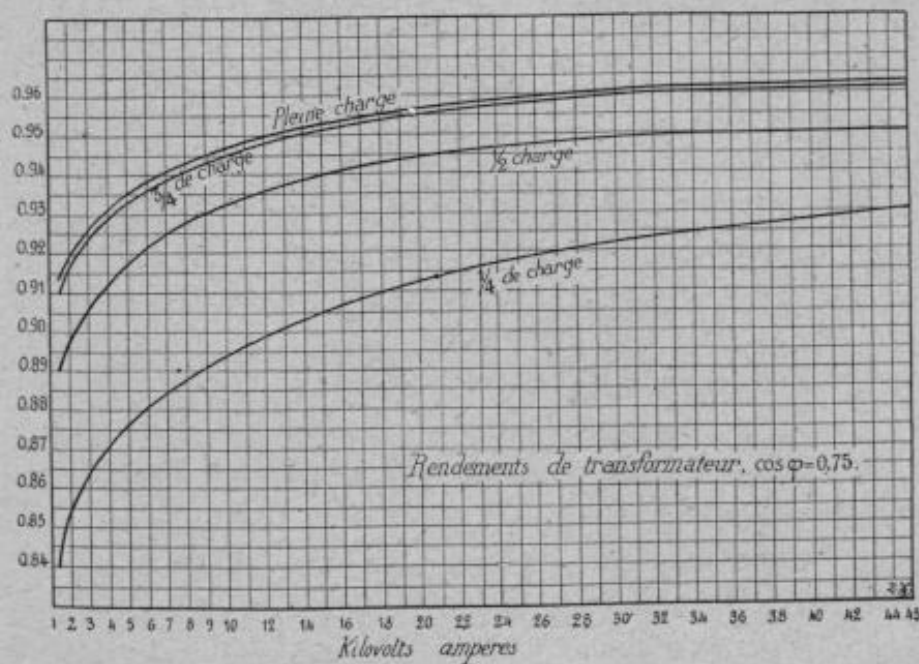


FIG. 1260.

rendement de transformateurs de diverses puissances pour ces valeurs diverses des $\cos \varphi$ ainsi que les chutes de tension correspondantes et la perte à vide, l'autre donne les valeurs des chutes de tension dans des transformateurs fonctionnant à pleine charge pour différentes valeurs de $\cos \varphi$.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, les transformateurs actuels pour la

haute tension sont presque exclusivement constitués par des séries de bobines alternativement primaires, secondaires, interchangeables et pour réduire au minimum les fuites magnétiques. En outre, la construction de l'appareil en est simplifiée et l'isolement plus facilement assuré. Les bobines sont enroulées sur le tour et elles sont généralement doubles.

Pour les transformateurs destinés à alimenter des fours électriques à grande intensité, les conducteurs sont constitués par des lames disposées

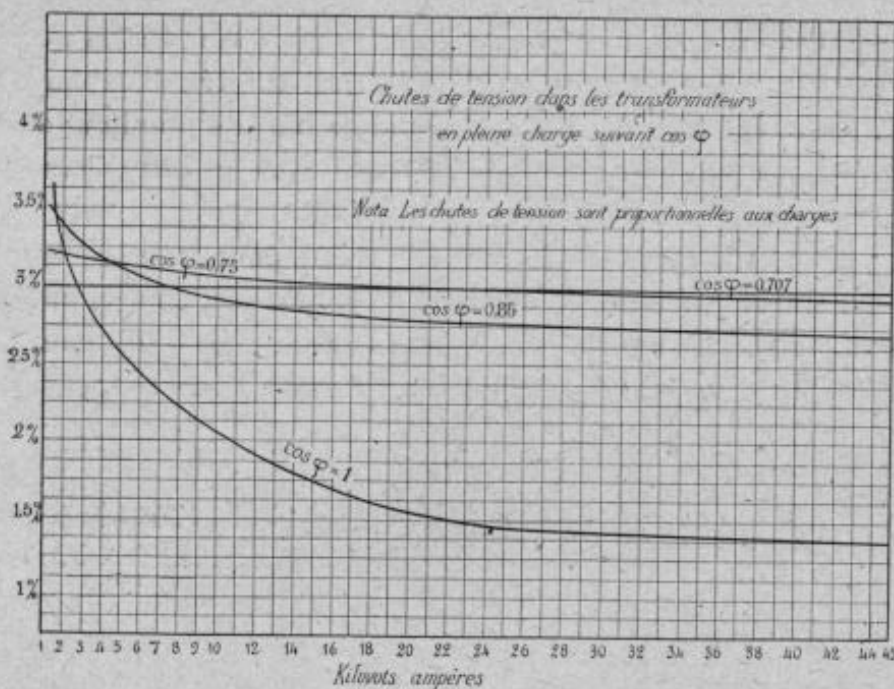


FIG. 1261.

en chicane et maintenues à distance par des isolateurs. Les transformateurs triphasés à noyaux sont préférables aux types cuirassés. On obtient une meilleure répartition du flux en disposant les trois colonnes suivant les sommets d'un triangle équilatéral

Pour assurer la distribution de l'huile, on enferme la partie inférieure des enroulements dans une boîte métallique munie de chicanes. Le tuyau d'arrivée d'huile pénètre dans cette chambre, traversant de haut en bas le fond supérieur ; quant à la sortie d'huile son niveau est au-dessus des enroulements, qui ne risquent pas ainsi d'être mis à découvert, et très au-dessous de la surface de l'huile, pour qu'il n'y ait pas aspiration d'air.

On n'installe ainsi qu'un seul système réfrigérant pour toute une batterie de transformateurs. Quoique cette méthode soit très répandue et donne d'excellents résultats, on a cru préférable d'installer des réfrigérants et des pompes à huile individuels pour rendre les transformateurs

indépendants et éviter qu'une avarie à l'un des deux n'entraîne la mise hors service des autres. On a créé dans ce but un modèle spécial où le serpentin réfrigérant est placé à l'intérieur de la cuvette comme dans le transformateur refroidi par circulation d'eau ; mais ici le serpentin se prolonge presque jusqu'au fond de la cuve. Un caisson métallique entoure ce serpentin, divisant ainsi en deux la capacité de la cuve ; il est percé à la partie inférieure d'une ou de plusieurs ouvertures. Au moyen d'un groupe moteur-pompe installé sur le transformateur lui-même, ou tout à

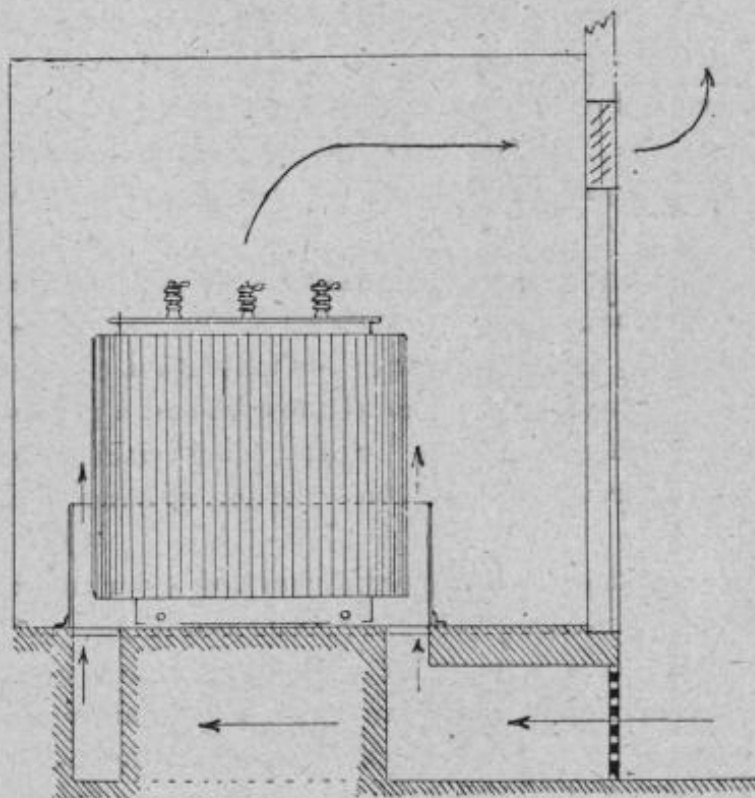


FIG. 1262. — Installation moderne d'un transformateur à huile et à refroidissement naturel.

côté, l'huile est aspirée au sommet de la chambre à huile principale et refoulée dans l'espace extérieur où est logé le serpentin ; la différence de niveau ainsi créée accélère beaucoup la circulation naturelle de l'huile dans les enroulements et le noyau.

Les transformateurs à ventilation forcée présentent sur ceux à huile le grand avantage de permettre l'amenée des conduites d'alimentation des fours directement aux bobines secondaires et de supprimer ainsi les longues et lourdes barres de connexion allant depuis ces bobines jusqu'au dessus du couvercle dans les transformateurs à bain d'huile. D'autre part les transformateurs à ventilation forcée sont moins encombrants, moins lourds et de prix moins élevés.

Soient P la puissance perdue en chaleur dans le transformateur (en watts), V le volume d'eau nécessitée par seconde, en litres, on a :

$$P = 4,17 V \Delta\theta.$$

L'élévation de température ($\Delta\theta$ degrés) de l'eau dépend de la surface du serpentín S et de la différence de température entre l'eau et l'huile et alors : $P = 0,00103 S \Delta\theta$. Le remplacement des bobines dans ce genre de transformateur nécessite beaucoup de temps et il faut les protéger d'une façon toute spéciale contre la foudre.

Dans les transformateurs à circulation d'huile forcée, on a coutume de régler la circulation de l'eau de façon qu'elle emporte tout le calorique sans s'échauffer de plus de 10° . Si la température de l'eau est 15° à l'entrée, elle sera donc de 25° à la sortie. Cela exige ordinairement une circulation d'environ 11,5 par minute pour chaque kilowatt de perte dans le transformateur.

On admet à peu près le même échauffement pour l'huile, de sorte qu'entre le bas et le haut de la cuve la différence maxima de température est d'environ 10° . La chaleur spécifique de l'huile étant environ la moitié de celle de l'eau, sa vitesse d'écoulement théorique est à peu près double. C'est ce qu'on vérifie dans la pratique, sauf que dans certains cas on trouve préférable de faire circuler l'huile 3 fois ou 3 fois et demie plus vite que l'eau.

L'huile employée dans les transformateurs doit avoir un pouvoir isolant aussi élevé que possible, produire l'extinction rapide de l'arc électrique dû à la rupture du circuit, ne contenir ni acides, ni soufre, être transparente et aussi fluide que possible, ne pas s'épaissir avec l'élévation de température, et en fin son point d'inflammation ne doit jamais être inférieur à 200° C. Les huiles que l'on utilise sont des huiles minérales de première qualité et qui n'ont pas été épurées chimiquement, mais raffinées seulement par distillation.

Elles doivent présenter une rigidité diélectrique telle qu'il faille un courant de 14.000 volts au minimum pour en traverser une épaisseur de $0^m,25$. Pour mesurer cette rigidité on place un échantillon d'huile dans une cuve en cuivre ayant environ $0^m,15$ de longueur, $0^m,09$ de largeur et $0^m,07$ de profondeur et l'on y dispose deux électrodes de cuivre ayant chacune 13 centimètres carrés de surface et séparées l'une de l'autre de 13 millimètres. On a soin d'isoler les rebords du récipient avec du mica, afin de réduire au minimum la perte de courant, puis l'on fait passer à travers l'huile un courant à haute tension (2.000 à 3.000 volts par exemple). Les intensités du courant mesurées au moyen d'un galvanomètre très sensible varient dans d'assez grandes limites, soit entre 0,000001125 et 0,0003 ampère pour une tension de 2.500 volts.

Pour les essais faits avec des déflagrateurs, on détermine la rigidité diélectrique en faisant croître sans à-coup la différence de potentiel aux bornes de ces appareils, plongés dans l'huile à essayer. La première étincelle observée marque la tension donnant la valeur de la rigidité électrique pour l'espacement des boules. Celles-ci doivent, à la température de 25°, supporter 20.000 volts avec 0^m,002 d'espacement ou 30.000 volts avec 0^m,00375 d'espacement entre les boules d'un déflagrateur. Pour procéder avec rigueur, il y a lieu, pour chaque voltage essayé, de maintenir la tension constante pendant une minute avant de pousser le voltage plus haut.

Avant l'introduction de l'huile, on a fait le vide à l'aide d'une machine pneumatique et on chauffe les bobines pour en chasser l'humidité. Celles-ci sont constituées par des fils de manganèse très fins couverts d'un isolant assez peu épais pour assurer le bon rayonnement de la chaleur dégagée par effet Joule, rayonnement encore facilité par le bain d'huile.

Pendant le même temps, les enroulements sont chauffés à une température inférieure à 80° C. par un courant approprié parcourant le primaire.

La question du refroidissement des transformateurs a une très grande importance, puisque seul l'échauffement en charge limite la puissance d'un transformateur. On admet d'une façon générale comme surélévation maxima, 55° pour les enroulements, 65° pour le fer, la température ambiante étant supposée égale à 20°.

La surface de refroidissement doit être au moins de 20 centimètres carrés par watt dépensé dans le fer et le cuivre, lorsque le transformateur est à l'air libre, et davantage s'il est enfermé dans une enveloppe.

La viscosité spécifique de l'huile d'isolement comparée à l'eau distillée à 20° mesurée à l'appareil Engler doit être de 10 environ. En ce qui concerne les acides organiques contenus dans l'huile, la tolérance qui peut être admise est de 0,2 0/0 pour l'acidité totale calculée en acide oléique. Mais il ne doit être toléré aucune trace d'acide minéral et d'alcali. La teneur en résidu asphaltique insoluble dans l'éther de pétrole d'un point d'ébullition inférieur à 35° C. ne doit pas dépasser 0,4 0/0 et la teneur en résine soluble dans l'alcool à 70°, 0,5 0/0.

Comme poids spécifique de l'huile, on se trouvera dans de bonnes conditions avec 0,89 à 0,91 à 15° et le point de solidification ne devra pas être inférieur à — 10°.

On sait que l'huile destinée à l'isolement des transformateurs et autres appareils à haute tension ne doit pas contenir trace d'eau. Il faut donc pouvoir enlever sur place l'eau provenant de celle condensée sur les parois du transformateur ou provenant de l'humidité qui s'est accumulée dans les bobines. Nous signalerons à cet effet l'appareil construit d'après le système R. von Brockdorff qui est constitué par un cadre dans lequel

sont disposés verticalement un nombre d'éléments de résistance à tuyau métallique, isolés dans des anneaux en porcelaine. Ce cadre est plongé dans l'huile de telle sorte que les tuyaux soient complètement immergés, tandis que les brides de raccord sont reliées au côté basse tension du réseau. L'huile échauffée dans les tuyaux parcourus par le courant électrique s'élève rapidement vers le haut, tandis que l'huile froide pénètre continuellement par le bas. La couche d'huile chaude se propage par suite rapidement depuis la surface jusqu'au fond du récipient, de sorte qu'au bout de peu de temps, toute la quantité d'huile est amenée à une température suffisamment élevée.

Dans les grandes centrales, la fuite des huiles perdues par le nettoyage des transformateurs et des interrupteurs peut être très importante. Il est donc intéressant de pouvoir remettre ces huiles en usage. On les sèche soit par chauffage électrique, soit par déshydratation à l'aide de chaux vive, soit par chauffage en vase clos sous basse pression (en faisant le vide partiel dans les récipients, ce qui permet de ne chauffer qu'à 70°).

Une filtration sur un lit de sable sec de 0^m,30 d'épaisseur avec une couche superposée de noir animal (0^m,10) rend les huiles à la fois sèches, claires et exemptes de traces charbonneuses.

Le danger d'inflammation que peut présenter l'huile des transformateurs et dont on leur fait un reproche est exagéré, car l'huile, dans les bons transformateurs, s'enflamme très difficilement et doit être, pour cela, fortement chauffée. Pour les hautes tensions, les transformateurs à huile comme les interrupteurs à huile sont préférables aux appareils du même genre à air.

Pour les transformateurs ventilés artificiellement, l'arrivée d'air frais du ventilateur entre par le bas de l'appareil et on admet généralement qu'il faut, pour actionner le ventilateur, un demi pour cent de la puissance du transformateur. Le volume d'air peut se déduire de la formule :

$$V = \frac{p}{1.270 \Delta\theta} ;$$

p perte en watts, V volume d'air fourni en mètres cubes ; $\Delta\theta$ l'élévation de température en degrés centigrades. Ce genre de transformateur permet le remplacement facile des bobines.

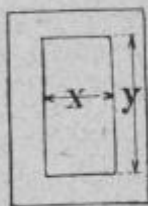


FIG. 1263.

Il est intéressant de connaître les dimensions d'un transformateur, en vue d'une consommation à vide minima. Pour cela nous supposons connues la valeur de l'induction, la densité électrique et la section S des noyaux. Appelons Y la hauteur des noyaux, X , l'espacement de deux noyaux voisins, A la place réservée aux isolants dans le sens de la largeur, et B celle dans le sens de la hauteur (*fig. 1263*).

L'espace disponible pour les bobinages est évidemment représenté par $(X - A)(Y - B)$, quantité qui doit rester constante. Par suite, nous pouvons poser :

$$(X - A)(Y - B) = C. \quad (1)$$

Nous allons ainsi passer à l'examen d'un transformateur monophasé et d'un transformateur triphasé.

Soit un transformateur monophasé à deux colonnes (*fig. 1264*). Disons d'abord que l'on a intérêt à prendre une section carrée pour les colonnes, puisque, à égalité de surface, le carré est celui qui offre la périphérie minima. Par suite, nous aurons comme volume du fer :

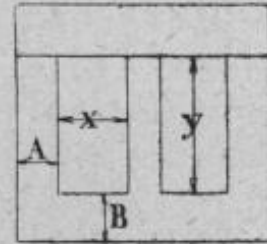


FIG. 1264.

$$V = S(2Y + 2X + 4\sqrt{S}). \quad (2)$$

L'induction étant supposée constante, il s'agit de rendre V minimum.

Pour cela, de la formule (1), on tire : $X = \frac{C}{Y - B} \times A$, et, en remplaçant dans la formule (2) :

$$V = S \left(2Y + 2A + \frac{2C}{Y - B} \right) 4\sqrt{S}.$$

En différentiant par rapport à Y , il vient $V_y = S \left(2 - \frac{2C}{(Y - B)^2} \right)$, qui s'annule pour $2(Y - B)^2 = 2C$, ou pour $(Y - B)^2 = C$.

En transportant dans la formule (1), il vient :

$$(X - A) = (Y - B) = \sqrt{C} \quad \text{et} \quad \frac{X - A}{Y - B} = 1.$$

Dans le cas d'un transformateur triphasé, en procédant comme ci-avant, on a :

$$V = 3YS + 4XS + 6S\sqrt{S} = S(3Y + 4X + 6\sqrt{S}) = S \left(3Y + 4A + \frac{4C}{Y - B} + 6\sqrt{S} \right).$$

Et : $Vy = S \left(3 - \frac{4C}{(Y-B)^2} \right)$, qui s'annule pour $(Y-B)^2 = \frac{4C}{3}$; d'où :

$$(X-A)^2 = \frac{3}{4} C, \quad \text{et enfin} \quad \frac{X-A}{Y-B} = \frac{3}{4}.$$

Une partie essentielle de l'étude des transformateurs est, en résumé, l'examen des conditions d'échauffement et de refroidissement et l'étude des dispositions à employer pour favoriser la réfrigération.

M. Vied a particulièrement étudié le cas des transformateurs à huile : sa théorie peut toutefois être aisément appliquée au transformateur à air, qui en est un cas simplifié.

Partant de la partie la plus chaude du transformateur, dans les bobines ou le noyau, pour arriver à la partie la plus froide, le milieu ambiant, on peut considérer dans la transmission de chaleur, les étapes suivantes : la dissipation de l'énergie calorifique développée dans les bobinages et les noyaux se fait à la faveur des phénomènes de la conduction, du rayonnement et de la convection. La transmission par conduction intervient seule dans le bobinage, dans l'isolant solide et dans la transmission dans la paroi ; elle intervient conjointement à la convection dans la transmission de la surface de l'isolant solide à la surface d'huile adjacente. Le rayonnement intervient en quelque sorte comme shunt dans la transmission de l'isolant solide à l'huile, dans celle de l'huile à la paroi de refroidissement et enfin dans celle de la surface extérieure de la paroi au milieu extérieur et de la surface du bobinage jusqu'à la paroi de refroidissement.

L'appareil Westinghouse pour le séchage et le filtrage des huiles des transformateurs se compose d'une pompe à huile actionnée par un moteur électrique et d'un appareil de filtrage dans lequel l'huile est pressée à travers une série de feuilles de buvard insérées entre des cadres métalliques. L'ensemble de ces derniers et des buvards est maintenu serré au moyen d'une vis de blocage actionnée par un volant à levier. Le grand modèle de ces appareils débite 37 à 45 litres à la minute, et la température de l'huile peut avoir 25 à 75° C. La puissance du moteur actionnant la pompe est de 2 HP. Le nombre de feuilles de buvard est de 140.

Un four électrique spécial est destiné à sécher les feuilles de buvard avant leur introduction dans l'appareil ; la puissance absorbée par ce dernier varie de 200 à 800 watts. Les huiles pour transformateurs, convenablement séchées, doivent présenter à l'essai diélectrique (éclateur à boules) une résistance telle que l'éclatement ne se produise pas au-dessous de 30.000 volts pour une distance de 3 millimètres entre boules.

La convection joue un très grand rôle dans le refroidissement du transformateur ; c'est ce qui explique la grande efficacité des canaux ménagés dans les bobinages et dans les noyaux, ainsi que les cloisonnements ayant pour effet de favoriser la formation des courants de convection et d'en assurer la régularité en supprimant les tourbillons parasites.

Pour les transformateurs à air à ventilation forcée, au point de vue du refroidissement, la circulation d'air s'établit ordinairement sur les enroulements et sur le noyau à part et les deux courants d'air sont réglés séparément. Les paquets de tôle ont, par exemple, de 75 à 100 millimètres d'épaisseur ; quant aux enroulements, ils sont divisés en bobines plates aussi nombreuses que possible ; les feuilles de carton comprimé et de ruban placées pour isoler les bobines et le noyau servent à isoler les deux courants d'air.

La résistance offerte au passage de l'air étant faible, on doit employer un ventilateur pouvant fournir sous basse pression de grands volumes d'air.

La réfrigération dans les transformateurs à bain d'huile à refroidissement naturel est assez bonne dans ces appareils grâce à ce que les courants de convection qui s'établissent dans le liquide renouvellent constamment le bain au contact des surfaces du transformateur et ramènent l'huile vers les parois de l'enveloppe où elle se refroidit. Pour activer le refroidissement on munit l'enveloppe d'ailettes ou bien on emploie une cuve en fonte ou en tôle ondulée. Pour les gros transformateurs on est amené à augmenter artificiellement le développement des parois, les ailettes ou ondulations ne suffisant plus.

Dans les transformateurs Thomson-Houston ce résultat est obtenu en formant la paroi verticale de tôle ondulée disposée non plus à plat mais en formant de grandes ondulations.

La Société Westinghouse emploie une cuve pourvue extérieurement de tubes en fer, communiquant avec l'intérieur de la caisse en haut et en bas. On a pu ainsi établir des appareils d'une puissance dépassant 3.500 kilowatts. Dans une autre construction du même genre les tuyaux sont remplacés par des boîtes à ailettes. La Compagnie Allis-Chalmers, qui construit la cuve proprement dite du transformateur avec de la tôle à chaudière, enveloppe celle-ci d'une chemise à doubles parois. La cuve, la chemise et les joints sont parfaitement soudés de façon à constituer un réservoir étanche à l'huile. L'huile chaude, s'élevant à la partie supérieure de la cuve passe dans l'enveloppe extérieure, s'y refroidit, redescend et s'écoule ainsi en un cycle ininterrompu ; dans l'espace entre la cuve et la chemise, un tirage énergique se produit ; il refroidit efficacement le liquide.

Le tableau comparatif suivant et les spécifications à la suite permettent d'avoir une idée des progrès réalisés dans la construction des transformateurs.

POISSANCE en k.-v.-a.	FREQUENCE	REFROIDIS-EMENT	POIDS TOTAL en tonnes	POIDS par k.-v.-a. en kg.	CONSTRUCTEURS	DESTINATAIRES
6.750	50	Circulation d'huile	38,0	5,63	Siemens-Schuckert Werke	Sociedad hydro- elec. espanola.
10.000	60	Huile avec circulation d'eau	85,0	8,50	General electric Co. Schenectady.	Great Western Power Co.
2.200	60	Id.	26,2	11,80	Id.	Washington Water Power Co.
3.060	50	Circulation d'huile	14,5	4,75	Maschinenfabrik Oerlikon.	Soc. pyrénéenne d'énergie électr.
2.000	50	Ventilat. artific.	8,0	4,00	Id.	Soc. grenobloise de force et lu- mière.
3.500	50	Id.	11,5	3,28	Id.	Soc. idrauliche del Moncenisio.

Transformateurs triphasés à huile, classe T. O. C., 10.000 volts au primaire
25 périodes par seconde (Ateliers Thomson-Houston).

	KILOVOLTS-AMPÈRES						
	10	25	50	100	250	500	1.000
Type.....	UT-10	UT-25	UT-50	UT-100	UT-250	UT-500	UT-1.000
Refroidissement.....		à huile	et à refroidissement naturel.				
Pertes dans le fer, en watts.....	200	600	1.400	1.550	2.550	4.000	6.800
Pertes dans le cuivre à chaud, en watts.....	520	1.000	1.800	3.500	6.800	10.400	20.400
Rendement :							
a) Pleine charge $\cos \varphi = 1..$	93,3	94	94,5	95,2	96,4	97,2	97,35
b) Pleine charge $\cos \varphi = 0,8$	91,7	92,6	93,2	94	95,5	96,5	96,7
1/2 charge $\cos \varphi = 0,8$	91,7	92,2	92,8	94,2	95,9	96,9	97,1
1/4 charge $\cos \varphi = 0,8$	84,5	83	84,2	91,8	94,35	94,7	96,2
Courants à vide :							
Phase centrale, en pour 100.	5,2	4,85	4,4	4,15	4	3,9	3,8
Phases extrêmes en pour 100	7,8	6,7	5,7	5	4,6	4,5	4,4
$\cos \varphi$ moyen à vide.....	0,110	0,106	0,100	0,095	0,09	0,085	0,08
Chute de tension, en pour 100 pour $\cos \varphi = 1.....$	3	2,4	2,1	2	1,7	1,25	1,18
Poids sans huile, en kilogr..	240	445	800	1.300	2.850	4.250	6.300
Litres d'huile nécessaires....	250	460	520	950	1.460	2.420	3.430

Transformateurs monophasés à huile, classe O. C., 10.000 volts au primaire,
50 périodes par seconde (Ateliers Thomson-Houston).

	KILOVOLTS-AMPÈRES						
	10	25	50	100	250	500	1.000
Type.....	U-10	U-25	U-50	U-100	U-250	U-500	U-1.000
Refroidissement.....	à huile et à refroidissement naturel.						
Pertes dans le fer en watts..	135	378	750	1.050	2.250	3.400	5.300
Pertes dans le cuivre à chaud, en watts.....	195	422	810	1.200	2.370	3.700	6.800
Rendement :							
a) Pleine charge $\cos \varphi = 1..$	96,6	96,9	97,05	97,8	98,2	98,6	98,8
b) Pleine charge $\cos \varphi = 0,8$	95,8	96,15	96,25	97,3	97,75	98,25	98,5
1/2 charge $\cos \varphi = 0,8$	95,1	95,35	95,45	96,7	97,2	97,9	98,25
1/4 charge $\cos \varphi = 0,8$	92,25	92,65	92,6	94,65	95,4	96,5	97,2
Chute de tension, en pour 100 pour $\cos \varphi = 1..$	2	1,65	1,65	1,25	0,96	0,75	0,70
Courant à vide, en pour 100.	4,4	4,2	3,8	3,5	3,4	3,35	3,3
$\cos \varphi$ à vide.....	0,35	0,292	0,394	0,3	0,265	0,203	0,164
Poids sans huile, en kilogr..	240	380	580	1.000	1.785	3.130	4.600
Litres d'huile nécessaires....	110	120	230	500	1.000	1.400	2.100

Transformateurs monophasés à huile, classe O. C., 10.000 volts au primaire,
25 périodes par seconde (Ateliers Thomson-Houston).

	KILOVOLTS-AMPÈRES						
	10	25	50	100	200	500	1.000
Type.....	U-10	U-25	U-50	U-100	U-250	U-500	U-1.000
Refroidissement.....	à huile et à refroidissement naturel.						
Pertes dans le fer en watts..	250	700	1.000	1.500	3.500	5.000	8.000
Pertes dans le cuivre à chaud, en watts.....	455	840	1.630	2.350	5.600	7.400	12.400
Rendement :							
a) Pleine charge $\cos \varphi = 1..$	93,4	94,2	95	96,3	96,5	97,6	98
b) Pleine charge $\cos \varphi = 0,8$	91,9	92,9	93,8	95,4	96,65	97	97,5
1/2 charge $\cos \varphi = 0,8$	92,5	91,7	93,5	94,2	95,3	96,7	97,3
1/4 charge $\cos \varphi = 0,8$	87,8	85,1	90,1	90,5	92,8	94,8	94,8
Courant à vide, en pour 100.	3,8	5,3	5,25	5,2	4,9	4,3	4,2
$\cos \varphi$ à vide.....	0,43	0,39	0,37	0,30	0,24	0,22	0,188
Chute de tension à chaud, en pour 100 pour $\cos \varphi = 1..$	4,6	3,4	3,3	2,35	2,25	1,5	1,25
Poids sans huile, en kilogr..	310	525	810	1.210	2.570	4.140	4.900
Litres d'huile nécessaires....	110	180	410	630	1.250	1.900	2.300

Transformateurs polyphasés (Ateliers de construction Oerlikon).

ÉLÉMENTS	PUISSANCE EN KILOVOLTS-AMPÈRES						
	3.000	600	3.500	4.500	1.375	400	4.000
Phases	Triphasé	Monophasé	Triphasé	Triphasé	Monophasé	Triphasé	Monophasé
Construction	Huile circ. dans des réfrigérants	Huile et circulation d'eau	Ventilation forcée	Ventilation forcée	Ventilation forcée	Huile et refroidissement naturel	Ventilation forcée
Tensions en volts	P. 5.000 S. 55.000	P. 27.000 S. 3.500	P. 27.000 S. 3.000	P. 32.000 S. 16.000	11.000/35-50 réglage de 1 à 1 volt	P. 52.000 S. 9.000	P. 45.000 S. 115.135, 155
Courants en ampères	355/32 50	22/170 40	75/580 50	80/40 50	125/39.000 25	45/260 50	8.000/33.300/38.700 50
Périodes	98,5 98 96,5	97,5 97 95,5	98,5 98 96,5	99 99 98	98,5 98 96,5	98 97,5 95	98,5 98,5 98
Rendements en pour 100, environ :	28	8	32	21,5	11,5	4	35
Pertes dans le fer en kilowatts, environ	19,5	6,5	20	17,5	13,5	3	44
Pertes dans le cuivre en kilowatts, environ	0,7 3,74	1,2 3,8	0,6 3,2	0,4 1,9	1,0 4,9	0,8 3,5	0,9 5,0
Chute de tension en pour 100 : $\cos \varphi = 1$, environ	12.500	4.800	11.800	8.500	9.200	4.300	16.000
Poids approximatif sans huile environ	3.200	2.300	"	"	"	2.800	"
Poids approximatif de l'huile environ							

Transformateurs triphasés à 50 périodes par seconde, 6 à 10.000/200 volts
(Schneider et C^{ie}.)

ÉLÉMENTS	PUISSANCE EN KILOVOLTS-AMPÈRES					
	10	25	50	100	250	500
Type.....	IP	IP	IP	IP	IC	IC
Nombre de phases.....	3	3	3	3	3	3
Refroidissement.....	Naturel	Naturel	Naturel	Naturel	Ventilé	Ventilé
Pertes dans le fer, en kilowatts.....	0,200	0,475	0,900	1,500	3,100	5,500
Pertes dans le cuivre, en kilowatts, à pleine charge et à chaud pour $\cos \varphi = 0,8$	0,300	0,625	1,040	1,700	3,850	7,000
Rendement à chaud, en pour 100 pour $\cos \varphi = 0,8$:						
0,25 de la charge.....	91,2	91,8	92,3	93,6	94,6	95,2
0,5 —	94,5	94,9	95,3	96,1	96,8	97,4
1,0 —	95	95,6	96,4	96,8	97,2	97,5
Courant à vide, en pour 100.....	8,5	7,2	6	5,5	4,4	4
$\cos \varphi$ à vide	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Chute de tension à pleine charge et à chaud, en pour 100, pour :						
$\cos \varphi = 1$	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,2
$\cos \varphi = 0,8$	3,5	3,3	3	2,8	2,6	2,5
Poids total, en kilogrammes.....	360	695	1.080	1.900	4.200	7.000

494. Couplage en parallèle des transformateurs. — La mise en quantité des transformateurs peut se faire immédiatement et sans aucune précaution, quand ces appareils alimentent des circuits secondaires complètement séparés les uns des autres. Il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit, comme c'est généralement le cas, d'accoupler plusieurs transformateurs sur un réseau secondaire unique. Ceux-ci, dans ce cas, doivent remplir les mêmes conditions que les alternateurs pour leur accouplement, savoir : fréquence identique, égalité de tension aux bornes et concordance de phases. Les deux premières conditions se trouvent résolues du fait que les enroulements secondaires sont alimentés par le même réseau et la deuxième résulte de la constance du rapport de transformation. Il reste donc la phase de la tension secondaire.

Comme dans un transformateur la concordance des phases résulte uniquement de la disposition des enroulements, il faut donc que ces appareils accusent une même valeur de l'angle de réseaux, c'est-à-dire que le décalage entre les phases des tensions primaire et secondaire correspondantes soit rigoureusement égal pour tous les transformateurs à brancher sur un même réseau.

Le couplage en parallèle des transformateurs à une phase n'offrant pas de difficultés, nous n'avons à envisager que des appareils triphasés.

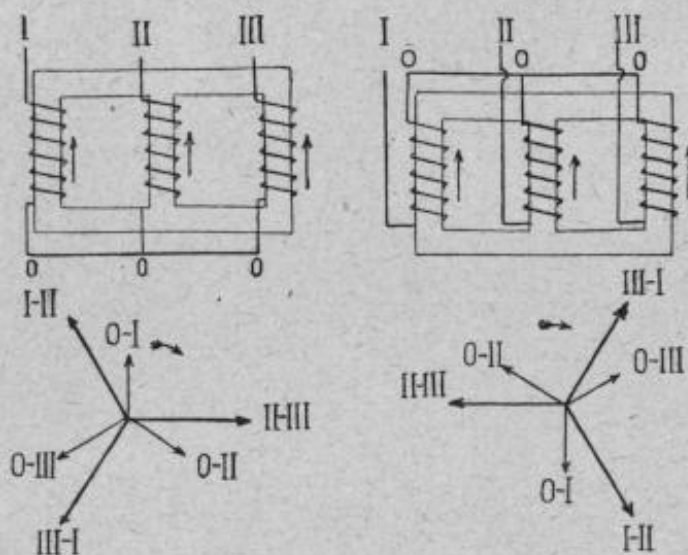


FIG. 1265.

Les transformateurs à trois phases ne donnent, en général, suivant le choix des enroulements, lieu qu'à quatre angles différents. Les (*fig. 1265 et 1266*) représentent les groupements courants des enroulements des transformateurs triphasés ainsi que les diagrammes des tensions qui s'y rapportent. Les deux schémas de la (*fig. 1265*) ont trait aux montages en étoile et les deux de la (*fig. 1266*) aux dispositifs en triangle.

Les différentes phases sont désignées par I, II, III, les tensions entre phases par I-II, II-III, III-I et les tensions entre les bornes et le point neutre par O-I, O-II, O-III. Dans tous les diagrammes, les flèches indiquent le sens positif de la f. é. m. induite par le flux. On voit ainsi que deux transformateurs connectés, l'un d'après la première figure et l'autre

selon la seconde figure, ne pourront, étant alimentés par un même réseau primaire, se coupler en quantité en raison de l'impossibilité de les mettre en phase. Il en serait de même pour deux appareils montés en triangle suivant la troisième et la quatrième figures, car ces deux dispositions conduisent également à des réseaux différents.

Dans la construction des transformateurs, il y a donc lieu de se rendre compte que l'angle des réseaux est égal : 1°, à 0° quand les enroulements primaire et secondaire sont groupés tous deux de la même façon et bobinés dans le même sens ;

2°, à 60° quand les enroulements primaire et secondaire sont groupés tous deux de la même façon, les bobinages étant en sens inverse l'un de

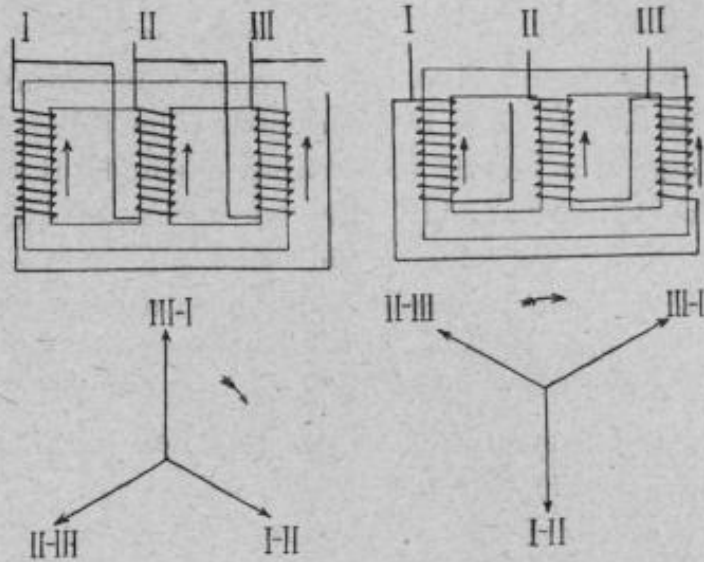


FIG. 1266.

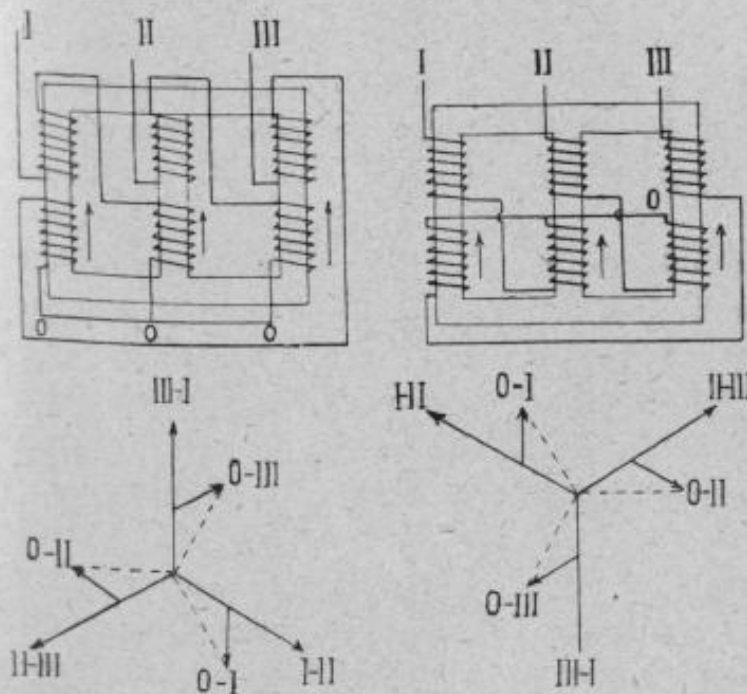


FIG. 1267.

l'autre ; 3°, à 30° quand le primaire est en étoile et le secondaire en triangle, les deux bobinages étant de même sens ; quand ces sens sont différents, l'angle est de 90° ; 4°, à 90° quand le primaire est en triangle et le secondaire en étoile, les bobinages étant de même sens ; quand ces sens sont différents, l'angle est de 30°.

On fait assez souvent usage, dans la construction des transformateurs, d'un groupement en étoile dans lequel les spires d'une même branche se trouvent distribuées en parties égales sur deux noyaux comme l'indique la (fig. 1267). Les tensions étoilées sont donc formées de deux composantes égales,

décalées entre elles de 120° . La comparaison de ces dernières figures avec les troisième et quatrième montre que cette dernière disposition, au point de vue de l'angle des réseaux, est identique au montage en triangle. Il suffira, par conséquent, de la ramener dans chaque cas au groupement en triangle correspondant.

Connaissant la valeur de l'angle des réseaux ressortissant de la construction de deux transformateurs, on peut en déduire aussitôt s'il est possible ou non de les accoupler ensemble. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que l'égalité entre ces angles est une condition indispensable, mais non suffisante, à elle seule, pour le bon fonctionnement en quantité et que les appareils doivent, en outre, accuser des chutes de tension égales aux différentes charges.

495. Installation et réglage des transformateurs. — On doit le plus possible éviter de placer les transformateurs dans des locaux hermétiquement clos ou qui renferment soit des générateurs à vapeur, soit des fours électriques ou autres appareils à température très élevée. On doit aussi éviter d'aspirer ou de refouler, dans le même local où se trouve le transformateur, l'air destiné à son refroidissement.

Il est bon de prévoir la salle des transformateurs assez loin ou au-dessous de la salle de chauffe afin d'éviter le mélange de l'air chauffé avec l'air ambiant des transformateurs. Les caniveaux d'amenée d'air donnant à l'extérieur, dans le cas d'appareils à refroidissement naturel, doivent déboucher dans la partie inférieure de la salle, au-dessous des appareils, et être continués par des conduits rejetant cet air à la partie supérieure de la salle.

Pour les appareils à insufflation d'air mécanique, le fluide échauffé doit être évacué de la même façon, soit par un seul conduit, soit par autant de cheminées qu'il y a d'appareils, ou on peut le laisser s'échapper librement dans la salle, à la condition qu'un puissant ventilateur aère le local. Une bonne précaution consiste à disposer un registre à la partie inférieure de l'appel d'air pour isoler de l'installation tout appareil mis momentanément hors d'usage.

Pour une parfaite exploitation, il convient de munir largement l'installation d'appareils de contrôle, tels que : appareils d'alarme annonçant au personnel l'arrêt du fonctionnement de l'eau ou de l'air, des thermomètres avertisseurs ou indicateurs à distance pour la signalisation des températures normales ou anormales, l'état des filtres d'air ou d'huile, etc.

Spécialement pour les transformateurs à huile, il convient de prendre des dispositions soit pour la meilleure économie de ce fluide, soit pour réduire le plus possible la surface de contact de l'huile avec l'air humide ; emploi de chlorure de calcium, de réservoir en dessous de la cuve du trans-

formateur; cette dernière étant étanche et remplie d'huile froide de telle façon que toutes les connexions sont noyées dans cette dernière.

Si la tension est supérieure à une trentaine de milliers de volts on doit employer un transformateur à huile. La réfrigération se fera : a) dans les grandes installations, comprenant des transformateurs de grande puissance et ayant à faire face à des surcharges accentuées et prolongées : 1° par circulation d'huile ou ventilation forcée si le procédé ci-après est impraticable ; 2° par circulation d'eau chaque fois que ce procédé sera économiquement possible ;

b) Dans les moyennes installations, ne demandant pas un procédé de réfrigération énergique : 1° par ventilation naturelle ; 2° par ventilation forcée assurée par un groupe automatique ;

c) Dans les cas de transformateurs isolés, par ventilation naturelle.

Lorsque la tension est inférieure à 30.000 volts on doit employer : a) dans les grandes installations ; 1° si la réfrigération par eau est possible, des transformateurs à bain d'huile à circulation d'eau ; 2° si ce procédé de réfrigération n'est pas économique, des transformateurs à air à ventilation forcée ;

b) Dans les moyennes installations, des transformateurs à réfrigération par ventilation forcée ou à réfrigération par ventilation naturelle, selon les conditions locales.

Le tableau suivant indique les limites de puissance et de tension atteintes avec les différentes constructions de transformateurs.

RÉFRIGÉRANTS	MONOPHASES		TRIPHASÉS	
	Puissance en K. V. A.	Tension en V	Puissance en K. V. A.	Tension en V
Transformateurs à air sans bain d'huile				
Ventilation naturelle.....	200	30-33.000	300	30-33.000
— artificielle.....	3.000		4.500	
Transformateurs à bain d'huile				
Ventilation naturelle.....	500	illimitée	1.000	illimitée
— artificielle.....	4.500		4.500	
Réfrigération par circulation d'eau.....	15.000		25.000	
Réfrigération par circulation d'huile.....	»		»	

Les transformateurs à circulation d'huile forcée par groupe moteur-pompe, malgré des avantages incontestables, ne sont généralement pas recommandables à cause du mauvais fonctionnement fréquent des

pompes à huile. Cependant les transformateurs de ce genre, du type cuirassé, sont acceptés pour l'alimentation des fours électriques, en Amérique principalement. Les transformateurs à circulation intense d'huile par thermo-siphon, dont l'emploi ne peut être envisagé que si l'on manque d'eau, leur prix élevé ne peut les faire admettre que dans des cas très restreints.

Enfin les appareils à refroidissement par chemises d'eau, enveloppés d'air, ne sont que très peu efficaces eu égard aux débits de liquide ou de fluide auxquels ils donnent lieu.

Les transformateurs desservant les réseaux secondaires sont placés soit sur des poteaux, soit dans des tourelles en maçonnerie ou en tôle (kiosques). On trouve ces dernières dans le commerce prêtes à leur mise en place.

Les (fig. 1268 et 1269) montrent des dispositions schématiques de montage de postes de transformateurs. Au (chapitre xxx) en traitant des usines centrales, nous faisons figurer les types les plus courants de postes de transformateurs.

Les conducteurs de la ligne à haute tension sont pourvus de parafoudres P, de bobines de self B, de coupe-circuits fusibles C et d'interrupteurs munis de résistances liquides R. La partie du kiosque réservée à la basse

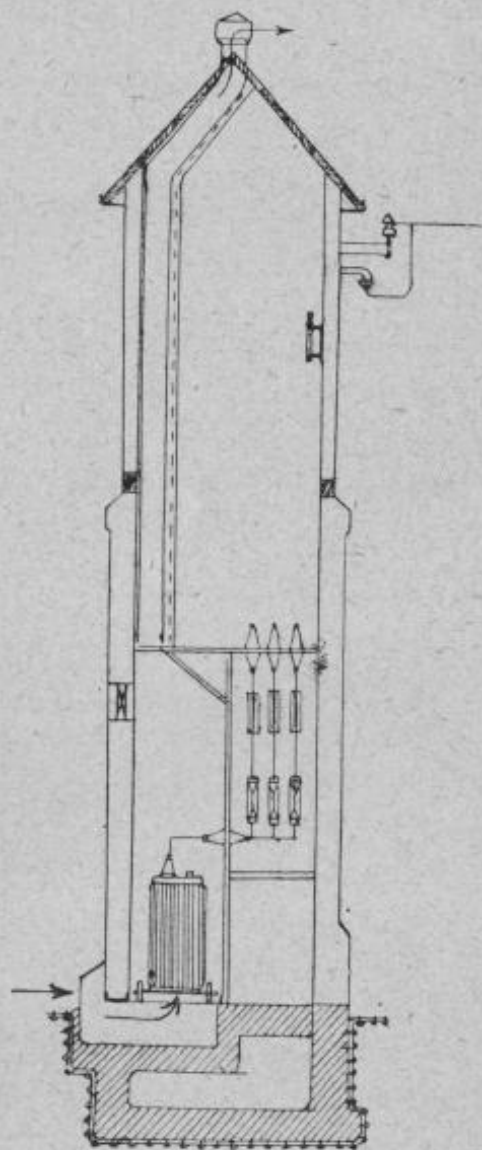


FIG. 1268. — Cabine aérée pour transformateur.

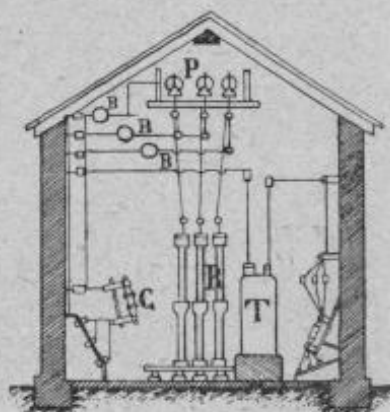


FIG. 1269.

tension renferme une série d'appareils du même genre, ainsi que les transformateurs T. En séparant les tensions et en apportant dans

toute l'installation le plus de simplicité et de clarté possible, on réduit de beaucoup les chances d'accident.

A l'entrée du kiosque et à l'extérieur, on dispose le plus souvent un interrupteur de sectionnement.

Il est de la plus haute importance d'éviter tout danger pouvant provenir d'une communication entre le réseau à basse tension et celui à haute tension. Le moyen le plus efficace consiste à mettre simultanément à la terre l'enveloppe du transformateur et un point de l'enroulement secondaire, mais en employant des appareils n'opérant la mise à la terre qu'au moment précis où le courant à haute tension pénètre dans le secondaire.

Dans les transformateurs du système Thomson-Houston, cette disposition est réalisée de la façon suivante : le secondaire a ses conducteurs reliés à des boutons en métal installés à proximité d'une plaque métallique en relation avec la terre ; une feuille d'isolant qui peut supporter la tension normale du secondaire est disposée entre les plaques et les boutons. Le courant à haute tension vient-il à communiquer avec le secondaire, aussitôt la feuille isolante se trouve percée et, les boutons communiquant avec la terre et entre eux, il y a court-circuit, qui détermine la fusion des coupe-circuits du primaire.

On peut aussi relier le bâti du transformateur au centre de l'étoile secondaire et mettre cet ensemble à la terre par l'intermédiaire d'un condensateur formé de lames de zinc et de mica. Lorsqu'on veut toucher au transformateur, on shunte le condensateur au moyen d'un interrupteur reliant directement le bâti à la terre.

La maison Voigt et Heffner place, en outre, un condensateur à chaque borne secondaire des transformateurs triphasés. Ces condensateurs sont reliés en étoile à la terre et, dans le cas de pénétration de haute tension, ils fondent. Il y a alors court-circuit à la terre et les fusibles primaires sautent.

M. Carlo Coltri, ingénieur à Milan, a établi un montage ingénieux utilisant les phénomènes de résonance pour la commande d'un relais qui supprime la haute tension en cas de contact accidentel entre les deux enroulements d'un transformateur. M. Coltri monte en dérivation entre le point neutre, milieu du secondaire et la terre, une bobine de self servant aussi de relais en série avec un condensateur.

Le primaire à haute tension présente toujours une certaine capacité vis-à-vis de la terre ; si un contact vient à se produire avec le secondaire et si la condition $\omega^2 LC$ est remplie, un phénomène de résonance se manifeste et le relais entre aussitôt en jeu.

Un autre dispositif dû à M. Cesare Scotuzzi est destiné également à prévenir tout contact entre les circuits primaire et secondaire. Dans ce

but, M. Scotuzzi intercale entre la terre et le secondaire un relais électrostatique qui ferme le circuit d'un petit moteur quand une surtension se produit. Ce dernier ouvre alors l'interrupteur automatique du primaire avec un retard déterminé.

Ce retard a pour but d'éviter une mise hors circuit en cas d'une surtension passagère due à des causes atmosphériques ou autres. L'avantage de ce procédé est qu'il n'établit aucune communication permanente entre l'installation et la terre.

Pour régler convenablement la tension du secondaire, il faut prendre

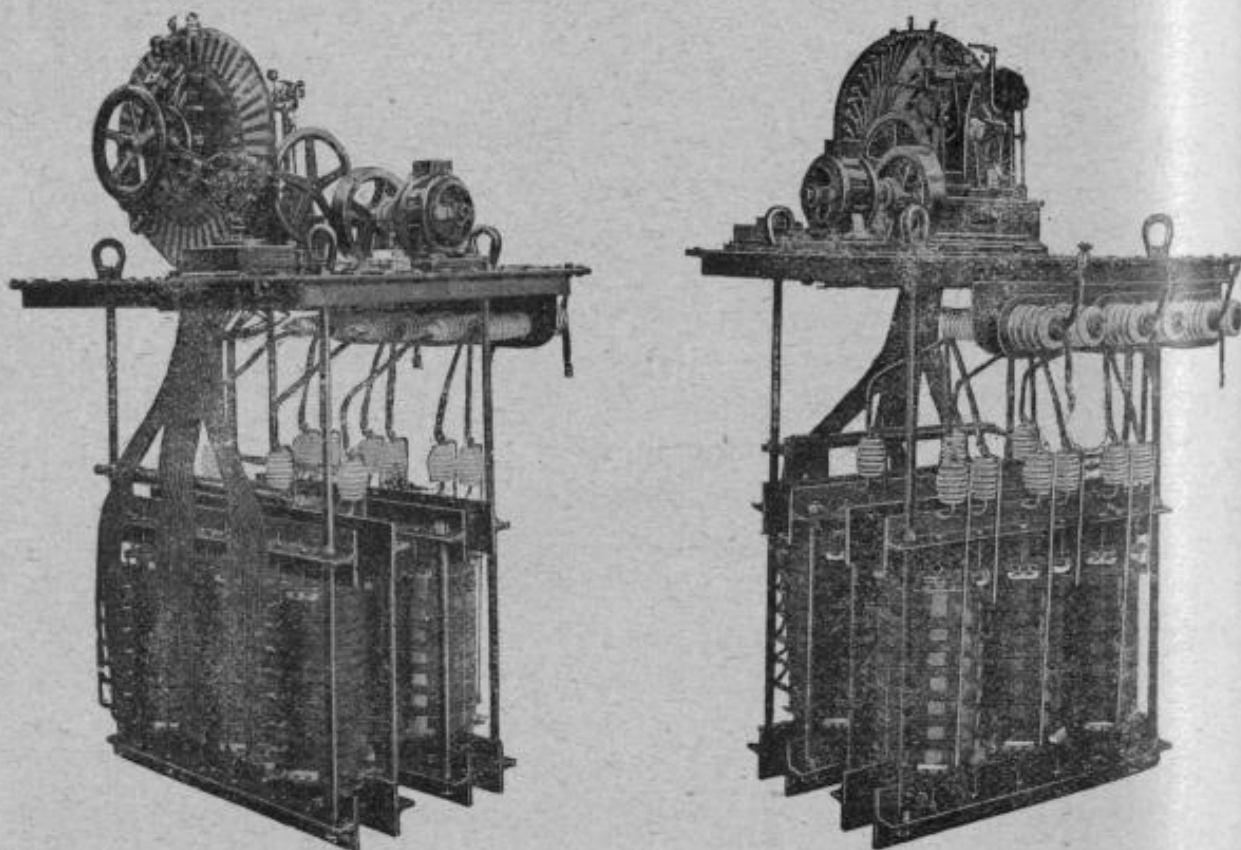


FIG. 1270. — Transformateur survolteur-dévolteur triphasé automatique pour un feeder de 750 K. V. A., 8.500 volts (Construction H. Guénod, A. S.).

des transformateurs-abaisseurs donnant une tension plus élevée que la tension normale et installer des bobines à réaction pour réduire la tension à certains moments. En réglant le potentiel à l'usine, suivant la charge, et les bobines à réaction, d'après le nombre de lampes installées, on arrive à un fonctionnement satisfaisant des lampes à incandescence.

L'emploi de compensateurs permet de réaliser une économie sensible sur le prix des transformateurs lorsqu'il n'y a aucun inconvénient à relier électriquement la haute et basse tension ou lorsque les voltages primaires et secondaires sont peu différents.

Dans les transformateurs alimentant un réseau de lampes à incandescence, d'après M. Potier, dès que la charge dépasse une certaine valeur,

qui est bien inférieure à la pleine charge, il n'y a plus de résonance à craindre. Il reste cependant une région allant de la marche à vide à cette charge critique dans laquelle la charge ne limite pas étroitement les surtensions, et il est intéressant d'examiner le cas particulier où le circuit secondaire du transformateur est ouvert.

Pour prévenir les chutes de potentiel excessives dans les longs feeders, on surélève le voltage au moyen d'un transformateur normal. A cet effet, on intercale le secondaire d'un transformateur dans la ligne et le primaire est monté en dérivation sur les conducteurs principaux comme à l'ordinaire.

Lorsque l'on a des transformateurs très lourds à manœuvrer, on doit prendre des dispositions pour faciliter leur déplacement en cas d'avarie ou de nettoyage. A l'usine de Livet (§ 349), les transformateurs de 2.500 kilowatts, pesant 18.000 kilogrammes, sont posés sur des rouleaux que l'on pousse sur un wagonnet, lequel est amené en dessous d'un pont roulant de 20 tonnes qui transporte l'appareil à l'atelier de réparation. Chaque transformateur aboutit à un interrupteur qui permet de les brancher sur des barres omnibus, au nombre de quatre, une par phase et une pour le point neutre.

496. Systèmes de distribution des transformateurs et rayons d'action des sous-stations de transformateurs. — Nous n'avons à nous occuper ici que de transformateurs alimentant des lampes et des petits moteurs, car généralement les moteurs de grande puissance sont commandés par un transformateur spécial.

Deux solutions interviennent pour les premiers, soit une sous-station unique, comportant un certain nombre de transformateurs que l'on met successivement en charge suivant les besoins, soit de répartir isolément un certain nombre de transformateurs alimentant chacun quelques abonnés. Il y a encore le cas où on installe un transformateur chez chaque consommateur.

La première solution a l'avantage de rendre minimum le nombre et la puissance des transformateurs, correspondant à 60 0/0 de la puissance des appareils d'utilisation fonctionnant simultanément, c'est-à-dire à 60 0/0 de la totalité des lampes et moteurs installés.

Les transformateurs donnent dans ce cas un rendement maximum, par la possibilité d'utiliser des appareils de grande puissance en réduisant leur nombre au minimum. De ce fait, le courant dans la ligne à haute tension est aussi réduit au minimum. Mais d'autre part, le réseau de basse tension prend une importance assez considérable.

La deuxième solution est surtout recommandable lorsque le réseau secondaire est établi avec des câbles souterrains ; elle est assez commu-

nément utilisée, même dans les installations complètement en fils nus. Cependant on peut lui reprocher de laisser toujours en circuit le primaire des transformateurs et de se prêter moins facilement à la régulation de la tension. Au point de vue de cette dernière, la régulation avec le montage en étoile se fait mieux qu'avec le système en triangle. La distribution en étoile avec quatre conducteurs est, en outre, le plus économique des systèmes utilisés, car il n'exige qu'un poids de cuivre de 33,3, le fil neutre pris égal à la section des autres fils, et 29,17, le fil neutre d'une grosseur égale à la moitié de celle des autres fils (dans cette évaluation, le point de départ de comparaison est le poids représenté par les conducteurs d'une ligne monophasée = 100). Le montage en triangle à trois conducteurs = 72,9. Cependant, dans les installations avec câbles souterrains, on donne assez souvent la préférence à ce dernier mode de montage.

Il nous reste à examiner le cas où chaque abonné possède son transformateur spécial. Alors l'importance du réseau secondaire est réduite à son minimum ainsi que la quantité de fils à employer; mais, par contre, le réseau à haute tension prend un développement très important. Le facteur de puissance de toute l'installation est nécessairement faible et le rendement des alternateurs en est abaissé d'autant. De plus, le nombre des transformateurs à installer est très grand. Il nécessite en outre une grande dépense de premier établissement et beaucoup de frais d'entretien. On évite le plus possible de recourir à ce genre d'installation.

Au point de vue des zones d'action, on peut envisager deux cas, celui où l'on cherche les meilleures conditions d'établissement d'un réseau à créer et celui où, un réseau de distribution à courant alternatif avec transformateurs individuels étant déjà en fonctionnement, on examine s'il y a intérêt à créer des sous-stations de transformation.

Le premier cas comporte deux hypothèses primordiales : ou les abonnés à desservir se trouvent en bordure des voies où passent les canalisations à haute tension, ou bien ces abonnés se trouvent à une certaine distance de ces voies. Dans la première hypothèse, le rayon d'action dépend, dans une large mesure, du nombre des abonnés à desservir et de la puissance des postes d'abonnés. Dans une distribution où la canalisation primaire est à 3.000 volts, par exemple, et la canalisation secondaire à trois fils, 220 volts, la durée de concession, trente-deux ans, le rayon d'action est extrêmement faible s'il n'y a que peu d'abonnés ne consommant qu'une faible puissance, et sa valeur moyenne est de 150 mètres environ, s'il s'agit de desservir une dizaine d'abonnés consommant de 1 à 5 kilowatts ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Rayon d'action des sous-stations (la Revue électrique, t. IX).

	1 Triangle. 40	2 Étoile. 40	3 Triangle. 20	4 Étoile. 20	5 Triangle. 10	6 Étoile. 5
1. Réseaux.....						
2. Charges maxima, en watts par mètre de canalisation.....						
3. Genre de connexion du réseau basse tension.....						
4. Genre de la canalisation.....						
Prix du réseau par kw pour une chute de tension de :						
5. 1,5 pour 100 dans le réseau basse tension minima.....	343	286	488	418	418	662
6. 1,5 pour 100 comme ci-dessus.....	376	301	586	456	465	745
7. 2 pour 100 minima.....	316	298	448	394	394	612
8. 2 pour 100 comme ci-dessus.....	350	282	565	433	410	702
Distance des stations de transformateurs, en m. Dépenses et chutes de tension comme :						
9. Dans position 5.....	400	500	500	500	700	900
10. — 6.....	550	600	700	750	1.000	1.300
11. — 7.....	400	500	500	600	800	1.100
12. — 8.....	600	650	800	850	1.100	1.450
Longueurs de canalisations par station de transformateurs, en m. Dépenses et chutes de tension comme :						
13. Dans position 5.....	600	1.000	1.000	1.000	1.950	3.200
14. — 6.....	1.200	1.450	1.950	2.250	3.950	6.700
15. — 7.....	600	1.000	1.000	1.450	2.550	3.800
16. — 8.....	1.450	1.700	2.550	2.850	4.800	8.600
Puissance des stations de transformateurs, en kw. Dépenses et chutes de tension comme :						
17. Dans position 5.....	24	40	30	20	19,5	16
18. — 6.....	48	58	39	45	39,5	33,5
19. — 7.....	24	40	20	29	25,5	24
20. — 8.....	58	68	31	57	48	43
Section totale de chaque conducteur extrême dans chaque direction, en mm ² :						
21. Dans position 5.....	80	42	62,5	20,8	98,3	30
22. — 6.....	164	72	110	71	82	90,5
23. — 7.....	60	31	46,5	25,8	31,4	40,75
24. — 8.....	161	70	188	76	81,5	97
Variation de tension maxima produite par la mise en marche d'un moteur de 3,5 kw. Dépenses et chutes de tension comme :						
25. Dans position 5.....	2,3	1,74	3,46	3,46	3,56	4,24
26. — 6.....	1,46	1,19	1,78	1,56	1,75	2,02
27. — 7.....	2,9	2,23	4,42	3,08	3,51	3,68
28. — 8.....	1,54	1,3	1,76	1,57	1,84	2,06

Dans la seconde hypothèse, le rayon d'action est à peu près indépendant du nombre des abonnés à desservir, mais diminue rapidement avec la puissance à fournir à chaque abonné : sa valeur moyenne est comprise entre 180 mètres et 200 mètres, s'il s'agit de desservir des abonnés consommant de 1 à 5 kilowatts, et tombe à 130 mètres environ si la puissance d'installation des abonnés dépasse 5 kilowatts.

Le second cas envisagé ci-avant comporte également deux divisions : ou l'on ne desservira par sous-stations que les nouveaux abonnés, ou bien, pour rendre plus homogènes les conditions d'exploitation, on reliera également les anciens abonnés aux sous-stations. La première supposition ramène le problème au cas précédent ; toutefois, il y a lieu de remarquer que le nombre des abonnés nouveaux situés sur les voies déjà canalisées en câbles à haute tension sera nécessairement assez faible, et puisqu'il a été trouvé que le rayon des sous-stations diminue rapidement en même temps que le nombre des postes à desservir, on voit qu'il y a rarement intérêt à établir des sous-stations sur les voies déjà canalisées. Pour la seconde supposition, où il y a à tenir compte des frais occasionnés par l'enlèvement des transformateurs placés chez les anciens abonnés, la jonction des anciens abonnés aux sous-stations est rarement avantageux.

Le tableau ci-avant permet de se rendre compte de la distance à établir entre les postes de transformation, la puissance des stations, la section des conducteurs extrêmes en fonction des différentes charges par mètre de canalisation et pour les deux genres de connexion : étoile et triangle.

Dans la majorité des cas, il est bon d'augmenter la distance entre les postes de transformation, ce qui augmente également le prix de revient de l'installation, mais diminue notablement les oscillations de tension.

497. Types de sous-stations de transformateurs. — *a) Sous-station de Clermont-Ferrand.* — Cette installation sert de sous-station réceptrice à l'usine génératrice décrite au (§ 365). Chaque groupe de trois transformateurs est logé dans un compartiment séparé dont les parois sont en béton armé. Le courant à haute tension arrive aux transformateurs par la partie supérieure de ces compartiments et chaque conducteur est séparé de son voisin par une cloison en ciment. Actuellement il y a trois groupes de transformateurs installés, chacun d'eux étant formé de trois transformateurs monophasés de 375 kilovolts-ampères. Les trois transformateurs d'un même groupe sont montés en triangle, et le rapport de transformation est de 20.000 à 3.000 volts (*fig. 1269*).

Les disjoncteurs automatiques, placés à l'arrivée des conducteurs de lignes à haute tension, sont du type Westinghouse à rupture dans l'huile.

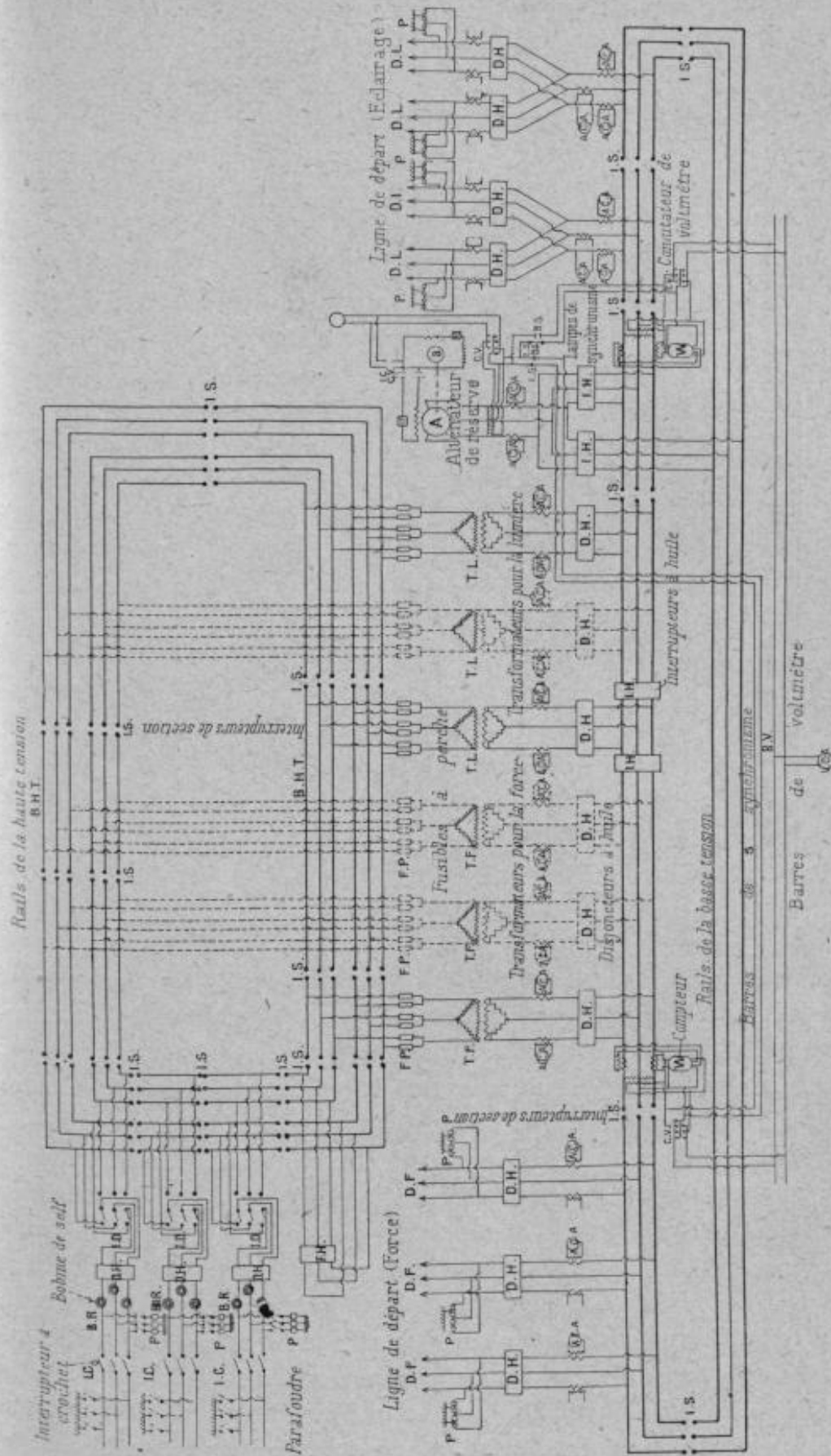


Fig. 1271. — Schéma de la sous-station de Clermont-Ferrand.

Ils sont logés dans des compartiments incombustibles ; il en est de même des transformateurs-réducteurs servant à fournir le courant d'excitation à basse tension aux électros de déclenchement des disjoncteurs.

Le tableau de distribution à 3.000 volts comprend 13 panneaux, savoir : 2 panneaux de feeders pour la distribution de l'éclairage, 1 panneau d'alternateur, 3 panneaux de transformateurs pour l'éclairage, 3 panneaux de transformateurs pour la force motrice et 3 panneaux pour la distribution de force motrice.

Les barres collectrices, les disjoncteurs automatiques et les inter-

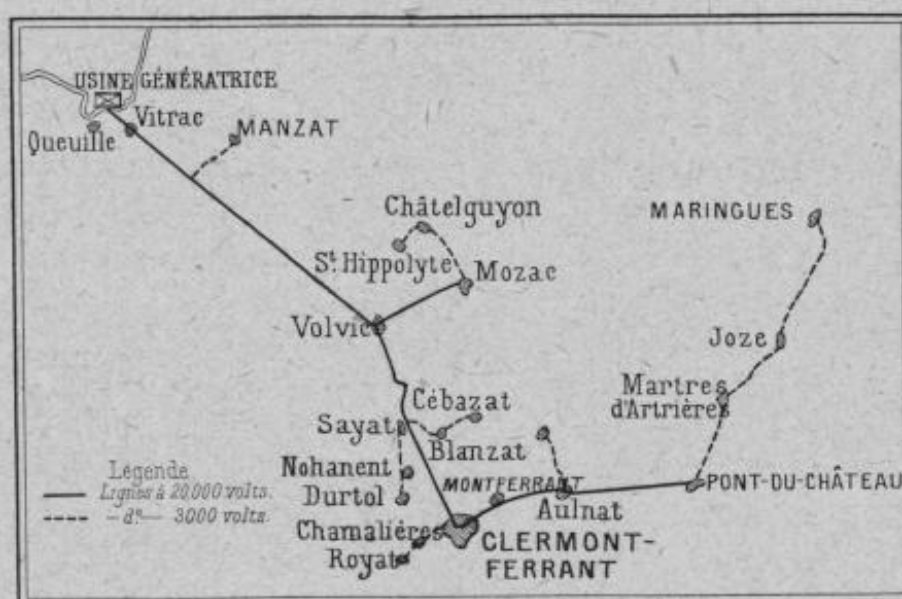


FIG. 1272. — Réseau de l'usine hydroélectrique de Queuille.

rupteurs à huile, avec leurs transformateurs-réducteurs spéciaux, sont installés dans le sous-sol. La commande des disjoncteurs et des interrupteurs s'effectue à l'aide de renvois, à partir du tableau. Les barres collectrices sont disposées en boucle et divisées en sections reliées entre elles au moyen d'interrupteurs de section ou sectionneurs.

La protection des appareils contre les décharges statiques, pouvant provenir de la ligne à haute tension, est assurée par des parafoudres Wurts et par des bobines de self. Pour parer aux accidents que pourraient occasionner des surtensions dangereuses, autres que celles dues aux décharges atmosphériques, le circuit secondaire à 3.000 volts de chaque transformateur-réducteur est muni de limiteurs de tension montés à la partie supérieure des caisses contenant les transformateurs. Ces limiteurs de tension sont reliés, d'une part, au point milieu de chaque enroulement du transformateur et, d'autre part, à la terre.

Pour parer à toute interruption de service, un groupe électrogène à

vapeur de 450 HP, composé d'un moteur Williams-Robinson et d'un alternateur triphasé de 315 kilovolts-ampères, fournit du courant à 3.000 volts, 50 périodes. Les chaudières sont du type Babcock et Wilcox donnant de la vapeur à 12 kilogrammes par centimètre carré.

b) *Poste d'Allauch.* — Dans le réseau des Bouches-du-Rhône, de la Société du Littoral méditerranéen, la distribution se fait à 13.500 volts, et le courant reçu dans les postes de transformation est abaissé à des tensions différentes suivant les régions. Mais les usines destinées à alimenter ce réseau étant à une tension plus élevée, il a fallu créer des postes principaux de transformation à Allauch, à Arles et à Saint-Maximin.

Le poste d'Allauch reçoit le courant de l'usine de la Brillanne (§ 325).

Les transformateurs du type monophasé sont entourés d'huile et à refroidissement par circulation d'eau ; il y en a 12 de 1.000 kilowatts chacun. Ils sont installés par groupes de trois au rez-de-chaussée du bâtiment et connectés au réseau de 45.000 volts par des interrupteurs à huile de la Compagnie Thomson-Houston. D'autres interrupteurs du même modèle, pour 13.500 volts, relient les secondaires aux barres omnibus et permettent les couplages nécessaires. Enfin les lignes des départs aériens ou souterrains pour la distribution sont commandées également par des interrupteurs semblables. Ces interrupteurs sont actionnés par des moteurs électriques commandés depuis le tableau. La rupture de chaque phase est double, se produisant brusquement par la détente de ressorts bandés par le moteur électrique. Leur fonctionnement est indiqué au tableau par des avertisseurs lumineux (une lampe s'allume à la fermeture, l'autre à l'ouverture).

Les deux lignes à haute tension partant de l'usine de la Brillanne entrent dans le bâtiment par les tourelles carrées des extrémités. L'entrée se fait, pour le conducteur de chaque phase, par une fenêtre recouverte d'un abri vitré. Ils sont reliés chacun à un parafoudre à intervalles multiples porté par des isolateurs fixés au mur de la tourelle. Ces parafoudres ont une hauteur totale d'environ 5 mètres et ils sont isolés les uns des autres par des cloisons de 1^m,50 × 8 mètres environ. Les conducteurs à haute tension pénètrent ensuite dans la salle des interrupteurs, au premier étage, où ils sont reliés à des barres omnibus portées horizontalement et séparées par des cloisons. La distance entre les trois conducteurs de chaque ligne est de 1^m,50. Des dérivations prises sur ces barres omnibus descendent le long du mur pour revenir, en traversant deux fois le plancher, aux interrupteurs à haute tension d'où elles redescendent aux transformateurs placés immédiatement au-dessous.

Les dispositions des conducteurs secondaires, à 13.500 volts, sont analogues.

A l'instar des grandes centrales modernes, on trouve au poste d'Alaucha les dispositions caractéristiques suivantes : grand espace donné à tous les organes, cloisonnement des conducteurs et les précautions prises pour le sectionnement des barres omnibus.

Pour les transports de force de Bishop Creek et de San Bernadino (Californie) qui forment les deux extrémités de la ligne de Southern Sierras Power et C^{ie} et dont la tension est de 150.000 volts, on a disposé de véritables sous-stations sur des poteaux aménagés à cet effet. Le transformateur est logé dans l'intérieur du socle des poteaux en acier de support de la ligne, dans une chambre hermétiquement close et accessible par une porte. Le courant à haute tension arrive à ce transformateur par le haut où le bas, en passant par un coupe-circuit, tandis que le secondaire à basse tension aboutit au sommet du poteau à un bloc répartiteur où viennent se rattacher les fils des circuits extérieurs et qui est recouvert d'un chapeau amovible.

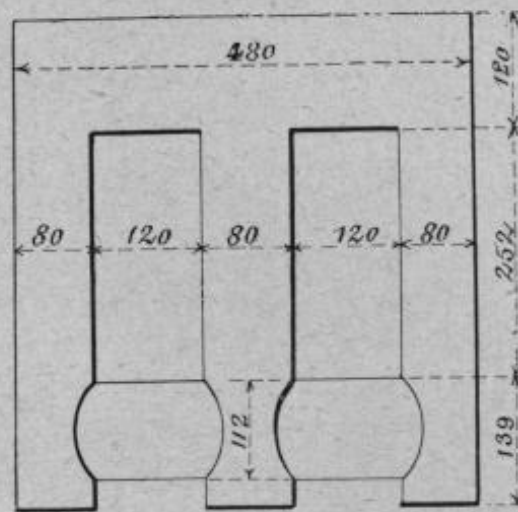
Le transformateur est d'un type spécial, long et de forme cylindrique et sa chambre est construite de façon à pouvoir être remplie d'huile isolante.

Types de transformateurs à haute tension employés dans de grands transports de force en Amérique.

SYSTÈMES	PUISSANCE en kilowatts	TENSION de la ligne	MODE de connexion du système	PHASES
Stanislaus Power Company.....	3.750	138.500	Étoile.	Monophasé.
	2.233	104.000	Étoile.	Monophasé.
Great Western Power Company.....	10.000	110.000	Triangle.	Triphasé.
	5.000	90.000	Triangle.	Monophasé.
Grand Rapids Michigan Power Company.	3.750	110.000	Triangle.	Triphasé.
Hydro-Electric Commission.....	1.250	110.000	Triangle.	Monophasé.
Great Falls Power Company.....	1.200	102.000	Triangle.	Monophasé.
Central Colorado Power Company.....	3.330	100.000	Triangle.	Monophasé.
Southern Power Company.....	3.000	100.000	Triangle.	Monophasé.
Mexican Light and Power Company.....	6.000	85.000	Étoile.	Monophasé.
Telluride Power Company.....	1.500	80.000	Étoile.	Monophasé.
Edison Electric Company (Los Angeles).	1.660	75.000	Étoile.	Monophasé.
Pennsylvania Power Company.....	10.000	70.000	Étoile.	Triphasé.
Missouri River Power Company.....	1.500	70.000	Étoile.	Monophasé.
Southern Wisconsin Power Company...	1.000	70.000	Triangle.	Monophasé.
Connecticut River Power Company.....	5.000	66.000	Étoile.	Triphasé.
High Falls Development.....	1.100	66.000	Étoile.	Monophasé.
Canadian Niagara Falls Power Company.	1.250	62.500	Étoile.	Monophasé.

498. Calcul d'un transformateur triphasé. — APPLICATION NUMÉRIQUE. — Données : 120 volts au primaire et 28^{amp},86 ; 5.200 volts au secondaire et 0^{amp},66 ; fréquence du courant, 50 périodes.

Nous adoptons pour le fer le profil de la (fig. 1273).



Epaisseur = 80

FIG. 1273.

Spires du secondaire. — Le nombre de spires N du secondaire est donné par la formule :

$$E_{eff} = \frac{4,44 B_{max} \times S \times \infty \times N}{10^8} = \frac{4,44 \times 6000 \times 64 \times 0,87 \times 50 \times N}{10^8}$$

$$= \frac{7420 \times N}{10^4} = 162 \text{ spires pour deux branches,}$$

soit 81 par branche.

Courant à vide. — La perte par hystérésis est fournie par la formule :

$$P_h = \frac{0,0024 \times B^{1,6} \times v_f \times 0,87 \times \infty}{10^7} = \frac{0,0024 \times 6000^{1,6} \times 0,87 \times 50}{10^7} \quad (1)$$

Pour avoir v_f , volume du fer, que nous prenons égal aux $2/3$ du volume total, nous cherchons la valeur de ce dernier, qui se compose :

1° De trois branches dont le volume de chacune $= 8 \times 39,1 \times 8 = 2.502$ centimètres cubes ;

2° De deux noyaux inférieurs dont chacun $= 12 \times 8 \times 8 = 768$ centimètres cubes ;

3° De un noyau supérieur $= 48 \times 12 \times 8 = 4.608$ centimètres cubes.

Le volume total est, par suite, égal à :

$$3 \times 2.502 + 2 \times 768 + 4.608 = 13.650 \text{ centimètres cubes,}$$

et :

$$v_f = \frac{13650 \times 2}{3} = 9.100 \text{ centimètres cubes.}$$

En remplaçant v_f par sa valeur dans la formule (1) :

$$P_h = \frac{0,0024 \times 1.10900 \times 9100 \times 0,87 \times 50}{10^7} = 105,35 \text{ watts,}$$

soit une intensité égale à :

$$\frac{105,35}{120} = 0,877 \text{ ampère.}$$

Nous appliquons la relation ci-après pour avoir le courant magnétisant :

$$I_m = \frac{3}{1,78 \times N} \times \frac{l}{\mu} = \frac{6000}{1,78 \times 162} \times \frac{l}{2570}.$$

Or l , longueur du circuit magnétique = $2 (25,2 + 6 + 5,6 + 20) = 113,6$.

Donc :

$$I_m = \frac{6000 \times 113,6}{1,78 \times 162 \times 2570} = 0,915 \text{ ampère.}$$

Et le courant à vide égale :

$$\sqrt{0,877^2 + 0,915^2} = 1,293 \text{ ampère.}$$

Ampères-tours. — Le nombre d'ampères-tours nécessaire à la marche à vide égale :

$$1,293 \times 162 = 210.$$

Or ce nombre est la résultante du nombre d'ampères-tours primaires et du nombre d'ampères-tours secondaires. Le diagramme de Kapp offre le

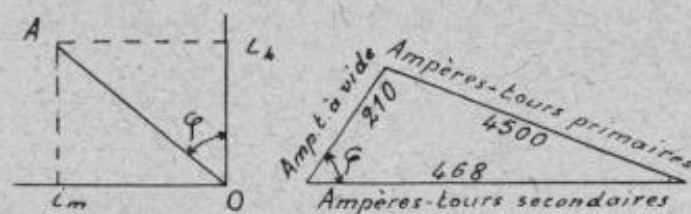


FIG. 1274.

moyen d'obtenir le nombre d'ampères-tours primaires, étant donné que le nombre d'ampères-tours secondaires égale :

$$162 \times 28,86 = 4.680.$$

Dans la (fig. 1274), i_h représente la perte par hystérésis et i_m le courant magnétisant ; il résulte que OA est le courant à vide. L'angle φ sera égal

(1) Pour fréquence 50, on peut prendre $3^\circ = 6.000$ à 8.000 , transformateur dans l'air et 9.000 à 13.000 pour transformateur à huile et circulation d'eau. Pour fréquence 25, respectivement 9.000 à 11.000 et 13.000 à 15.000 gauss.

à 45°. Par suite, le nombre d'ampères-tours secondaires = 4.500, soit un nombre de tours égal à $\frac{4500}{0,66} = 6.818$ ou 3.409 par branche ou couches de 227 spires pour le fil fin.

Avec une densité de 1^{amp},3 par millimètre carré, on trouve, pour le diamètre du fil fin de cuivre, 0^{mm},8.

Une densité pareille pour le gros fil fournit une section de 22 millimètres carrés, que l'on obtient en disposant en parallèle trois fils de 3 millimètres de diamètre et, pour avoir les 81 spires par branche, nous mettons trois couches de 27 spires en série.

La (fig. 1275) donne les dimensions des bobines pour le gros fil et le fil fin.

Perles par effet Joule. — La résistance ohmique croissant avec l'élévation de température, augmentation qui est de 0,388 par degré centigrade, pour une élévation de température de 45° par exemple, nous aurons comme résistance spécifique :

$$1,584 \left(1 + \frac{0,388 \times 45}{100} \right) = 1,584 (1 + 0,17) = 1,857 \text{ microhm-centimètre.}$$

D'après les dimensions des bobines, nous avons 6.818 spires d'une longueur moyenne de 655 millimètres en comptant sur un fil de 1^{mm},2 de diamètre, guipage compris. La longueur totale est, par suite :

$$6.818 \times 0,655 = 4.475 \text{ mètres.}$$

A l'effet d'obtenir une perte dans le primaire pareille à celle du secondaire, nous prenons un fil de cuivre de 0^{mm},9 de diamètre avec 0^{mm},3 de guipage.

La résistance ρ de ce fil a pour valeur :

$$\rho = \frac{1,857 \times 4.475}{0,63 \times 10^2} = 132 \text{ ohms.}$$

Et la perte :

$$\rho i^2 = 132 \times 0,66^2 = 57 \text{ watts.}$$

En employant pour le secondaire du fil de 0^{mm},33 de diamètre, guip-

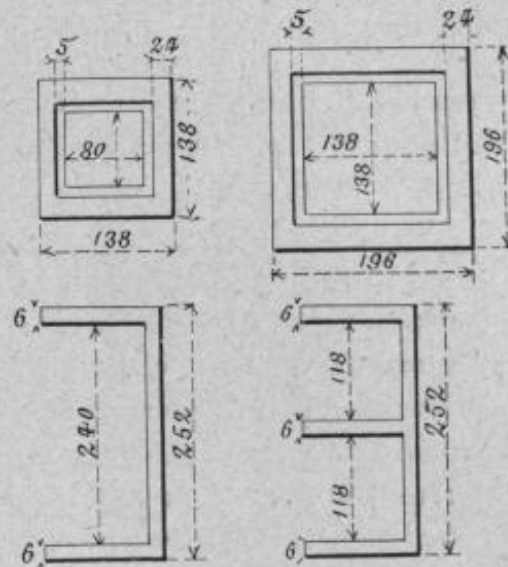


FIG. 1275.

page compris, avec une longueur moyenne de spire de 398 millimètres, on trouve pour la longueur totale :

$$398 \times 162 = 64^m,6.$$

La résistance a pour valeur :

$$\rho' = \frac{1,857 \times 64,6}{21,2 \times 10^2} = 0,057 \text{ ohm},$$

en remarquant qu'il y a trois fils de 0^{mm}2,3 en parallèle.

La perte $\rho' i^2$ égale donc :

$$0,057 \times 28,86^2 = 47,5 \text{ watts}.$$

D'après Kapp, les pertes dans les deux circuits doivent être de même valeur ; on serait donc conduit à augmenter celle dans le secondaire, ce qui aurait pour effet de diminuer le prix de revient de l'appareil, en même temps que le rendement. Si, au contraire, on diminuait la perte dans le primaire, on augmenterait le prix de revient ainsi que le rendement.

Arrêtons-nous à la première hypothèse ; alors nous prendrons du fil avec un diamètre de cuivre de 0^{mm}27, soit 0^{mm}30 avec le guipage. Dans ces conditions, la longueur moyenne d'une spire est de :

$$4(90 + 9) = 396 \text{ millimètres},$$

et la longueur totale :

$$396 \times 162 = 64^m,2.$$

Par suite :

$$\rho i^2 = \frac{1,857 \times 64,2 \times 28,86^2}{17,2 \times 10^2} = 57,8 \text{ watts}.$$

Rendement. — La perte totale dans l'appareil a pour valeur, dans le cas de pertes égales dans les enroulements :

$$105,35 + 57 + 57,8 = 220,15.$$

Et le rendement égale :

$$\frac{120 \times 28,86 - 220,15}{120 \times 28,86} = 93,7.$$

Si on avait diminué la perte dans le primaire jusqu'à la rendre égale à 47,5 watts, perte dans le secondaire, la perte totale aurait été de :

$$105,35 + 47,5 + 47,5 = 200,35 \text{ watts}.$$

Et le rendement :

$$\frac{3463 - 200,35}{3463} = 94,1.$$

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE XXV

LIGNES DE TRANSPORT DE FORCE A HAUTE TENSION CALCUL DES RÉSEAUX

I. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE PAR COURANT TRIPHASÉ

499. **Considérations générales sur le transport de l'énergie par courant triphasé.** — Le transport de l'énergie électrique par courant monophasé n'a été retenu que pour les installations de traction électrique et la transmission par courant diphasé, qui avait eu un moment ses partisans, n'offre plus qu'un médiocre intérêt. Le courant triphasé, au contraire, s'est imposé victorieusement et est devenu le système à peu près universel en tant que courant alternatif. Si, dans un problème de transport d'électricité, on ne devait tenir compte que du rendement de la transmission proprement dite, la question se résoudrait aisément en adoptant la plus haute tension physiquement possible, car on utilise une ligne de conductibilité donnée dans les conditions les plus économiques en faisant appel à un voltage aussi élevé que possible. Mais, dans la pratique, l'on est limité, en ce qui concerne le voltage, par l'air lui-même, qui perd sa qualité de diélectrique quand on envisage de très hautes tensions, et par la résistance de la ligne qui, pour de très longues distances et de grandes puissances à transmettre, entraîne à des pertes d'énergie considérables. Si, d'autre part, on cherche à diminuer cette résistance, on augmente le prix des conducteurs, des supports, des isolateurs dans une proportion telle que l'exploitation économique de la transmission devient impossible.

En ces dernières années, les progrès intervenus dans l'électrotechnique ont été tels que les limites de la transmission se sont élargies d'une façon singulière. Ainsi M. Noishon, dans une conférence donnée à l'*American Institute of Electrical Engineer*, a pu dire, qu'en prenant pour base le

prix de la production de l'énergie à 55 francs le kilowatt-an, le transport est économiquement réalisable jusqu'à 820 kilomètres avec une puissance de 200.000 kilowatts, et jusqu'à 1.000 kilomètres avec 300.000 kilowatts, le système employé étant le courant triphasé, de 30 à 25 périodes.

En se mettant sur le même terrain, on pourrait donc avancer qu'avec un transport de 1 million de kilowatts l'entreprise serait économique jusqu'à 2.000 kilomètres !

L'avantage principal du transport de l'énergie à l'aide du courant triphasé consiste dans la facilité et l'économie de sa transmission. Le courant fourni par les machines génératrices est commodément porté à de très hautes tensions dans la ligne par des transformateurs statiques qui coûtent peu et qui ne nécessitent pour ainsi dire aucune surveillance. La transformation inverse, dans les stations secondaires, a lieu avec la même facilité. Les alternateurs à haute tension débitent sur des transformateurs fixes élévateurs de tension. Il y a lieu de synchroniser sur la haute tension et d'établir des connexions permettant de coupler au besoin un transformateur avec un alternateur quelconque. Les secondaires des transformateurs sont couplés en parallèle sur un jeu de barres omnibus à haute tension que l'on monte en boucle afin de pouvoir isoler facilement chaque machine du reste de l'installation sans obliger d'arrêter le fonctionnement de l'Usine centrale. Mais la self-induction inhérente au courant alternatif affecte le rendement d'une façon très sensible et donne lieu à des perturbations dangereuses pour la conservation de la ligne, surtout aux moments de l'ouverture et de la fermeture du circuit. Le facteur de puissance, qui dépend de l'impédance et de la capacité, est généralement de 75 à 80 0/0, en d'autres termes l'effet obtenu au moyen d'une f. é. m. de puissance minima donnée est de 25 à 20 0/0 inférieur à celui qu'il serait si l'impédance était égale à la résistance ohmique.

La fréquence naturelle d'oscillation d'une ligne ne dépendant que de la longueur de cette ligne, pour la calculer, il faut considérer l'inductance et la capacité par rapport au sol. On détermine assez facilement, comme on le verra plus loin, la fréquence naturelle d'une ligne de transmission d'après le fait que la longueur de la ligne est le quart de la longueur d'onde. Mais, dans l'établissement d'un transport de force, il est important que ni la fréquence fondamentale de la distribution ni celle d'un harmonique important ne coïncident avec la fréquence naturelle de la ligne, à cause des effets de résonance.

L'étendue des variations de la tension à l'arrivée, non seulement en dépendance de la charge de la ligne, mais encore et surtout du fait des perturbations que peuvent provoquer les phénomènes atmosphériques, est une des questions les plus suggestives des transports à grande distance. A la distance de 200 kilomètres, le réglage à l'arrivée donne déjà

lieu à un renchérissement important du coût du transport, en raison des dispositions spéciales nécessaires pour la production de la lumière. En outre, le fait d'envisager des fréquences de 25 périodes entraîne pour certains usages l'obligation de convertir le courant en une fréquence plus élevée, ce qui est une complication et une dépense d'énergie.

Dans la plupart des installations on a été amené, pour leur meilleure marche, à coupler les réseaux secondaires en parallèle par le jeu de convertisseurs (moteurs à courant continu et génératrices à courant alternatif) introduisant, dans le système, des génératrices synchrones permettant de combattre, par leur surexcitation, les effets nuisibles du décalage et de solutionner toutes les difficultés du réglage en soulageant le réseau aux points les plus chargés.

Ainsi, ce système permet d'atteindre les plus hautes tensions réalisables sur la ligne, ensuite sa pénétration par câbles souterrains au centre des villes et une grande simplification d'établissement des lignes aériennes sont particulièrement appréciables près des localités de dense population, sans parler des plus grandes facilités de protection contre les phénomènes de décharges atmosphériques.

La combinaison est particulièrement intéressante lorsque la distribution comporte la livraison d'énergie pour tramways à courant continu, qui exige de toute manière une transformation. On obtient ainsi tous les avantages que donne l'accouplement d'une usine à vapeur avec réseau triphasé hydroélectrique, tout en maintenant l'économie que donne la production de l'énergie hydroélectrique, surtout lorsqu'on dispose d'un réservoir hydraulique.

Ces toutes dernières années, les efforts des ingénieurs, des constructeurs de matériel électrique se sont particulièrement portés sur l'amélioration du facteur de puissance. Il y a là, en effet, un intérêt primordial en raison des avantages qu'on peut en attendre : meilleure utilisation des lignes, des transformateurs et des génératrices ; diminution des chutes de tension dans ces derniers appareils et, par conséquent, plus grandes facilités de réglage des variations de tension qui aboutissent à une augmentation de la puissance distribuée pour un même courant total produit à l'usine génératrice, avantage qui prend une importance considérable quand celle-ci est presque à sa limite de charge, puisqu'elle permet d'éviter l'installation de nouvelles génératrices dont l'utilisation est faible.

Au point de vue du matériel des stations centrales et principalement du matériel de secours à vapeur, des progrès incessants se sont manifestés pour l'amélioration des rendements et de la puissance unitaire des machines.

A Philadelphie, à la nouvelle station thermique de la Philadelphia Electric Co, on a installé des unités de 35.000 kilowatts et à Détroit,

existent les plus grandes chaudières, qui vaporisent 60.000 kilogrammes d'eau à l'heure.

Les turbines à vapeur qui sont en évolution continue ne se font plus qu'à axe horizontal, compound, jumelées ou en tandem, la turbine à haute pression étant à flux unique et celle à basse pression à flux double divergent. Les unités atteignent et dépassent 50.000 chevaux à 150 tours par minute.

Les chaudières réalisent industriellement des rendements thermiques de 80 à 83 0/0. Avec les groupes turbo-électriques à vapeur on obtient des consommations ne dépassant pas 5 kilogrammes de vapeur par kilowatt-heure.

Le rendement thermique des stations centrales a été porté à 18 0/0. L'application des turbo-moteurs permet la production d'un cheval-heure avec 3^{kg},5 de vapeur et moins de 450 grammes de charbon.

500. Constantes des lignes aériennes à courant alternatif. —

Parmi les constantes d'une ligne d'énergie électrique, les unes se rapportent directement aux conducteurs proprement dits et sont indépendantes du courant et de la longueur de la ligne ; les autres, qui dépendent de la fréquence du courant et de la longueur de la ligne, servent à évaluer les effets de capacité et d'inductance.

Effets dus à l'inductance. — Un conducteur parcouru par un courant alternatif présente à ce dernier une résistance apparente, en raison de phénomènes spéciaux, et une résistance ohmique réelle, résistance plus grande que celle qu'il présente à la circulation d'un courant continu, et d'autant plus élevée que la fréquence du courant alternatif est plus grande.

Disons cependant que les effets dus à cette augmentation apparente de résistance sont pour ainsi dire négligeables dans une ligne de transmission d'énergie. Mais les effets dus aux forces électromotrices de self-induction dans un conducteur et d'induction mutuelle dans les conducteurs voisins sont d'ordre plus élevés pour la valeur de la tension qui doit être produite au départ, laquelle doit compenser ces effets.

L'induction mutuelle est d'autant moindre que les conducteurs sont plus éloignés et la self induction joue le rôle contraire.

Les variations de flux magnétique provenant des courants alternatifs induisent dans le circuit constitué par les deux conducteurs de ligne (courant alternatif simple) une force électromotrice de self-induction décalée de 1/4 de période par rapport à l'intensité du courant, laquelle a une valeur d'autant plus grande que la valeur efficace de l'intensité est plus élevée, que la ligne a une plus grande longueur et que les conducteurs sont plus éloignés les uns des autres.

A partir d'un certain écartement des conducteurs, l'inductance reste à peu près constante. Dans les lignes à haute tension cet écartement varie entre 0^m,50 minimum et 1^m,50 maximum.

Dans les lignes triphasées, on place chaque conducteur, au point de vue de l'induction, dans des conditions identiques par rapport aux autres ; à cet effet on dispose tous les conducteurs à égale distance sur le tracé d'une circonférence afin qu'ils soient rangés aux sommets d'un polygone régulier. Lorsque la ligne comporte un certain nombre de fils, par exemple trois fils pour un même conducteur ou pour une phase il vaut mieux adopter une disposition donnant la moindre différence entre les fils constituant une même branche, après celle du polygone régulier, soit un dispositif où ces fils sont voisins. D'autre part, on sait que, pour éviter les réactions d'induction mutuelle dans une ligne triphasée, l'on peut transposer la position des conducteurs sur chaque appui.

Dans une ligne double à courants diphasés, pour rendre symétriques les effets de l'induction mutuelle sur chacune des séries de conducteurs on dispose les conducteurs en forme de spirale .

L'inductance que présente une longue ligne de transmission d'énergie est plus ou moins diminuée par la capacité de la ligne.

Appelons l' la distance entre les deux conducteurs d'une ligne à courant alternatif simple ;

l la longueur du conducteur ;

I l'intensité du courant ;

r le rayon du conducteur.

La valeur du flux magnétique est :

$$\Phi = 2I l \left(\frac{1}{2} + \log. e \frac{l'}{r} \right).$$

En prenant $I = 1$, on a pour la valeur du coefficient de self-induction :

$$L_s = 2l \left(\frac{1}{2} + 2 \log. e \frac{l'}{r} \right) \text{ en unités C. G. S.}$$

Si on exprime l , l' et r en centimètres et en multipliant L_s par 10^{-9} , on obtient la valeur de cette formule en henrys.

Soient une ligne triphasée à un seul circuit, r rayon d'un fil de ligne, L_m le coefficient d'induction mutuelle, et 1, 2 et 3 les indices se rapportant aux conducteurs.

Les effets combinés de la self-induction et de l'induction mutuelle peuvent se réduire à un seul effet de self-induction, pourvu que l'on prenne un coefficient de self-induction apparente donné par l'expression :

$$L_{s1}^2 = \frac{1}{2} L_s - (L_{m1.2} + L_{m1.3})^2 + \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} (L_{m1.2} - L_{m1.3}) \right\}^2.$$

La force électromotrice d'induction due à l'inductance est généralement décalée en retard par rapport au courant qui passe dans le conducteur considéré d'un angle $2 + 6$, la valeur de σ étant donnée par l'expression :

$$\operatorname{tang} \sigma = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} (L_{m1,2} - L_{m1,3})}{L_s - \frac{1}{2} (L_{m1,2} + L_{m1,3})}$$

Si les 3 conducteurs du système occupent les sommets d'un triangle équilatéral, $L_{n1,2}$ et $L_{m1,3}$ ont des valeurs égales, l'angle σ est nul et on détermine le décalage en retard de la force électromotrice due à l'inductance.

Soit enfin une ligne triphasée comportant plusieurs fils pour chaque conducteur.

Le coefficient de self-induction apparente de l'un quelconque des conducteurs ainsi que le retard correspondant σ , se calcule par la formule :

$$L_{s1}^2 = \left\{ A - \frac{1}{2} (B + C) \right\}^2 + \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} (B - C) \right\}^2$$

$$\operatorname{tang} \sigma_1 = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} (B - C)}{A - \frac{1}{2} (B + C)}$$

Dans ces formules les symboles A, B et C ont les significations suivantes : la lettre A représente le coefficient de self-induction d'un des conducteurs, (x') d'un des trois circuits triphasés (cas d'une ligne à 9 conducteurs), plus la somme des coefficients d'induction mutuelle qu'exercent sur lui les autres conducteurs x'' et x''' des deux autres circuits ; la lettre B est la somme des coefficients d'inductions mutuelles qu'exercent sur le conducteur x' les conducteurs y', y'' et y''' , et enfin la lettre C désigne la somme des coefficients d'induction mutuelle provenant des conducteurs z', z'' et z''' sur le même conducteur x' .

En modifiant les indices on trouve les valeurs A, B et C pour les autres conducteurs ; le calcul doit être fait pour chacun des conducteurs et il faut le reprendre pour tous les autres ou tout au moins pour ceux qui, par rapport aux $n-1$ autres, n'occupent pas la même position.

Lorsque les conducteurs occupent les sommets d'un polygone régulier, le calcul est unique, parce que, dans ces conditions, l'un quelconque des conducteurs occupe une position identique par rapport aux autres, mais il faut que les courants se succèdent sur le pourtour du polygone dans l'ordre $x', y', z', x'', y'', z'', x''', y''', z'''$, etc., dans chaque circuit triphasé.

Dans ce cas $B = C$. L'inductance reste constante pour tous les conducteurs et a sa valeur minima possible du fait que $B = C$, ce qui annule le terme de l'expression qui donne la valeur de L_{s1}^2 et que l'on a aussi : $\sin \alpha_1 = 0$. Le système de n conducteurs est ainsi équilibré si les charges sont également réparties sur les 3 phases et les tensions à l'arrivée se maintiennent avec la même différence qu'au départ.

Relativement à la position à donner aux conducteurs d'une ligne triphasée, si ceux-ci sont placés aux sommets d'un polygone régulier, il arrive qu'indépendamment de l'inductance minima qui en est la conséquence, on obtient une inductance égale pour tous les conducteurs, et par suite aussi pour tous ceux d'une même phase; ce dernier résultat s'obtient toujours quand les conducteurs sont placés de manière que par rapport aux conducteurs d'une phase, ceux des autres phases se trouvent dans des positions identiques.

La (fig. 1276) montre les divers cas de montage des conducteurs pour une ligne triphasée double soit à 6 conducteurs. Avec la disposition (1) l'in-

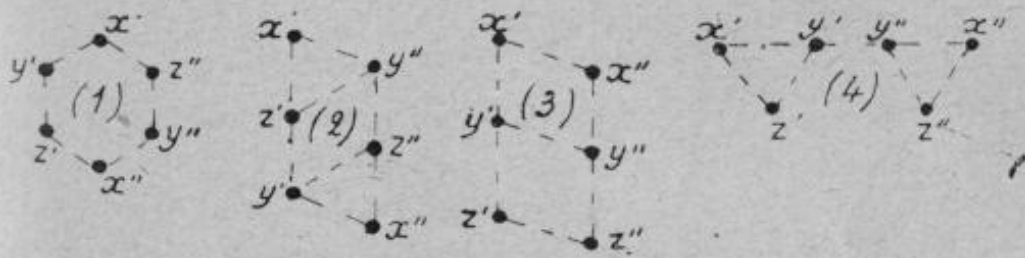


FIG. 1276.

ductance est la même pour tous les conducteurs et égale à : $L_{s1} = 10,23$ en unités absolues par centimètre de longueur. Avec la disposition (2) on a :

$$L_{s1}x' = 9,9; L_{s1}y' = 10,18 \text{ et } L_{s1}z' = 11,08.$$

Les valeurs de l'inductance dans les conducteurs x'', y'', z'' du second système triphasé sont respectivement égales à celles du système x', y' et z' du premier. On empêche ainsi la production des courants parasites d'une même phase $x'x'', y'y'', z'z''$. La disposition (3) donne une valeur plus élevée de l'inductance moyenne.

On a :

$$L_{s1}x' = 12,88; L_{s1}y' = 11,08; L_{s1}z' = 11,65.$$

Cette disposition, qui n'est pas recommandable au point de vue de l'inductance, ne peut être envisagée que si on a intérêt à placer les trois conducteurs d'un même côté du poteau. Mais alors la disposition (4) présente pour la même application une inductance moins élevée. Cependant le dis-

positif représenté par (3) a son intérêt quand le poteau doit recevoir 9, 12 ou 15 conducteurs parce qu'alors les conducteurs se trouvent plus rapprochés les uns des autres.

Avec la disposition (4) les inductances ont pour valeur :

$$L_{s,x'} = 9,99; L_{s,y'} = 11,77; L_{s,z'} = 10,68.$$

Enfin les inductances sont égales pour les conducteurs d'une même phase dans les dispositifs (4), (1) et (2).

Les formules ci-après sont celles que M. A. Blondel a rappelées en tête de sa magistrale étude parue dans la *Revue électrique* ⁽¹⁾.

1° *Lignes triphasées.* — 1° Résistance par kilomètre :

$$r = \frac{\sigma}{s} \text{ ohms};$$

σ , résistance spécifique du bronze silicieux par kilomètre et millimètre carré, et s , section en millimètres carrés.

2° Self-induction ou inductance par kilomètre :

$$l = \frac{1}{10^4} \left(4,605 \log. \text{ vulg. } \left(\frac{d}{a} \right) + 0,50 \right) \text{ henrys};$$

d , distance entre les axes des deux conducteurs de polarité opposée, et a , rayon extérieur des dits conducteurs.

Si l'on emploie des câbles à âme creuse en chanvre, et qu'on appelle a le rayon intérieur du conducteur ainsi formé, on a lors :

$$l = \frac{2}{10^4} \left[\log. \text{ nép. } \left(\frac{d}{a} \right) + 0,25 \left(1 + \frac{a'^2}{a^2} \right) \right] \text{ henrys};$$

3° Capacité totale par kilomètre (capacité apparente ou étoilée) :

$$c = \frac{0,0241}{10^6} \left[\frac{1}{\log. \text{ vulg. } \left(\frac{d}{a} \right)} + \frac{1}{\log. \text{ vulg. } \left(\frac{2h}{a} \right)} \right] \text{ farads } ^{(2)};$$

h , hauteur moyenne du conducteur au-dessus du sol.

⁽¹⁾ Numéro du 28 mars 1908.

⁽²⁾ On peut prendre pour les valeurs moyennes que peuvent atteindre l'inductance et la capacité dans les lignes à haute tension : 1,087 millihenry et 0,102 microfarad par kilomètre de fil ; ces valeurs ne comportent pas d'erreur supérieure à 15 0/0 pour des tensions de 30.000 à 60.000 volts et des conducteurs de 6 à 25 millimètres de diamètre. En outre, comme dans ces transmissions à haute tension, il est nécessaire d'établir deux lignes en parallèle, la perte de tension ohmique est la même qu'avec une seule ligne, la perte de tension par inductance est moitié moindre et le courant de capacité deux fois plus grand.

4° Perditance g par kilomètre (coefficient de perte qui représente la conductance correspondante aux fuites exprimées en mhos) (la perditance dépend à la fois de la perte par les isolateurs et par l'ionisation de l'air par les câbles) :

$$g = \frac{34 \text{ à } 58}{(90000)^2};$$

2° Lignes monophasées. — 1° Inductance par kilomètre :

$$l = \frac{4}{10^4} \left[\log. \text{ nép. } \left(\frac{d}{a} \right) + 0,25 \right] \text{ henrys};$$

pour une ligne à deux fils parallèles.

2° Capacité totale par kilomètre :

$$c = \frac{0,0121}{10^6} \left[\frac{1}{\log. \text{ nép. } \left(\frac{d}{a} \right)} + \frac{1}{\log. \text{ nép. } \left(\frac{2h}{a} \right)} \right] \text{ farads.}$$

Pour un câble à deux conducteurs cordés, l'inductance a même valeur que ci-dessus, et la capacité par kilomètre a pour expression (d'après Lichtenstein) :

$$c_2 = \frac{Q}{E} = \frac{0,111 \text{ K}}{10^6 \times 4 \log. \text{ nép. } \left[\frac{2b}{a} \frac{R^2 - b^2}{R^2 + b^2} \right]} \text{ farads};$$

a , rayon des conducteurs en centimètres ; R , rayon intérieur de l'enveloppe en centimètres ; b , distance entre les axes des conducteurs et l'axe du câble en centimètres ; Q , charge par kilomètre en coulombs ; $E = 2V$, différence de potentiel entre conducteurs, et K , constante du diélectrique.

Le tableau ci-après donne les valeurs de l en henrys par kilomètre de conducteur.

	$d = 25 \text{ cm}$	$d = 50 \text{ cm}$	$d = 75 \text{ cm}$	$d = 100 \text{ cm}$	$d = 150 \text{ cm}$	$d = 200 \text{ cm}$
$a = 0^{\text{mm}},5$	0,001292	0,001431	0,001512	0,001570	0,001645	0,001705
1	0,001155	0,001292	0,001372	0,001431	0,001514	0,001570
$1^{\text{mm}},5$	0,001070	0,001209	0,001292	0,001348	0,001430	0,001487
2	0,001017	0,001155	0,001240	0,001292	0,001372	0,001430
$2^{\text{mm}},5$	0,000970	0,001110	0,001190	0,001247	0,001329	0,001386
3	0,000904	0,001070	0,001150	0,001219	0,001292	0,001346
$3^{\text{mm}},5$	0,000905	0,001044	0,001129	0,001183	0,001263	0,001320
4	0,000877	0,001017	0,001087	0,001155	0,001226	0,001292
$4^{\text{mm}},5$	0,000850	0,000990	0,001070	0,001127	0,001212	0,001270
5	0,000832	0,000971	0,001052	0,001110	0,001191	0,001249

3^o *Lignes diphasées.* — Dans le cas d'un câble armé à quatre conducteurs, 1, 2, 3, 4, appartenant à deux circuits 1-2 et 3-4, parcourus respectivement par des courants diphasés, on a pour les valeurs des constantes applicables à chaque ligne double :

$$l = \frac{1}{10^4} \left(4,605 \log. \text{ vulg. } \left(\frac{2b}{a} \right) + 0,50 \right) \text{ henrys par kilomètre,}$$

et :

$$c = \frac{0,0111 \text{ K}}{10^6} \left[\frac{1}{\log. \text{ nép. } \frac{2b}{a_1} \frac{R^2 - b^2}{R^2 + b^2}} + \frac{1}{\log. \text{ nép. } \frac{b\sqrt{2}}{a_1}} \right] \text{ farads par kilomètre.}$$

Dans une ligne monophasée, la tension entre le neutre et les fils de ligne est la moitié de la tension entre fils, tandis qu'elle est de 58 0/0 de la tension entre fils dans une ligne triphasée. Il s'ensuit que le courant de capacité par fil pour une tension donnée est de 16 0/0 plus intense dans une ligne triphasée que dans une ligne monophasée.

Le produit de l'inductance par la capacité est constant, quels que soient la distance entre les fils et leurs diamètres.

Pour un kilomètre de fil : $lc = \frac{111}{10^{13}}$; l et c exprimés en henrys et en farads.

Appelons m la longueur des fils en kilomètres ; on a :

$$lc' = \frac{11 \text{ m}^2}{10^{13}},$$

l' et c' étant l'inductance et la capacité totales de chaque fil du réseau.

Nous allons passer maintenant aux constantes représentatives du courant distribué le long de la ligne. A toutes les constantes précédentes, il convient, lorsque la ligne sert en même temps à distribuer l'énergie tout le long de son parcours, d'ajouter des constantes fictives représentant cette distribution. En supposant la distribution uniformément répartie, pour tenir compte du courant watté distribué, on prend pour g la valeur ci-après, toujours d'après les indications de M. A. Blondel :

$$g' = \frac{\pi}{3U_p^2};$$

π , la puissance totale distribuée par kilomètre ; U_p , la tension moyenne étoilée sur la ligne.

Quant au courant magnétisant ou déwatté, il est connu généralement en fonction du courant watté ; on peut donc le considérer comme produit par

une admittance uniformément répartie, en phase avec la capacitance (ωc), mais de signe opposé et qui vient en déduction de celle-ci. Par exemple, si on admet que du courant soit débité le long de la ligne avec le facteur de puissance $\cos \varphi = 0,85$, on posera :

$$K = g' \operatorname{tg} (\arccos 0,85) = g' \times 0,619.$$

Le calcul se fait alors à la manière ordinaire, à la seule condition de remplacer dans toutes les formules suivantes la perdite g par $(g + g')$ et la capacitance ωc par $(\omega c - K)$.

Appelons n la fréquence et ω la vitesse de pulsation, on a :

Réactance linéique par kilomètre :

$$\omega l = 2\pi n l = 6,28 n l \text{ ohms.}$$

Impédance linéique par kilomètre :

$$z = \sqrt{r^2 + \omega^2 l^2} \text{ ohms;}$$

Admittance linéique par kilomètre :

$$w = \sqrt{g^2 + \omega^2 c^2} \text{ ohms.}$$

En posant : $p = \omega^2 l c - g r$ et $q = \omega c r + \omega l g$, on a :

1° Coefficient numérique d'amortissement le long de la ligne :

$$a = \sqrt{\frac{\omega z - p}{2}};$$

2° Coefficient angulaire de rotation des phases le long de la ligne :

$$b = \sqrt{\frac{\omega z + p}{2}} \text{ radians } ^{(1)};$$

3° Coefficient d'influence du courant sur la f. é. m. :

$$m = \sqrt{\frac{z}{w}}.$$

Pour l'étude des coefficients dans lesquels intervient la longueur de la

(1) Pour qu'une ligne se mette en résonance, il faut sensiblement que sa longueur L corresponde à $1/4$ de longueur d'onde λ ; alors la rotation de phase d'une extrémité à l'autre doit être $\frac{\pi}{2}$ et on en déduit la condition de résonance : $bL = \frac{\pi}{2}$; d'où $L = \frac{\pi}{2b}$. Si on néglige la résistance ohmique, b se réduit à $b = \omega \sqrt{cl}$. D'où, en appelant T la période dangereuse correspondante, la condition de la résonance est sensiblement $T = 4L \sqrt{cl}$.

ligne, M. A. Blondel, pour simplifier les calculs et les écritures, admet deux groupes de fonctions auxiliaires, savoir :

$$1^{\circ} \quad \alpha = \sqrt{\frac{\cosh 2ax + \cos 2bx}{2}} \quad \text{et} \quad \beta = \sqrt{\frac{\cosh 2ax - \cos 2bx}{2}},$$

d'où les fonctions commodes :

1^o Impédance apparente de la ligne $m\beta$ et admittance apparente à vide $\frac{\beta}{m}$;

2^o Angles auxiliaires pour l'application des phases :

$$\gamma = \arctg \frac{mc}{g} - \arctg \frac{a}{b}; \quad \sigma = \arctg \frac{\sin 2bx}{\sin 2ax}$$

et :

$$\varepsilon = \arctg (\tanh ax \tanh bx);$$

d'où les angles apparents d'impédance de la ligne en charge et d'admittance de la ligne à vide :

$$\psi = \sigma - \gamma \quad \text{et} \quad \xi = \sigma + \gamma.$$

Si l'on connaît le régime de tension étoilée ($U_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ de la tension entre conducteurs), l'intensité de phase (I_1) dans chaque conducteur de la ligne et le décalage (φ_1) à l'arrivée de la ligne, on peut admettre que le régime correspondant au départ peut être considéré comme résultant de deux régimes correspondant respectivement à un régime de marche à vide et à un régime de court-circuit. A la tension étoilée d'arrivée U_1 correspond une tension de départ étoilée : $U_0 = \alpha U_1$, décalée par rapport à U_1 d'un angle d'avance ε .

De même au courant d'arrivée I_1 correspond un courant de départ $I_0 = \alpha I_1$ décalé en avance du même angle ε .

La tension U_1 produit dans la ligne isolée un courant de charge à vide :

$$J_0 = \frac{\beta U_1}{m}; \quad \frac{\beta}{m} \text{ est donc l'admittance apparente de la ligne isolée.}$$

De même, le courant d'arrivée I_1 produit une chute de tension $V_0 = m\beta I_1$; $m\beta$ est l'impédance apparente de la ligne pour le courant débité à l'extrémité :

Les vecteurs J_0 et V_0 (*fig. 1277*), ainsi définis en grandeur, sont en outre définis en décalage par les angles ψ et ξ dont les valeurs s'obtiennent, comme on l'a dit plus haut, au moyen des angles σ et γ .

Les angles ψ et ξ se rapportant au cas où le courant d'arrivée I_1 est en phase avec U_1 , si l'on suppose au courant un décalage φ_1 , les vecteurs

I_0 et V_0 se décalent en arrière de ce même angle, et par suite leurs angles de phase par rapport à J_0 et à U_1 respectivement, se trouvent modifiés et deviennent :

$$\xi = \sigma - \gamma - \varphi_1; \quad \chi = \sigma + \gamma + \varphi_1.$$

La tension étoilée résultante au départ U_0 est la résultante des vecteurs U_0 et V_0 . De même, le courant au départ \mathfrak{A}_0 est la résultante des vecteurs I_0 et \mathfrak{A}_0 . Autrement dit, on doit former deux triangles, l'un au moyen des vecteurs U_0 , V_0 et de l'angle ξ , l'autre à l'aide des vecteurs I_0 , J_0 et de l'angle γ en tenant compte des angles de décalage indiqués plus haut. Le tracé graphique donne immédiatement U_0 et \mathfrak{A}_0 .

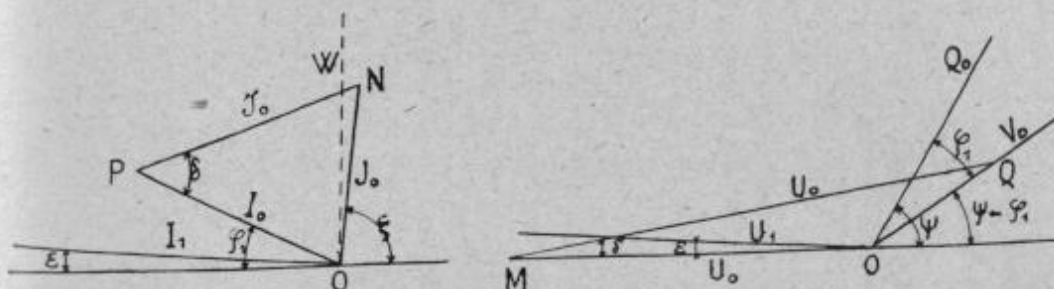


FIG. 1277.

Cette comparaison peut se faire aussi par le calcul, et, à cet égard, M. A. Blondel a donné les formules ci-après pour les deux cas différents qui se présentent le plus souvent, à savoir suivant qu'on doit chercher la tension au départ nécessaire pour entretenir à l'arrivée une tension connue sous un certain débit; ou, au contraire, déterminer la tension à l'arrivée résultant du débit quand la tension au départ est connue :

1^o Solution pour le cas où U_1 est donné et U_0 cherché :

$$\begin{aligned} V_0 &= m\beta I_1; & \operatorname{tg} \delta &= \frac{V_0 \sin \xi}{U_0 + V_0 \cos \xi}; & V_0 &= \frac{\sin \xi}{\sin \delta} V_0; \\ I_0 &= a I_1; & J_0 &= \frac{\beta}{m} U_1; \\ \operatorname{tg} \delta' &= \frac{J_0 \sin \gamma}{I_0 + J_0 \cos \gamma}; & \mathfrak{A}_0 &= \frac{\sin \gamma}{\sin \delta'} J_0; & \varphi_0 &= \delta - \delta' + \varphi_1; \\ P_0 &= \mathfrak{A}_0 \mathfrak{A}_0 \cos \varphi_0. \end{aligned}$$

2^o Solution pour le cas où \mathfrak{A}_0 est donné et U_1 inconnu :

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin \xi \frac{V_0}{\mathfrak{A}_0}; & \lambda &= \pi - (\pi - \xi) - \delta = \xi - \delta; & U_0 &= \mathfrak{A}_0 \frac{\sin \lambda}{\sin \xi}; \\ U_1 &= \frac{U_0}{\alpha} = \frac{\mathfrak{A}_0 \sin (\xi - \delta)}{a \sin \xi}; & I_0 &= a I_1; & J_0 &= \frac{\beta}{m} U_1; \\ \operatorname{tg} \delta' &= \frac{J_0 \sin \gamma}{I_0 + J_0 \cos \gamma}; & \mathfrak{A}_0 &= \frac{\sin \gamma}{\sin \delta'} J_0; & \varphi_0 &= \delta - \delta' + \varphi_1. \end{aligned}$$

Pour rendre plus clair l'emploi de ces formules, nous donnons au (§ 522) un exemple numérique fourni par M. A. Blondel, ayant trait à une ligne triphasée à très haute tension (100.000 volts).

Sur une ligne existante, on peut aisément déterminer expérimentalement les constantes a et b et les autres fonctions auxiliaires, qui s'en déduisent, sans être obligé de recourir aux calculs préliminaires exposés plus haut. Il suffit, dans ce but, de faire deux mesures du régime, l'une à circuit ouvert à haute tension, l'autre à circuit fermé à basse tension.

Dans la première, on mesure simultanément la tension au départ U_0 , le courant de charge J_0 , le décalage φ_0 de J_0 sur U_0 , la tension à l'arrivée U_1 , et on en déduit les valeurs de $\frac{\beta}{m} = \frac{J_0}{U_1}$, de $\xi = \text{angle}(J_0, U_0)$ et de $\alpha = \frac{U_0}{U_1}$.

Dans la seconde, on détermine le courant I_0 au départ, la tension U_0 qui se réduit alors à V_0 , le courant I_1 du court-circuit à l'arrivée, et le décalage au départ entre V_0 et le courant I_0 . On en déduit une vérification de $\alpha = \frac{I_1}{I_0}$, de $\psi = \text{angle}(V_0, I_0)$ et de $m\beta = \frac{V_0}{I_1}$.

D'où, en tenant compte des résultats de la première expérience :

$$\beta = \sqrt{\frac{V_0 J_0}{U_1 I_1}} \quad \text{et} \quad m = \sqrt{\frac{V_0 U_1}{J_0 I_1}},$$

et connaissant α et β , il suffit de se reporter à leurs valeurs :

$$\alpha = \sqrt{\frac{\cosh 2ax + \cos 2bx}{2}}; \quad \beta = \sqrt{\frac{\cosh 2ax - \cos 2bx}{2}},$$

pour en déduire :

$$\cosh 2ax = \alpha^2 + \beta^2 \quad \text{et} \quad \cos 2bx = \alpha^2 - \beta^2,$$

fonctions de x , sauf les valeurs de a , b , m , γ , qui sont des constantes.

On voit ainsi que la méthode de M. A. Blondel, que nous venons d'exposer, permet de déterminer les constantes caractéristiques d'un câble : a , b , m , γ , au moyen d'une mesure faite seulement sur un tronçon de ce câble. La connaissance de ces constantes renseigne beaucoup plus directement sur les propriétés du câble que celle des grandeurs r , l , c et g .

D'ailleurs, si l'on ne veut que se contenter d'une approximation, il est bien plus commode et plus rapide d'employer les solutions graphiques que nous exposons au (§ 509).

501. Choix de la tension. — Au fur et à mesure des progrès obtenus dans la construction du matériel électrique, on est arrivé à utiliser des tensions de plus en plus élevées, qui ont permis d'accroître le rayon de la transmission de l'énergie produite économiquement dans les usines hydroélectriques. Aujourd'hui, des installations utilisant de puissantes chutes d'eau transportent à des distances de plusieurs centaines de kilomètres la force de l'eau, à des rendements que naguère encore on croyait impossibles.

Dans les grands transports d'énergie, la puissance fournie par l'usine génératrice est distribuée dans des postes secondaires de distribution ou sous-stations, ou même dans de simples postes de transformateurs destinés à abaisser la tension du courant qui les alimente.

Les sous-stations servent le plus souvent à transformer le courant alternatif à haute tension en courant de même nature à basse tension, et le courant alternatif à haute tension en courant continu à basse tension. Dans ce dernier cas, elles reçoivent le courant à une tension très élevée (jusqu'à 100.000 volts et plus), qu'elles abaissent au moyen de transformateurs statiques, et l'envoient alors dans des transformateurs tournants ou convertisseurs.

Au point de vue de la disposition des sous-stations, il y a intérêt à les placer autant que possible au centre de la distribution, c'est-à-dire à s'en rapprocher le plus près possible avec la ligne à haute tension. Quant à leur puissance, on la calcule en tenant compte des charges maxima et minima de la partie du réseau qu'elles desservent.

Pour des distances jusqu'à 15 kilomètres et une puissance à transmettre de 250 kilowatts, une tension de 3.000 volts efficaces est généralement suffisante (avec une tension efficace de 3.000 volts, la tension maxima est : $3.000 \sqrt{2} = 4.250$ volts). Si la distance atteint 20 à 25 kilomètres et la puissance 500 kilowatts, on peut aller jusqu'à 5.000 volts. Quand on arrive à 50 kilomètres et que la puissance n'est pas trop considérable, on s'adresse aux tensions de 10 à 15.000 volts. Avec des courants de 20.000 à 30.000 volts, il est possible d'avoir une zone de distribution économique de 80 à 120 kilomètres autour de l'usine génératrice et pouvant transporter jusqu'à 10.000 kilowatts. Au delà, les tensions (30.000 jusqu'à 80.000 volts et plus) sont utilisées pour des distances allant de 100 à 500 kilomètres et plus.

Au Niagara, on a essayé des lignes à des tensions allant de 90.000 volts à 133.000 volts. Pour le transport de force de Mont-Hamilton à Oakland (240 kilomètres) et à San-José (320 kilomètres), on a adopté 40.000 volts que l'on se propose de pousser à 60.000 volts. En France, de nombreuses installations portant sur 60, 80, 100, 200 et 300 kilomètres ont été faites avec des voltages de 20.000, 30.000 et 50.000 volts. Nous citerons la

ligne de Grenoble à Saint-Chamond (60.000 volts), le réseau de la Compagnie Lorraine d'électricité et la ligne de Venthou au val de Fier (70.000 volts), les lignes de la Société de la Haute Durance et de la Société des Forces motrices de l'Eau d'Olle (60.000 volts). En Italie, où l'industrie de la houille blanche a pris un grand développement, les installations à 40.000 volts sont déjà nombreuses et il existe plusieurs lignes à 70.000 volts. Les lignes de Bolognosa à Naples (180 kilomètres) et de Piscara à Rome (180 kilomètres) sont à la tension de 88.000 volts. Le transport de force de El Molinar à Madrid, de 250 kilomètres, utilise une tension de 70.000 volts. Le réseau de Saxe (Verband Sroeba) est à 100.000 volts.

En Amérique il existe une vingtaine d'installations utilisant des tensions de 100.000 à 150.000 volts.

Le transport de force triphasé de la Grand Rapids Muskegon Power Co, de 148 kilomètres de longueur, utilise une tension de 72.000 volts.

La ligne de transmission d'énergie électrique qui part de la station de Croton, établie sur les rapides de Muskegon-Michigan, a 332 kilomètres de longueur. La station génératrice a une puissance de 30.000 HP, et la tension est de 110.000 volts.

La station de Ontario H. E. Power marche à 110.000 volts ainsi que la Washington Water Power; la Southern Sierra Power Co est à 140.000 volts et la Pacific Light Power Co à 150.000 volts.

Au surplus, il suffit de jeter un coup d'œil sur le tableau d'entrée du Tome II pour se rendre compte des tensions admises dans les diverses installations décrites dans le second volume de cet ouvrage.

Nous avons enfin signalé dans l'introduction de cet ouvrage les fameux projets de transports de Victoria et de Genissiat (Ain) à Paris, qui visent, le premier une distance de 1.200 kilomètres, et le second une ligne de 450 kilomètres; pour ces deux installations, on a envisagé une tension de 150.000 volts.

Jusqu'aux tensions de 8.000 à 15.000 volts, il est préférable de marcher directement avec un alternateur fournissant une tension pareille, c'est-à-dire sans passer par un transformateur; dans les très hautes tensions, les alternateurs ne rendent pas de bons services après quelques années de fonctionnement.

A partir de 30.000 volts, avec l'emploi des courants polyphasés, les fils conducteurs aériens commencent à devenir lumineux, à cause des décharges entre les conducteurs sous forme d'aigrettes, et à émettre un son qui croît avec le voltage sur la ligne. Au-dessus de 40.000 volts, l'air cesse d'être isolant, surtout dans les pays humides, et des fuites importantes se produisent entre fils, surtout avec des fréquences très élevées. Le phénomène s'accroît au fur et à mesure que le voltage s'élève. Le

pouvoir diélectrique de l'air varie du reste proportionnellement à la pression et en raison inverse de la température absolue. Enfin, avec les très hautes tensions, les difficultés d'isolement augmentent et les transformateurs ainsi que les alternateurs sont plus coûteux.

Les distances des fils entre eux et du fil inférieur au sol sont déterminées par des considérations de voltage et d'altitude, l'air raréfié des grandes altitudes étant plus conducteur que l'atmosphère ordinaire. Au Niagara, on a adopté entre fils une distance de 2^m,15 pour 60.000 volts.

Pour les lignes de transmission, les fréquences basses sont plus avantageuses, car elles réduisent les effets de la self, qui sont surtout importants sur les conducteurs aériens, ainsi que ceux de la capacité, qui sont prépondérants dans les câbles souterrains. Une fréquence de 25 à 33 périodes, en thèse générale, semble de bon aloi, d'autant plus qu'il n'existe pas une grande différence entre les poids et les prix des moteurs à 25, 33 ou 50 périodes, quand on choisit convenablement les vitesses de rotation. D'autre part, les transformateurs à 50 périodes présentent une supériorité considérable sur ceux à 25 périodes ; mais les commutatrices fonctionnent beaucoup mieux à 25 périodes qu'à 50 (pour les tensions dépassant 500 volts à 50 périodes, on fait plutôt appel aux moteurs-générateurs).

Pour la traction électrique, la fréquence 25 est de beaucoup la plus avantageuse. Nous concluons donc avec M. A. Blondel que la fréquence la plus propice est celle de 33 cycles, parce qu'elle donne un bon éclairage et qu'elle peut facilement se transformer en fréquence de 25 ou 50.

Cependant d'autres auteurs estiment qu'avec la fréquence 25 on peut faire à la fois de la lumière, de la force motrice et de la traction, ce qui, dans bien des cas, peut conduire à une notable économie de frais. Mais il ne faut pas perdre de vue, comme nous le montrerons plus loin, qu'avec les basses fréquences les alternateurs et les câbles sont plus sujets à être détériorés par les effets des surtensions et qu'il est de bon usage d'employer des conducteurs aériens de section plus forte que pour la fréquence ordinaire, car les convertisseurs fonctionnent beaucoup mieux et les alternateurs ainsi que les moteurs sont meilleur marché dans ce cas.

La *tension limite pratique* est imposée par les isolateurs et surtout par la perte entre fils, qui est fonction du diamètre des conducteurs, de leur distance et de la forme du courant. Les très hautes tensions produisent en ligne des étincelles de plusieurs décimètres de longueur, font siffler les câbles et ozonisent l'air. De nombreux essais effectués en Amérique ont montré que la perte d'électricité à travers l'air entre conducteurs est fonction inverse de la courbure des fils et de leur distance. Ces pertes ont une importance appréciable dans certains climats dès que l'on atteint

des tensions de 40.000 volts. De ce fait, le chiffre de 100.000 volts paraît ne pas pouvoir être dépassé dans la majorité des cas, en ce qui concerne les courants polyphasés, et à la condition d'avoir un air très pur sur le parcours de la ligne.

M. Ralph D. Mershon a fait récemment d'admirables recherches expérimentales pour déterminer le voltage maximum qu'on peut employer pour une ligne aérienne triphasée, dans des conditions données. M. Mershon indique la formule suivante comme étant très approchée des résultats d'expérience. La limite de tension au delà de laquelle la dispersion entraîne une perte sensible d'énergie est, en kilovolts virtuels :

$$KV = \left(\frac{1}{1 + K_4 p'} \right) K_1 \left(1 + \frac{K_2}{K_3 + r} \right) r \log \left(\frac{s}{r} \right)$$

où K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , sont des constantes, p' un facteur que M. Mershon appelle le « produit de vapeur », r le rayon du fil et s la distance séparant les deux fils entre lesquels existe la tension KV. On remarquera que la température n'entre pas directement dans cette formule, bien qu'elle soit implicitement contenue dans la valeur p' , tandis que la vieille formule de Ryan renfermait cette température elle-même. En reprenant les courbes de M. Mershon et admettant la proportionnalité entre la pression barométrique et le voltage critique, comme dans la formule de Ryan :

$$E_{\max} = \frac{17,94b}{439 + t} \times 2,055 \log_{10} \frac{s}{r} \times D' \times (r + d) \times 10^{10},$$

le docteur Kapp a trouvé que l'expression suivante, plus simple, représente assez bien le potentiel critique en kilovolts virtuels :

$$KV = \frac{0,115b}{0,5 + r} \left(\frac{1}{1 + 0,013v} \right) r \log \frac{s}{r}.$$

Dans cette formule, b est la pression barométrique en millimètres de mercure, r le rayon du conducteur en centimètres, s la distance entre les deux conducteurs en centimètres, et v est le « produit de vapeur » de Mershon, à savoir la pression de la vapeur saturée en millimètres de mercure à la température donnée multipliée par l'humidité relative, c'est-à-dire par le rapport $\frac{\text{humidité réelle}}{\text{humidité possible}}$.

Quant à la valeur de la puissance à transmettre, elle est limitée, pour une distance donnée, entre un minimum et un maximum pour lesquels l'opération cesserait de présenter des avantages. On ne peut, d'une part, recourir à des fils de section trop faible, et, d'autre part, construire des transformateurs à haute tension de trop faible puissance, causes qui

limitent la puissance minimum à transmettre, alors que la perte en ligne est le plus grand obstacle à l'obtention de la puissance maximum.

Effet corona. — Il se produit, comme nous l'avons déjà dit, autour de chacun des fils d'un champ électrique dont la valeur à la distance R de l'axe du fil est approximativement :

$$H = \frac{U}{2R \log e \frac{D}{r}},$$

en volts par centimètre.

A la surface extérieure des fils, ce champ a donc approximativement la valeur :

$$H = \frac{U}{2r \log e \frac{D}{r}};$$

U , tension entre fils, en volts; D leur éloignement et r leur rayon commun en centimètres.

L'apparition de ce phénomène ⁽¹⁾ se produit au moment où la tension critique commence à se manifester.

La valeur de cette dernière pour un courant alternatif simple est donnée par l'expression :

$$U_1 = K \times 21,2 \frac{3,86H}{273 + t} \left(1 + \frac{0,445}{\sqrt{d}} \right) d \log \frac{2D}{d}.$$

Et pour un courant triphasé :

$$U_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} K \times 21,2 \frac{3,86H}{273 + t} \left(1 + \frac{0,445}{\sqrt{d}} \right) d \log \frac{2D}{d};$$

pour une ligne dont les trois conducteurs sont les sommets d'un triangle équilatéral, de côté D en centimètres, d diamètre des conducteurs; $K = 1$ pour fil uni et 0,85 pour câble à sept fils; $H = 76$ et $t = 20^\circ$.

Pour calculer la perte d'énergie par effet corona, Faccioli a proposé la formule :

$$P = c (U - U')^2; \quad (1)$$

P perte de puissance, U tension de distribution, C et U' des constantes.

⁽¹⁾ On a montré que les effluves autour des conducteurs nus constituent une excellente protection contre les surtensions. Il est par suite vraisemblable de penser que, par la suite, l'effet corona sera utilisé comme moyen de protection contre les surtensions, ce qui réduira les frais d'installation des lignes à haute tension.

U' représente une certaine tension critique qu'il ne faut pas confondre avec celle U , donnée ci-avant.

Pour une ligne à courant alternatif simple :

$$c = 86.10^{-3} \frac{n}{\delta} \sqrt{\frac{d}{2d}} \quad \text{et} \quad U' = Kh_0 \delta d \log \frac{2D}{d} \text{ Kv. elf. ;}$$

n fréquence du courant : $\delta = \frac{3,85H}{2,3 + t}$; $h_0 = 21,2$ et K a les valeurs indiquées plus haut.

La puissance dissipée par effet corona en kilowatts dans un conducteur d'une ligne monophasée est par kilomètre d'après Peek :

$$P = 86.10^{-3} \frac{n}{\delta} \sqrt{\frac{d}{2D}} \left(U - 21,2K\delta d \log \frac{2D}{d} \right)^2.$$

U exprimée en kilovolts.

On tire de ces expressions :

$$\frac{U_1}{U'} = 1 + \frac{0,445}{\sqrt{d}}.$$

M. Zickler, qui a soumis la formule de Peek à de nombreux essais, ne l'a pas trouvée concordante à la réalité des faits. Il a déterminé des formules que nous relatons :

$$U' = K\delta n_1 (d + 0,146) \log \frac{D}{d};$$

$$\frac{U_1}{U'} = \frac{d + 0,445 \sqrt{d}}{d + 0,146}.$$

MM. Gorges, Weidig et Jaensch ont montré que pour les mêmes valeurs de d et de D , le champ électrique a la même valeur à la surface des conducteurs en monophasé et en triphasé si les tensions entre fils sont dans le rapport :

$$\frac{U \text{ triph.}}{U \text{ mon.}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Par suite la perte de puissance par effet corona par kilomètre pour un conducteur d'une ligne triphasée sera :

$$P' = c \left[\frac{2}{\sqrt{3}} U - U' \right]^2$$

ou

$$P' = \frac{4}{3} c \left[U - \frac{\sqrt{3}}{2} U' \right]^2 = 1,33c \left[U - 0,866U' \right]^2.$$

502. Capacité de la ligne. — Une ligne de transport d'énergie électrique peut être considérée comme formée de condensateurs et de réactances en série. Quand on la relie par une extrémité à une source d'électricité à potentiel constant, une charge passe dans la ligne, atteint l'autre extrémité, et reste là ; mais, à cause de l'inductance du circuit, la charge atteint approximativement le double de celle de la source, puis, à son tour, se décharge dans la ligne, et ainsi une suite d'oscillations se produit. Il n'est pas nécessaire que la ligne soit en circuit ouvert pour obtenir des ondes réfléchies et une augmentation de potentiel ; en effet, s'il se trouve à l'extrémité de la ligne principale une ligne secondaire de capacité inférieure à celle de la ligne principale, elle se trouvera incapable d'absorber la charge aussi rapidement qu'elle arrivera au croisement des lignes, et des phénomènes oscillants prendront naissance. Ce phénomène se produit fréquemment sur des lignes de transports d'énergie comportant des lignes souterraines et aériennes.

La capacité de la ligne peut avoir une influence considérable sur la marche des alternateurs. Elle donne lieu à l'existence d'un courant à vide, décalé en avant sur la force électromotrice et à des courants de décharge très intenses au moment d'une rupture en charge ou en cas de fusion de fusibles. Elle peut aussi provoquer en certains points des relèvements de voltage, quand la ligne n'est pas chargée, par suite des conditions de résonance avec la self-induction du circuit.

Lorsque la capacité est nulle, ce qui a lieu sensiblement pour une ligne aérienne à bas voltage, le décalage est alors maximum. Au fur et à mesure que la capacité augmente, le décalage diminue et devient nul quand le courant est en phase avec la force électromotrice.

Si la capacité devient supérieure à cette valeur, le sens du décalage change et le courant est en avance sur la force électromotrice, circonstance qui ne se rencontre guère dans la pratique en raison de la self des moteurs à champ tournant, des transformateurs et de la ligne elle-même, self qui est bien supérieure à la capacité de la transmission ou même des moteurs synchrones surexcités.

Par suite de sa capacité, la ligne exige un courant de charge de valeur déterminée pour maintenir la tension.

Le courant à vide nécessité par la capacité se compose d'une composante énergétique en concordance de phase avec la force électromotrice, qui compense les diverses pertes de la ligne (effet Joule, pertes dans le diélectrique, etc.), et d'une composante inercégétique due à la capacité, qui est décalée de un quart de période en avance par rapport à la force électromotrice de l'alternateur. A vide, celui-ci, pour obtenir la tension normale, n'exige qu'un courant d'excitation relativement faible, car c'est le courant de charge qui fournit le supplément.

La (fig 1278) illustre les valeurs efficaces de l'intensité, de la différence de potentiel et du décalage pour un cas pratique déterminé en supposant la ligne fonctionnant à vide.

La courbe de la puissance indique sa valeur moyenne en différents points de la ligne ; cette valeur décroît progressivement en compensant les pertes en lignes ⁽¹⁾.

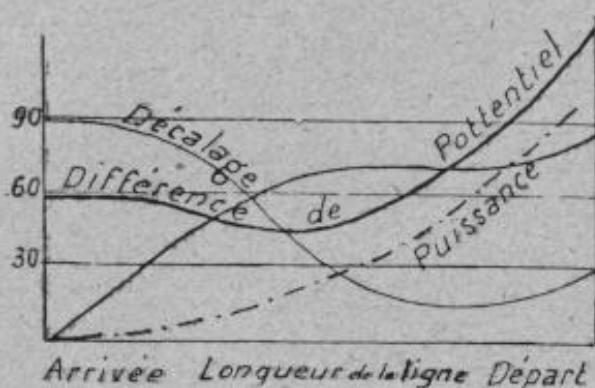


FIG. 1278.

La capacité C d'un conducteur cylindrique de rayon r , par rapport à un plan indéfini métallique qui lui est parallèle, cette distance étant représentée par $\frac{D}{2}$, cas iden-

tique à celui d'un conducteur ordinaire par rapport à la terre, a pour valeur, par unité de longueur, lorsqu'elle est exprimée en unités électrostatiques et que la ligne est aérienne dont la constante diélectrique est égale à l'unité :

$$C = \frac{1}{2 \log e \frac{D}{r}}$$

Cette capacité a une valeur double de celle que le même conducteur présenterait par rapport à un autre conducteur parallèle placé symétriquement à la même distance $\frac{D}{2}$ du plan, mais du côté opposé ayant une charge contraire à celle du premier.

Avant de considérer l'action de la terre, on peut, dans le cas de la pratique, considérer celle du second conducteur pris comme image virtuelle du premier, en supposant un miroir étendu à la surface du sol, étant admis que la capacité de ce conducteur par rapport à son image est exprimée par :

$$C = \frac{1}{2 \log e \frac{D}{r}} \text{ et non par } C = \frac{1}{4 \log e \frac{D}{r}},$$

comme cela serait si le second conducteur existait au lieu d'être une simple image virtuelle.

Dans ces conditions, si le conducteur, par unité de longueur, possède une charge d'électricité de quantité q que l'on suppose répartie le long de

⁽¹⁾ *Canalisations électriques*, par Montpellier, Dunod et Pinat, éditeurs.

l'axe du conducteur, le potentiel U à la surface du conducteur dépend de $q = CU$ et, par conséquent :

$$U = \frac{q}{\frac{1}{2 \log_e \frac{D}{r}}} = 2q \log_e \frac{D}{r}.$$

Pour le plan de terre, $U = 0$.

Dans le cas d'une ligne à courant monophasé, les deux conducteurs ayant à tout instant des potentiels égaux mais de sens opposés et, par conséquent, les charges étant égales et de sens contraires, on peut exprimer la valeur instantanée du potentiel pour chacun des conducteurs par l'expression :

$$u = 2q \log_e \frac{D}{r} + 2(-q) \log_e \frac{D}{d}$$

formule qui donne, en supposant que les conducteurs soient situés dans un plan horizontal :

$$u = 2q (\log_e d - \log_e r) = 2q \log_e \frac{d}{r};$$

d , distance entre les conducteurs :

La capacité d'un des conducteurs est :

$$C = \frac{q}{u} = \frac{1}{2 \log_e \frac{d}{r}}.$$

et celle de la ligne est :

$$C = \frac{1}{4 \log_e \frac{d}{r}}.$$

Dans le cas d'une ligne triphasée, la capacité d'un des conducteurs par rapport à la zone neutre est :

$$C = \frac{1}{4 \log_e \frac{d}{r}},$$

par unité de longueur, correspondant au double de la capacité du condensateur formé par deux conducteurs seulement.

En rapportant la capacité au kilomètre de longueur (10^5 c. m.) et en réduisant les logarithmes naturels en logarithmes décimaux on a :

1° Pour une ligne monophasée :

$$C = \frac{0,0242 \cdot 10^{-6}}{2 \log 10 \frac{d}{r}} \text{ farad par kilomètre de ligne.}$$

Et pour une ligne triphasée comme expliqué ci-avant :

$$C = \frac{0,0242 \cdot 10^{-10}}{2 \log 10 \frac{d}{r}} \text{ farad par kilomètre de conducteur,}$$

d et r en centimètres.

La capacité étant déterminée, on obtient la valeur de l'intensité du courant de charge dans le condensateur en appliquant la formule :

$$U_0 = \frac{I_0}{\omega C} \text{ et l'on a : } I_c = \omega C U,$$

U valeur efficace de la différence de potentiel entre les armatures du condensateur, soit la différence de potentiel normale pour une ligne à courant monophasée et la différence de potentiel entre un conducteur et le centre de l'étoile (tension correspondant à une phase), pour une ligne triphasée.

Prenons $d = 60$ centimètres, et $r = 0,4$ centimètre; on a :

$$C = \frac{0,0242 \cdot 10^{-10}}{\log 10 \frac{60}{0,4}} = 111,25 \cdot 10^{-10} \text{ farad par kilomètre,}$$

et pour 50 kilomètres par exemple :

$$C = 5562,5 \cdot 10^{-10} \text{ farad.}$$

Avec un courant d'une périodicité de 42, l'intensité du courant de charge pour chacun des conducteurs est :

$$I_c = 2\pi f C U \text{ ou } 2\pi \sim C U$$

Soient $U = 10.000$ volts (tension par phase), et $2\pi f = 250$;

Alors :

$$I_c = 250 \times 5562,5 \cdot 10^{-10} \times 10.000 = 1,39 \text{ ampère.}$$

Il en serait ainsi si la totalité de la capacité se trouvait en un seul point sous la tension U ; mais elle est en réalité répartie uniformément sur toute la longueur de la ligne.

Selon la forme schématique de la ligne de transport (*fig. 1279*) on voit que l'on peut subdiviser en un certain nombre de capacités égales celle totale de la ligne. Dans ce cas l'impédance de la dernière section APQB du circuit est en dérivation avec l'impédance du condensateur AB et on trouve alors la résultante. Cette impédance est en outre en série avec l'impé-

dance de la section ACBD, et, à son tour, cette impédance ainsi trouvée est en dérivation par rapport à celle du condensateur CD. En procédant ainsi jusqu'au point de départ de la ligne, on peut calculer la valeur approximative de l'impédance de la totalité de la ligne. On peut aussi calculer, section par section, les tensions et intensités correspondant à une charge déterminée. Prenons, à titre d'application numérique, une ligne triphasée avec dérivation. Admettons que la résistance d'un conducteur de la ligne est de 20 ohms et la réactance apparente de 25 ohms.

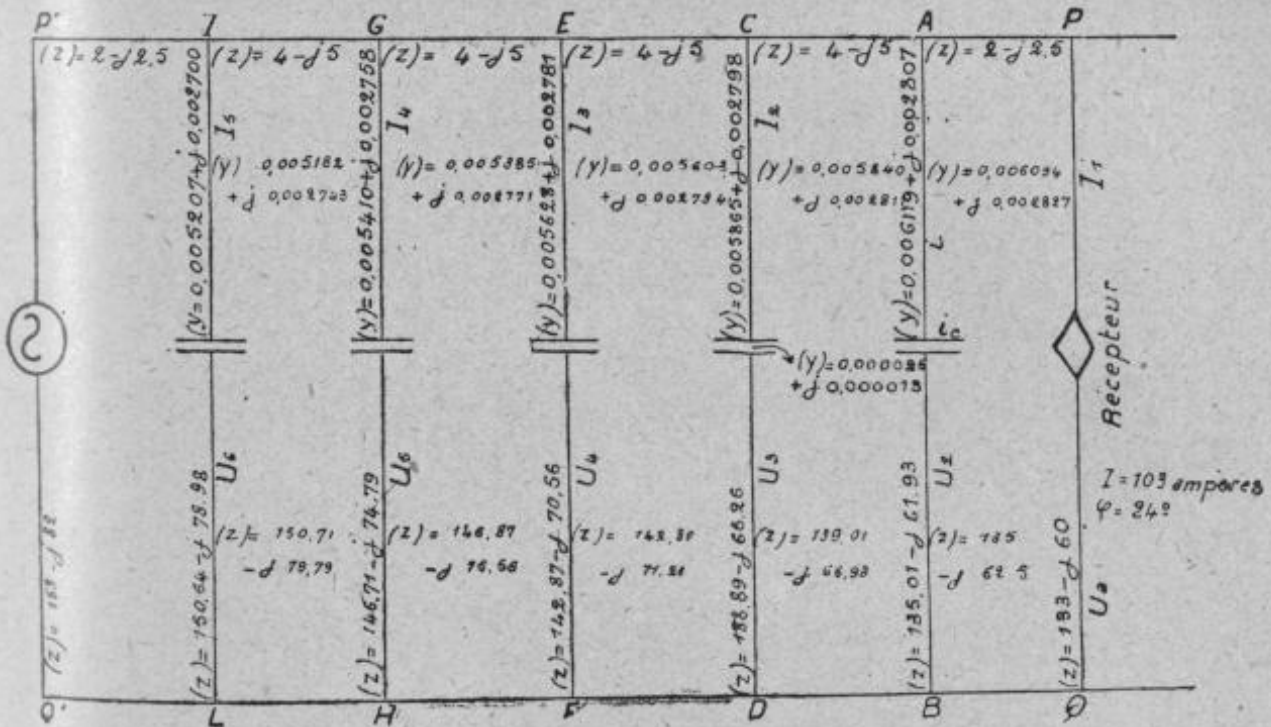


FIG. 1279.

La capacitance totale d'un conducteur par rapport à la zone neutre est de 3160 ohms ; la tension étoilée à l'arrivée 15.000 volts efficaces et 2,5 ampères la perte par dérivation d'un conducteur à l'autre dans chaque branche du circuit triphasé. On cherche la valeur de la tension à appliquer au départ, lorsque la charge à l'arrivée exige 94 ampères de courant énergétique et 42 ampères de courant magnétisant décalé en retard.

L'impédance présentée par les deux sections extrêmes de la ligne, soient AP et P'I est $2 - j 2,5$, et dans les autres sections, $4 - j 5$ (j , opérateur figuratif du décalage de l'intensité de 15° en avance sur la différence de potentiel). En dérivation entre les points AB, CD, on suppose qu'il y a des condensateurs, chacun d'eux présentant une capacitance de :

$$\frac{1}{\omega C} = 3160 \times 5 = 15800 \text{ ohms.}$$

Pour tenir compte des dérivations existant entre les divers conducteurs, on admet que chacun de ces condensateurs absorbe un courant énergétique de $\frac{2,5}{5} = 0,5$ ampère correspondant à une résistance ohmique de 30.000 volts sous une tension de 15.000 volts, de sorte que l'impédance de chaque condensateur est exprimée par :

$$(Z) = 30\,000 + j\,15\,800$$

correspondant à une admittance :

$$(Y) = 0,000025 - j\,0,000013$$

dépendant des formules symboliques :

$$(Y) = g + jb; \quad g = \frac{Z}{Z^2}; \quad b = \frac{x}{Z^2}$$

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{\sqrt{g^2 + x^2}}{Z^2} \frac{1}{Z}$$

dans lesquelles $x = \omega L$.

L'intensité totale et le décalage de phase à l'arrivée sont :

$$I = \sqrt{94^2 + 42^2} = 103 \text{ ampères}$$

$$\tan \varphi = \frac{42}{94} = 0,445 \text{ et } \varphi = 24^\circ.$$

Par suite l'impédance du circuit du récepteur PQ est :

$$(Z) = \frac{U \cos \varphi}{I} - j \frac{U \sin \varphi}{I} = 133 - j\,60.$$

En ajoutant à cette impédance celle de la partie AP de la ligne on a :

$$(Z) = 133 - j\,60 + (2 - j\,2,5) = 135 - j\,62,5.$$

comme expression de l'impédance dans la section APQB du circuit.

A cette impédance correspond une admittance :

$$(Y) = 0,006094 + j\,0,002827$$

à laquelle il faut ajouter l'admittance du premier condensateur :

$$0,000025 - j\,0,000013.$$

Par suite l'admittance totale entre les points A et B est :

$$(Y) = 0,006094 + j\,0,002827 + (0,000025 - j\,0,000013) = 0,006119 + j\,0,002827.$$

A cette admittance correspond une impédance :

$$(Z) = 135,91 - j 61,93.$$

à laquelle il faut ajouter l'impédance $4 - j5$ de la partie AC.

On continue à opérer comme il vient d'être indiqué en remontant jusqu'au départ de la ligne. En suivant la figure on a les résultats successifs des opérations à effectuer, pour arriver à l'expression finale, qui donne la valeur de l'impédance de la ligne, récepteur compris, dans les conditions de charge indiquées.

Pour déterminer la valeur de la tension au départ, on peut, par approximation, opérer comme suit. On admet que la tension, pour chaque condensateur, est la même et que chacun d'eux consomme 0,5 ampère de courant énergétique et 0,95 ampère de courant magnétisant en avance $\left(0,95 = \frac{150.00}{15.800}\right)$. L'alternateur devra donc débiter $94 + (5 \times 0,5) = 96,5$ ampères de courant énergétique et $42 - (5 \times 0,95) = 37,25$ ampères de courant magnétisant.

Et l'insensité totale est :

$$I = \sqrt{96,5^2 + (37,25)^2} = 103,4 \text{ ampères.}$$

La valeur absolue de l'impédance étant :

$$Z = \sqrt{(153)^2 + (82)^2} = 174 \text{ ohms,}$$

il s'ensuit que la tension nécessaire pour obtenir une intensité de 103,4 ampères est :

$$174 \times 103,4 = 17.991 \text{ volts.}$$

Si on néglige la capacité et les dérivation entre conducteurs, on obtient, pour la valeur de l'impédance :

$$(Z) = 133 - j 60 + (20 - j 25) = 153 - j 85;$$

soit :

$$Z = \sqrt{153^2 + (85)^2} = 175 \text{ ohms.}$$

Et l'intensité totale étant $(\sqrt{94^2 + 42^2}) = 103$ ampères la tension au départ pour avoir 15.000 volts est :

$$U = 175 \times 103 = 18.025 \text{ volts.}$$

Cet exemple montre le peu d'influence qu'exerce la capacité dans le

cas de tensions de 15.000 à 20.000 volts pour une ligne de 60 à 80 kilomètres,

Méthode graphique. — On sait que la capacité n'est pas répartie en des points déterminés d'une ligne de transmission électrique, mais qu'elle est uniformément distribuée. Les calculs sont longs et laborieux, en raison des opérations intermédiaires ; pour le cas de la détermination de la valeur de la tension au départ, connaissant celle au point d'utilisation, on peut recourir à la méthode graphique, étant admis que la capacité est placée en des points déterminés. En nous reportant à la (fig. 1279) on voit que, par suite de la résistance et de l'inductance de la première partie du circuit, le vecteur de la tension en AB est U_2 . L'intensité du courant dans la dérivation est i , en concordance de phase avec U_2 et proportionnelle à cette tension. Dans le condensateur il passe un courant i_c décalé de $1/4$ de période en avance par rapport à U_2 et d'une intensité proportionnelle à cette dernière. Dans la seconde dérivation, l'intensité du courant est I_2 ; en ajoutant à U_2 la chute de tension produite par la résistance ohmique de la ligne et par l'inductance, on trouve que la tension dans la partie CD est U_3 et ainsi de suite.

Les extrémités des vecteurs U_a et I_a (fig. 1280) se trouvent situées sur deux courbes qui diffèrent d'autant moins de celles qui correspondent

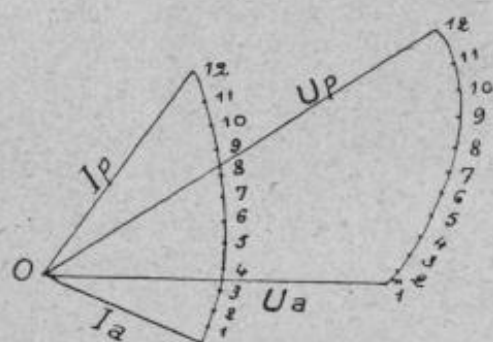


FIG. 1280.

à une répartition uniforme de la capacité, que plus nombreux sont les points de la répartition de cette capacité.

Pour construire graphiquement les diagrammes de la tension et de l'intensité, on suppose qu'une ligne partant de l'origine des temps tourne d'un mouvement uniforme correspondant à la période ; on marque les

différentes positions qu'elle prend aux différents moments successifs de la période et on projette au-dessus de la ligne les points 1, 2, 3... 12, des deux courbes pour chacune de ces positions. On porte enfin les valeurs de ces quantités comme ordonnées et on prend pour abscisse la distance des points considérés à l'extrémité réceptrice.

On peut aussi construire le diagramme (fig. 1280) en traçant une droite représentant la ligne de transmission et en portant aux points considérés, en ordonnées les valeurs efficaces de la tension, de l'intensité et du décalage. Au point d'arrivée de la ligne I_a étant égal à 0, le cas représenté est celui du fonctionnement à vide.

Ce diagramme est modifié suivant les différentes charges. Le diagramme de fonctionnement à vide présente un grand intérêt parce que les effets de

capacitance ne peuvent produire des effets importants que dans ces conditions et que c'est le moyen de se rendre compte de la valeur du courant de charge nécessaire pour mettre la ligne sous tension.

Lorsqu'il s'agit de très longues lignes de transmission on dispose à l'arrivée des fusibles ou automatiques à fonctionnement pas trop sensibles, à l'effet d'éviter une surélévation de tension dans la génératrice par leur fonctionnement.

En effet, si la ligne présente une capacité, une brusque interruption du circuit amène une subite élévation de la tension au départ et si la ligne a une capacité notable, le courant de charge qui circule sur la ligne a pour effet de renforcer l'excitation entraînant une augmentation de tension qui peut atteindre une valeur dangereuse.

On sait que dans les câbles concentriques pour réseaux souterrains, la capacité a une valeur assez élevée dont la valeur est :

$$C = \frac{0,0242}{\log 10 \frac{R}{r}} r \cdot 10^{-6} \text{ farad par kilomètre,}$$

R, rayon intérieur du conducteur extérieur, r rayon du conducteur central, ϵ constante diélectrique égale à 2,4 pour le papier imprégné, 2,7 pour le jute imprégné de résines, 2,34 pour le caoutchouc pur, 2 pour le caoutchouc vulcanisé et 4,2 pour la gutta-percha. Pour les câbles ordinaires à plusieurs conducteurs toronés, la capacitance est plus faible que pour les câbles concentriques. Elle est approximativement le cinquième ou le sixième de la valeur de celle que l'on constate entre le conducteur extérieur et l'enveloppe de plomb (le conducteur central non compris) dans les câbles concentriques formés de conducteurs ayant la même section et de même diélectrique.

Une méthode simple et pratique de calcul de la capacité est celle de MM. Perrine et Baum, à cette considération près que lorsque le courant de charge par unité de longueur de ligne est supposé le même en tous les points de la ligne, l'erreur est d'ordre de 10/0 pour une ligne de 300 kilomètres à la fréquence de 60 par exemple.

D'autre part, pour une ligne à circuit ouvert, le courant de charge peut être considéré comme étant le même en tous les points de la ligne.

Quand on est en présence d'une ligne mixte, c'est-à-dire en partie aérienne et en partie souterraine, cette dernière a sa capacité qui s'augmente de celle due au système aérien, avec, en plus, celle provenant des moteurs synchrones surexcités et des transformateurs à haute tension de grande puissance.

Dans une ligne aérienne chargée, ayant de la capacité, on constate, en chaque point de la ligne et pendant la durée d'une période, des

valeurs différentes pour l'intensité et la différence de potentiel. Quand il n'y a pas de capacité, l'intensité dans la ligne diminue d'une manière uniforme ainsi que la tension, par suite des pertes à travers l'air et des dérivations à la terre par les isolateurs.

503. Surtensions ⁽¹⁾. Phénomènes de résonance. — Par suite du grand nombre d'industries qui en sont tributaires pour leur force motrice et pour leur éclairage, la régularité dans le fonctionnement des centrales et de leurs lignes de distribution est devenue une question capitale qui justifie amplement l'importance actuelle prise par l'étude des moyens propres à éviter les interruptions dans l'exploitation dues aux excès de tension dans les conducteurs. De ce fait, les lignes peuvent être endommagées par des surtensions dues soit à des phénomènes atmosphériques, soit à des perturbations dans le régime de marche des appareils de réseaux.

Les accidents produits par les surtensions se divisent en accidents dus à une action lente ou instantanée de ces phénomènes. Dans la première catégorie, on relève les altérations des enroulements des machines, des isolants, des câbles. L'action de l'ozone dégagé sous les effluves produits par les surtensions, surtout à la suite de surtensions répétées, oxydant le coton des enroulements et ses dérivés. Les accidents dus à une action unique ou instantanée sont : les coups de foudre directs ; les décharges à haute fréquence ; les unes à haute tension par coups de foudre très voisins de la ligne, les autres à basse tension par les décharges conductives ; les phénomènes de propagation d'ondes à front raide et de grande amplitude ; les phénomènes oscillatoires de grande amplitude quand la ligne se décharge comme un condensateur de faible capacité et enfin les phénomènes statiques engendrés normalement dans les champs électriques terrestres, et les phénomènes de résonance.

On distingue les surtensions d'origine interne et celles d'origine externe.

Les premières proviennent de phénomènes de résonance, de réflexions d'onde ou de la manœuvre des appareils (fermeture et ouverture d'un interrupteur, extinction d'un court-circuit, mise à la terre d'une phase et autres causes accidentelles).

Les ondes d'ouverture et de fermeture ne peuvent guère donner naissance à des nœuds ou des ventres en raison de leur grande longueur d'onde (de l'ordre de 6.000 kilomètres sur les lignes aériennes). Mais les

(¹) Pfiffner a donné la définition suivante s'appliquant aux surtensions : Toute modification dans la valeur du potentiel en un point quelconque de l'installation et tendant à dépasser la valeur admise pendant le régime normal ou stationnaire dans le sens radial ou axial du conducteur.

ondes propres des circuits peuvent parfaitement présenter des nœuds et des ventres (ondes stationnaires).

Avec une fréquence propre de 1.000, la longueur d'onde est de :

$$\lambda = V_1 T = \frac{3 \times 10^{10}}{10^3} = 3 \times 10^7 \text{ cm.} = 3 \times 10^2 \text{ km.} = 300 \text{ kilomètres.}$$

Une telle ligne peut comporter un nœud et un ventre.

V_1 vitesse de propagation, T fréquence propre du circuit.

Les secondes sont le fait des harmoniques supérieurs de la courbe de tension et de décharges atmosphériques. L'énergie mise en jeu par les surtensions est, dans le cas de résonance ou de réflexions d'ondes, celle même de la station génératrice. Elle est beaucoup plus faible dans les surtensions dues aux manœuvres, ou même dans l'extinction brusque d'un court-circuit qui détermine les surtensions internes les plus dangereuses. Elle peut être au contraire considérable dans les surtensions d'origine atmosphérique.

Les surtensions de basse fréquence peuvent se produire par résonance sur le réseau, soit de l'onde fondamentale, soit des harmoniques supérieurs de la courbe de tension, et, par réflexion, d'une onde à l'extrémité d'une très longue ligne ouverte. Les surtensions de la fréquence propre du réseau ou de ses subdivisions naissent lors de perturbations brusques accompagnant la manœuvre des appareils ou l'extinction d'un court-circuit.

Comme phénomènes accidentels de surtension, on doit citer : les courts-circuits, les arcs à la terre, les ruptures d'isolateurs, de fils, de câbles, les défauts d'isolement, les ruptures de coupe-circuits, les extra-courants, etc.

Les contacts accidentels entre circuits voisins sont de nature dangereuse pour les réseaux à basse tension et peuvent être cause d'accidents très graves, ainsi que le fonctionnement intempestif des parafoudres. Dans le cas d'une surtension de grande amplitude arrivant aux bornes de machines, de transformateurs et appareils, l'isolation est souvent nettement percée en plusieurs points et le claquage se produit entre conducteur et masse ; aux accidents de cette dernière catégorie appartiennent également les foudroiements d'interrupteurs ouverts, mais reliés aux lignes par les bornes d'entrée, d'où nécessité de mise à la terre des lignes aériennes non en service. Si c'est une onde à front raide ou à grande fréquence qui pénètre dans un enroulement, le claquage des bobines se fait entre spires et non entre spires et masse. Ces derniers accidents sont tous graves, car ils sont capables d'amener un court-circuit sur la machine elle-même et sa mise hors service si le court-circuit destructeur a le temps de produire tout son effet.

La réflexion des ondes conduit à des claquages fréquents des isolateurs en porcelaine, des interrupteurs, des transformateurs, des jonctions des lignes aériennes et des câbles souterrains.

Les effets produits par les phénomènes atmosphériques sont : 1° des courants d'induction, conséquences des décharges qui se manifestent à proximité des conducteurs aériens ; 2° des charges statiques développées en présence de corps électrisés. Il est entendu que les phénomènes électriques ont tous une période d'oscillation bien définie et déterminée par leurs propriétés particulières ; mais alors que la self-induction et la capacité influent sur la période vibratoire, la résistance n'a aucun effet.

La décharge atmosphérique est caractérisée : par la durée de la décharge oscillatoire, par le potentiel de la décharge, par la valeur maxima du courant, par la fréquence et enfin par la quantité d'électricité de la décharge. C'est la durée de la décharge qui a la plus grande importance sur le choix des parafoudres ; cette durée varie entre 4/100 et 1/1.000 de seconde, et, dans certains cas très rares, elle a atteint une demi-seconde. Pour des éclairs d'origine interne, cette durée a atteint plusieurs minutes et même plusieurs heures et les éclairs très rapprochés (jusqu'à sept éclairs par seconde) peuvent être assimilés à une longue décharge de longue durée. Dans le cas d'une décharge ou d'une induction due à une décharge entre nuages, le potentiel monte si rapidement que la petite inductance de la ligne jusqu'à l'isolateur le plus proche présente une impédance relativement haute, et le courant contourne l'isolateur pour se rendre à la terre.

Dans les installations électriques, les élévations de tension dues aux décharges atmosphériques et à ses effets de résonance sont toujours brusques et très élevées ; en outre, l'élévation du niveau électrique ne se produit pas d'une façon régulière, mais sous forme d'ondes de différentes longueurs, présentant des sommets et des nœuds. Chaque ligne d'énergie a une fréquence propre d'oscillation, et si la fréquence de la génératrice vient à être en résonance avec celle de la ligne, le voltage atteint des valeurs considérables, pratiquement illimitées. Heureusement, les fréquences propres de la ligne et de la génératrice sont tellement différentes que la résonance n'a qu'une très faible valeur.

La période de résonance d'un circuit électrique est donnée par la relation :

$$T = \frac{2\pi}{1.000} \sqrt{L \cdot C} = 0,00629 \sqrt{L \cdot C};$$

T, période en secondes ; L, coefficient de self-induction en henrys, et C, capacité en microfarads.

Si l'on ne tient compte que de la capacité du conducteur, on a, si l

représente la longueur du conducteur en kilomètres, c' la capacité et l' le coefficient de self au kilomètre :

$$T = 0,00629l \sqrt{l' \cdot c'}.$$

Cette formule montre que la période de résonance augmente avec la longueur de la ligne (c'est-à-dire que la fréquence de résonance diminue).

Si le circuit est pourvu de capacité et de self-induction dans le cas d'un courant alternatif, les effets de résonance se produisent quand on a : $L \cdot C \cdot \omega^2 = 1$.

Les phénomènes de résonance peuvent amener des surélévations subites de tension très élevées, mais qui n'ont pas lieu quand le courant a une allure sinusoïdale, et qui sont amoindries dans les basses fréquences, inférieures à 50 périodes.

La force électromotrice de résonance du circuit est :

$$E = \frac{\infty LE}{R};$$

E , force électromotrice agissante considérée ; ∞ , fréquence ; R , résistance en ohms ; L en henrys. Le voltage de résonance E' peut décupler E ou voltage initial.

D'après la définition de la résonance donnée par Steinmetz, les demi-ondes se déplaçant dans un temps égal à celui nécessaire à la lumière pour parcourir deux fois la longueur de la ligne, si l est la longueur de la ligne en kilomètres, S la vitesse de la lumière (300.000 km : sec.), la fréquence des oscillations ou périodes naturelles de la ligne est :

$$f = \frac{S}{4l} = \frac{300.000}{4l} = \frac{75.000}{l}.$$

On voit que, pour obtenir la fréquence de résonance aux extrémités des lignes aériennes avec les fréquences usuelles, cela nécessiterait des lignes longues de 3.000 kilomètres avec 25 périodes et de 1.250 kilomètres avec 60 périodes. Mais si on applique le même raisonnement aux ondes se propageant dans les câbles ou dans les enroulements des machines et transformateurs on arrive à trouver pratiquement pour les conditions de résonance des valeurs qui se rapprochent des fréquences usuelles.

On considère comme surtensions normales, celles provenant d'une résonance plus ou moins parfaite, de la fermeture d'une ligne sur la source et de la coupure du courant. Les surtensions anormales sont localisées aux coupures de circuits accidentelles et aux extinctions de courts-

circuits. Les amorçages d'arcs par surélévation de voltage entre phases ont lieu beaucoup plus fréquemment que ceux occasionnés par des décharges atmosphériques.

Chaque brusque augmentation ou diminution de courant produit une perturbation dans l'énergie électromagnétique du système et à cette perturbation vient s'ajouter une oscillation qui détermine une surélévation de tension. Dans le cas d'un court-circuit (dû au contact accidentel de deux fils ou au fonctionnement simultané de deux ou plusieurs parafoudres pendant un orage), l'augmentation de tension peut aussi bien se produire à la station génératrice qu'à la station réceptrice ; le cas le plus dangereux pour la station génératrice est celui où le court-circuit se produit vers l'extrémité de la ligne, malgré la résistance qu'offre celle-ci.

A la fermeture du courant, la ligne est soumise à une tension double environ de celle de la source. Les résonances ne sont pas à craindre en général sur les distributions composées de lignes aériennes. En tout état de cause, il y a intérêt à réaliser une fermeture exacte et simultanée des 3 phases des interrupteurs à haute tension lorsqu'ils commandent des lignes aériennes de grande longueur. A l'ouverture du circuit la tension dépend du point de coupure sur la ligne et de la charge du circuit : elle peut être très élevée. L'énergie accumulée dans le champ magnétique d'une ligne ayant de la capacité se manifeste au point de rupture sous forme d'un arc et produit en même temps la charge du condensateur formé par la canalisation. Ce condensateur étant déjà chargé par la tension propre du réseau, il peut en résulter une tension résultante très élevée.

De fortes surtensions peuvent être également produites par suite d'une variation subite de charge sans qu'il y ait interruption complète du courant en un point ; elles sont souvent dangereuses pour les isolants. La valeur maxima de la surtension dans ce cas ne peut être atteinte que lors d'un court-circuit aux bornes d'un alternateur en pleine charge. Les autres causes sont : mise en courant des moteurs asynchrones et synchrones de grande puissance, mise en parallèle des alternateurs et le fonctionnement des commutatrices engendrant des harmoniques du 5^e et 7^e ordre. D'autre part, les basses fréquences sont plus dangereuses ; au-dessous de 25 périodes, les ruptures d'isolants de câbles ou de machines sont très fréquentes. Le rang de l'harmonique susceptible de résonner s'élève au fur et à mesure qu'augmente le nombre des appareils générateurs et récepteurs branchés sur le réseau. Spécialement la mise en service de transformateurs à vide sur un réseau peut amener des surtensions permanentes et parfois importantes. La fermeture d'un interrupteur sur un câble à vide ou peu chargé est une manœuvre dangereuse.

Pour déterminer les surélévations de tension et d'intensité à l'ouverture ou à la fermeture d'un circuit, il faut calculer l'énergie accumulée dans la ligne. Or, on sait que l'énergie en joules existant dans la ligne sous forme électromagnétique est $0,5LI^2$, et l'énergie sous forme électrostatique $0,5CE^2$, L et C exprimés en henrys et en farads. Si on ouvre la ligne au moment où le courant a l'intensité I , l'énergie accumulée est absorbée par la capacité de la ligne ; celle-ci se charge à une certaine différence de potentiel dépendant de ses constantes, puis elle se décharge à travers l'inductance de la ligne, se recharge, et ainsi de suite. En d'autres termes, il s'établit un courant oscillant jusqu'à ce qu'il soit dissipé par la résistance de la ligne.

On a :

$$0,5LI^2 = 0,5CE^2;$$

donc :

$$E = I \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{ou} \quad I = E \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

En remplaçant par les valeurs moyennes de C et L trouvées plus haut, on obtient :

$$E = 325I \quad \text{ou} \quad I = \frac{E}{325}.$$

On voit ainsi que la f. é. m. induite par l'ouverture d'un circuit est indépendante de la longueur de la ligne.

Supposons qu'on ouvre un interrupteur au moment où la valeur instantanée du courant est l'intensité de pleine charge dans une transmission de 20.000 kilowatts à 60.000 volts, la surtension par phase aura une valeur de :

$$\frac{\frac{20.000.000}{60.000} \times 325}{\sqrt{3}} = 60.000 \text{ volts.}$$

Le voltage total sera donc presque triplé. Mais, si l'on ne coupe que le courant de capacité, la surtension sera très faible, ce courant étant très peu intense. Si l'on relie la ligne aux alternateurs à l'instant où la f. é. m. est maxima, cette f. é. m. donnera naissance à un courant instantané d'une valeur :

$$I = \frac{34.750}{325} = 107 \text{ ampères,}$$

le chiffre 34.750 représentant la tension par phase de la distribution à 60.000 volts, tandis que le courant de capacité ne serait probablement pas supérieur à 10 ampères. Ces phénomènes de surtension et de surintensité

se produisent aussi bien dans les réseaux mis à la terre que dans les autres.

PROTECTION DES RÉSEAUX. — Les causes d'amortissement ou d'amoindrissement des surtensions sont : la résistance du circuit lui-même, l'effet Kelvin, les pertes dans les diélectriques et circuits dérivés, les circuits induits, courants de Foucault, hystérésis, radiation dans l'atmosphère par production d'ondes hertziennes ; changement dans les constantes de self et de capacité de la ligne, introduction d'une résistance artificielle en série dans le circuit, le retard de l'étincelle sur le pouvoir d'amorçage et le pouvoir d'auto-régulation des isolants.

La protection contre les surtensions doit être complète et efficace pour toutes les parties du réseau, machines, appareils, lignes, câbles, etc. Les dispositifs prévus sont généralement munis des relais à temps agissant directement sur l'interrupteur (qui a pour fonction de différer le moment de l'ouverture de l'interrupteur). Aux surtensions de faible durée et ne mettant en jeu que de faibles quantités d'énergie, on oppose des mesures préventives adaptées aux machines et à l'appareillage.

Pour remédier aux inconvénients produits par les surtensions, il faut soit établir les isolants des câbles, de telle sorte qu'ils puissent supporter des tensions doubles ou triples des tensions normales, soit introduire sur les réseaux des appareils jouant le rôle de soupapes de sûreté (limiteurs de courant, résistances, condensateurs). Un réseau isolé au triple de la tension normale résiste efficacement aux tensions de répercussion ; d'ailleurs, des limiteurs, réglés au double de cette tension normale protègent les câbles contre ces mêmes répercussions. Il est indispensable, quoi qu'il en soit, de surveiller attentivement un réseau lors de sa mise en marche, et après chaque modification, par des essais oscillographiques.

Une bonne méthode pour se prémunir contre les surtensions est la mise à la terre du point neutre ; dans les installations à très haut voltage, cette précaution est presque de toute nécessité, car, dans un réseau non mis à la terre, presque toutes les perturbations donnent lieu à de graves dangers.

La mise à la terre doit se faire par l'intermédiaire d'une résistance ohmique pour les lignes allant jusqu'à 30.000 et 40.000 volts. Au-dessus de ces voltages, il est préférable d'établir une mise à la terre directe.

Les essais de rupture des câbles en usiné doivent être faits au triple de la tension qu'ils auront à supporter en service courant. Après pose, on procède à un essai au double et on s'assure que l'installation ne donne pas de résonance d'harmoniques produisant des tensions supérieures à celles indiquées par le voltmètre.

Quant aux parafoudres, il est bon de les régler pour une tension quatre ou cinq fois supérieure à la normale. Les perturbations provenant de l'ouverture des interrupteurs sont atténuées par le fait de l'emploi d'in-

interrupteurs à huile ; avec les interrupteurs à air, il faut réduire d'autant plus la vitesse d'écartement des contacts que la tension normale de marche est plus basse.

Les parafoudres ordinaires peuvent jouer le rôle de déchargeurs statiques pour les circuits connectés en étoile avec point neutre mis à la terre ; dans ce cas, ils doivent être réglés en prévision de la tension entre conducteurs différents. Quand les circuits sont connectés en triangle ou que le point neutre n'est pas à la terre, les parafoudres demandent à être réglés pour la tension totale entre conducteurs et, dans ce cas, ils ne peuvent plus jouer efficacement le rôle de déchargeurs entre phases, parce qu'ils ne fonctionneraient que pour les tensions plus élevées.

Pour parer à cet inconvénient, la Compagnie Thomson-Houston complète ses parafoudres par une disposition offrant une notable capacité, disposition qui consiste à relier les points milieux des parafoudres établis sur chaque phase par une connexion spéciale à haute tension. Par suite, l'appareil s'amorce pour le même voltage qu'entre phases et terre. Quand le réseau à protéger est entièrement souterrain, les connexions avec la terre sont inutiles, et celles entre phases doivent seules subsister.

Une très faible charge sur un réseau suffit pour atténuer énormément les surtensions. D'après M. de Marchena, tant qu'il n'y a pas augmentation de la tension efficace, les harmoniques ne peuvent donner lieu à une surélévation de tension de plus de 40 0/0 de la tension maxima à laquelle donnerait lieu une sinusoïde parfaite.

Quoi qu'il en soit, il convient, pour la mise en circuits de puissants transformateurs ou de moteurs d'induction, de brancher en dérivation aux bornes de ces engins un condensateur à l'effet de limiter la surélévation de tension, condensateur que l'on peut d'ailleurs mettre hors circuit dès que le fonctionnement des moteurs est devenu régulier, mais en les intercalant à nouveau avant d'interrompre le courant.

D'après M. de Kermond ⁽¹⁾, l'emploi de condensateurs à la station génératrice ou dans une sous-station permet de protéger les lignes contre les effets des courants d'induction de haute fréquence, en permettant une mise à la terre permanente n'entraînant pour la station génératrice qu'une très faible perte de courant déwatté ⁽²⁾.

⁽¹⁾ *L'Électricien*, décembre 1906.

⁽²⁾ Selon MM. Feldmann et Herzog, de brusques variations de charge sur des lignes à courant continu peuvent provoquer des oscillations de fréquence élevée avec surtensions dont la valeur limite est donnée par l'expression : $1 \sqrt{\frac{L}{C}}$, dans le cas d'une ligne sans résistance, sans charge et parfaitement isolée. Les conducteurs aériens portant du courant continu donneraient ainsi lieu à des surtensions élevées. Quant à la rareté des accidents qui en résultent, elle tient au peu de durée du phénomène et à la faible quantité d'énergie mise en jeu, ainsi qu'à l'amortissement qui provient des appareils d'utilisation et d'un isolement imparfait.

Une autre cause de perturbations statiques est la concentration de potentiel sur les spires terminales des appareils. Pour protéger les lignes contre cette cause de dérangements, on peut, d'une part, isoler les spires terminales pour leur permettre de supporter cette élévation de tension, et, d'autre part, empêcher ces spires d'être soumises à une brusque variation de potentiel, par exemple, en fermant le circuit au travers d'une résistance, ou bien employer des bobines d'absorption placées entre les appareils et la ligne. Plus grande sera la réactance de la bobine, plus grand sera l'effet retardateur.

Dans les conditions actuelles d'établissement des transports d'énergie électrique et sous les fréquences usuelles, les surtensions par résonance deviennent improbables en raison de la faible inductance offerte par les machines génératrices. Il ne peut se produire de surtensions dangereuses sur les réseaux que par la présence de transformateurs à circuits secondaires ouverts, de groupements diphasés, triphasés ou scott particulièrement alimentés aux primaires. De même, les transformateurs montés en étoile sur le primaire et en triangle ouvert sur la basse tension sont à rejeter pour introduire sur le réseau d'alimentation une réactance élevée due à la bobine primaire correspondant au côté d'ouverture du triangle secondaire. Dans le même ordre d'idées, il faut citer : les montages comprenant des enroulements primaires associés en étoile, les secondaires étant composés de circuits séparés ou d'un groupement en Y à quatre fils ; les connexions en V fréquemment utilisées pour l'alimentation des petits moteurs.

Les alternateurs triphasés à bobinage étoilé complétés d'une connexion entre neutre et terre qui alimentent un réseau de capacité notable, une canalisation souterraine, par exemple, peuvent donner lieu à une surtension destructrice entre les conducteurs et la terre. Le phénomène est encore possible dans le cas d'un point neutre isolé.

Aux points dangereux des réseaux, par exemple au point de branchement d'une ligne aérienne et d'un câble, il ne doit pas être installé d'appareils de protection à distance explosive ; on peut, dans ce cas, connecter une batterie de condensateurs, combinée à une self-induction, et compléter par un jeu de bobines pour l'écoulement des charges statiques. On peut procéder de même aux points de branchement de câbles avec des régulateurs d'induction, des moteurs à haute tension, etc.

504. Chute de tension. — Dans une ligne, la tension au départ doit être de valeur suffisante pour compenser les effets dus aux forces électromotrices de self-induction et d'induction mutuelle dans les conducteurs voisins. La self a une valeur d'autant plus élevée que la ligne a une plus

grande longueur et que les conducteurs sont plus éloignés les uns que les autres.

Pratiquement, les phénomènes produits par la self et par l'induction mutuelle, qui n'impliquent du reste aucune augmentation de perte d'énergie, sont la cause qui nécessite un accroissement de quelques centièmes de la tension au départ de la ligne. La valeur de la force électromotrice due à ces effets, dans les conducteurs d'une ligne de 40 à 50 kilomètres de longueur, atteint rarement 15 0/0 de la valeur de la tension au départ de la ligne. Il y a lieu de remarquer que cette force électromotrice est décalée en retard de $1/4$ de période sur l'intensité et aussi sur la tension, si les récepteurs ne présentent pas d'induction.

L'induction que possède une longue ligne de transmission d'énergie est plus ou moins diminuée par la capacité de la ligne ; lorsque la ligne est en charge, l'inductance, qui augmente avec la charge de la ligne, produit une action opposée à celle de la capacité, et ces actions réciproques se neutralisent plus ou moins.

La capacité ne peut donner d'effets sensibles que lorsque la ligne est à vide, ou qu'il n'y a pas de charge. Ainsi, sur la ligne à courant triphasé de Saint-Georges (Aude), de 100 kilomètres de longueur, on a constaté que lorsque les alternateurs fonctionnent à la tension normale de 2.500 volts, le courant d'excitation, qui est de 12 ampères lorsque les câbles ne sont pas reliés à la ligne, tombe à 6 ampères lorsqu'ils sont en communication avec la ligne.

D'ailleurs, même à vide, il faut toujours une certaine intensité de courant de charge pour maintenir une différence de potentiel entre les armatures de l'espèce de condensateur formé par les conducteurs, les appuis et la terre.

Lorsque la ligne comporte des câbles souterrains et qu'elle est en charge, la capacité s'augmente de celle due aux câbles armés ainsi qu'aux moteurs synchrones surexcités et aux puissants transformateurs à haute tension.

Lorsque les conducteurs ont une grande intensité à transmettre, au lieu d'employer des câbles ou des fils d'un diamètre supérieur à 8 ou 9 millimètres, on installe plusieurs conducteurs de moindre section. On les dispose pour que les effets d'induction soient presque égaux sur chacun d'eux, afin d'éviter la production de courants parasites entre les fils constituant un même conducteur. Ces montages sont d'ailleurs d'une pratique courante. Dans une ligne double à courant triphasé, on peut rendre symétrique les effets de l'induction mutuelle sur chacune des séries de conducteurs en disposant les lignes en spirales, soit par exemple en divisant la ligne en trois sections, et, dans chacune de ces sections, en changeant la position des conducteurs ; on peut encore diviser la ligne en plusieurs parties, et dans chacune d'elles, divisée en trois sections, on opère de

même. Aux points où les conducteurs sont transposés, il faut établir deux appuis assez rapprochés l'un de l'autre pour que, dans le parcours où s'effectue le changement, les fils soient parfaitement tendus.

Quant aux générateurs, l'inductance agit sur eux de deux façons : elle tend à abaisser le voltage de la machine et elle nécessite un courant plus fort pour produire la même énergie. On peut se rendre un compte exact de l'inductance d'un système d'après son facteur de puissance, c'est-à-dire d'après le rapport entre l'énergie apparente donnée par le voltmètre et l'ampèremètre et l'énergie réelle indiquée par le wattmètre.

Pour une ligne à courant alternatif simple, on considère la valeur de la tension à l'arrivée, on y ajoute géométriquement la chute de tension (en phase avec l'intensité) due à la résistance complexe de la ligne et celle (décalée d'un angle $\frac{\pi}{2} + \delta$, par rapport à l'intensité) produite par l'inductance de la ligne entière. On obtient ainsi la valeur de la tension au départ de la ligne. Si on se donne la tension au départ, en retranchant géométriquement les deux chutes de tension précitées, on a alors la valeur de la tension disponible à l'arrivée.

Pour une ligne triphasée on opère de même en considérant une ligne monophasée imaginaire constituée par un des conducteurs et par un conducteur neutre hypothétique dont la réactance et la résistance auraient une valeur nulle. Autrement dit, on considère la tension d'un montage en étoile au départ ou bien à l'arrivée, et respectivement on retranche ou l'on ajoute les chutes de tension dues, d'une part à la résistance ohmique du conducteur et d'autre part à sa réactance apparente $2\pi \sim L_s$, le coeffi-

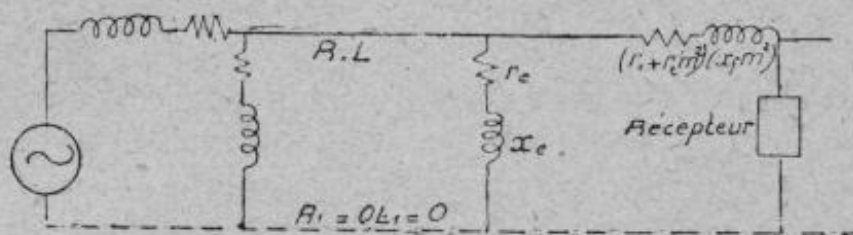


FIG. 1281.

cient de self induction apparente L_s ayant été préalablement calculé par la méthode indiquée dans le cas d'une ligne triphasée comportant plusieurs circuits. D'autre part, on ne doit pas négliger l'influence sur la chute de tension par les transformateurs-élévateurs ou abaisseurs de tension. On peut substituer à l'action du transformateur celles de simples impédances, l'une en dérivation sur la différence de potentiel du primaire qui est destinée à tenir compte des pertes qui se produisent lorsque le transformateur fonctionne à vide ; l'autre en série avec le circuit alimenté. Donc le circuit monophasé qu'il faut considérer dans le cas d'une transmission

triphasee doit être constitué comme l'indique la (fig. 1281) lorsqu'il y a des transformateurs tant à l'arrivée qu'au départ :

- 1° r_c résistance ohmique équivalente à l'impédance ;
- 2° x_c à calculer par le moyen du courant magnétisant ;
- 3° $(r_1 + r'_2 m^2)$, dans laquelle r_1 est la résistance du primaire du transformateur, r_2 celle du secondaire, m rapport de transformation ;
- 4° $x_f m^2$ réactance à substituer aux fuites magnétiques du transformateur.

Méthode graphique. — Appelons U_a le vecteur de la tension étoilée que l'on veut obtenir à l'arrivée (fig. 1282) s'il s'agit d'un circuit triphasé, ou bien le vecteur de la tension si le circuit est monophasé. On suppose d'abord qu'il n'y a pas de transformateurs, et soit I le vecteur de l'intensité du courant dans le circuit du récepteur auquel correspond la tension U_a décalée d'un angle φ par suite de la réactance du circuit d'utilisation.

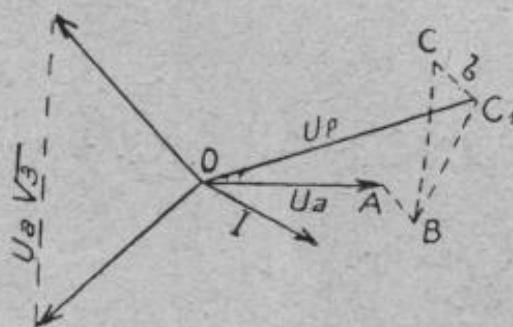


FIG. 1282.

En AB, en concordance de phase avec I , on porte un segment, à l'échelle choisie pour les tensions, représentant la chute ohmique de tension $R_1 I$ dans la ligne, R_1 étant la résistance d'un seul conducteur si le circuit est triphasé ou bien celle de la ligne (aller et retour) si le circuit est monophasé.

Puis on porte en BC un segment $\omega L_{s1} I = 2\pi f L_{s1} I$ dans une direction perpendiculaire au vecteur de l'intensité en prenant pour L_{s1} , qui doit être exprimé en henrys, une valeur convenable, suivant que le circuit est triphasé ou monophasé.

Dans le cas d'un circuit triphasé, si l'inductance apparente de chacun des conducteurs n'est pas égale pour tous, on fait tourner le vecteur BC de l'angle δ correspondant, en le portant en BC_1 . Dans ces conditions $OC_1 = U_p$ donne la valeur en grandeur en phase de la tension qu'il faut établir au départ pour obtenir au point d'utilisation la tension U_a , lorsque la charge est telle qu'elle nécessite une intensité I avec un facteur de puissance égale à $\cos \varphi$.

Si la ligne comporte un transformateur à l'arrivée ou bien un à l'arrivée et un au départ, les résistances et les réactances, correspondant aux impédances que l'on substitue aux transformateurs, doivent être ajoutées à la résistance et à la réactance apparente de la ligne. Il faut seulement observer que la force électromotrice due à la réactance des transformateurs est en retard de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au vecteur de l'intensité, tandis que celle

qui est due à la réactance de la ligne est en retard de $\frac{\pi}{2} + \delta$ lorsqu'on est en présence d'un circuit triphasé présentant des inductances apparentes différentes pour chacun des conducteurs.

Méthode analytique. — Soient $I \cos \varphi$ et $I \sin \varphi$, la première la valeur de la composante énergétique et la seconde de la composante magnétisante de l'intensité ; on cherche pour chacune d'elles la chute de tension due à l'impédance $Z_1 = \sqrt{R_t^2 + \omega^2 L_t^2}$ ou R_t est la somme de toutes les résistances et L_t la somme de toutes les inductances.

L'impédance totale de la ligne, transformateurs compris, est exprimée en valeur symbolique par :

$$Z_t = R_t + j\omega L_t,$$

$Z_t I$ représentant la chute de tension qui en résulte (fig. 1283). La valeur

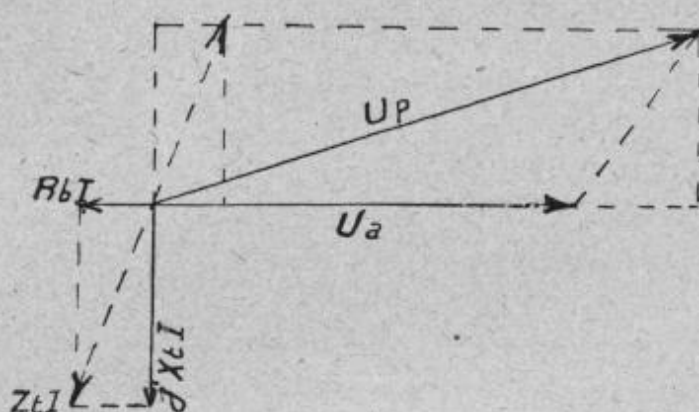


FIG. 1283.

de la tension au point d'utilisation étant donnée, cette chute de tension doit en être retranchée géométriquement pour obtenir la valeur de la tension au départ ; cette dernière est la somme géométrique de la tension à l'arrivée et de la force

électromotrice qui compense exactement la chute de tension qui est :

$$Z_t I = (R_t + j\omega L_t) I.$$

On a donc, dans le cas de l'intensité en concordance de phase avec la tension à l'arrivée :

$$U_p = U_a + (Z_t) I.$$

Et lorsque I est décalé par rapport à U_a d'un angle φ :

$$(U_p) = U_a + (Z_t) (I \cos \varphi - j I \sin \varphi)$$

et en développant :

$$(U_p) = U_a + I \cos \varphi (R_t + j\omega L_t) - j I \sin \varphi (R_t + j\omega L_t).$$

La réactance d'un fil de ligne aérienne peut être prise en pratique

comme se confondant avec son inductance. Si nous appelons R la résistance de la ligne et K sa réactance, l'impédance d'un fil est reliée aux deux termes R et K par l'expression :

$$z^2 = R^2 + K^2.$$

M. A. Blondel, à qui la science électrique est redevable de tant de travaux remarquables, aussi bien au point de vue expérimental qu'à ceux analytique et mathématique, a donné le moyen de calculer la perte de tension produite par l'impédance des lignes par l'application de la formule ci-après :

$$u = I \sqrt{\left(\frac{u'}{I} + \cos \varphi + \omega L \sin \varphi\right)^2 + (\omega L \cos \varphi - R \sin \varphi)^2},$$

dans laquelle u est la tension au départ de la ligne et u' celle à l'arrivée, R la résistance totale, I le courant et L l'inductance totale apparente.

Le diagramme représenté par la (fig. 1234) permet de déterminer faci-

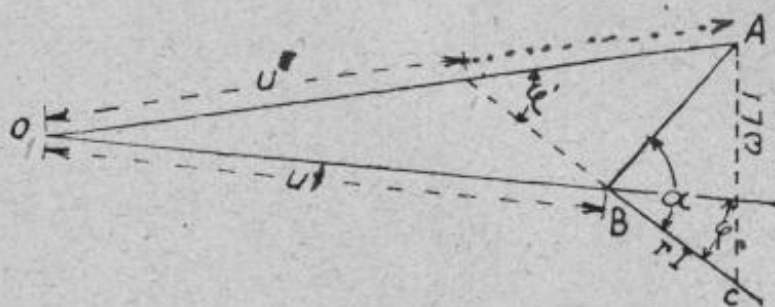


FIG. 1234.

lement la chute de tension ($OA - OB$), l'angle de décalage φ entre le courant et la différence de potentiel, le voltage u' étant donné. On peut également déterminer le décalage φ' à l'origine de la ligne. Dans le cas d'une ligne à double fil, rI et ωLI sont le double des valeurs pour un fil et, pour une ligne triphasée, rI et ωLI sont les valeurs trouvées pour un fil, mais u et u' sont les différences de potentiel étoilées et non entre fils.

En général, on s'arrange pour que les pertes soient très faibles, alors Bc est très petit, et la chute de tension pouvant être prise égale à AB , on a :

$$u - u' = AB \frac{rI}{\cos \alpha}.$$

Dans ce cas, le rapport de la chute totale à la chute ohmique est : $\frac{1}{\cos \alpha}$. Quand $\cos \alpha$ est plus grand que $\cos \varphi$, le décalage à l'origine de la ligne est plus petit qu'à l'extrémité et, au cas contraire, il est plus



grand ($\cos \varphi > \cos \varphi'$), et alors, pour la même énergie à transmettre, l'intensité du courant doit être augmentée.

Le tableau ci-après donne, pour des fils espacés de 50 centimètres et pour des tensions inférieures à 20.000 volts, les valeurs de ωL , de $\cos \alpha$ et de $\frac{1}{\cos \alpha}$ (ce dernier étant le coefficient par lequel on doit multiplier la chute ohmique pour avoir le maximum de chute réelle pour des fréquences de 50 à la seconde, cas le plus ordinaire).

	DIAMÈTRE DES FILS EN MILLIMÈTRES								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Résistance en ohms par kilomètre	2,400	1,360	0,870	0,600	0,450	0,340	0,260	0,210	0,170
Valeurs de ωL en unités pratiques au kilomètre.....	0,381	0,363	0,349	0,337	0,327	0,319	0,312	0,305	0,299
Valeurs de $\cos \alpha$	0,987	0,967	0,928	0,872	0,809	0,728	0,640	0,568	0,494
Valeurs de $\frac{1}{\cos \alpha}$	1,010	1,030	1,080	1,150	1,240	1,370	1,560	1,760	2,020

Calcul de la chute de tension, en tenant compte de la capacitance. — Nous appelons : r , la résistance par unité de longueur de la ligne ;

L_s , la self-induction par unité de longueur de la ligne ;

c , la capacité par unité de longueur de la ligne ;

i , l'intensité du courant de charge par unité de longueur de la ligne ;

U_0 , la différence de potentiel aux bornes de la génératrice ;

U , la différence de potentiel aux bornes de la réceptrice ;

L , la longueur totale de la ligne ;

ω , la fréquence ;

j , avec la valeur indiquée ci-avant.

Le courant de charge traversant un élément de la ligne dx à une distance x du récepteur est :

$$i_x = + Uc jx = \omega.$$

La tension absorbée par l'élément de ligne dx est (récepteur en circuit ouvert) :

$$de = + jUc\omega x (r - j l \omega) dx ;$$

d'où on tire, en intégrant :

$$u = + j \frac{ix}{2} (rx - j l x \omega) = + j \frac{I_c}{2} (R - j L_s \omega) ;$$

I_c courant de charge, R résistance de la longueur totale de la ligne.

Par cette formule on se rend compte, si le courant de charge est le même pour chaque unité de longueur de la ligne, l'on peut supposer la capacité concentrée au centre de gravité de la capacité de charge.

Le pourcentage d'élévation de la tension serait pratiquement égal à :

$$u = \frac{C\omega L_s\omega}{2} 100,$$

où C est la capacité totale de la ligne.

D'autre part :

$$U_0 = U + u = U + j \frac{I_c}{2} (R + jL_s\omega).$$

La valeur de I_c peut être obtenue au moyen de l'équation :

$$I_c = UC\omega \text{ ou } I_c = U_0C\omega,$$

sans erreur appréciable du pourcentage d'élévation de la tension.

Dans le cas où le circuit du récepteur est chargé on a, pour la tension absorbée dans la ligne, en appelant θ l'angle de retard de la charge du récepteur :

$$u = I \cos \theta (R + jL_s\omega) - j I \sin \theta (R + jL_s\omega) + j \frac{I_c}{2} \left(1 + \frac{p}{3 \times 100} \right) (R + jL_s\omega).$$

Le pourcentage d'élévation de tension dû au courant de charge sera inférieur à :

$$\frac{C\omega}{2} \left(1 + \frac{p}{3 \times 100} \right) L_s\omega 100.$$

Si l'on fait $C\omega \times \frac{L_s\omega}{2} 100 = 4$,

et que l'on donne à p une valeur atteignant 20 (tension de la génératrice 20 0/0 plus élevée que celle du récepteur), on obtient :

$$4 \text{ 0/0 } \left(1 + \frac{20}{300} \right) = 4,24 \text{ 0/0}.$$

L'erreur commise en supposant le courant de charge constant est de 10 0/0 de la tension de la ligne.

Le courant de charge peut donc être considéré comme constant et par conséquent écrire :

$$U_0 = U + u = U + I \cos \theta (R + jL_s\omega) - j I \sin \theta (R + jL_s\omega) + j \frac{I_c}{2} (R + jL_s\omega).$$

On voit ainsi que chaque composante du courant du récepteur est appelée à surmonter l'impédance de la ligne entière, et la composante de la capacité à surmonter l'impédance, du centre de la ligne au générateur.

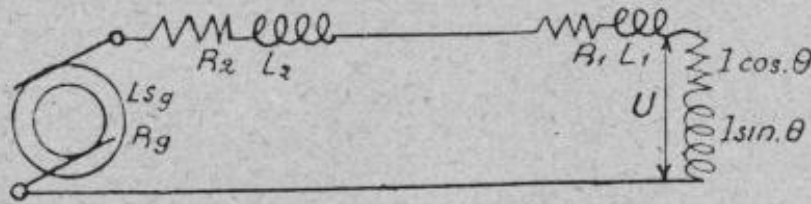


FIG. 1285.

Soient (*fig. 1285*) : R_1 résistance équivalente des transformateurs-réducteurs ;

R_2 , résistance équivalente des transformateurs-élevateurs ;

L_{s1} , self-induction équivalente des transformateurs-réducteurs ;

L_{s2} , self-induction équivalente des transformateurs-élevateurs ;

R_g , résistance de la génératrice ;

L_{sg} , self-induction de la génératrice ;

R , résistance de la ligne ;

L_s self-induction de la ligne.

Puis : $Ll = L_{s1} + L_{s2} + L_{sg} + L_s$;

$Rl = R_1 + R_2 + R_g + R$.

La différence de potentiel produite est :

$$U_g = U + I \cos \theta (R_l + j L_{st} \omega) - j I \sin \theta (R_l + j L_{st} \omega) + j I_c \left\{ \left(\frac{R}{2} + R_2 + R_g \right) + \left(\frac{L_s}{2} + L_{s2} + L_{sg} \right) \omega \right\}.$$

Cette équation peut être résolue par rapport à U_g plus facilement si on écrit :

$$U_g = \left\{ U + I \cos \theta R_l + I \sin \theta L_{st} \omega - I_c \left(\frac{L_s}{2} + L_{s2} + L_{sg} \right) \omega \right\} + j \left\{ I \cos \theta L_{st} \omega - I \sin \theta R_l + I_c \left(\frac{R}{2} + R_2 + R_g \right) \omega \right\}.$$

On additionne les termes entre crochets avant d'extraire la racine carrée de la somme des carrés.

La (*fig. 1286*) montre la méthode de régulation pour charge variable et facteur de puissance constante.

La grandeur de *ce* est proportionnelle à I , c'est-à-dire à la charge pour un facteur de puissance constant, puisque $ce = I \cos \theta (Rl + j L_{st} \omega)$.

La grandeur *eg* est proportionnelle à la charge puisque

$$eg = j \frac{W}{U} \tan \theta (R_l + j L_{st} \omega);$$

eg est toujours tracé perpendiculaire à ce . Les triangles cde et efg sont toujours semblables et, pour un facteur de puissance constant, augmentent dans le même rapport. Pendant que le point e se déplace le long de ce , le point g se meut suivant eg , la ligne eg faisant un angle θ avec ce . Si le courant commence par l'angle θ , le lieu géométrique de g sera le long de cg' . Si la tension du récepteur doit rester constante avec une tension constante au générateur, le lieu géométrique de g doit se trouver sur l'arc de cercle partant de c avec oc comme rayon.

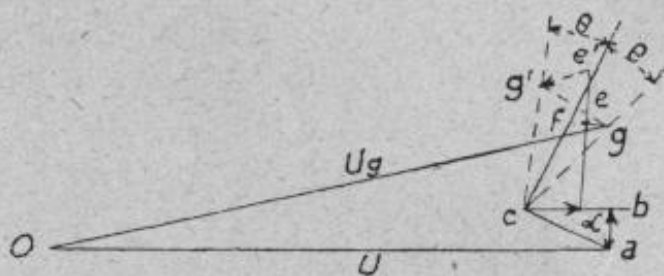


FIG. 1286.

S'il y a une charge inductive au récepteur la régulation sera très peu satisfaisante à moins que fg décroisse plus rapidement que cd ne s'accroît ; cd décroît avec la charge et fg augmente ou diminue selon que $\frac{W}{U} \tan \theta$, augmente ou diminue.

Pour le tracé du diagramme on a :

$$\begin{aligned} ab &= +j \frac{I_c R}{2}; \quad bc = -\frac{I_c L_s \omega}{2}; \quad cd = +I \cos \theta R; \\ de &= +j I \cos \theta L_s \omega; \quad ef = j I R \sin \theta; \quad fg = +I L_s \omega \sin \theta \\ &\text{et } UI \cos \theta = W \text{ (constante).} \end{aligned}$$

Pour maintenir constante la tension du récepteur, la composante dominante du courant $I \sin \theta$ doit s'accroître à mesure que la charge augmente, ou bien θ doit varier du retard à l'avance.

Le calcul de la réactance dans un réseau triphasé dont les fils sont disposés suivant les sommets d'un triangle équilatéral ne présente aucune difficulté. Il n'en est pas de même lorsque la symétrie n'existe pas. Il faut alors tenir compte de la force électromotrice induite dans chaque fil par la variation du flux à laquelle il est soumis. Celui-ci est la résultante de quatre composantes : les flux produits par le courant traversant le conducteur dans l'intérieur de celui-ci et à l'extérieur ; les flux produits par chacun des deux autres courants. Le diagramme représenté ci-contre (fig. 1287) est le résultat de calculs établis par M. Brown.

Pour un fil de diamètre r , éloigné des fils voisins par les distances d_1 et d_2 , on fait le calcul de d_1 et d_2 . On cherche sur le diagramme le point de rencontre des lignes obliques correspondant respectivement à la valeur de ces deux rapports. L'abscisse du point d'intersection donne la valeur de la réactance en centièmes d'ohm. Il faut noter que le diagramme s'ap-

plique à la fréquence 60. Pour les autres fréquences, on sait que la réactance est directement proportionnelle au nombre de périodes par seconde.

Pour le cas où les fils sont dans un même plan, tout se passe, suivant le sens du courant, comme si un des fils extrêmes avait une résistance ohmique majorée, et l'autre fil une résistance ohmique diminuée arithmé-

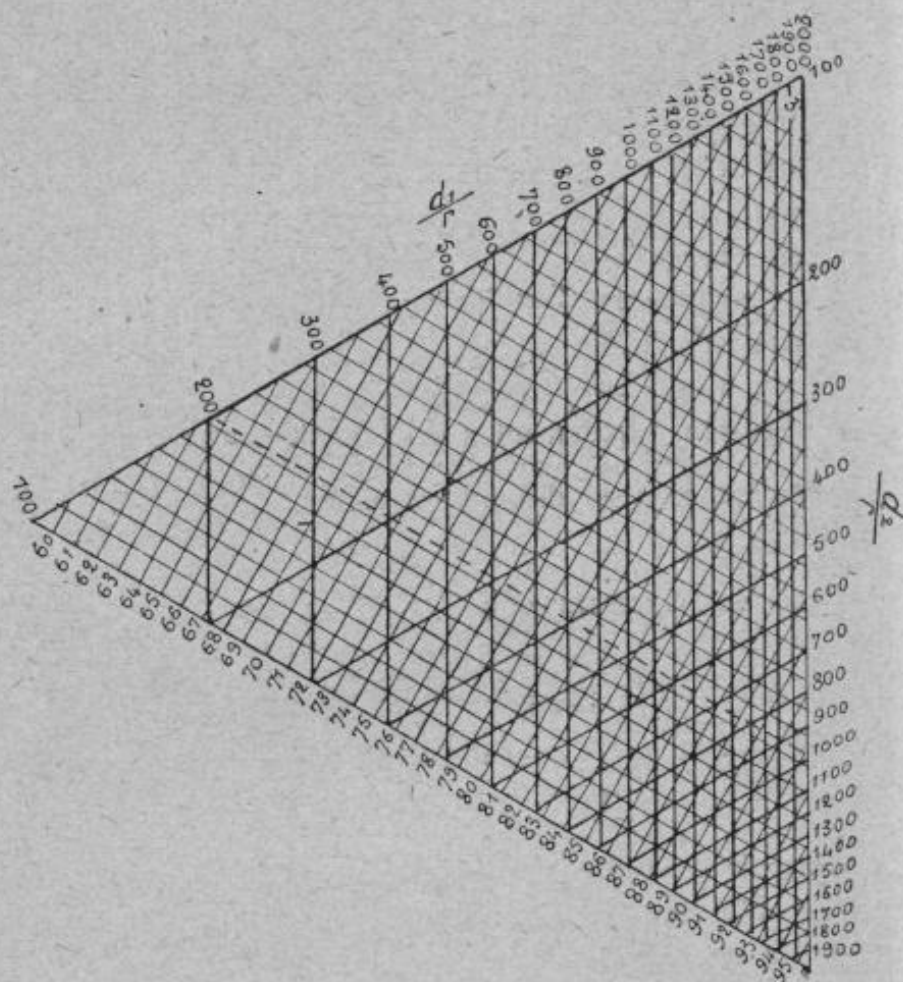


FIG. 1287. — Diagramme des réactances. — Ohms par mille.

tiquement d'une certaine valeur. Cette valeur est de 0,073 ohm par mille à 60 périodes.

Cette valeur constante s'applique pour toutes distances entre les fils quelle qu'en soit la valeur absolue, pour que le fil du milieu soit équidistant des deux autres.

505. Courant de charge. — Surélévation de tension. — Le courant de charge mesuré au départ n'augmente pas proportionnellement à la longueur de la ligne ; à tout instant, les valeurs de l'intensité et de la tension et par suite du décalage varient de point en point le long de la ligne. Par suite des pertes par dérivation à la terre provenant des appuis

et de celles entre conducteurs à travers l'air et par les isolateurs, l'intensité baisse d'une façon uniforme et aussi la tension. Successivement la tension au départ varie ainsi que l'intensité ; mais l'affaiblissement de leur valeur reste toujours constant, car il est dû seulement aux pertes.

Sur la ligne triphasée de Saint-Georges (Aude), en sectionnant la ligne, on a constaté, la station des alternateurs ayant sa valeur normale, que l'intensité mesurée à la tension génératrice avait les valeurs suivantes :

Longueurs en kilomètres : 12, 62, 72, 83, 100.

Courant de charge : 0, 68, 78, 52, 38,

Dans les calculs relatifs aux lignes triphasées, le plus simple est ordinairement de considérer une seule branche de la ligne, en supposant que le retour du courant se fait par un conducteur neutre sans réactance ni résistance. Le conducteur neutre peut être fictif ou réel, mis à la terre ou non et les fils de ligne supposés placés au sommet d'un triangle.

La capacité entre chaque fil et le conducteur neutre supposé placé au centre du triangle équilatéral a pour valeur :

$$C = \frac{1}{2 \log e \frac{d}{r}},$$

en unités électrostatiques par centimètre de la ligne. Si l'on exprime C en microfarads par kilomètre, le courant de charge par kilomètre et par fil à la tension E entre fils et à la fréquence ω est :

$$I = \frac{E \cdot C \cdot 2 \cdot n\omega}{\sqrt{3} \cdot 10^6}.$$

Le courant de charge d'une ligne triphasée est $\frac{2}{\sqrt{3}}$ fois plus grand (15,5 0/0) que celui d'une ligne monophasée, d , r et E étant les mêmes dans les deux cas.

Nous rappellerons que la fréquence du courant ne varie guère avec l'écartement de la ligne, car, lorsque cet écart augmente, la self croît et la capacité décroît ; mais elle dépend de la longueur de la ligne, et, la réduction de fréquence diminuant le courant de charge, il s'ensuit que, de ce fait, la chute de tension se rapproche de RI de la ligne. Aussi, pour les longues lignes de transport, la fréquence 60 apparaît comme exagérée.

L'élévation de voltage due au courant de capacité (celle-ci pouvant toujours être considérée en pratique comme concentrée au milieu de la ligne) provient de l'influence de la réactance de la moitié de la ligne (entre l'alternateur et le condensateur fictif) sur le courant de charge. On a pour la valeur de l'élévation de tension : $\frac{iL2\pi\omega}{2}$. Comme le courant de charge

varie proportionnellement à la tension en ligne, le taux pour cent d'élévation de tension ne dépend pas de la tension en ligne ⁽¹⁾.

Le taux pour cent du voltage de réactance, pour un courant donné I , peut se calculer par l'expression suivante, l étant la longueur de la ligne en kilomètres : $\frac{l \times L \times 2\pi\omega I'}{\sqrt{3} E} \times 100$; L , self-induction en henrys par

kilomètre, et I' , self-induction par fil et par centimètre, dont les valeurs sont données par les expressions suivantes :

$$L = 0,0002 \left[2,303 \log \left(\frac{d}{r} \right) + 0,25 \right] \quad \text{et} \quad I' = 2 \left[\log \left(\frac{d}{r} \right) + \frac{1}{4} \right].$$

Pour une ligne triphasée, on peut prendre la self-induction, pour un fil et pour la moitié de la ligne, égale à 0,05 henry par 100 kilomètres ou $L = 0,05L'$, L' étant la longueur de la ligne en centaines de kilomètres ; quant à C , il peut être pris égal à 1,25 microfarad par 100 kilomètres, ou :

$$C = \frac{1,25L'}{10^6} \text{ farads.}$$

Approximativement on prend :

$$\omega = \frac{640}{L'} \quad \text{et} \quad V = 200 I.$$

Soit un courant efficace de 100 ampères ; si l'on coupe le courant au moment du maximum, on a : $V = 200 \times 100 \sqrt{2} = 28.200$ volts, tension qui se superpose à la tension normale de distribution, de sorte que la tension maxima T , possible pour l'interruption d'un courant quelconque est :

$$T = E \sqrt{2} + 200 I \sqrt{2};$$

E , voltage entre le fil de ligne et le neutre, et I , courant coupé. En réalité, le courant n'est pas coupé instantanément ; il se forme un arc qui réduit la surélévation de tension.

Pour une fréquence de 60, en raison de la chute de tension due à la réactance, il semble que l'intensité par conducteur pour les longues transmissions (200 à 300 kilomètres) doit être limitée à 100 ampères environ. Ainsi un courant d'une intensité de 100 ampères, à la fréquence 60 et à la tension de 50.000 volts entre fils, sur une ligne de 320 kilomètres, donne lieu à une baisse de tension par la self-induction d'environ 50 0/0. Si on admet que les alternateurs donnent un courant de court-circuit égal à quatre fois le courant normal, un court-circuit au milieu, de la ligne, pro-

(1) F.-G. Baum, *Revue électrique*, 1905.

duirait un courant à peu près double du courant normal, de sorte que l'élévation maxima de tension due à la coupure du court-circuit serait d'environ 56.000 volts.

Maintenant supposons une fréquence de 25 ou 30 périodes, de façon qu'on puisse transmettre environ 500 ampères par phase sans self-induction excessive, il faudra que l'isolement puisse résister à la tension normale entre fil de ligne et neutre, soit dans l'exemple précédent, 30.000 volts, augmentée de la surélévation accidentelle, ce qui donne :

$$30.000 \sqrt{2} + 200 \times 500 \sqrt{2} = 130.000 \sqrt{2} = 183.000 \text{ volts.}$$

Dans ce qui précède, on a fait l'hypothèse d'une longue ligne de transmission n'ayant qu'un circuit récepteur à son extrémité. En pratique, la charge est distribuée sur tout le parcours de la ligne, de sorte que l'énergie potentielle peut se décharger en partie dans les divers circuits récepteurs, ce qui diminue l'élévation de tension.

Pour les lignes triphasées à quatre fils destinées à alimenter des moteurs et des lampes, il faut donner au fil neutre une section rationnelle tenant compte des chutes ou surélévations de tension qu'entraîne le déséquilibre des ponts. On trouve, à ce sujet, une remarquable étude de M. Guyau dans *la Lumière électrique* du 28 février 1909.

D'autre part, il existe des moyens pratiques d'obtenir l'équilibrage des réseaux triphasés à quatre fils. On peut, par exemple, ramener à l'alternateur ou à un transformateur le neutre du primaire (procédé coûteux), ou bien employer un enroulement triangle-étoile, mais qui nécessite des transformateurs assez chers, lorsqu'il s'agit de faibles puissances ou de hautes tensions ; mieux vaut faire usage de la connexion étoile-zigzag, proposée par M. Peck. Enfin l'emploi d'auto-transformateurs d'équilibre fournit une solution avantageuse dans certains cas, ces appareils étant placés aux points où se trouvent les charges de lumière, et dispensant ainsi d'avoir le fil neutre sur toute la longueur des canalisations. Ces appareils ont leurs enroulements interconnectés, de façon qu'un courant dans le fil neutre intéresse les trois phases.

506. Régulation de la tension en ligne. — Cette régulation est d'importance capitale. On peut la déterminer par la méthode ci-après, qui est assez simple. On a tout d'abord trois tensions à considérer : 1° tension aux bornes du circuit récepteur ; 2° chute de tension en ligne ; 3° tension au point de départ de la ligne. La chute de tension comprend la perte ohmique et le voltage de réactance.

Le plus simple est de considérer le courant total des récepteurs comme composé de deux parties : la composante wattée et la composante

déwattée, qu'on regarde chacune comme circulant isolément sur la ligne.

La composante wattée du courant récepteur est $I \cos \theta$, et celle déwattée $I \sin \theta$. Soit oa (fig. 1288) la tension réceptrice (E), la chute de tension due

à l'action de la résistance et de la réactance de la ligne sur la composante wattée du courant récepteur est :

$$I \cos \theta \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}.$$

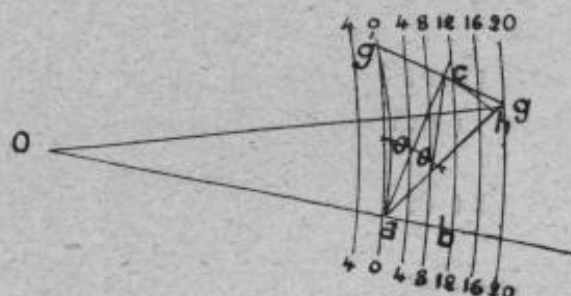


FIG. 1288.

Dans la figure, ac représente en grandeur et direction la tension perdue en ligne par la

composante wattée du courant récepteur. On a aussi :

$$cg = I \sin \theta \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2},$$

qui représente en grandeur et en direction la tension perdue en ligne par la composante déwattée du courant récepteur. Le vecteur ag représente en grandeur et direction la tension perdue en ligne par le courant récepteur total. Par suite, og est la tension au départ (E_0) de la ligne, et ac figure la tension perdue en ligne par le courant de pleine charge. Si, de a comme centre et avec un arc de rayon égal à ac , on décrit un arc de cercle, pour une intensité de courant égale à celle de pleine charge, et pour un facteur de puissance correspondant à l'angle θ , la valeur de E_0 est donnée par oh . Enfin, si de O comme centre on décrit des arcs de cercle par les points $a, 4, 8, \dots$, la distance radiale entre deux arcs successifs sera de 40/0 de la tension aux bornes du circuit récepteur. On voit par là que $ab = 80/0$ de la tension réceptrice, c'est-à-dire que la perte RI^2 dans la ligne est de 80/0 à pleine charge non inductive. La position du point c montre que la régulation de la ligne considérée, à pleine charge et pour un circuit de récepteur non inductif, est de 100/0, c'est-à-dire que la tension au départ de la ligne doit être de 100/0 plus élevée que la tension aux bornes réceptrices. A pleine charge, en kilowatts, à un facteur de puissance correspondant à l'angle θ , la régulation est de 200/0 (point g) ; à pleine charge, en kilovolts-ampères, c'est-à-dire pour le même courant que dans le premier cas, avec même facteur de puissance que dans le second, la régulation est de 180/0 (point h).

Dans les réseaux à courant alternatif on emploie, pour régler la tension de distribution depuis l'usine génératrice, deux transformateurs de mesure dont les enroulements secondaires sont en série avec un voltmètre. Sur l'enroulement primaire d'un des transformateurs agit la tension aux

barres du tableau ; sur l'autre agit une grandeur proportionnelle à l'intensité du courant et à l'impédance de la ligne de transmission et en phase avec le courant. Les indications du voltmètre relié aux enroulements à basse tension des transformateurs sont proportionnelles à la tension existant aux points de distribution.

II. — MÉTHODES GRAPHIQUES POUR LE CALCUL DES LIGNES A HAUTE TENSION

En raison de l'importance qu'ont prise les longues lignes de transmission d'énergie électrique, la question de leur rendement en énergie et celle de la propagation du courant le long de leurs parcours préoccupent au plus haut point les ingénieurs chargés d'étudier les projets de ce genre.

Pour le calcul des lignes, on les décompose en tronçons dont on détermine la résistance, la self, la capacité et au besoin les fuites, et l'on construit le graphique des courants et des tensions avec tous ces éléments. On a ainsi une vérification de la tension, de l'intensité, et le moyen de suivre les phénomènes en tous les points de la ligne. Ce qu'il s'agit de mettre en lumière, ce sont les effets secondaires que l'on traduit à l'aide d'épure à grande échelle et avec le plus grand soin ; sans quoi on n'a de résultats que sur les effets principaux, ce que l'on se contente généralement de faire pour les lignes ordinaires.

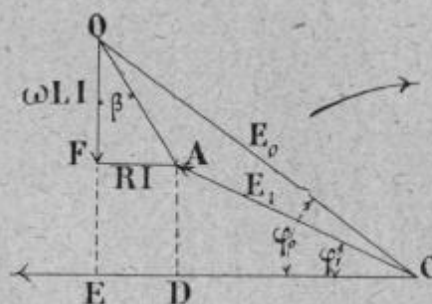


FIG. 1239.

507. **Méthode de M. Claveleira.** — Lorsqu'on s'en tient à la détermination de la puissance à transmettre et du diamètre du conducteur, la méthode ci-après, due à M. Claveleira, ingénieur de la Société Parisienne électrique à Jeumont, facilite considérablement les calculs.

Soient E_1 la tension aux bornes du récepteur, φ_1 son déphasage par rapport au courant I , R la résistance ohmique de la ligne, ωL sa réactance, η le rapport de la puissance p perdue en ligne à la puissance P transmise au récepteur, E_0 la tension aux bornes de la génératrice, et φ_0 son déphasage; le diagramme représenté par la (fig. 1289) va permettre de déterminer les valeurs de ces deux dernières quantités en fonction de celles qui précèdent (1).

(¹) *Revue électrique*, septembre 1905.

A cet effet on trace une ligne CA faisant un angle φ_1 avec une direction arbitraire CE représentant la direction du vecteur I, et on porte sur cette ligne une longueur CA proportionnelle à E_1 ; puis, par le point A, on mène une parallèle à CE ayant une longueur AF égale à RI; enfin, en F, on élève sur AF une perpendiculaire FO égale à ωLI ; on a en O l'extrémité du vecteur E_0 , et l'angle ECO donne φ_0 .

La connaissance du rapport η permet de simplifier la construction. En effet on a :

$$\frac{ED}{DC} = \frac{RI}{E_1 \cos \varphi_1} = \frac{RI^2}{E_1 \cos \varphi_1} = \frac{P}{P} = \eta.$$

De sorte que, pour avoir le point F, il suffit de porter, suivant AF, une longueur égale à ηDC . On peut également simplifier la détermination du point O en calculant l'angle β par la relation :

$$\text{tang } \beta = \frac{AF}{FO} = \frac{R}{\omega L}.$$

Mais R peut être facilement calculé en fonction de la puissance du récepteur par les formules connues :

$$R = \frac{\eta E_1^2 \cos^2 \varphi_1}{2P} \text{ (distribution monophasée à 2 fils),}$$

$$R = \frac{4\eta E_1^2 \cos^2 \varphi_1}{3,41P} \text{ (distribution diphasée à 2 fils),}$$

$$R = \frac{\eta E_1^2 \cos^2 \varphi_1}{P} \text{ (distribution triphasée à 3 fils),}$$

où R désigne la résistance d'un fil.

Connaissant R, on en déduit facilement le diamètre des fils. D'autre part, la distance entre fils est fixée par la valeur de E_1 . Ayant ainsi déterminé le diamètre et la distance, on trouve ωL par les tableaux contenus dans les formulaires d'électricité. On voit donc que, pour avoir E_0 et $\cos \varphi_0$, il suffit de se donner $P_1 E_1 \cos \varphi_1$ (connus par les caractéristiques du récepteur) et η .

Applications. — L'on peut se proposer, connaissant la force électromotrice E_0 à l'origine de la ligne (force électromotrice que l'on suppose invariable), de déterminer : 1° la puissance pouvant être transmise en fonction de $\cos \varphi_0$ du récepteur, en supposant que la ligne existe (c'est-à-dire que l'on connaît les valeurs totales de la résistance et de la réactance de la ligne); 2° les dimensions des fils de ligne en fonction du $\cos \varphi_1$ du récepteur, en supposant que la puissance effective transmise, située à une distance connue l du générateur, soit égale à une valeur imposée P. Dans les deux cas, il est supposé que les récepteurs ne sont pas construits, mais

qu'ils le seront d'après les résultats donnés par l'étude, et l'on s'impose la valeur du rapport η précédemment défini.

PREMIER CAS. — *La ligne existe, quelle puissance peut-on transmettre ?* — Sur une droite indéfinie Ox (fig. 1290), on porte une longueur OC égale à E_0 . Sur cette même droite et à partir de C , on prend CB égale à $\frac{OB}{BC} = \eta$.

Cette valeur de CB est évidemment donnée par l'expression : $\frac{E_0}{1 + \eta}$.

Puis, sur chacune des longueurs CB et CO comme diamètres, on décrit les circonférences CDB et CEO .

Supposons que l'on mène du point C une droite quelconque figurant la direction du courant débité et coupant en E et en D les circonférences que l'on vient de tracer ; joignons les points D et B d'une part, et E et O d'autre part, et choisissons sur la droite OE un point F tel que l'on ait, entre les longueurs OF et FA (FA étant égale et parallèle à ED), la relation $\frac{AF}{OF} = \tan \eta$. Comme, d'ailleurs, on aura toujours : $\frac{DE}{CD} = \eta$, la droite CA représentera la force électromotrice appliquée au récepteur correspondant à un facteur de puissance égal à $\cos ACD$.

Maintenant, il faut chercher le lieu des points tels que A ou extrémités des vecteurs figurant les forces électromotrices appliquées au récepteur.

En désignant par α l'angle formé par la direction du courant CD et par la force électromotrice au générateur, on a évidemment :

$$ED = RI = OB \cos \alpha,$$

d'où :

$$I = \frac{\eta E_0}{(1 + \eta) R} \cos \alpha; \quad (1)$$

I sera donc proportionnel à $\cos \alpha$. Or, comme la droite $OA = I \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ est proportionnelle à I , elle sera elle-même proportionnelle à $\cos \alpha$. Le point A se déplacera donc sur une circonférence de diamètre égal à :

$$OG = \frac{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}{R} \frac{\eta E_0}{1 + \eta}; \quad (2)$$

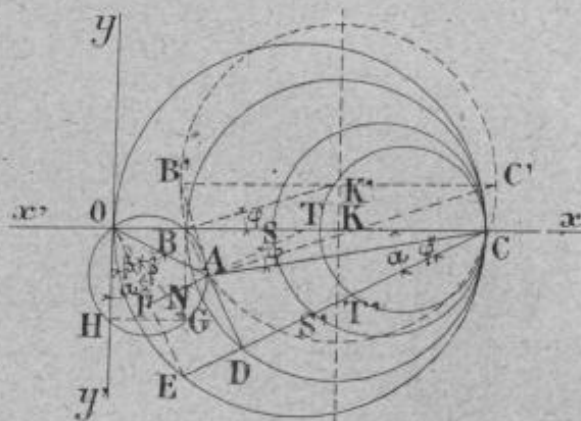


FIG. 1290.

faisant avec la direction Oy un angle égal à l'angle constant β (puisque l'on a angle $AOG = \alpha$).

D'ailleurs, la perpendiculaire abaissée du point B sur OC limite sur la direction OG , faisant avec Oy' un angle β , une longueur égale précisément à la valeur de OG . En effet, on a :

$$\overline{OG}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{BG}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{OB}^2 \frac{1}{\tan^2 \beta}; \quad \overline{OG}^2 = \frac{\eta^2 E_0^2}{(1 + \eta)^2} \left(1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2} \right);$$

et :

$$OG = \frac{\eta E_0}{1 + \eta} \frac{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}{R}.$$

Le lieu des points sera donc la circonférence $OBGH$.

Traçons une circonférence passant par les trois points BC et A , et soit $B'K'C'$ le diamètre de cette circonférence, parallèle à BC . Du point A élevons une perpendiculaire AP sur BD , on a évidemment :

$$\text{angle } BAB' + CAC' = KBK'; \quad \text{angle } BAB' = PAC' = CAC',$$

c'est-à-dire que :

$$\text{angle } PAC = KBK' = \varphi,$$

$\cos \varphi$ étant le facteur de puissance du récepteur.

Enfin, il faut remarquer que l'on a comme expression de la puissance absorbée par le récepteur :

$$P = I \times CD = I \frac{E_0}{1 + \eta} \cos \alpha,$$

ou, en remplaçant I par sa valeur (1) :

$$P = \frac{\eta \times E_0^2}{R (1 + \eta)^2} \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

ou encore :

$$\sqrt{P} = \sqrt{\frac{\eta}{R}} \frac{E_0}{1 + \eta} \cos \alpha \quad \text{et} \quad \sqrt{P} = \text{const.} \cos \alpha.$$

Par conséquent, si, sur xx' et à partir du point C , on porte à une certaine échelle une longueur CS égale à $\frac{E_0'}{1 + \eta} \sqrt{\frac{\eta}{R}}$, et si, sur cette longueur comme diamètre, on décrit une circonférence, celle-ci interceptera, sur la direction du courant CD , une longueur CS' égale, à l'échelle choisie, à la racine carrée de la puissance cherchée. Une seconde circonférence, tracée sur $CT = \frac{\eta E_0}{R (1 + \eta)}$ comme diamètre, interceptera des longueurs telles que CT' , figurant en grandeur et en direction les courants débités.

En résumé, si l'on se fixe une valeur de $\cos \varphi$, facteur de puissance du récepteur, voici dans quel ordre il conviendra de construire le diagramme.

On tracera d'abord les circonférences CDB et CEO, puis la circonférence lieu du point A. Ensuite on mènera du point B une droite faisant, avec BC, l'angle φ donné, et du point K', où cette droite coupera la perpendiculaire élevée au milieu de BC, on tracera une circonférence avec K'B comme rayon.

On joindra le point A, où cette dernière circonférence coupe la circonférence lieu des extrémités des forces électromotrices appliquées au récepteur, au point B. On prolongera la droite ainsi obtenue jusqu'au point D, où elle coupe la circonférence tracée sur BC comme diamètre.

Enfin, sur CS et CT comme diamètres, on tracera deux circonférences (ou même, afin de ne pas compliquer la figure, il sera inutile de tracer ces circonférences, et l'on pourra se baser, en appropriant les échelles, sur l'une des deux circonférences tracées sur CO ou sur CB).

On obtiendra ainsi : en CA, la force électromotrice appliquée au récepteur ; en CD, la direction du courant ; en ED, la chute ohmique dans le ou les fils de ligne ; en OF, la chute réactive ; en CS, la racine carrée de la puissance effective pouvant être transmise, et en CT', la valeur du courant.

REMARQUE. — Le point N, où la circonférence lieu du point A coupe la circonférence tracée sur BC comme diamètre, correspond au récepteur à décalage nul.

Toutes les circonférences telles que B'AC', dont les centres sont situés au-dessus de OC, correspondent aux récepteurs à décalage positif (appareils inductifs). Celles dont le centre se trouvent en dessous de OC correspondent aux récepteurs à décalage négatif (tels que les capacités, par exemple).

Les points de la circonférence lieu des points A, situés sur l'arc NBO, correspondent aux récepteurs à décalage positif. En s'éloignant du point N sur cet arc, les puissances pouvant être transmises décroissent progressivement et deviennent nulles quand le point A se confond avec le point O. A ce moment, la valeur φ est égale à $+90^\circ$.

Les points de cette même circonférence situés sur l'arc NHO correspondent aux récepteurs à décalage négatif. Les courants avancent par rapport aux forces électromotrices appliquées au récepteur. On voit qu'en partant du point N sur cet arc, les puissances pouvant être alimentées augmentent jusqu'à ce que le point A se confonde avec G, puis diminuent et deviennent nulles quand on arrive au point O. A ce moment la valeur de φ est égale à -90° .

Le diagramme montre également que, pour les appareils à décalage négatif, la force électromotrice appliquée au récepteur peut dépasser la valeur de la force électromotrice du générateur. La force électromotrice

La construction géométrique de cette courbe serait assez compliquée, et le mieux est de la tracer par points d'après le procédé suivant :

On sait que :

$$I = \frac{P (1 + \eta)}{E_0 \cos \alpha} \quad \text{et} \quad RI = \frac{1 + \eta}{\eta} E_0 \cos \alpha. \quad (4)$$

D'où, en remplaçant I par sa valeur :

$$R = E_0^2 \cos^2 \alpha \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \frac{1}{P} = \frac{4\rho l}{\pi d^2},$$

d désignant le diamètre des fils employés ; d'où :

$$d^2 = \frac{4\rho l (1 + \eta)^2 P}{\pi E_0^2 \cos^2 \alpha \times \eta};$$

et enfin :

$$d = \frac{2 (1 + \eta)}{E_0} \sqrt{\frac{\rho l P}{\pi \eta}} \sec \alpha = K \sec \alpha. \quad (5)$$

En portant donc, à partir du point C, sur la direction xx' , une longueur égale à la constante K, et en élevant du point d ainsi obtenu une perpendiculaire sur la direction xx' , cette perpendiculaire interceptera sur les droites menées du point C, et figurant les directions des courants, des longueurs mesurant les diamètres des fils correspondant à ces directions. Comme on connaît d'ailleurs la distance entre fils (déterminée d'après la grandeur de E_0), on pourra trouver les réactances ωL correspondantes.

Par exemple, la direction du courant CD coupera en d_1 la perpendiculaire élevée du point d, et CD_1 mesurera le diamètre du conducteur correspondant.

Les tableaux des formulaires donneront immédiatement la valeur de ωL et, comme la connaissance du diamètre permet également de calculer la résistance R des conducteurs, on peut tracer la circonférence OBG_1 , passant par le point G_1 et déterminée par la relation :

$$BG_1 = OB \frac{\omega L}{R}.$$

La droite joignant le point D_1 au point B coupera la circonférence ainsi tracée en A_1 , point du lieu cherché.

La droite limitée aux points C et A_1 figurera la force électromotrice appliquée au récepteur, et l'angle A_1CD_1 correspondra au facteur de puissance de celui-ci. Ainsi, pour chacune des directions de courant CD_1 , CD_2 , CD_3 ,..., on pourra tracer les circonférences OBG_1 , OBG_2 , OBG_3 ,..., et trouver les points A_1 , A_2 , A_3 ,..., du lieu cherché. En particulier, la longueur Cd correspondant au plus petit diamètre de fil pouvant être em-

ployé permettra de trouver le point P où la courbe lieu des points A coupe l'axe yy' .

Il faut remarquer, d'ailleurs, que sur chacune des circonférences ainsi tracées seront situés deux points du lieu (A_1 et A'_1 , A_2 et A'_2 ...) correspondant à deux valeurs égales en valeur absolue, mais de signes contraires, de l'angle mesurant le décalage du courant par rapport à la force électromotrice au générateur.

On obtient rapidement par ce procédé quelques points de la courbe lieu des points A, assez rapprochés pour que la forme de celle-ci soit suffisamment déterminée.

Enfin, la relation (4) montre que la perpendiculaire élevée sur xx' du point I, telle que la longueur :

$$CI = \frac{P(1 + \eta)}{E_0},$$

limite sur les directions CD_1 , CD_2 , CD_3 ,..., des longueurs CI_1 , CI_2 , CI_3 ,..., qui mesurent à l'échelle choisie les courants correspondant à ces directions.

Tracé du diagramme. — Après avoir tracé le lieu des points A, on mène, ainsi qu'on l'a fait dans le premier cas, une droite faisant avec BC un angle égal à φ_1 ; puis, du point K' où cette droite coupe la perpendiculaire élevée sur xx' , du centre de la circonférence CD_1B on décrit, avec K'B comme rayon, un arc de cercle dont le point d'intersection avec le lieu des points A fixera l'extrémité de la force électromotrice appliquée au récepteur, correspondant à la puissance et au $\cos \varphi_1$ donnés. On complète la construction comme dans le cas précédent.

On a ainsi : en Cd_1 , le diamètre du fil à employer ; en CI_1 , la grandeur et la direction du courant absorbé par le récepteur ; en CA_1 , la force électromotrice appliquée au récepteur.

On peut d'ailleurs, dans le but de faciliter la discussion du problème, obtenir, à l'aide du diagramme, des courbes en coordonnées cartésiennes représentant les variations de différents éléments en fonction de l'un d'eux.

REMARQUE. — Comme dans le cas précédent, le point N, où le lieu des points A rencontre la circonférence tracée sur BC comme diamètre, correspond à un décalage nul du courant par rapport à la force électromotrice appliquée au récepteur. Les directions NB et NJ du lieu des points A correspondent respectivement à des décalages positifs et négatifs.

MÉTHODES DE M. A. BLONDEL

Les méthodes graphiques de M. A. Blondel donnent sous une forme pratique tout ce qui est nécessaire pour le calcul graphique dans le cas

d'une ligne débitant à son extrémité d'arrivée, présentant ou non une distribution de puissance uniformément répartie. Dans les cas plus complexes où la ligne alimente un petit nombre de gros centres de distribution, on opère par cheminement partant du point d'arrivée et des valeurs de la tension et du courant en ce même point, en traitant chaque tronçon compris entre ces points de consommation par les mêmes méthodes qu'un tronçon isolé qui débite un courant connu à son extrémité aval sous une tension connue. A chaque tronçon on applique les constantes correspondantes aux sections des conducteurs employés dans ce tronçon.

508. Lignes de transmission à capacité négligeable ⁽¹⁾. — Soient : x la longueur de la ligne ; $M_1O = U_1$ le vecteur représentatif de la tension à l'arrivée et Oq le courant I_1 , supposé d'abord en phase avec la force électromotrice ; r , l et z , respectivement les résistance, inductance et impédance par unité de longueur et R , L , Z , les valeurs *totalisées* correspondantes pour un fil de la ligne. On prend une longueur $Oq = r x I_1 = R I_1$ qui représente la chute ohmique, puis on trace la perpendiculaire $Qq = \omega l x I_1 = \omega L I_1$, qui représente la chute inductive ; l'hypoténuse OQ du triangle (*fig. 1292*) représente la chute totale $z x I_1 = Z I_1$, due à l'inductance de la ligne, et M_1Q figurera la tension au départ.

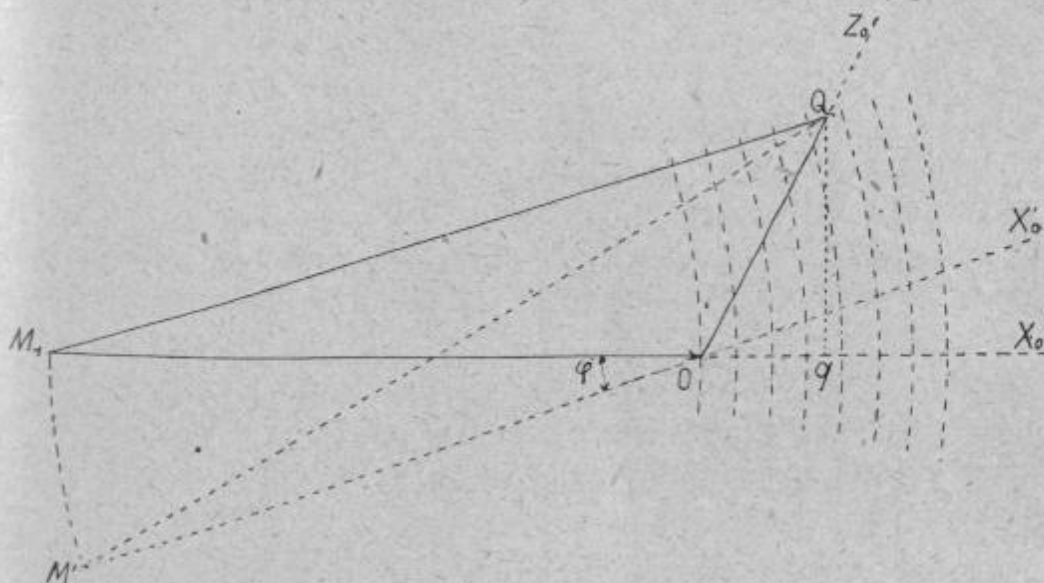


FIG. 1292. — Premier problème. — Recherche de la tension au départ correspondant à divers régimes avec la tension d'arrivée constante.

Si le courant, au lieu d'être en phase avec le courant d'arrivée, est décalé d'un angle φ , il suffit de décaler le vecteur de la chute de tension Oq d'un angle φ en retard (dans le sens des aiguilles d'une montre), ou, ce

⁽¹⁾ *La Lumière électrique*, 28 août 1909, A. Blondel.

qui revient au même, de décaler du même angle φ dans le sens opposé, le vecteur OM_1 représentant la tension d'arrivée, qui vient ainsi en OM' . M. A. Blondel s'est arrêté à cette dernière méthode de décalage en regard de l'application spéciale qu'il avait en vue et que nous exposons plus loin.

Au lieu de faire le tracé et la mesure de la ligne M_1Q dans chaque cas, on peut, comme le montre la figure en pointillé, tracer à l'avance autour du point M_1 toute une série de cercles concentriques équidistants, correspondant à des tensions différentes, qu'on peut inscrire sur chaque cercle ; ces derniers permettent alors d'évaluer à la vue, par simple interpolation, la tension au départ correspondant à chaque point Q qui caractérise le régime du courant débité dans le cas où l'on suppose constante la tension à l'extrémité de la ligne représentée par M_1O .

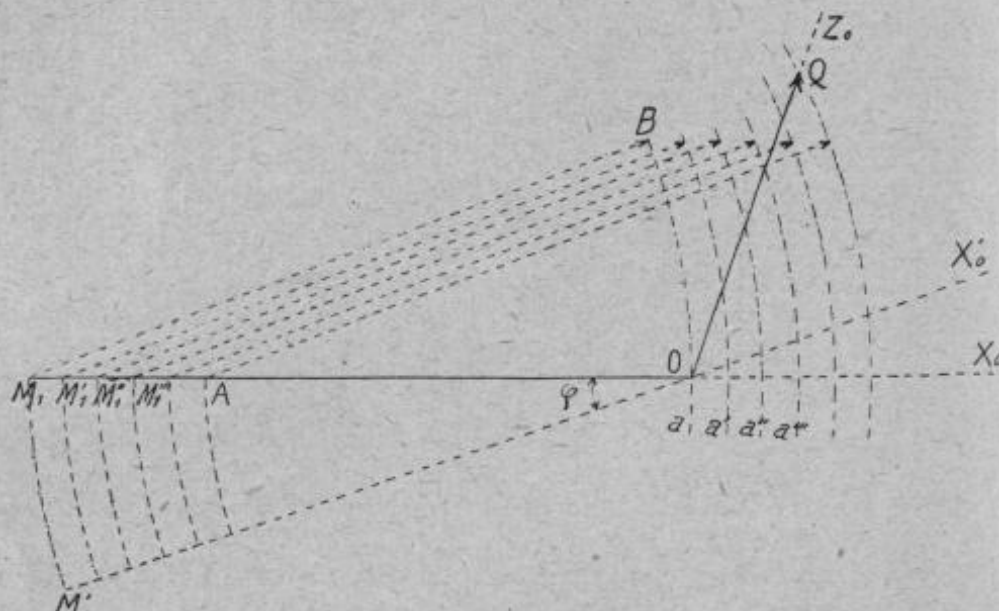


FIG. 1293. — Deuxième problème. — Détermination de la chute de tension en partant d'une tension constante.

M. A. Blondel s'est posé le problème sous une forme inverse en se proposant de déterminer quelle est la chute de tension correspondant à chaque régime quand la tension au départ est donnée, et égale à M_1O par exemple ; l'épure doit être alors modifiée comme l'indique la (fig. 1293). Ayant déterminé comme plus haut le vecteur de chute de tension OQ , on trace de Q comme centre avec un rayon égal à OM_1 un cercle dont on prend l'intersection A par exemple avec la ligne M_1X_0 ; la longueur AO indique alors la tension à l'arrivée ; elle varie naturellement suivant la position du point Q .

Comme plus haut, on peut remplacer cette construction spéciale pour chaque régime par un tracé préalable de cercles d'égal potentiel ; mais ceux-ci sont alors établis d'une manière un peu différente de tout à

l'heure, parce que leur rayon représente la tension du départ qui est constante. On prend donc sur la direction MO une série de points équidistants M_1, M'_1, M''_1 , etc., comme centres successifs des cercles a, a', a'' ayant tous ce même rayon ; chacun d'eux correspond à une tension d'arrivée différente représentée par la distance de son centre respectif au point O (tension qu'on peut inscrire à côté de chaque cercle). La position du point Q par rapport aux cercles indique donc la tension d'arrivée correspondante.

On remarquera aussi qu'on peut tenir compte d'un décalage du courant, en déplaçant de l'angle φ soit le vecteur OQ de la chute de tension, soit l'axe $M_1X'_0$ de la tension au départ ; c'est cette dernière solution qui est représentée. Naturellement, tous les centres des cercles et tous les cercles eux-mêmes doivent suivre le même changement d'orientation.

Ces figures contiennent la solution de tous les problèmes qu'on peut rencontrer dans le calcul des lignes ⁽¹⁾.

Les épures des (fig. 1292 et 1293) ont fourni à M. A. Blondel immédiatement la solution d'un problème important pour la pratique, celui de la construction d'un *abaque* permettant de déterminer, par simple lecture directe, la section d'un conducteur nécessaire pour transmettre une certaine intensité de courant (quelconque), à une certaine distance (quelconque), avec une certaine chute de tension (quelconque).

Et cet abaque peut se construire, comme on va le voir, avec le minimum de théorie et de calculs.

On commence par tracer pour la fréquence choisie toute une série de droites OQ correspondant à une série de conducteurs de diamètres différents, choisis parmi ceux dont on peut prévoir à l'avance l'emploi. Ces droites sont déterminées en direction par la simple connaissance de la self-induction et de la résistance kilométrique du conducteur qui se calculent par les formules ⁽²⁾ :

$$r = \frac{\rho}{s} \text{ (C. G. S.)} = 17,4 \frac{\text{ohms-km}}{\text{mm}^2},$$

$$\text{ol} = \frac{1}{2} + 2 \log \frac{D}{a} \text{ (C. G. S.)} = \frac{0,500 + 4,605 (\text{lov. } D - \text{lov. } a)}{10} \frac{\text{henrys}}{\text{km}},$$

en appelant a le rayon du conducteur et D la distance entre les axes des fils mesurés tous deux en centimètres et en représentant (suivant la notation de Vassal) les logarithmes vulgaires par le symbole *lov*, et les logarithmes népériens par *log*.

⁽¹⁾ M. A. Blondel en a donné différents exemples dans la *Lumière électrique*, t. II, n° 19, du 28 mars 1908.

⁽²⁾ En pratique, on prend comme unités de résistance et de self-induction les valeurs rapportées au kilomètre et au millimètre carré. C'est ce qui explique la présence des puissances de 10 qu'on ne rencontre pas quand on emploie les unités C. G. S.

L'espacement D entre les conducteurs est fixé, d'après la tension qu'on doit employer, par des considérations de construction.

La chute de tension étoilée (c'est-à-dire mesurée entre fil et point neutre de la distribution) ⁽¹⁾, à une distance x (évaluée en kilomètres), sous l'influence du courant I ayant pour valeur :

$$u = xI = \sqrt{r^2 + \omega^2 l^2} (xI),$$

est proportionnelle au produit xI de la longueur en kilomètres par le courant débité en ampères, c'est-à-dire à la valeur des ampères-kilomètres ; et il est dès lors naturel de prendre comme variables les *ampères-kilomètres* (fig. 1294).

On calculera donc, pour chaque conducteur, la chute de tension avec une série de nombres ronds d'ampères-kilomètres, et on marquera sur la droite OQ correspondante, dont la direction a été déterminée comme on vient de le dire, les divisions correspondantes. Les longueurs tracées ainsi sur chaque ligne OQ sont évaluées en volts ; on n'inscrit pas le chiffre des volts, mais bien celui des ampères-kilomètres correspondants. On marque par exemple sur chaque ligne OQ les points correspondant à 10, 20, 30, 40 ampères-kilomètres, si l'on prévoit des intensités et des distances de cet ordre de grandeur ; ou bien 100, 200, 300, etc., ampères-kilomètres, si l'on a affaire à des intensités et des distances plus grandes, etc. Ces divisions peuvent se faire en calculant la chute de tension pour le plus grand chiffre xI , et formant ensuite les divisions intermédiaires à l'aide d'un compas de proportion.

Une fois qu'on a tracé ces divisions sur toutes les lignes rayonnantes OQ , OQ' , OQ'' , etc., qui se rapportent aux différents diamètres de conducteurs, on réunit par des courbes d'*égal ampère-kilométrage* les points correspondants des différentes lignes rayonnantes. Ce réseau de courbes qui sont des logarithmiques, comme on le montrera plus loin, rend la lecture plus facile, puisque chaque courbe est désignée par un chiffre d'ampères-kilomètres qui dispense de le répéter sur chaque ligne graduée, et permet de faire les interpolations entre les diamètres des conducteurs calculés.

L'ensemble des lignes rayonnantes et des courbes constitue ce que M. A. Blondel appelle l'*abaque fixe* des chutes de tension.

Pour évaluer les tensions absolues aux deux extrémités de la ligne, M. A. Blondel détermine d'autre part d'après les (fig. 1293 et 1294), un

(1) Si l'on veut la tension *entre fils*, il faut multiplier la tension étoilée par 2 dans le cas d'une ligne monophasée, et par $\sqrt{3}$ dans le cas d'une ligne triphasée. Si on veut envisager directement dans les formules la tension entre fils, dans le cas du monophasé il faut doubler les valeurs des résistances et selfs données plus haut.

abaque *mobile* sur papier calque (ou toile transparente) qui porte un point de repère fixe ou pôle O' destiné à être mis en coïncidence avec le pôle O de l'abaque fixe ; on fait tourner plus ou moins cet abaque mobile suivant le décalage comme on va le voir. On choisit entre les deux types des cercles des figures ci-avant, suivant qu'on se propose de calculer la ten-

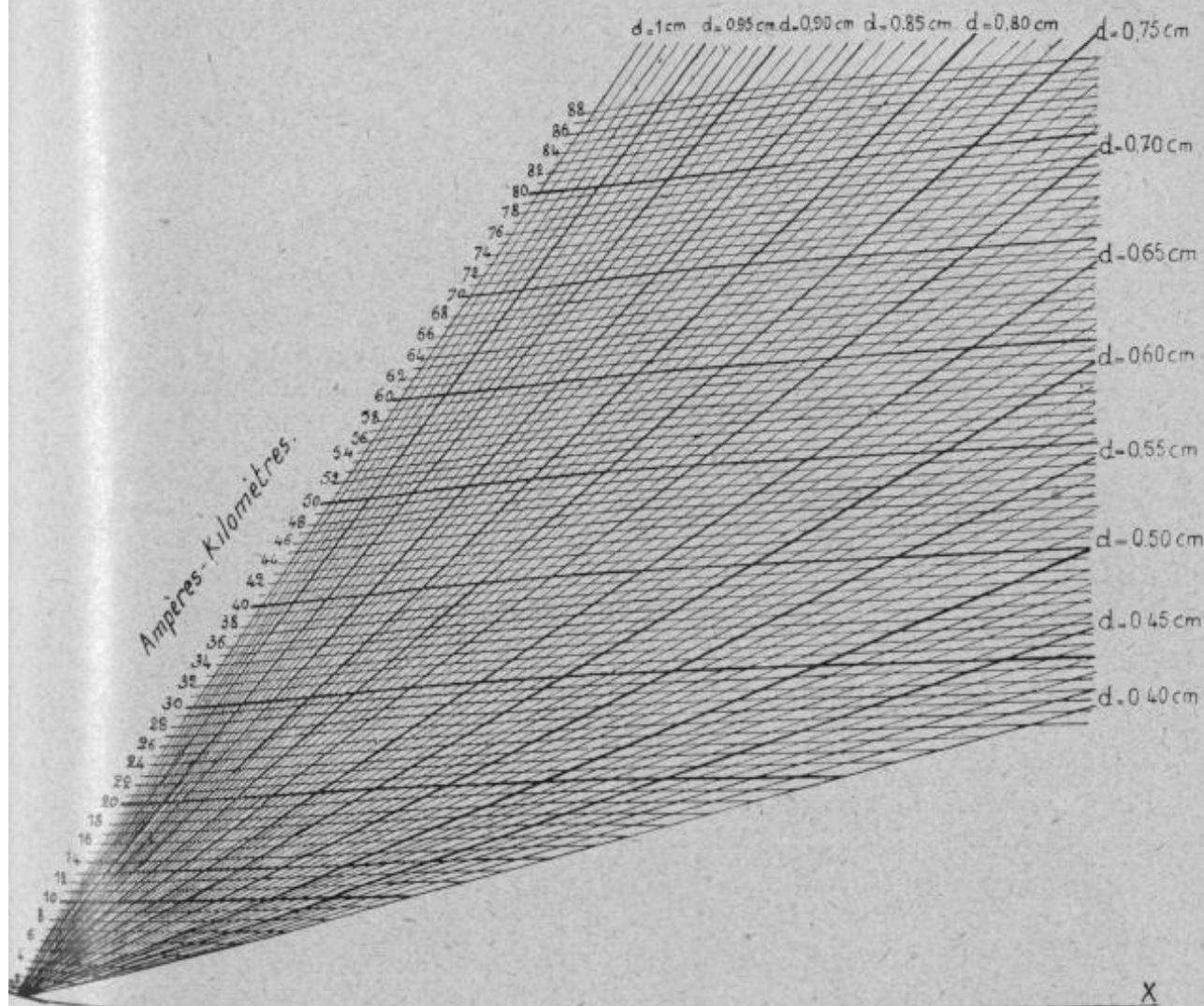


FIG. 1294. — Abaque fixe.

sion au départ correspondant à une tension d'arrivée fixée d'avance (ce qui est le cas dans un calcul d'une ligne de transmission aboutissant à un centre de distribution), ou bien qu'on veuille au contraire calculer la tension au départ fixée d'avance (ce qui est le cas du calcul de branchements d'un réseau de distribution à partir d'un centre de distribution dont la tension est fixée).

PREMIER CAS. — *Lignes de transmission aboutissant à un centre de distribution.* — Comme sur la (fig. 1293), on trace une série de cercles a, a', a'', a''' concentriques, correspondant à des tensions également espacées

et croissant à partir de la tension d'arrivée fixée, tout en restant dans les limites qu'on sait à l'avance ne pas devoir dépasser ; par exemple, si l'on veut réaliser une tension normale à l'arrivée $U_1 = 5.000$ volts sans perdre dans les lignes plus de 10 0/0, on trace un premier cercle de rayon MO représentant 5.000 volts à la même échelle que celle qui a été employée pour mesurer les volts sur l'abaque fixe, puis une série d'autres cercles concentriques de rayons croissant, par exemple, de 50 en 50 volts si l'on veut une approximation de 1 0/0 (ou de 100 en 100 volts si on désire une approximation de 2 0/0, etc.) (1).

On numérote ces cercles d'égale tension en indiquant sur chacun le nombre des volts correspondants, 5.000, 5.050, 5.100, 5.150, etc., ces chiffres croissant de gauche à droite.

L'abaque mobile s'emploie de la manière suivante : on maintient son pôle O' en concordance avec celui O de l'abaque fixe au moyen d'une épingle ; on place l'axe $O'X'_0$ en concordance avec l'axe OX_0 de l'abaque fixe s'il n'y a pas de décalage au courant ; dans le cas contraire, on déplace $O'X'_0$ dans le sens inverse des aiguilles d'une montre d'un angle φ égal au décalage qu'on veut réaliser. Soit, par exemple, à distribuer la puissance P sous la tension U_1 entre fils avec le décalage φ ; on en déduit l'intensité du courant correspondant :

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi},$$

dans le cas des courants monophasés ; ou :

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi \sqrt{3}},$$

s'il s'agit de courants triphasés. Dans ce cas la tension étoilée $U_1 = \frac{U}{\sqrt{3}}$.

La distance x étant connue, on en déduit le produit $xI = m$ ampères-kilomètres. Il n'y a plus qu'à prendre l'intersection de la courbe de m ampères-kilomètres (qu'on peut tracer, à l'œil, par interpolation si elle ne correspond pas avec une des courbes déjà tracées) avec le cercle a, a' , par exemple, correspondant à la tension maxima au départ qu'on ne veut pas dépasser ; le point d'intersection n détermine, par sa position au milieu du faisceau des droites OQ , le diamètre du conducteur nécessaire (2).

(1) Ces constructions devant être exécutées à grande échelle, on devra se servir en général d'un compas à verge pour tracer les cercles d'égale tension ; l'abaque mobile ne contiendra donc pas le centre des cercles qui est beaucoup trop éloigné du pôle O mais seulement tout un réseau de cercles contenant en son milieu l'axe $O'X'_0$.

(2) Si n tombe sur une des lignes rayonnantes OQ' , celle-ci indique le diamètre ; s'il tombe entre deux lignes, on interpole au jugé d'après la distance à ces deux droites.

DEUXIÈME CAS. — *Lignes rayonnantes à partir d'un centre de distribution.*

— L'abaque mobile se construit suivant la (fig. 1293) ; la seule différence avec le précédent est que les cercles ne sont plus concentriques, mais parallèles et tous construits avec un même rayon égal à la tension U_0 au départ. En outre, la graduation se fait par échelons décroissants au lieu d'échelons croissants. Par exemple, si l'on a 5.000 volts de tension de distribution et qu'on veuille tracer un réseau de cercles de 50 en 50 volts, on garde le rayon M_1O égal à 5.000 volts à l'échelle des volts et on déplace le centre de 50 en 50 volts vers la droite. Le premier cercle sera numéroté 5.000 volts, et le cercle suivant à droite 4.950, puis le suivant 4.900, etc.

A part cette différence, l'abaque mobile s'emploie exactement de la même manière que le précédent, c'est-à-dire en plaçant le pôle en coïncidence avec celui de l'abaque fixe et en faisant tourner l'axe $O'X'_0$ sinistrorsum d'un angle égal au décalage des courants prévus. Tout point de l'abaque fixe qui correspond à un certain diamètre et un certain nombre d'ampères-kilomètres se trouve ainsi correspondre en même temps à une certaine chute de tension lue sur l'abaque mobile, ou inversement.

Cette méthode, comme on le voit, est extrêmement simple. Il convient d'ajouter qu'un même abaque fixe reste utilisable pour des tensions de distributions variées et que, si on change celles-ci, il n'y a qu'à refaire les abaques mobiles, travail facile, puisqu'il consiste dans un simple tracé de cercles. L'abaque fixe doit être modifié seulement si l'on change la fréquence des courants ou l'écartement des fils ; encore faut-il noter qu'un changement de l'écartement des fils exige simplement, comme on le verra plus loin, une translation verticale des lignes d'ampère-kilométrage, mais non un calcul nouveau.

Dans tous les cas, il suffit d'un très faible outillage et de très peu de calculs pour réaliser immédiatement l'abaque dont on a besoin pour n'importe quel réseau. Dans le cas où les câbles présentent de la capacité notable, il est facile d'ajouter ensuite la correction de capacité, que nous exposons au paragraphe suivant, pour voir dans quelles limites elle peut faire varier la perte de tension prévue d'abord sans capacité ; si la correction qui en résulte est notable, on peut recalculer le diamètre du câble en modifiant d'autant la chute de tension primitivement admise ; on arrive ainsi par un ou deux tâtonnements à une valeur très suffisamment exacte.

A titre d'exemple, M. A. Blondel donne l'abaque fixe ci-après, calculé pour des conducteurs distants de 0^m,70 avec la fréquence 50.

On a alors :

$$Y = \frac{314,15}{10^4} xI (7,2859 - 2,3025 \log. xI + 2,3025 \log. X).$$

Le faisceau de droites rayonnantes de l'origine a été tracé (*fig. 1295*) pour les conducteurs de diamètres variant, par millimètre, depuis 10 millimètres jusqu'à 4 millimètres. Les courbes (Y, X) ont été tracées pour des valeurs (αI) variant, par unité, depuis 0 jusqu'à 88 ampères-kilomètres.

Deux abaques mobiles de seconde espèce (tension au départ constante)

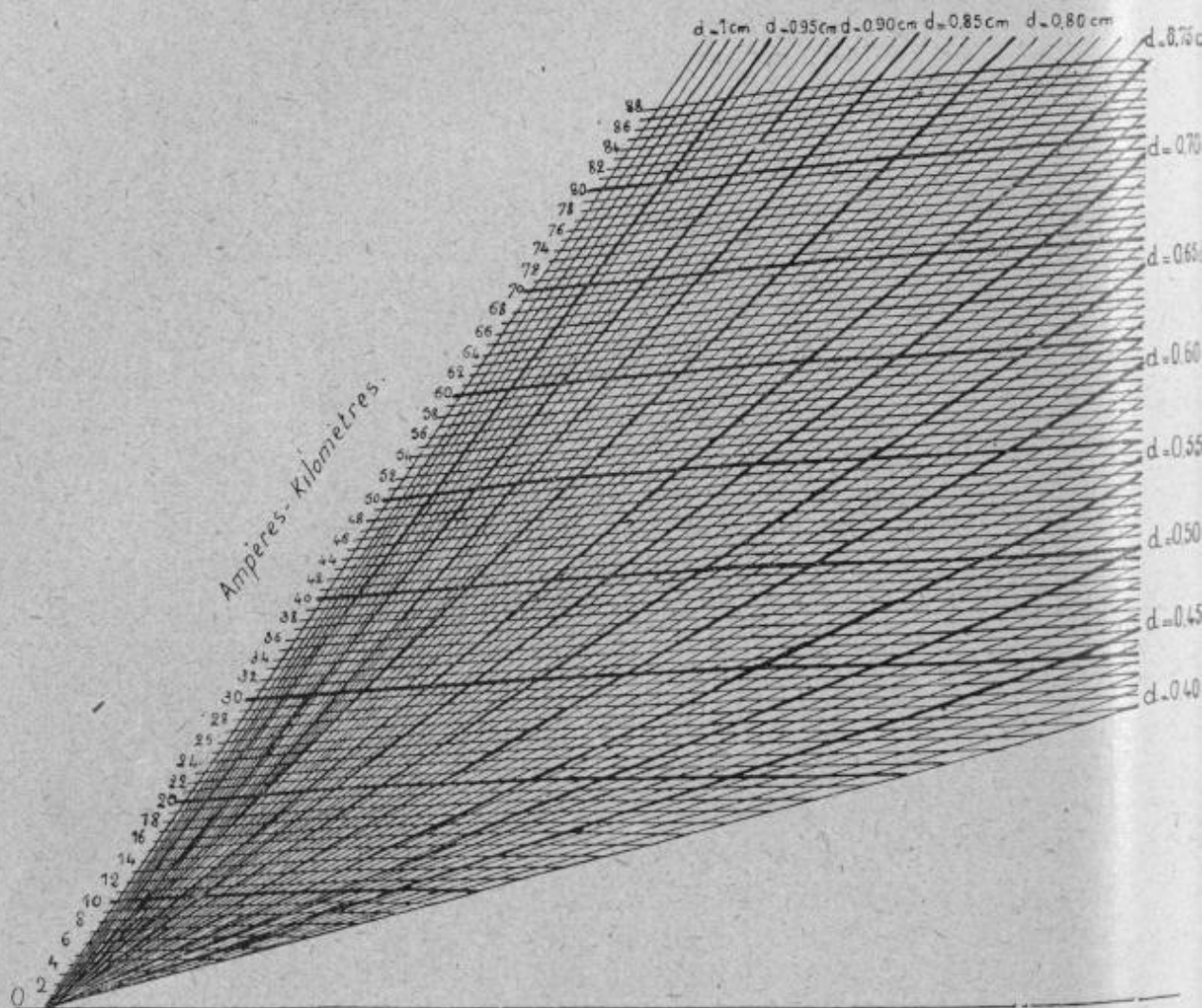


FIG. 1295. — Abaque fixe ($D = 0^m,70$; $\omega = 314$).

ont été tracés (*fig. 1296* et *1297*) avec $V_0 = 120$ volts et $V_0 = 250$ volts. Pour en réduire les dimensions, on a supprimé toute la partie (la plus utile) des cercles, située au-dessus de l'axe X_0 ; les lecteurs qui voudront en faire un calque devront donc continuer ces cercles dans tout le quadrant supérieur non représenté. Les positions à donner à l'abaque suivant le décalage sont représentées par les axes correspondant à des $\cos \varphi$ de 1 ; 0,95 ; 0,90 ; 0,85 ; 0,80 ; 0,75 ; l'axe choisi doit être placé en concordance avec l'axe OX de la (*fig. 1295*).

Soit, par exemple, à déterminer quelle puissance utile sous $\cos \varphi = 0,85$

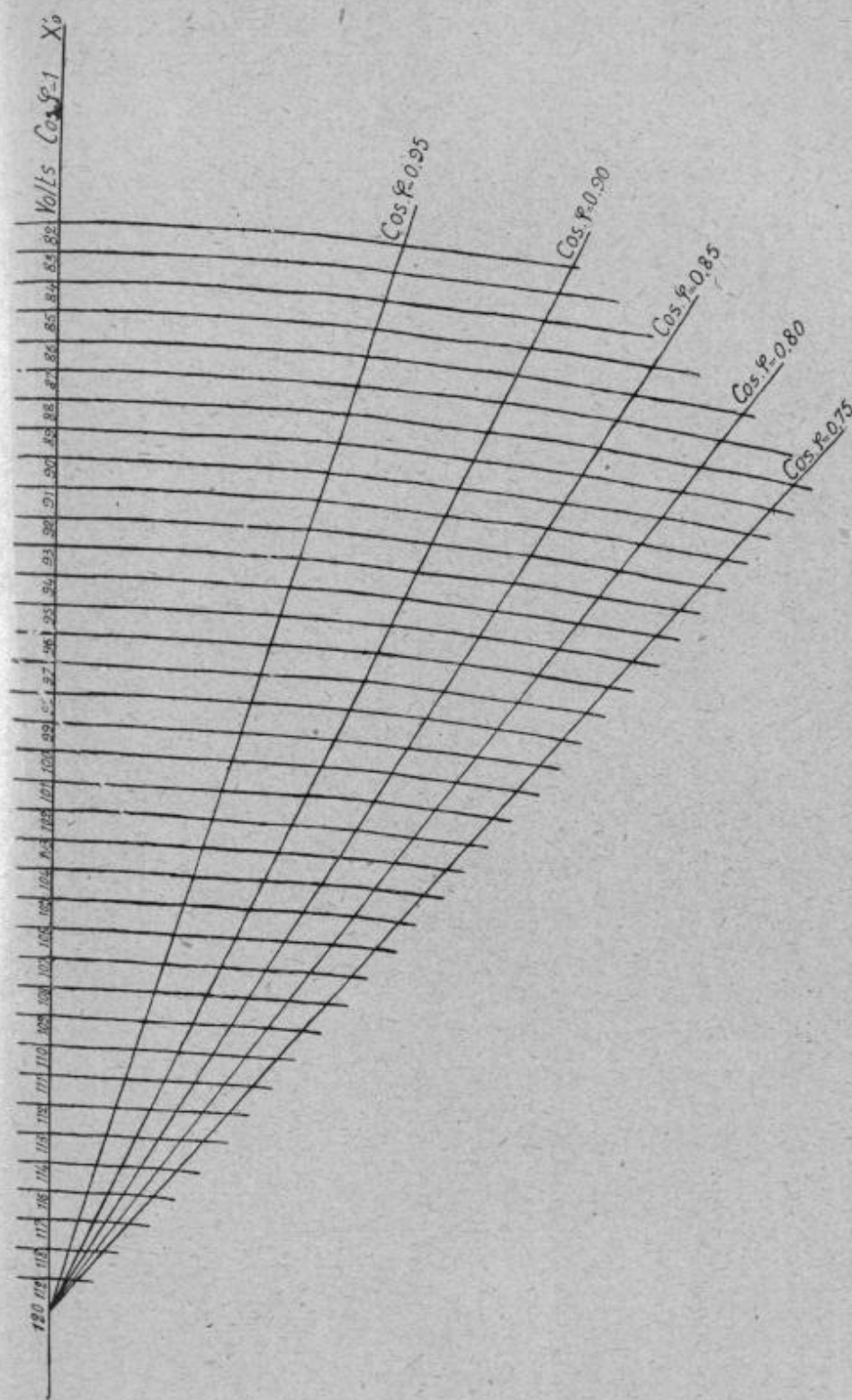


Fig. 1296. — Abaque mobile (tension constante au départ : 120 volts).

on peut faire passer dans un fil de 0^{cm},45 et de 1 kilomètre de longueur, sans que la tension étoilée, de 120 volts à l'origine, tombe au-dessous de

100 volts. On place l'axe $\cos \varphi = 0,85$ sur ox , et on prend l'intersection du cercle 100 avec la droite $d = 0^{\text{cm}},45$; ce point se trouve à égale distance entre les logarithmiques 17 et 18, soit environ sur la logarithmique 17,5. On en déduit aussitôt la puissance transportée *par fil* :

$$P = 0,85 \frac{17,5}{4} 100 = 1487,5 \text{ watts.}$$

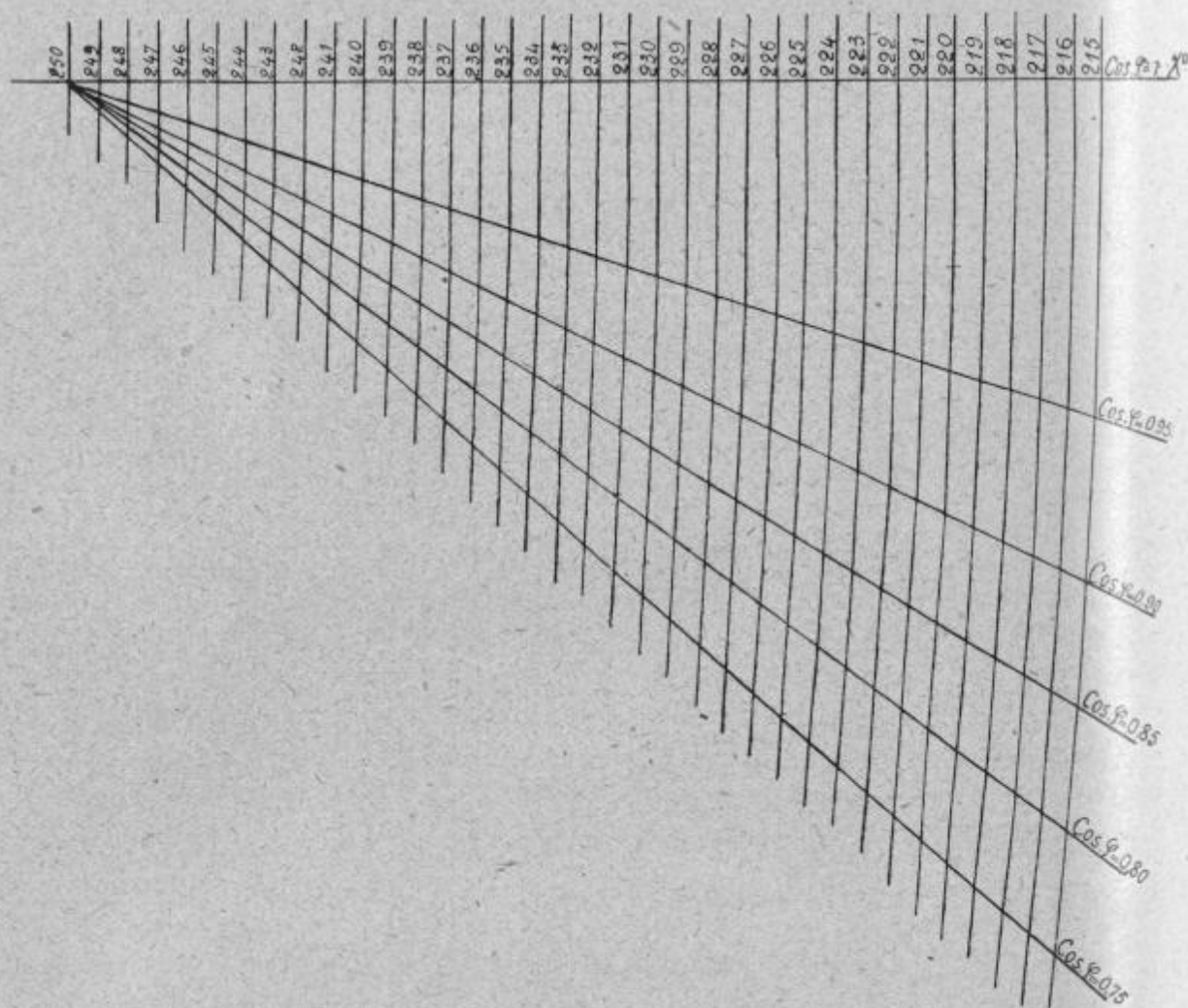


FIG. 1297. — Abaque mobile (tension constante au départ : 250 volts).

Remarques sur les logarithmiques de l'abaque. — a) Il est facile de voir que les courbes d'égal kilomètre-ampérage qui caractérisent essentiellement la méthode de M. A. Blondel sont de simples logarithmiques. En effet, le coefficient de self-induction peut s'écrire pour les lignes triphasées :

$$L = 0,500 + 4,605 (\log. D - \log. a) \text{ (C. G. S.),}$$

en appelant a le rayon du conducteur et D la distance entre les axes des

fil, mesurés tous deux en centimètres. Si l'on préfère exprimer le tout en fonction du diamètre du conducteur $d = 2a$, on a :

$$L = 0,5 + 4,605 (\text{lov. } 2 + \text{lov. } D - \text{lov. } d).$$

Les ordonnées de la courbe peuvent donc s'écrire :

$$Y = \omega x l [1,887 + 4,605 (\text{lov. } D - \text{lov. } d)] \text{ (C. G. S.)}.$$

D'autre part, les abscisses, qui sont proportionnelles aux chutes de tension dues à la résistance, ont pour expression :

$$X = \frac{\rho x l}{s} = \frac{4 \rho x l}{\pi d^2},$$

d'où :

$$\text{lov. } X = \text{lov. } \frac{4 \rho x l}{\pi} - 2 \text{ lov. } d.$$

Si l'on élimine $\text{lov. } d$ d'entre les expressions de X et de Y , il vient simplement :

$$\begin{aligned} Y &= \omega x l \left[1,887 + 2,3025 (2 \text{ lov. } D - \text{lov. } \frac{4 \rho x l}{\pi} + \text{lov. } X) \right] \text{ (C. G. S.)} \\ &= \frac{\omega x l}{10^4} [1,887 + 2,3025 (2 \text{ lov. } D - \text{lov. } 4 - \text{lov. } \rho \\ &\quad + \text{lov. } \pi - 2,3025 \text{ lov. } (x l) + 2,3025 \text{ lov. } X)] \text{ (henrys par km.)}, \end{aligned}$$

qui est de la forme :

$$Y = \frac{\omega x l}{10^4} [B + 4,605 \text{ lov. } D - 2,3025 \text{ lov. } (x l) + 2,3025 \text{ lov. } X]$$

ou :

$$Y = \frac{\omega x l}{10^4} [A - 2,3025 \text{ lov. } (x l) + 2,3025 \text{ lov. } X] \text{ (henrys par km.)},$$

en posant :

$$A = B + 4,605 \text{ lov. } D.$$

La constante B , calculée pour le cuivre, de résistivité :

$$\rho = 17,4 \frac{\text{ohms km}}{\text{mm}^2},$$

a pour valeur :

$$B = - 1,2107.$$

Pour l'aluminium, avec :

$$\rho = 30,8 \frac{\text{ohms km}}{\text{mm}^2},$$

elle est :

$$B' = - 1,7754.$$

On voit que pour chaque valeur constante du produit (xI) , le seul terme variable du second membre est $\log. X$; donc la courbe est une logarithmique déplacée parallèlement à l'axe OY d'une certaine hauteur, variable suivant xI et D . Cette formule permet de la construire en coordonnées rectangulaires, en effectuant simplement les calculs si l'on aime mieux opérer ainsi que de joindre des points équidistants déterminés sur les différentes lignes rayonnantes, comme on l'a expliqué plus haut.

b) Le changement d'écartement D entre fils modifie seulement un terme constant dans la parenthèse et entraîne, par suite, une simple translation de chaque logarithmique, parallèlement à l'axe des Y .

Par exemple, le changement de D ou D' entraîne, pour la logarithmique (xI) , une translation, dans le sens des Y croissants, égale à :

$$h = \omega (xI) \times [4,605 (\log. D' - \log. D)];$$

car, pour toute abscisse X , les autres termes de la parenthèse sont constants, (xI) étant constant.

Si donc on a établi l'abaque fixe pour un écartement quelconque D , on peut, par un simple travail de calquage, en déduire l'abaque pour un D' quelconque.

On remarquera que le déplacement h des logarithmes croît proportionnellement à leur numéro d'ordre (xI) .

c) Les longueurs comptées sur les lignes OQ représentent les chutes par impédance xxI , proportionnelles aux longueurs et aux intensités. Le même abaque peut donc servir pour des intensités et des longueurs quelconques, en modifiant simplement l'échelle des volts.

Par exemple, la logarithmique de 10 ampères-kilomètres peut servir de courbe de 100 ampères-kilomètres en prenant simplement une échelle des volts dix fois plus petite, et par suite en réduisant dans le rapport $\frac{1}{10}$ les rayons des cercles d'égale chute de tension ; l'abaque mobile est à refaire en conséquence.

Un seul abaque fixe peut donc suffire pour tous usages relatifs à des conducteurs d'écartement donné. Or, ce dernier est toujours fixé *a priori* par les conditions de construction mécanique des lignes et d'isolation entre conducteurs. On peut toujours construire à coup sûr un abaque convenable pour le réseau qu'on veut établir et, une fois cet abaque construit, *aucun calcul* n'est nécessaire et tous les problèmes se résolvent par *simple lecture*, grâce aux réseaux complets de logarithmiques et de cercles des abaques.

509. Lignes de transmission en tenant compte de la capacité et de la perditance réparties ⁽¹⁾. — On ne peut calculer rigoureusement les lignes de transport d'énergie à haute tension qu'en tenant compte de la capacité et de la perditance réparties. Dans des études antérieures, M. A. Blondel a résolu ce problème, notamment au moyen de constructions graphiques combinées avec l'emploi des tables des fonctions hyperboliques, sans faire intervenir les notations imaginaires.

La nouvelle méthode de M. A. Blondel exposée ci-après ne nécessite ni l'emploi des fonctions hyperboliques, ni aucun calcul pénible ; elle repose sur l'emploi de développements en séries vectorielles, dont l'interprétation physique présente, comme on le verra, un certain intérêt :

Soient :

r , résistance linéique d'un conducteur (par kilomètre) ;

l , self-inductance linéique ;

z , impédance linéique ;

c , capacité linéique ;

g , perditance linéique (conductance équivalente aux pertes) ;

w , admittance linéique ;

x , distance en kilomètres comptée à partir du point d'arrivée de la ligne ;

1 , indice du point d'arrivée (station réceptrice) ;

0 , indice du point de départ (station génératrice) ;

\mathcal{U} , tension étoilée efficace (mesurée entre un des conducteurs et le point neutre de la ligne en charge) ;

\mathcal{I} , courant efficace dans un conducteur de la ligne en charge ;

φ , angle de décalage entre \mathcal{U} et \mathcal{I} ;

U , tension efficace dans le régime à vide (sans débit) avec la même tension d'arrivée qu'en débit ;

I , courant efficace dans le régime de court-circuit (avec le même courant à la station réceptrice qu'en charge) ;

U_1, I_1 , tension et intensité à l'arrivée ; φ_1 , décalage entre eux ;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$, vitesse de pulsation des courants alternatifs transportés, de fréquence $\frac{1}{T}$;

a, b, m , constantes définies ci-dessous ;

$\theta, \theta', \delta, \gamma$, angles définis ci-après.

Le sens des vecteurs est indiqué par les flèches.

⁽¹⁾ *La Lumière électrique*, 18 et 25 septembre, 23 et 30 octobre 1909. A. BLONDEL et C. ROY.

Les angles positifs sont comptés en sens inverse de la rotation des aiguilles d'une montre.

Rappelons d'abord sommairement les principes analytiques et géométriques de la rotation.

Appelons \mathcal{U}_x et \mathcal{I}_x les amplitudes des variations de la tension et du courant en un point x quelconque, φ_x le décalage en ce point entre la tension et le courant, u et i les valeurs instantanées; c'est-à-dire :

$$u = \mathcal{U}_x \sqrt{2} \sin \omega t; \quad i = \mathcal{I}_x \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi).$$

Les équations différentielles du problème sont :

$$(1) \quad \frac{\partial u}{\partial x} = ri + l \frac{\partial i}{\partial t}; \quad \frac{\partial i}{\partial x} = gu + c \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

ou, en séparant les variables :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = rgu + (rc + lg) \frac{\partial u}{\partial t} + cl \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1')$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = rgi + (rc + lg) \frac{\partial i}{\partial t} + cl \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}. \quad (2')$$

Les intégrales générales des deux équations (1') et (2') sont de même forme ; mais, pour la commodité de ce qui suit, il est préférable de déterminer l'intégrale de (1) en fonction de celle de U en intégrant l'équation (2), après y avoir remplacé u par sa valeur. On pose donc :

$$u = A_1 e^{ax} \sin (\omega t + bx - \alpha) + B_1 e^{-ax} \sin (\omega t + bx - \beta), \quad (3)$$

$$i = \frac{1}{m} A_1 e^{ax} \sin (\omega t + bx - \alpha + \gamma) + \frac{1}{m} B_1 e^{-ax} \sin (\omega t + bx - \beta + \gamma), \quad (4)$$

en appelant A_1, B_1, α, β des constantes d'intégration qui dépendent des conditions aux limites ; a, b, m, γ sont des constantes qu'on détermine immédiatement par identification, c'est-à-dire en vérifiant que les solutions (3) et (4) satisfont aux équations différentielles (1') et (2') ; on trouve ainsi :

$$(5) \quad a = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-p + \sqrt{p^2 + q^2}}; \quad b = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{p + \sqrt{p^2 + q^2}}, \quad (6)$$

$$(7) \quad m = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{g^2 + \omega^2 c^2}}; \quad \gamma = \theta' - \tau; \quad (8)$$

en posant pour simplifier par l'écriture :

$$(9) \quad \begin{aligned} p &= \omega^2 cl - gr; & q &= \omega cr + \omega lg, \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{\omega l}{r}; & \operatorname{tg} \theta' &= \frac{\omega c}{g}; & \operatorname{tg} \tau &= \frac{b}{a}. \end{aligned}$$

Les valeurs efficaces ou maxima de u et i se déduisent facilement des équations (3) et (4), soit analytiquement, soit géométriquement. Pour obtenir les projections sur 2 axes rectangulaires $\partial_x \sqrt{2}$ et $\partial_x \sqrt{2}$ qui représentent les amplitudes du voltage et du courant au point x , il suffit de faire $\omega t = 0$ et $\omega t = \frac{\pi}{2}$. Si l'on prend OX confondu avec le vecteur U_1 qui

représente la tension efficace à l'arrivée, on voit aisément que la tension efficace V_x peut être considérée comme la résultante de deux vecteurs figurant respectivement la tension à vide en ce point et la perte de charge produite par le courant depuis le point d'arrivée jusqu'à ce point. De même, si l'on prend l'axe OX confondu avec le vecteur du courant débité à l'arrivée, on voit que le courant efficace I_x en un point quelconque est la résultante du courant que l'on aurait en ce point si l'on débitait en court-circuit une intensité efficace I_1 à l'arrivée, et du courant de charge qui passerait en ce même point dans le régime de la ligne à vide.

Il est, du reste, évident, par le fait que les équations (1') et (2') sont linéaires et à coefficients constants, que si plusieurs solutions de la forme (3) et (4) satisfont séparément aux conditions, aux limites, leur somme est aussi une solution, pourvu que les deux premières solutions puissent être combinées ensemble. Il en résulte immédiatement que la meilleure manière de déterminer les constantes d'intégration est de cal-

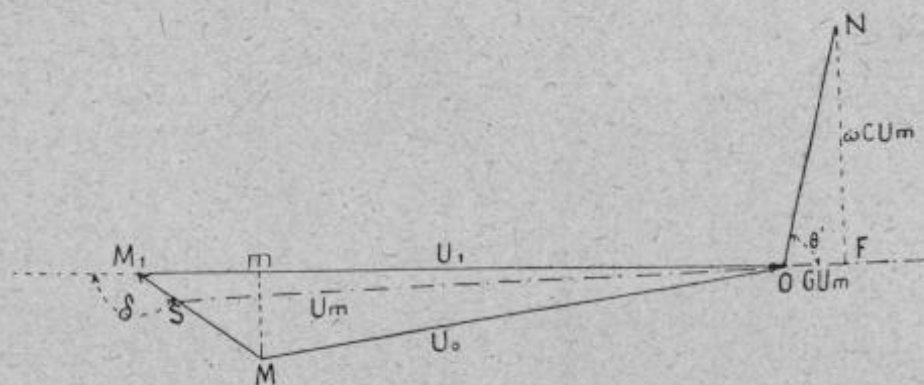


FIG. 1298. — Épure du régime à vide (au lieu de l'indice o , lire x).

culer deux solutions particulières, simples, introduisant chacune deux constantes, et de les superposer.

Les deux solutions particulières les plus simples, et d'ailleurs compatibles, sont le régime à vide et le régime en court-circuit. Les (fig. 1298 et 1299) définissent les vecteurs correspondant à ces deux régimes.

1° Régime à vide. — Ce régime est traduit vectoriellement par la (fig. 1298) : M_1O représente la tension efficace à vide à l'arrivée U_1 ; MO la tension U_x au point x , qui diffère de U_1 par un vecteur M_1M ; OM représente le vecteur du courant efficace de charge J_x au point x .

sions et courants apparents, s'obtiennent au moyen des éléments composants de la manière qu'indiquent les (*fig. 1300 et 1301*).

La tension résultante U_x s'obtient (*fig. 1300*) en composant le vecteur $\overline{OM} = U_1$ de la (*fig. 1293*) avec le vecteur $\overline{OQ} = V_x$ de la (*fig. 1294*) sans changer l'orientation de celui-ci, si le courant I_1 est en phase avec la ten-

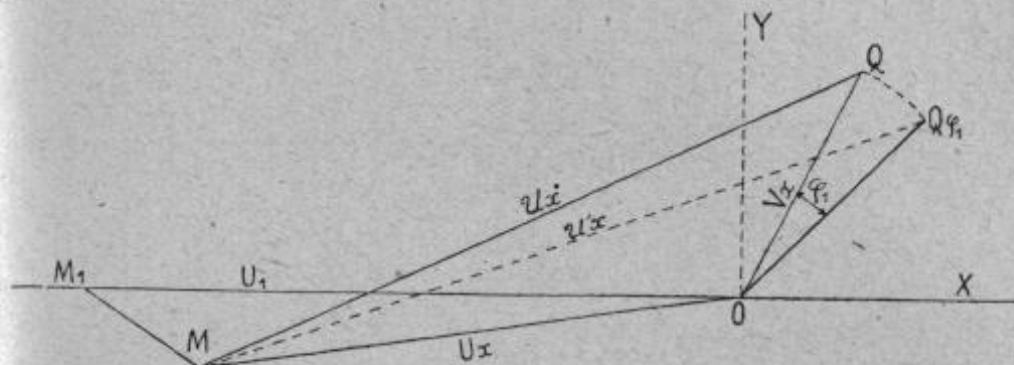


FIG. 1300. — Composition des tensions.

sion U_1 , et en le décalant, au contraire, d'un angle φ_1 si le courant I_1 est décalé de cet angle par rapport à la tension d'arrivée U_1 . On a alors la tension résultante $U_{x'} = \overline{MQ_{\varphi_1}}$.

De même, l'intensité résultante du courant J s'obtient en composant, comme le montre la (*fig. 1301*); le vecteur $\overline{PO'} = I$ de la (*fig. 1299*) avec le vecteur $\overline{ON} = J_x$ de la (*fig. 1301*). Si le courant I_1 est décalé de l'angle φ_1 par rapport à U_1 , on doit faire tourner préalablement le vecteur OP de cet angle, et joindre P à N , ce qui donne la nouvelle valeur $J_{x'} = \overline{PN}$.

Mais, malgré cela, les calculs sont encore un peu laborieux, surtout pour V_x et pour J_x ; et les ingénieurs électriciens n'ont pas en général entre les mains les tables

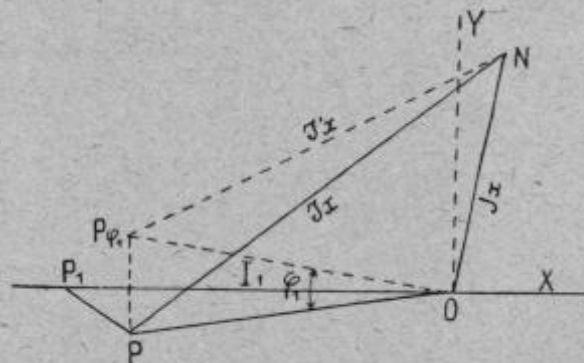


FIG. 1301. — Composition de courants.

de fonctions hyperboliques, dont l'emploi demande un certain apprentissage.

La solution nouvelle évite toute difficulté en remplaçant les expressions données plus haut par des séries, dans lesquelles n'entrent que les constantes usuelles des lignes, sous une forme très simple, et qui permet des approximations variées suivant les cas d'application.

La simplicité de ces développements dépend du choix des constantes auxiliaires dont les valeurs sont; impédance $z = r + j\omega l$; admittance

$w = g + \omega c$; facteur de réactance $\tan \theta = \frac{\omega l}{r}$; facteur de capacitance $\tan \theta' = \frac{\omega c}{g}$; angle résultant $\delta = \theta + \theta'$.

Les angles θ et θ' sont ceux que forment l'impédance avec la résistance et l'admittance avec la perditance; l'emploi des constantes z , w et des angles θ , θ' revient, au fond, à prendre pour les exprimer des coordonnées polaires au lieu des coordonnées rectangulaires habituelles.

De ces constantes on tire immédiatement les valeurs suivantes :

$$\sin \theta = \frac{\omega l}{z}; \quad \cos \theta = \frac{r}{z}; \quad \sin \theta' = \frac{\omega c}{w}; \quad \cos \theta' = \frac{g}{w};$$

$$\sin (\theta + \theta') = \frac{\omega (gl + cr)}{zw} = \frac{q}{zw}; \quad \cos (\theta + \theta') = \frac{p}{zw},$$

d'où, puisqu'on a posé $\theta + \theta' = \delta$:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-p + \sqrt{p^2 + q^2}} = \sqrt{zw} \cos \frac{\theta + \theta'}{2} = \sqrt{zw} \cos \frac{\delta}{2}, \\ b &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{p + \sqrt{p^2 + q^2}} = \sqrt{zw} \sin \frac{\theta + \theta'}{2} = \sqrt{zw} \sin \frac{\delta}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} m &= \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{g^2 + \omega^2 c^2}} = \sqrt{\frac{zw}{w^2}} = \sqrt{\frac{z}{w}}, \\ \gamma &= \theta' - z = \theta' - \arctan \frac{b}{a} = \theta' - \frac{\theta + \theta'}{2} = \frac{\theta - \theta'}{2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

On remarquera que tout se trouve maintenant exprimé uniquement en fonction de z , w , θ , θ' .

En reportant ces valeurs dans les expressions données plus haut, et en remplaçant les fonctions circulaires et les fonctions hyperboliques par leur développement en séries connu, on obtient les expressions très simples suivantes pour les projections des quatre vecteurs qui nous intéressent (1).

Tension à vide :

$$\left. \begin{aligned} (U_x)_x &= U_1 \left[1 + \frac{(zx^2)}{1 \times 2} \cos \delta + \frac{(zx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4} \cos 2\delta + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zx^2)^n}{2n!} \cos n\delta \dots \right], \\ (U_x)_y &= U_1 \left[0 + \frac{(zx^2)}{1 \times 2} \sin \delta + \frac{(zx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4} \sin 2\delta + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zx^2)^n}{2n!} \sin n\delta \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(1) Le lecteur trouvera la démonstration de ces calculs dans *la Lumière électrique*, numéro du 25 septembre 1909, pp. 389 à 394 (A. Blondel et C. Roy).

Courant à vide :

$$\left. \begin{aligned} (J_x)_x &= wxU_1 \left[\frac{\cos \theta'}{1} + \frac{(zwx^2)}{1 \times 2 \times 3} \cos (\theta' + \delta) + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zwx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5} \cos (\theta' + 2\delta) + \dots + \frac{(zwx^2)^n}{2n+1!} \cos (\theta' + n\delta) \dots \right], \\ (J_x)_y &= wxU_1 \left[\frac{\sin \theta'}{1} + \frac{(zwx^2)}{1 \times 2 \times 3} \sin (\theta' + \delta) + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zwx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5} \sin (\theta' + 2\delta) + \dots + \frac{(zwx^2)^n}{2n+1!} \sin (\theta' + n\delta) \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Courant de débit :

$$\left. \begin{aligned} (I_x)_x &= I_1 \left[1 + \frac{(zwx^2)}{1 \times 2} \cos \delta + \frac{(zwx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4} \cos 2\delta + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zwx^2)^n}{2n!} \cos n\delta \dots \right], \\ (I_x)_y &= I_1 \left[0 + \frac{(zwx^2)}{1 \times 2} \sin \delta + \frac{(zwx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4} \sin 2\delta + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zwx^2)^n}{2n!} \sin n\delta \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Chute de tension :

$$\left. \begin{aligned} (V_x)_x &= (zxI_1) \left[\cos \theta + \frac{(zwx^2)}{1 \times 2 \times 3} \cos (\theta + \delta) + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zwx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5} \cos (\theta + 2\delta) + \dots + \frac{(zwx^2)^n}{2n+1!} \cos (\theta + n\delta) \dots \right], \\ (V_x)_y &= (zxI_1) \left[\sin \theta + \frac{(zwx^2)}{1 \times 2 \times 3} \sin (\theta + \delta) + \dots \right. \\ &\quad \left. + \frac{(zwx^2)^2}{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5} \sin (\theta + 2\delta) + \dots + \frac{(zwx^2)^n}{2n+1!} \sin (\theta + n\delta) \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Ces expressions sont toutes, comme on le voit, des séries de la forme :

$$\left. \begin{aligned} K_x &= r_0 \cos \lambda + r_1 \cos (\lambda + \delta) + r_2 \cos (\lambda + 2\delta) + \dots \\ &\quad + r_n \cos (\lambda + n\delta) + \dots, \\ K_y &= r_0 \sin \lambda + r_1 \sin (\lambda + \delta) + r_2 \sin (\lambda + 2\delta) + \dots \\ &\quad + r_n \sin (\lambda + n\delta) + \dots, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

en appelant K un vecteur, et r_0, r_1, r_2 des grandeurs numériques décroissant indéfiniment. Ces séries sont convergentes, dans les conditions qu'on indiquera plus loin.

En comparant deux à deux les termes de même rang de la projection sur OX et de la projection sur OY , on voit que les premiers sont en cosinus et les seconds en sinus respectivement des mêmes angles ; cela montre que le vecteur K est tout simplement la somme géométrique d'une série de vecteurs $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$, décalés régulièrement les uns par rapport aux

autres angles égaux à δ dans le sens positif, c'est-à-dire inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

On le vérifie aisément en portant à la suite l'un de l'autre le vecteur

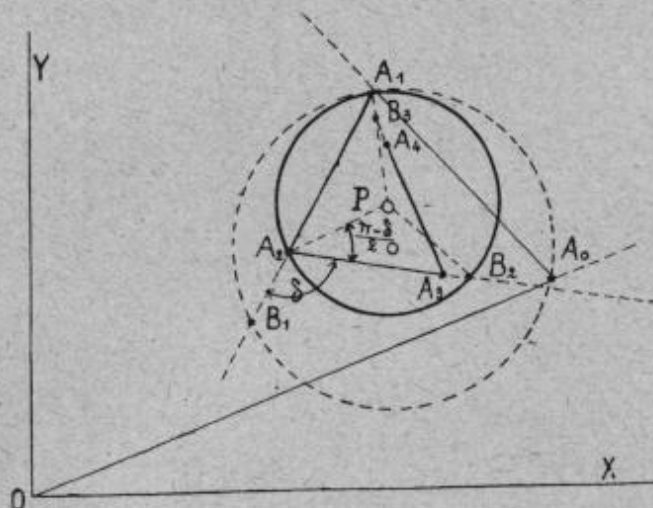


FIG. 1302. — Épure géométrique de l'erreur.
L'angle $XOA_0 = \lambda$.

$OA_0 = r_0$, faisant avec l'axe OX l'angle λ , puis la valeur $A_0A_1 = r_1$, faisant avec OA_0 l'angle δ dans le sens positif, etc.; en projetant sur OX et OY la ligne brisée formée par cette série de vecteurs, on obtient les termes des deux séries K_x et K_y ci-dessus.

On peut donc désormais remplacer les formules donnant les deux projections de chaque

série vectorielle par une formule unique en symboles vectoriels de la forme :

$$\bar{K} = (\bar{r}_0)_{\lambda} + (\bar{r}_1)_{\lambda+\delta} + (\bar{r}_2)_{\lambda+2\delta} + \dots (\bar{r}_n)_{\lambda+n\delta} + \dots \text{etc.};$$

les indices extérieurs désignant les angles avec l'axe OX.

En appliquant cette notation aux quatre vecteurs qui nous intéressent, on peut remplacer maintenant les formules de développement en projections par de simples séries vectorielles :

$$\bar{U}_x = \bar{U}_1 + \left[\frac{(zwx^2)\bar{U}_1}{2} \right]_{\delta} + \left[\frac{(zwx^2)^2\bar{U}_1}{24} \right]_{2\delta} + \dots + \left[\frac{(zwx^2)^n\bar{U}_1}{2n!} \right]_{n\delta} \dots, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_x &= [\overline{wxU_1}]_{\theta} + \left[\frac{(zwx^2)(wxU_1)}{6} \right]_{\theta+\delta} \\ &+ \left[\frac{(zwx^2)^2(wxU_1)}{120} \right]_{\theta+2\delta} + \dots + \left[\frac{(zwx^2)^n(wxU_1)}{(2n+1)!} \right]_{\theta+n\delta} \dots, \quad (22) \end{aligned}$$

$$\bar{I}_x = \bar{I}_1 + \left[\frac{(zwx^2)\bar{I}_1}{2} \right]_{\delta} + \left[\frac{(zwx^2)^2\bar{I}_1}{24} \right]_{2\delta} + \dots + \left[\frac{(zwx^2)^n\bar{I}_1}{2n!} \right]_{n\delta} \dots, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_x &= [\overline{xzI_1}]_{\theta} + \left[\frac{(zxI_1)(zwx^2)}{6} \right]_{\theta+\delta} \\ &+ \left[\frac{(zxI_1)(zwx^2)^2}{120} \right]_{\theta+2\delta} + \dots + \left[\frac{(zxI_1)(zwx^2)^n}{(2n+1)!} \right]_{\theta+n\delta} \dots \quad (24) \end{aligned}$$

On peut encore simplifier l'écriture en remplaçant z_n , w_n par Z et W,

impédance et admittance totales du tronçon de longueur z . Il vient alors :

$$\begin{aligned}\overline{U}_x &= [\overline{U}_1]_0 + \left[\frac{(\overline{ZW})U_1}{2} \right]_\delta + \left[\frac{(\overline{ZW})^2 U_1}{2!} \right]_{2\delta} + \dots + \left[\frac{(\overline{ZW})^n U_1}{n!} \right]_{n\delta} + \dots, \\ \overline{J}_x &= [\overline{WU}_1]_{0'} + \left[\frac{(\overline{ZW})WU_1}{6} \right]_{0'+\delta} + \left[\frac{(\overline{ZW})^2 WU_1}{120} \right]_{0'+2\delta} + \dots + \left[\frac{(\overline{ZW})^n WU_1}{(2n+1)!} \right]_{0'+n\delta} + \dots, \\ \overline{I}_x &= [\overline{I}_1]_0 + \left[\frac{(\overline{ZW})I_1}{2} \right]_\delta + \left[\frac{(\overline{ZW})^2 I_1}{2!} \right]_{2\delta} + \dots + \left[\frac{(\overline{ZW})^n I_1}{n!} \right]_{n\delta} + \dots, \\ x &= [\overline{ZI}_1]_0 + \left[\frac{(\overline{ZW})ZI_1}{6} \right]_{0+\delta} + \left[\frac{(\overline{ZW})^2 ZI_1}{120} \right]_{0+2\delta} + \dots + \left[\frac{(\overline{ZW})^n ZI_1}{(2n+1)!} \right]_{0+n\delta} + \dots\end{aligned}$$

Chacune de ces séries définit très clairement les vecteurs correspondants : chacun d'eux peut être construit en joignant à l'origine un des sommets du polygone ainsi représenté ; plus on prend de termes, plus on a de précision : on verra ci-dessous le degré d'approximation obtenu.

Les (fig. 1303 et 1304) représentent, par exemple, respectivement les

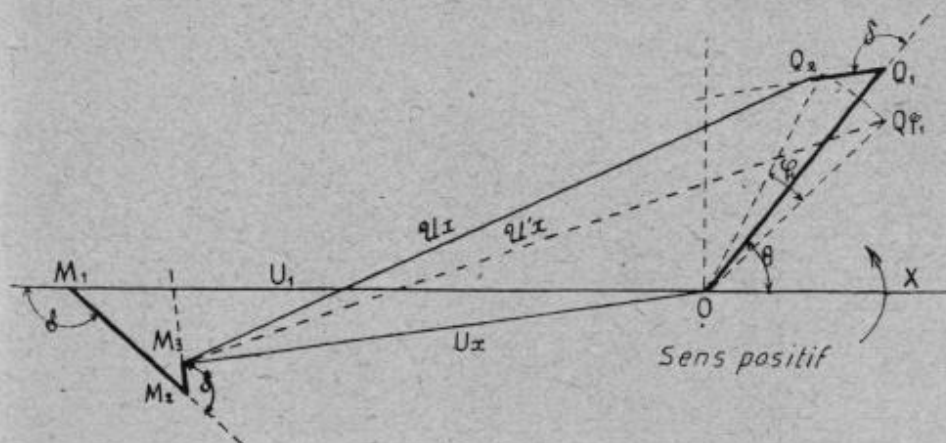


FIG. 1303. — Composition des vecteurs approchés des tensions.

constructions des tensions et courants résultants, dans le cas où l'on prend dans chaque polygone correctif pour U_x et I_x trois côtés seulement et pour V_x et N_x deux côtés, ce qui conduit à s'arrêter à des sommets d'indice 3 pour M_3 et P_3 et à des sommets d'ordre 2 pour N_2 et Q_2 (V_x et J_x sont alors considérés comme corrections d' U_x et I_x respectivement).

Ces constructions sont identiques à celles des (fig. 1300 et 1301) si l'on remarque que les points M_3, P_3, N_2, Q_2 représentent les approximations des points exacts M, P, N, Q , de ces figures.

Degré d'approximation obtenu. — La même figure permet immédiatement de calculer le degré d'approximation obtenu en prenant comme

vecteur résultant $\overline{OA_2}$ ou $\overline{OA_3}$, ou $\overline{OA_n}$, au lieu de poursuivre la série jusqu'à l'infini ; pour cela il suffit d'appliquer une méthode qui a été indiquée par Laurent.

On prolonge le vecteur $\overline{A_1A_2}$ jusqu'en B_1 , de façon que $\overline{A_1B_1} = \overline{A_0A_1}$. On porte également $\overline{A_2B_2} = \overline{A_1A_2}$; $\overline{A_3B_3} = \overline{A_2A_3}$, etc., et on considère les

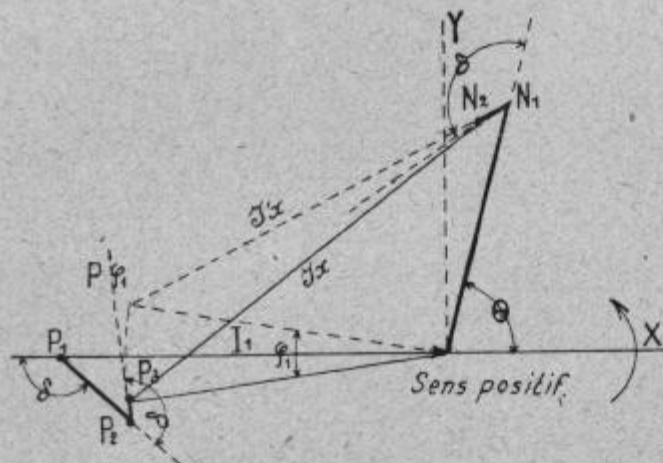


FIG. 1304. — Composition des vecteurs approchés des courants.

cercles circonscrits aux triangles isocèles $A_0A_1B_1$, $A_1A_2B_2$, $A_2A_3B_3$, etc.

Ces cercles ont des rayons décroissants, car ils sont circonscrits à des triangles semblables de côtés décroissants.

Le cercle d'ordre supérieur $A_1A_2B_2$, par exemple, est intérieur au cercle précédent $A_0A_1B_1$. En effet, les centres de ces deux cercles se trouvent

sur la bissectrice de l'angle A_1 . C'est évident pour le cercle $A_0A_1B_1$; pour le cercle $A_1A_2B_2$, il suffit de remarquer que le centre Γ se trouve sur la bissectrice de l'angle A_2 ; par suite $\widehat{\Gamma A_1 A_2} = \frac{\pi - \delta}{2} = \widehat{\Gamma A_1 A_0}$.

Les deux cercles passent par A_1 ; ils sont tangents en ce point et ont leur centre d'un même côté sur la bissectrice de A_1 ; comme le second cercle a le plus petit rayon, c'est lui qui est intérieur. On verrait de même que le troisième cercle est intérieur au deuxième et ainsi de suite.

Cela permettrait de démontrer la convergence de la série, s'il en était besoin, et suffit pour calculer une limite de l'erreur commise. Si on arrête au terme d'ordre n , l'erreur absolue sur le vecteur K est évidemment plus petite que le diamètre du cercle circonscrit au triangle isocèle $A_nA_{n+1}B_{n+1}$, puisque ce cercle contient l'extrémité limite du vecteur K .

On a d'ailleurs :

$$\frac{D}{2} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{r_n + 1}{2} ; \quad \text{d'où} \quad D = \frac{r_n + 1}{\sin \frac{\delta}{2}}.$$

L'erreur absolue faite sur le vecteur K est donc plus petite que le quotient du premier terme négligé r_{n+1} par $\sin \frac{\delta}{2}$.

Dans les lignes de transport de force aériennes ou souterraines, θ' est

très voisin de π ; δ est donc compris entre π et $\frac{\pi}{2}$; par suite, $\frac{\delta}{2}$ est compris entre $\frac{\pi}{2}$ et $\frac{\pi}{4}$, et la plus petite valeur de $\sin \frac{\delta}{2}$ est ainsi $\frac{\sqrt{2}}{2}$.

L'erreur absolue D est donc sûrement plus petite que $r_{n+1} \sqrt{2}$.

L'erreur relative $\frac{D}{K}$ s'obtient en divisant l'erreur absolue D par la valeur absolue du vecteur; on peut la calculer avec une approximation suffisante en remplaçant la valeur absolue par la valeur approchée elle-même, et celle-ci ne diffère pas beaucoup en général du premier terme de la série r_0 .

Dans toutes les séries (16, 17, 18, 19), r_0 a été fait égal à 1, en faisant sortir les facteurs communs; on peut donc considérer que le terme de rang n dans les parenthèses mesure l'erreur relative avec une approximation suffisante; en multipliant par le facteur hors de la parenthèse, on a la limite maxima de l'erreur absolue.

Dans la pratique des lignes de transport d'énergie, avec les longueurs et les fréquences usuelles, le produit zwx^2 est généralement si faible qu'on peut arrêter le développement aux tout premiers termes des séries et qu'on a rarement à dépasser les termes en x^4 . En outre, dans les cas ordinaires, les vecteurs J_x et V_x sont petits par rapport aux vecteurs U_x et I_x et le coefficient numérique, qui multiplie le terme d'ordre n , est plus petit que dans les séries de U_x et I_x ; il en résulte qu'on peut le plus souvent, dans les constructions, se contenter d'un terme de moins pour les premiers comme pour les seconds; c'est d'ailleurs une question d'espèce et l'on est averti, par la construction même, du degré d'approximation.

Au maximum, on prendra pour U_x et I_x les termes en x^4 et pour J_x et V_x les termes en x^3 et on négligera les termes en x^6 . On aura alors comme limites supérieures des erreurs absolues les valeurs indiquées au tableau I ci-après.

TABLEAU I

NOM DU VECTEUR	LIMITE DE L'ERREUR ABSOLUE	VALEUR APPROXIMATIVE DE L'ERREUR RELATIVE
U_x	$\frac{(zwx^2)^3 U_1 \sqrt{2}}{720}$	$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{720}$
J_x	$\frac{(zwx^2)^2 wx U_1 \sqrt{2}}{120}$	$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{120}$
I_x	$\frac{(zwx^2)^3 I_1 \sqrt{2}}{720}$	$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{720}$
V_x	$\frac{(zwx^2)^2 zx I_1 \sqrt{2}}{120}$	$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{120}$

On voit que les erreurs relatives sont six fois plus faibles sur U_x et I_x que sur V_x et J_x .

De la connaissance des erreurs individuelles des vecteurs composants, on peut déduire comme il suit les limites des erreurs sur les vecteurs résultants \mathcal{V}_x , \mathcal{J}_x .

1° *En grandeur.* — L'erreur absolue a pour limite maxima la somme des limites maxima des erreurs des deux vecteurs ; par conséquent, si l'on arrête le développement au-dessous du terme en x^5 , on déduit du tableau ci-avant les erreurs absolues suivantes sur \mathcal{V}_x et \mathcal{J}_x , respectivement :

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{(zwx^2)^3}{720} U_1 + \frac{(zwx^2)^2 z x^2}{120} I_1, \\ \epsilon' &= \frac{(zwx^2)^3}{720} I_1 + \frac{(zwx^2)^2 wx^2}{120} U_1.\end{aligned}$$

Les erreurs relatives s'obtiendraient en divisant respectivement par les longueurs des vecteurs eux-mêmes et seraient $\frac{\epsilon}{\mathcal{V}_x}$, $\frac{\epsilon'}{\mathcal{J}_x}$.

2° *En phase.* — L'erreur en phase a pour limite maxima la plus grande variation possible qu'on peut faire sur l'angle compris entre les vecteurs \mathcal{V}_x et \mathcal{J}_x , quand les extrémités de ces vecteurs se déplacent à l'intérieur des

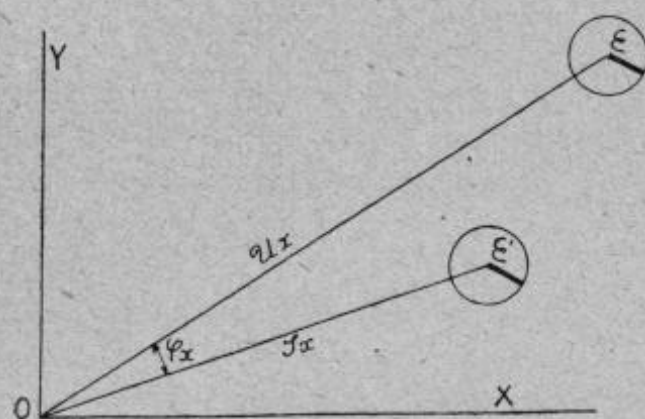


FIG. 1305. — Schéma du calcul des erreurs de phase.

cercles limites d'erreur, ayant pour rayons ϵ et ϵ' . La (fig. 1305) traduit géométriquement cette considération. On trace à partir de l'origine deux vecteurs égaux à \mathcal{V}_x et à \mathcal{J}_x , et à l'extrémité, on décrit les deux cercles de rayon ϵ et ϵ' ; on voit de suite que l'erreur sur la phase de chacun de ces

vecteurs a pour maximum sensiblement le rapport du rayon d'erreur à la longueur du vecteur, c'est-à-dire l'erreur relative calculée ci-dessus.

L'erreur maxima absolue possible sur la valeur de l'angle φ_x est donc :

$$\frac{\epsilon}{\mathcal{V}_x} + \frac{\epsilon'}{\mathcal{J}_x}.$$

Toutes ces erreurs sont en pratique négligeables, comme on le verra par les applications. On peut même, pour ce motif, se contenter, le plus sou-

vent, du premier terme correctif de chaque série. Ce cas présente quelques particularités intéressantes.

Cas particulier où l'on prend seulement les deux premiers termes des

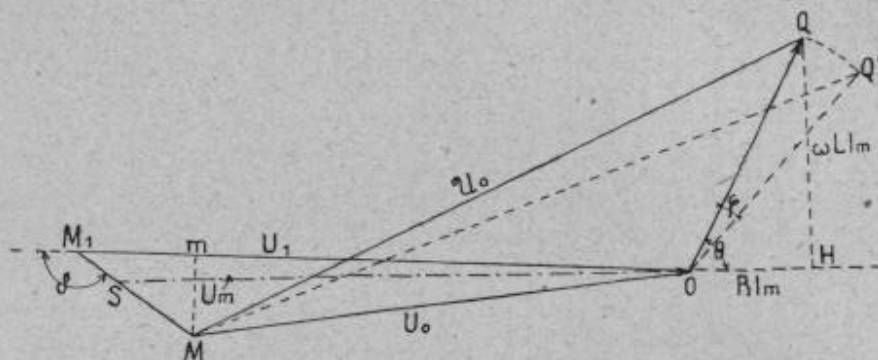


FIG. 1336. — Construction simplifiée de U_0

séries. — Prenons donc seulement les deux premiers termes de chaque série, sous la forme :

$$\begin{aligned}\bar{U}_x &= \bar{U}_1 + \left(\frac{\bar{Z}W}{2} U_1\right)_\delta, \\ \bar{J}_x &= (\bar{W}U_1)_{\theta'} + \left(\bar{W}U_1 \frac{\bar{Z}W}{6}\right)_{\theta'+\delta}, \\ I_x &= \bar{I}_1 + \left(\frac{\bar{Z}W}{2} I_1\right)_\delta, \\ V_x &= (\bar{Z}I_1)_\delta + \left(\bar{Z}I_1 \frac{\bar{Z}W}{6}\right)_{\delta+\delta},\end{aligned}$$

en supposant pour simplifier $\varphi_1 = 0$; et traçons-les graphiquement (fig. 1306 et 1307).

Régime à vide. — Le régime à vide donne lieu à l'addition au voltage U_1

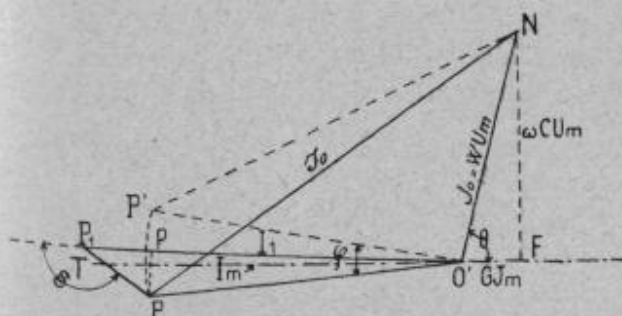


FIG. 1307. — Construction simplifiée de J_0 .

d'un simple vecteur correctif $M_1M_2 = \frac{ZWU_1}{2}$
tracé sous l'angle φ
(fig. 1303)

D'autre part le courant de charge est formé des deux vecteurs $\overline{ON_1}$ et N_1N_2 . Le vecteur principal $ON_1 = WU_1$

décalé de l'angle d'admittance θ' est le même que si la ligne avait sa capacité concentrée au point milieu. C'est le courant de charge représenté qui produit précisément la perte de charge $\overline{M_1 M_2}$, égale au produit du

courant de charge WU_1 par l'impédance $\frac{Z}{2}$ et décalée par rapport à ce courant de charge d'un angle précisément égal à l'impédance θ' (*fig.* 1301).

Quant au vecteur correctif N_1N_2 , qu'il faut ajouter au courant de charge, on remarquera qu'il fait avec ON_1 le même angle δ que M_1M avec OM_1 ; le second terme de la série de J_x que par le facteur $1/3$. Si donc l'on prend sur M_1M (*fig.* 1301) S , tel que $M_1S = \frac{M_1M}{3}$, le triangle OM_1S est semblable au triangle ON_1N_2 . Il en résulte qu'on peut obtenir directement l'extrémité du vecteur du courant de charge corrigé ON_2 (*fig.* 1301) en considérant OS comme la *tension moyenne* de la ligne U_m et construisant sous l'angle θ' un vecteur $J_0 = \overline{WU_m}$ formé de deux composantes ordinaires : GU_m en phase avec U_m et ωCU_m en quadrature.

Régime de court-circuit. — Le régime de court-circuit s'obtient d'une manière analogue. Tout d'abord, le vecteur correctif du courant P_1P a pour expression $\frac{WZI_1}{2}$ et est porté sous l'angle δ . L'interprétation physique, c'est que le courant I_1 donne lieu dans la ligne à une perte de charge ZI_1 d'un bout à l'autre, soit en moyenne $\frac{ZI_1}{2}$, et que la tension moyenne ainsi produite, décalée de l'angle d'impédance θ en avant de I , fait naître dans la ligne un courant de charge supplémentaire correspondant à l'admittance totale W , ayant donc pour grandeur efficace $\frac{WZI_1}{2}$ et décalé d'un angle θ' égal à l'angle d'admittance.

On démontrerait, de la même manière que plus haut, en comparant les formules de I_x et de V_x , que la part de charge corrigée $\overline{OQ_2}$ se déduit du courant moyen I_0 obtenu en joignant O' au point T situé au $1/3$ de P_1P , et par la même construction la perte de charge d'un courant quelconque; c'est-à-dire qu'on portera $\overline{OQ_2} = ZI_m$ sous un angle θ en avant de I_m ; et $\overline{OQ_2}$ est formé de deux composantes : RI_m en phase avec I_m et ωLI_m en quadrature.

Les (*fig.* 1306 et 1307) représentent les constructions ainsi exécutées pour la détermination des régimes résultants U_0 et J_0 .

Si l'on remarque que les longueurs M_1M , P_1P , sont proportionnelles au carré de la longueur de la ligne, cette construction peut se résumer en langage ordinaire en disant qu'on prend comme tension et courant moyens ceux qui se produisent en un point de la ligne situé au $\frac{1}{\sqrt{3}}$ de la ligne, compté à partir de l'arrivée.

Puissance et rendement. — Les épures permettent de déterminer gra-

phiquement la puissance, le rendement et le décalage d'une transmission en se servant des vecteurs de la tension et du courant résultants au départ et à l'arrivée ; les angles entre U_1 et I_1 (arrivée) et entre \mathcal{V}_0 et \mathcal{I}_0 (départ) donnent respectivement les décalages ; les puissances étoilées sont :

A l'arrivée : $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_1 x$ (projection I_1 sur U_1).

Au départ : $P_0 = \mathcal{V}_0 \mathcal{I}_0 \cos \varphi_0 = U_0 x$ (projection \mathcal{I}_0 sur \mathcal{V}_0) ; chaque courant étant projeté sur la tension correspondante. Le rendement est le rapport des deux puissances.

On peut d'ailleurs calculer les mêmes quantités en se servant des projections sur les axes :

$$P_0 = (\mathcal{V}_0)_x (\mathcal{I}_0)_x + (\mathcal{V}_0)_y (\mathcal{I}_0)_y,$$

$$\text{tg } \varphi_0 = \frac{(\mathcal{V}_0)_x (\mathcal{I}_0)_y + (\mathcal{V}_0)_y (\mathcal{I}_0)_x}{P_0},$$

$$H_0 = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{P_0}.$$

Le numérateur de la fraction $\text{tg } \varphi_0$ représente la puissance magnétisante.

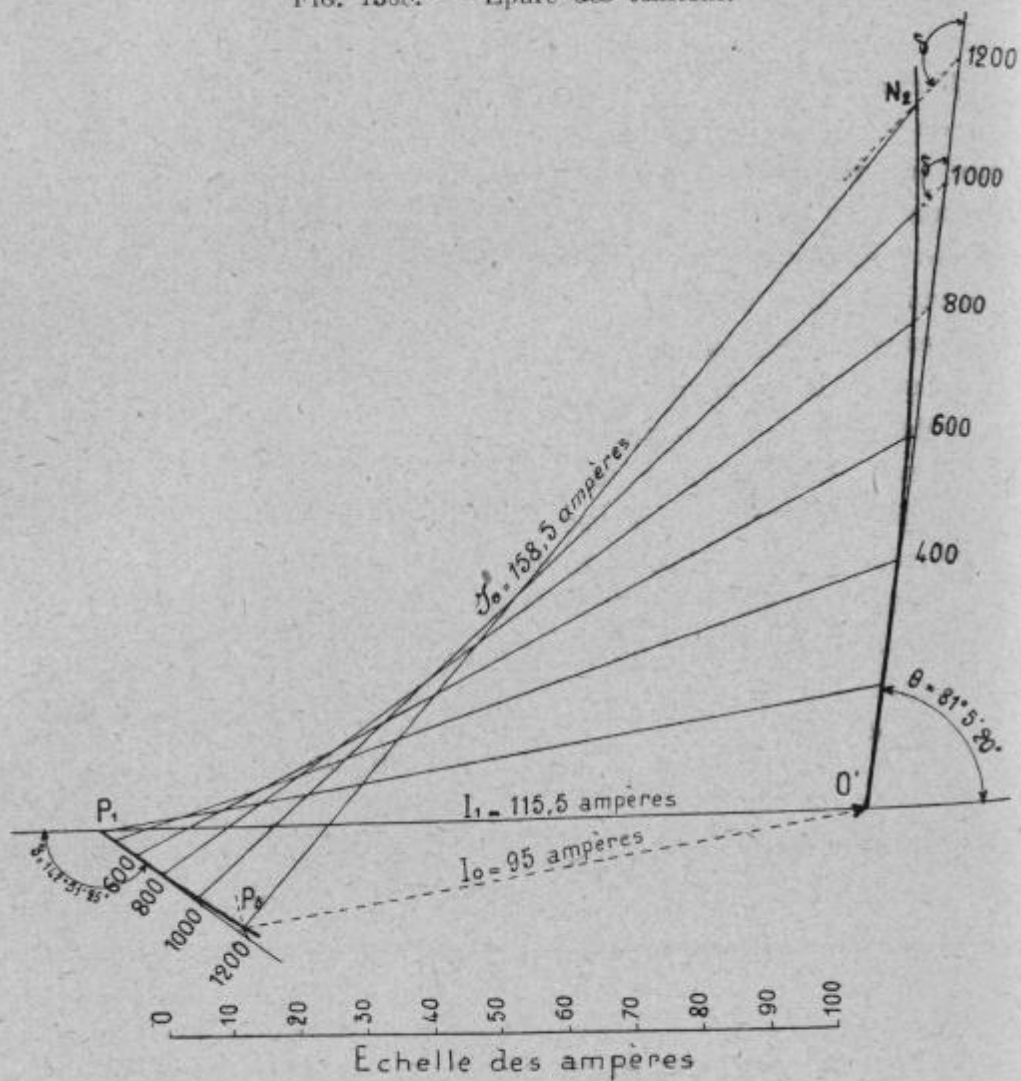
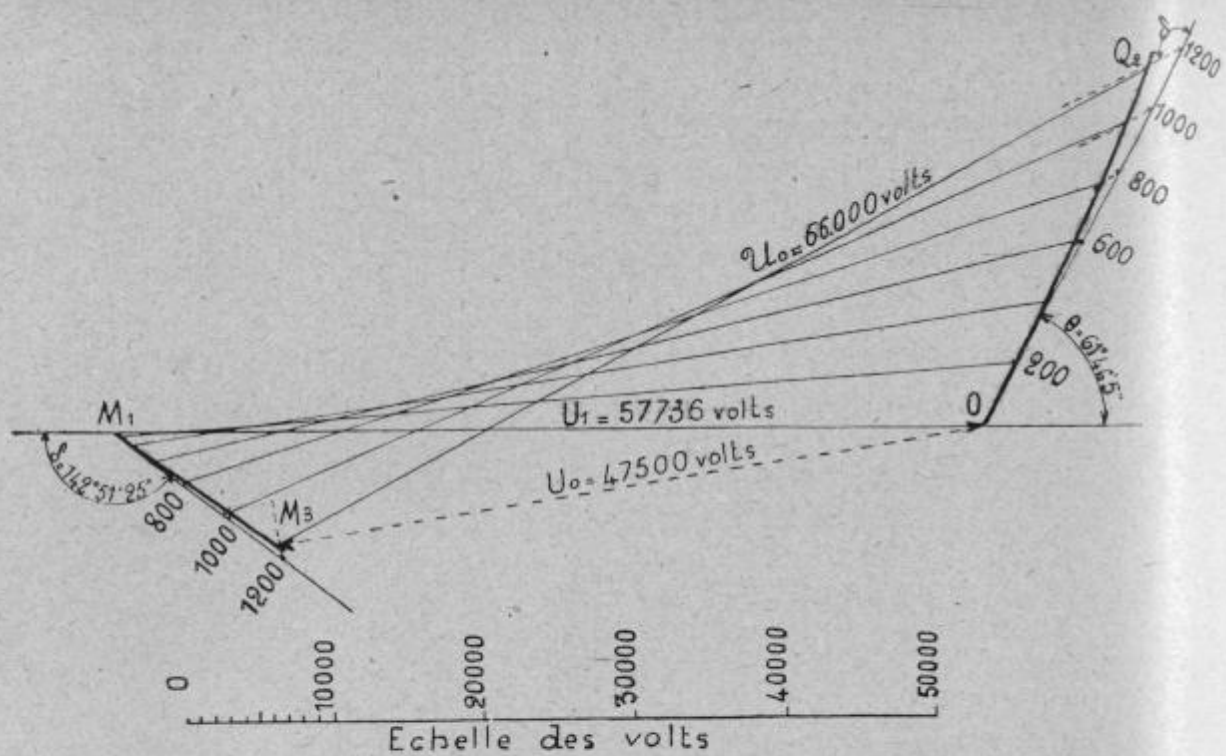
Influence des différentes circonstances d'une transmission. — Cette manière de construire les vecteurs correctifs présente le grand avantage de permettre de faire ressortir assez facilement l'influence des différents éléments de la question, qui est extrêmement compliquée quand on emploie les formules exactes.

On voit en particulier que :

1° Les vecteurs principaux OM_1 , OP_1 , ON_1 , OQ_1 sont exactement les mêmes que si la capacité est concentrée au bout de la ligne et si le courant utile débité I_1 est constant dans la ligne ;

2° Toutes les corrections qu'on fait subir à ces vecteurs reviennent à les multiplier vectoriellement par des séries ordonnées en fonction du seul produit $zw x^2 = ZW$, et du seul angle caractéristique $\delta = \theta + \theta'$; au point de vue des corrections, l'admittance w et l'impédance z jouent donc identiquement le même rôle, et il revient par suite au même d'augmenter, soit l'impédance, soit l'admittance ; de même toute variation du facteur de réactance $\frac{\omega l}{r}$ produit même effet qu'une variation égale du facteur de capacitance $\frac{\omega c}{g}$.

Répartition des voltages et des intensités le long d'une ligne. — La méthode se prête aussi d'une manière facile à l'étude de la répartition des tensions et intensités le long d'une ligne. Il suffit de construire les vecteurs $M_1 M, P_1 P, N_1 N, Q_1 Q$, d'abord pour la longueur totale de la ligne, puis de diviser ces vecteurs en un certain nombre de tronçons correspon-



dant à des points de division de la ligne (à chacun desquels correspond un certain x). Les longueurs des divisions sur M_1M et P_1P croîtront proportionnellement à x^2 , tandis que les divisions sur ON_1 et OQ_1 seront proportionnelles à x .

Pour chacun des points de division, on tracera les vecteurs correctifs du second ordre ; par exemple les vecteurs M_2, M_3 , étant parallèles entre eux et proportionnels à x^4 , et par suite à $(M_1M_2)^2$, la courbe qui relie les points M_3 est une parabole, ainsi que la courbe des points P_3 .

De même les courbes des points Q_2 et N_2 sont paraboliques du troisième degré, parce que les segments $\overline{Q_1Q_2}$, par exemple, sont proportionnels à x^3 , donc à $(\overline{OQ_1})^3$.

L'aspect de ces courbes (voir *fig. 1308 et 1309*) montre que les corrections vont en augmentant plus vite que les longueurs des lignes, mais elles en sont sensibles que pour des lignes déjà très longues.

510. Exemples d'applications. — PREMIER EXEMPLE. — *Ligne aérienne pour transmission triphasée de 20.000 kilovolts-ampères à grande distance (1.200 kilomètres), à très haute tension (120.000 volts environ) et à la fréquence 25.*

M. A. Blondel considère ici un problème tel que celui de la transmission des chutes du Zambèze au Transwaal, sur une longueur d'environ 1.200 kilomètres, en supposant qu'on emploie plusieurs lignes formées chacune de trois conducteurs portant 20.000 kilovolts-ampères ; qu'on adopte pour conducteurs des câbles d'aluminium de 350 millimètres carrés de section nets, d'un rayon extérieur $a = 12^{\text{mm}},5$, espacés d'axe en axe de $d = 3$ mètres, et placés à une hauteur *moyenne* ⁽¹⁾ au-dessus du sol $h = 9$ mètres.

Les résistances, capacités et self-inductions se déduisent de ces données pour $t = 15^\circ$, par les formules suivantes ⁽²⁾ :

$$r = \zeta \frac{2,9(1 + 0,003915t)}{350} = 0,096726 \text{ ohm/km.},$$

en appelant ζ le facteur correctif de Lord Kelvin $= \left(1 + \frac{\omega^2}{12r^2} \cos^2 \theta\right)$;

$$l = 2 \times 10^{-4} \left(\log \frac{d}{a} + 0,25\right) = 0,001147 \text{ henry/km.};$$

$$c = \frac{0,0244}{18^8} \frac{1}{\log \left(\frac{d}{a} \frac{2h}{\sqrt{4h^2 + d^2}}\right)} = \frac{0,01015}{10^6} \text{ farad/km (formule de Breisig).}$$

⁽¹⁾ Hauteur mesurée entre le sol et le centre du triangle formé par les sections des fils et moyennisée en tenant compte de la forme de la chaînette dans une travée.

⁽²⁾ En appelant *lov* le logarithme vulgaire et *log* le logarithme népérien.

Pour la perditance, on la calcule d'après la perte d'énergie probable en ligne ⁽¹⁾, soit par exemple 2.500 watts par kilomètre :

$$g = \frac{2.500}{(100.000)^2} = \frac{25}{10^8} \text{ mhos/km.}$$

On déduit de là immédiatement les impédance et admittance par kilomètre :

$$\omega = \frac{314,15}{2},$$

$$z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{314,15l}{2}\right)^2} = 0,2045 \text{ ohm/km.},$$

$$w = \sqrt{g^2 + \left(\frac{314,15c}{2}\right)^2} = \frac{1,614}{10^8} \text{ mho/km.},$$

et les angles caractéristiques :

$$\theta = \text{arc tg } \frac{\omega l}{r} = \text{arc tg } \frac{313,15 \times 0,001447}{2 \times 0,096726} = 61^\circ 46' 5'',$$

$$\theta' = \text{arc tg } \frac{\omega c}{g} = \text{arc tg } \frac{314,15 \times 0,01015}{2 \times 0,25} = 81^\circ 5' 20'',$$

$$\delta = \theta + \theta' = 142^\circ 51' 25''.$$

Le régime à l'arrivée se déduit de la tension donnée pour la réception (100.000 volts entre fils, par exemple), et de la puissance transportée (20.000 KVA), d'où :

$$U_1 = \frac{100.000}{\sqrt{3}} = 57.736 \text{ volts};$$

$$I_1 = \frac{20.000.000}{100.000 \sqrt{3}} = 115,5 \text{ ampères.}$$

Pour simplifier, on suppose $\varphi_1 = 0$, c'est-à-dire le courant débité purement watté; on peut toujours traiter ensuite le cas de $\varphi_1 \gtrless 0$ par rotation des vecteurs J_0 et V_0 , comme on l'a expliqué plus haut (fig. 1301 et 1304).

⁽¹⁾ Si on appelle p la perte totale d'énergie par kilomètre des 3 phases, elle a évidemment pour valeur, en supposant U_x constant pour simplifier :

$$p = 3U_x g U_x = 3g U_x^2;$$

on admet comme approximation $U_x = U_1$; d'où :

$$g = \frac{p}{(U_1 \sqrt{3})^2}.$$

On calcule d'abord, pour le régime *au départ* ($x = x_0 = 1.200$ kilomètres), les termes correctifs utilisés :

$$\begin{aligned}\frac{zwx^2}{2} &= \frac{0,2045 \times 1,644}{2 \times 10^8} (1.200)^2 = 0,2376; \\ \frac{(zwx^2)}{6} &= 0,0792; \\ \frac{(zwx^2)^2}{24} &= 0,0198.\end{aligned}$$

On voit combien les valeurs relatives des premières corrections sont déjà faibles pour les deux derniers termes.

Les erreurs relatives des termes négligés par rapport aux premiers termes de chaque série sont d'ailleurs donnés par le tableau I, qui montre combien elles sont pratiquement négligeables :

Erreurs relatives approximatives :

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{720} = 0,00066 \sqrt{2}; \quad \frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{420} = 0,00396 \sqrt{2}.$$

Erreurs absolues :

$$\begin{aligned}M_3 M_4 &\leq \frac{(zwx^2)^3 \sqrt{2}}{720} U_1 \leq 8,606 \sqrt{2}, \\ P_3 P_4 &\leq \frac{(zwx^3) \sqrt{2}}{420} I_1 \leq 0,0172 \sqrt{2}, \\ Q_2 Q_3 &\leq \frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{420} x I_1 \leq 53,320 \sqrt{2}, \\ N_2 N_3 &\leq \frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{420} w x U_1 \leq 0,2104 \sqrt{2}.\end{aligned}$$

On voit qu'on est parfaitement en droit de se contenter de deux termes correctifs pour le calcul de U_0 et I_0 , et d'un seul terme correctif pour le calcul de V_0 et J_0 .

Cela posé, on peut *a fortiori* négliger ces termes pour des distances x plus faibles. Le tableau ci-dessous résume les résultats des calculs effectués pour les vecteurs et les termes correctifs de puissances inférieures à la puissance x^5 , en des points distribués de 200 en 200 kilomètres sur la ligne.

TABLEAU I. — Ligne aérienne.

x	$M_1 M_2 = \frac{(zwx^2)}{2} U_1$	$M_2 M_3 = \frac{(zwx^2)^2 U_1}{24}$	$\pi Q_1 = x I_1$	$Q_1 Q_2 = \frac{(zx) I_1 (zwx^2)^2}{6}$	$P_1 P_2 = \frac{(zwx^2)}{2} I_1$	$P_2 P_3 = \frac{(zwx^2)^2}{24} I_1$	$O' N_1 = w x U_1$	$N_1 N_2 = \frac{(w x U_1) (zwx^2)^2}{6}$
200	381,07	0,4192	4.722,20	10,389	0,7621	0,00838	18,636	0,0410
400	1.524,27	6,7070	9.444,30	83,442	3,0485	0,013444	37,272	0,3280
600	3.429,60	33,9340	14.166,50	280,50	6,8591	0,067907	55,909	1,1070
800	6.097,10	107,311	18.889,00	664,90	12,1940	0,244620	74,545	2,6240
1.000	9.526,70	261,990	23.611,00	1.298,63	19,0530	0,52397	93,181	5,1251
1.200	13.718,40	543,263	28.333,00	2.244,03	27,4367	1,08651	111,818	8,8562

Ces chiffres ⁽¹⁾ ont servi à dresser les épures des tensions et des courants (fig. 1308 et 1309). On remarque que les tensions à vide qui s'obtiennent en joignant les points M_3 au point O vont en diminuant, du point d'arrivée au point de départ de la ligne ; c'est l'effet de surtension dû à la capacité. Bien que la ligne soit très longue, il est à peu près le même que si on négligeait la correction M_2M_3 , c'est-à-dire si l'on supposait la capacité de la ligne concentrée au milieu de celle-ci.

Par contre, la correction N_1N_2 est assez importante et cette hypothèse trop simplificatrice ne suffirait pas pour le vecteur J_0 .

Plus la résistance ohmique de la ligne l'emporte sur la self-induction, plus le vecteur V sera incliné vers la droite. Dans le cas particulier, le grand espacement entre les fils donne une valeur importante à l'inductance et redresse le vecteur V .

Sur l'épure des courants, le courant au départ I_0 , correspondant au régime de court-circuit, est plus petit que le courant utile à l'arrivée I_1 .

Le courant de charge n'a pas une valeur très élevée malgré la grande longueur de la ligne et la forte section des conducteurs, parce que la capacité est réduite par l'espacement entre les câbles.

D'autre part, le vecteur J est un peu incliné vers la droite et non pas perpendiculaire à U_1 , par suite de l'effet de l'admittance g qui est assez notable, vu la haute tension.

Les régimes résultants sont représentés, pour chacun des points de division de la ligne, par les vecteurs joignant les points respectifs correspondants des deux courbes de chaque épure.

Pour tout le reste, la figure se comprend d'elle-même et n'appelle pas d'autres commentaires.

DEUXIÈME EXEMPLE. — *Ligne souterraine de 100 kilomètres, 50 périodes.* — Comme second exemple, M. A. Blondel prend une ligne souterraine à 50 périodes, voltage d'arrivée 10.000 volts étoilés (17.320 volts entre fils) ; débit, 50 ampères par conducteur ; longueur (relativement considérable), 100 kilomètres. Pour n'avoir pas de chute de voltage excessive, on réduit la densité de courant à 1 ampère par millimètre carré et on adopte par exemple un câble triphasé de 50 millimètres carrés par âme, indiqué par Roessler ⁽²⁾, avec les constantes suivantes :

$$\omega = 314,15 ;$$

$$r = 0,3594 \text{ ohm par kilomètre ;}$$

⁽¹⁾ Les calculs ayant été faits par logarithmes, les résultats contiennent plus de décimales qu'il est nécessaire. On peut se contenter de trois chiffres significatifs et employer la règle à calcul.

⁽²⁾ Théorie et calcul des lignes à courants alternatifs, tableau 5, page 90, câble n° 5. Chaque âme est formée de 19 fils de 1^{mm},83 de diamètre. On a adopté comme tension

$l = 0,000352$ henry par kilomètre ;

$c = 0,185$ microfarad par kilomètre ;

et en ajoutant :

$$g = 0.$$

On suppose $g = 0$, bien qu'en réalité il ne soit pas nul, mais faute d'autre indication précise à ce sujet, En pratique, il conviendrait de déterminer par expérience la perte d'énergie par kilomètre p due aux fuites et surtout à l'hystérésis diélectrique, et on déduirait comme plus haut g par la formule :

$$g = \frac{p}{(10.000 \sqrt{3})^2}.$$

On déduit de ces constantes :

$$z = \sqrt{r^2 + \omega^2 l^2} = 0,3761 \text{ ohm/km.},$$

$$w = \omega c = 0,00003812 \text{ mho/km.},$$

$$\theta = \text{arc tg } \frac{\omega l}{r} = 17^\circ 6' 10''$$

$$\theta' = \text{arc tg } \frac{\omega c}{g} = 90^\circ$$

$$\delta = 107^\circ 6' 10''.$$

On calcule immédiatement comme plus haut, pour la longueur totale $x_0 = 100$ kilomètres, les fractions suivantes, dont les deux premières indiquent les erreurs relatives des premiers termes omis dans les différentes séries, et les suivantes montrent les erreurs absolues correspondantes sur les vecteurs de première et de seconde catégories :

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{720} = 0,000066 \sqrt{2} = 0,000093,$$

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{120} = 0,000398 \sqrt{2} = 0,000563,$$

$$\frac{(zwx^2)^3 \sqrt{2}}{720} U_1 = 0,14506 \sqrt{2} = 0,20600,$$

$$\frac{(zwx^2)^3 \sqrt{2}}{720} I_1 = 0,000725 \sqrt{2} = 0,001025,$$

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{120} zxI_1 = 0,7488 \sqrt{2} = 1,06000,$$

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{120} wxU_1 = 0,02314 \sqrt{2} = 0,03269.$$

10.000 volts étoilés au lieu de 10.000 volts entre fils, en supposant qu'on ait adapté à ce câble, d'un type déjà ancien, les procédés d'imprégnation modernes qui ont permis d'augmenter beaucoup la rigidité diélectrique du papier imprégné.

On voit que les erreurs relatives sont encore faibles et sont de même ordre que dans la ligne aérienne à très haute tension du premier exemple ; elles sont même notablement plus faibles en ce qui concerne les corrections de tension à vide et de courant de court-circuit. C'est donc d'une manière très légitime que les auteurs ont conseillé précédemment de s'en tenir

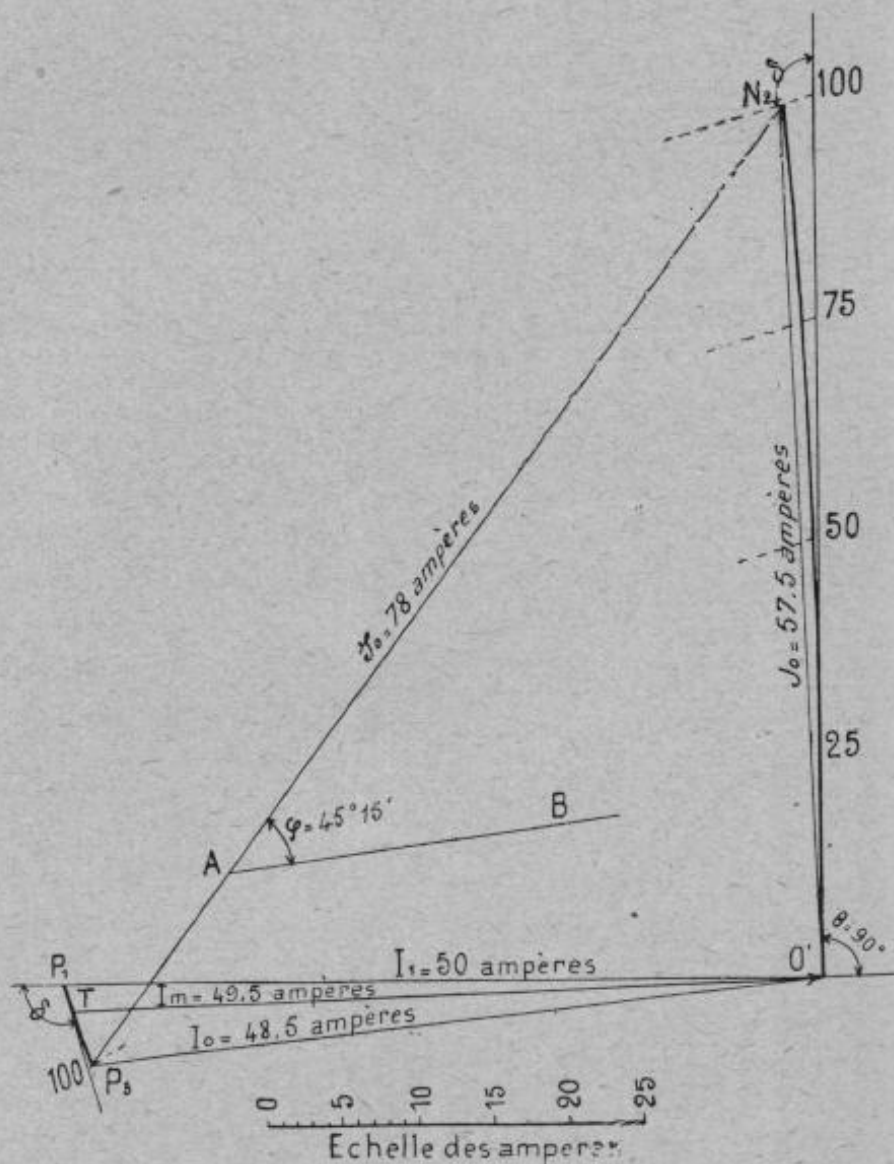


FIG. 1310.

pour toutes les séries à un seul terme de correction, en négligeant les puissances supérieures à x^3 .

L'épure des (fig. 1310 et 1311) représente, comme plus haut, les constructions graphiques en négligeant les termes correctifs au delà de la quatrième puissance de la distance. On a divisé la ligne en tronçons de 25 kilomètres chacun ; les extrémités des vecteurs ont été déterminées

par les distances de 25, 50, 75 et 100 kilomètres, et réunies ensuite par des courbes.

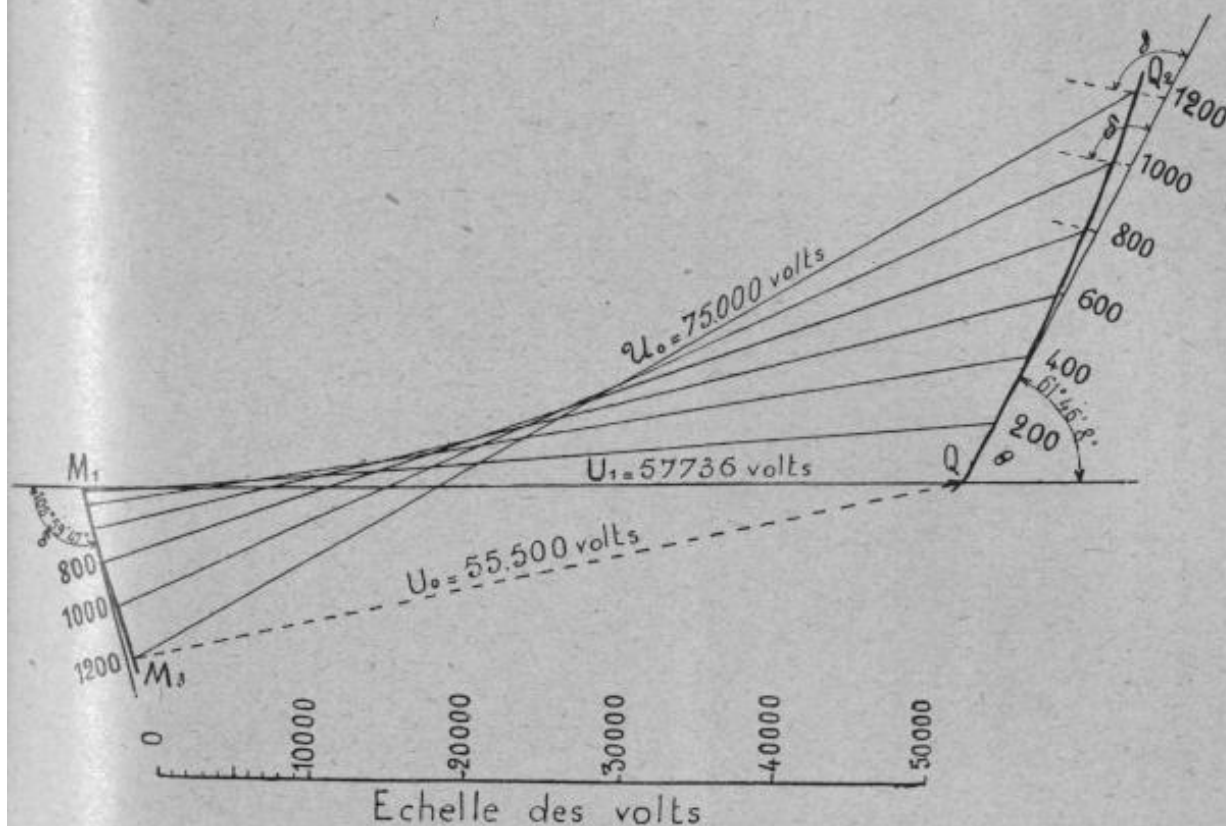


FIG. 1311.

Les éléments de cette construction, tels qu'ils résultent du calcul (par logarithmes), sont résumés dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU II. — Ligne souterraine de transport.

x	M_1M_2	M_2M_3	OQ_1	Q_1Q_2	P_1P_2	P_2P_3	$O'N_1$	N_1N_2
25	68,309	0,07777	470,12	1,0705	0,3415	0,000389	14,060	0,03308
50	273,235	1,24429	940,25	8,5636	1,3662	0,006221	29,350	0,26467
75	614,778	6,29920	1410,37	28,902	3,0739	0,031296	43,590	0,89328
100	1902,930	19,90900	1880,50	68,510	5,4647	0,099540	58,120	2,11740

Les vecteurs résultants U_0 et J_0 n'ont été tracés que pour le point extrême ($x_0 = 100$ kilomètres).

Pour montrer l'application de la méthode simplifiée, on a tracé les vecteurs U_m et I_m qui représentent respectivement la tension à vide et le courant de court-circuit, à la distance de $\frac{100 \text{ km}}{\sqrt{3}}$ du point d'arrivée. Les points S et T qui déterminent ces vecteurs moyens sont obtenus, comme

on le sait, en prenant le tiers des vecteurs correctifs de premier ordre c'est-à-dire :

$$\frac{1}{3} \frac{zw}{2} \frac{(100)^2}{2} U_1 = 364,31$$

et :

$$\frac{1}{3} \frac{zw}{2} \frac{(100)^2}{2} I_1 = 1,822,$$

portés sous l'angle ε à partir de la direction de U_1 et I_1 respectivement.

On lit sur l'épure, au moyen des échelles tracées d'avance, les valeurs de U_m et I_m :

$$U_m = 9,850 \text{ volts,}$$

$$I_m = 49,5 \text{ ampères.}$$

La chute de tension OQ_2 est alors la résultante des deux vecteurs :

$$OH = rI_m = 35,94 \times 49,5 \text{ amp.} = 1.760,$$

$$HQ_2 = \omega l I_m = 0,4106 \times 49,5 \text{ amp.} = 5,475,$$

Quant au courant J_0 , il se déduit de même de U_m ; mais comme ici $g = 0$, J_0 n'a qu'une composante perpendiculaire U_m :

$$J_0 = \omega c U_m = 57,5 \text{ ampères.}$$

Les longueurs des vecteurs résultants, lues respectivement aux échelles des volts et des ampères, indiquent :

$$\mathcal{V}_0 = 11.500 \text{ volts étoilés;}$$

$$\mathcal{J}_0 = 78 \text{ ampères.}$$

A titre d'exemple du calcul de la puissance au départ, on a tracé par un point quelconque A du vecteur \mathcal{J}_0 , une droite AB parallèle au vecteur \mathcal{V}_0 de la (fig. 1310). Son angle avec \mathcal{J}_0 représente le décalage au départ $\varphi_0 = 45^\circ 15'$.

On en déduit la puissance étoilée au départ pour chaque conducteur :

$$3 \mathcal{V}_0 \mathcal{J}_0 \cos \Phi_0 = 11.500 \times 78 \times \cos (45^\circ 15') \times 3 = 1.894.600 \text{ watts.}$$

En remarquant que la puissance à l'arrivée est :

$$3 U_1 I_1 = 10.900 \times 50 \times 3 = 1.500.000 \text{ watts,}$$

on obtient le rendement :

$$\eta = \frac{1.500.000}{1.894.500} = 0,792.$$

TROISIÈME EXEMPLE. — *Ligne aérienne pour transmission de distribution.* — On suppose la même ligne, le même voltage et le même débit

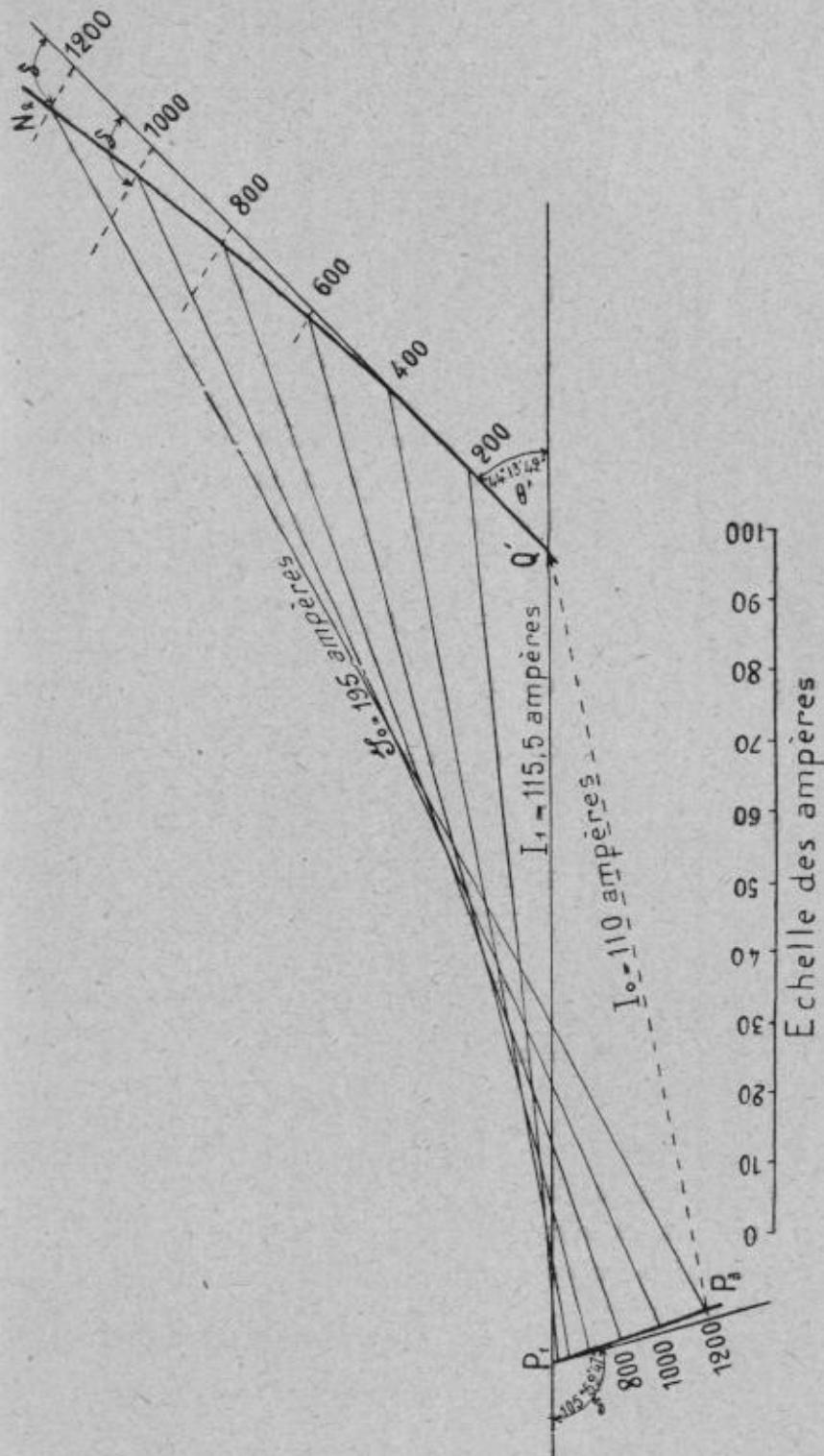


FIG. 1312. — Épure des intensités.

que dans le premier exemple. Mais on admet qu'en plus on doit fournir par kilomètre 7.500 kilowatts de puissance utile uniformément distribuée,

sous un facteur de puissance de 0,85. Les méthodes précédentes s'appliquent sans difficulté. Il suffit de faire entrer l'énergie distribuée dans les coefficients g et ωc .

La perditance g doit être remplacée par une acceptance ($g' = g''$), en appelant g' la perditance, comme plus haut, et g'' la distributance, c'est-à-dire l'acceptance linéaire correspondant à l'énergie distribuée utilement. En admettant comme ci-dessus une perte de 2.500 watts par kilomètre et un débit utile de 7.500 watts par kilomètre, on en déduit :

$$g = \frac{2.500}{(10.000)^2} + \frac{7.500}{(10.000)^2} = \frac{100}{10^8}.$$

D'autre part, la capacitance ωc est remplacée par une susceptance ($\omega c - k$), obtenue en retranchant de la capacitance l'excitance k (ou magnétisance), c'est-à-dire l'inductance répartie correspondant au courant déwatté débité. Cette dernière se déduit directement de la distributance g'' , lorsqu'on connaît le facteur de puissance $\cos \varphi'$ de la puissance distribuée, par la relation :

$$k = g' \tan \varphi'.$$

On suppose ici, par exemple :

$$\cos \varphi' = 0,85, \quad \text{d'où} \quad k = 0,621 \quad \text{et} \quad g = \frac{62,1}{10^8}.$$

De là on tire :

$$\begin{aligned} z &= \sqrt{r^2 + \omega^2 l^2} = 0,20448, \\ \omega &= \sqrt{(g' + g'')^2 + (\omega c - k)^2} = 0,000001393, \\ \theta &= \arctan \frac{\omega l}{r} = 44^\circ 13' 42'', \\ \theta' &= \arctan \frac{\omega c - k}{g' + g''} = 61^\circ 46' 5'', \\ \delta &= \theta + \theta' = 105^\circ 59' 47''. \end{aligned}$$

Le tableau ci-dessous indique, comme dans les cas précédents, les erreurs relatives et les erreurs absolues obtenues en arrêtant les développements en série à la puissance x^4 inclusivement pour la distance maximale $x_0 = 1.200$ kilomètres :

$$\begin{aligned} \frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{720} &= 0,000234 \sqrt{2} = 0,000331, \\ \frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{420} &= 0,001407 \sqrt{2} = 0,002079, \\ \frac{(zwx^2)^3 \sqrt{2}}{720} U_1 &= 5,5639 \sqrt{2} = 7,860, \end{aligned}$$

$$\frac{(zwx^2)^3 \sqrt{2}}{720} I_1 = 0,04413 \sqrt{2} = 0,04573,$$

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{720} zxI_1 = 39,867 \sqrt{2} = 56,4,$$

$$\frac{(zwx^2)^2 \sqrt{2}}{120} wxU_1 = 0,1360 \sqrt{2} = 0,1925.$$

Le tableau ci-après résume, pour des points espacés de 200 en 200 kilomètres, comme dans le premier exemple, les valeurs des vecteurs correctifs.

TABLEAU III. — Ligne aérienne, transport avec distribution.

x	M_1M_2	M_2M_3	OQ_1	Q_1Q_2	P_1P_2	P_2P_3	$O'N_1$	N_1N_2
200	329,51	0,3134	4,722	8,983	0,6590	0,00063	16,115	0,03065
400	1318,00	5,0148	9,444	71,868	2,6360	0,01003	32,230	0,24525
600	2965,58	25,3876	14,166	242,55	5,9310	0,05077	48,344	0,82773
800	5272,14	80,2373	18,889	574,94	10,5441	0,16047	64,459	1,96200
1.000	8237,72	195,892	23,611	1122,90	16,4752	0,39178	80,574	3,83200
1.200	11862,30	406,201	28,333	1940,42	23,7242	0,81239	96,688	6,62180

On remarquera que OQ_1 est le même que dans le premier exemple, parce que le z de la ligne reste le même.

En comparant les (*fig.* 1311 et 1312) aux (*fig.* 1308 et 1309), on voit immédiatement l'influence du débit d'énergie le long de la ligne : la surtension à vide $U_1 - U_0$ est beaucoup plus faible que dans le premier cas, parce que U_0 ne descend pas au-dessous de 55.500 volts, au lieu de 47.500, par suite de la plus faible valeur de l'angle δ ; ce changement de δ provient exclusivement de la variation de l'angle d'admittance : $\arctg \frac{\omega c - k}{g' + g''}$.

Si l'on augmentait davantage encore la puissance débitée, ou si l'on diminuait son facteur de puissance, l'angle δ diminuerait encore et on arriverait à avoir $U_0 = U_1$; on verra plus loin cet effet se produire dans le quatrième exemple.

En même temps que la surtension de la ligne à vide est moindre, la variation du court-circuit I est diminuée également dans les mêmes proportions, puisque sa loi de variation est la même que pour U .

La chute de tension OQ_2 ne varie pas beaucoup en phase, puisqu'elle dépend presque uniquement du facteur d'impédance de la ligne, qui est le même dans les deux cas. Mais elle augmente en grandeur, par suite du plus grand débit et aussi par suite de la diminution de l'angle δ appliqué au segment correctif Q_1Q_2 .

L'effet résultant de ces modifications, et en particulier du courant total

plus fort débité, est de rendre nécessaire au départ une tension étoilée de 75.000 volts au lieu de 66.000.

Quant au courant de charge à vide J_0 , il est à la fois moins important en grandeur (environ 104 ampères, au lieu de 95) et plus décalé en phase que dans le premier exemple.

Le premier effet peut surprendre, puisque l'énergie débitée le long de la ligne est comptée dans le courant à vide, c'est-à-dire un courant qui ne dépend pas de l'intensité débitée à l'arrivée ; mais cette réduction provient de la présence d'un fort courant déwatté magnétisant qui se retranche du courant de capacité, lequel jouait le rôle principal dans le premier exemple. C'est cette réduction de la susceptance apparente qui réduit le décalage.

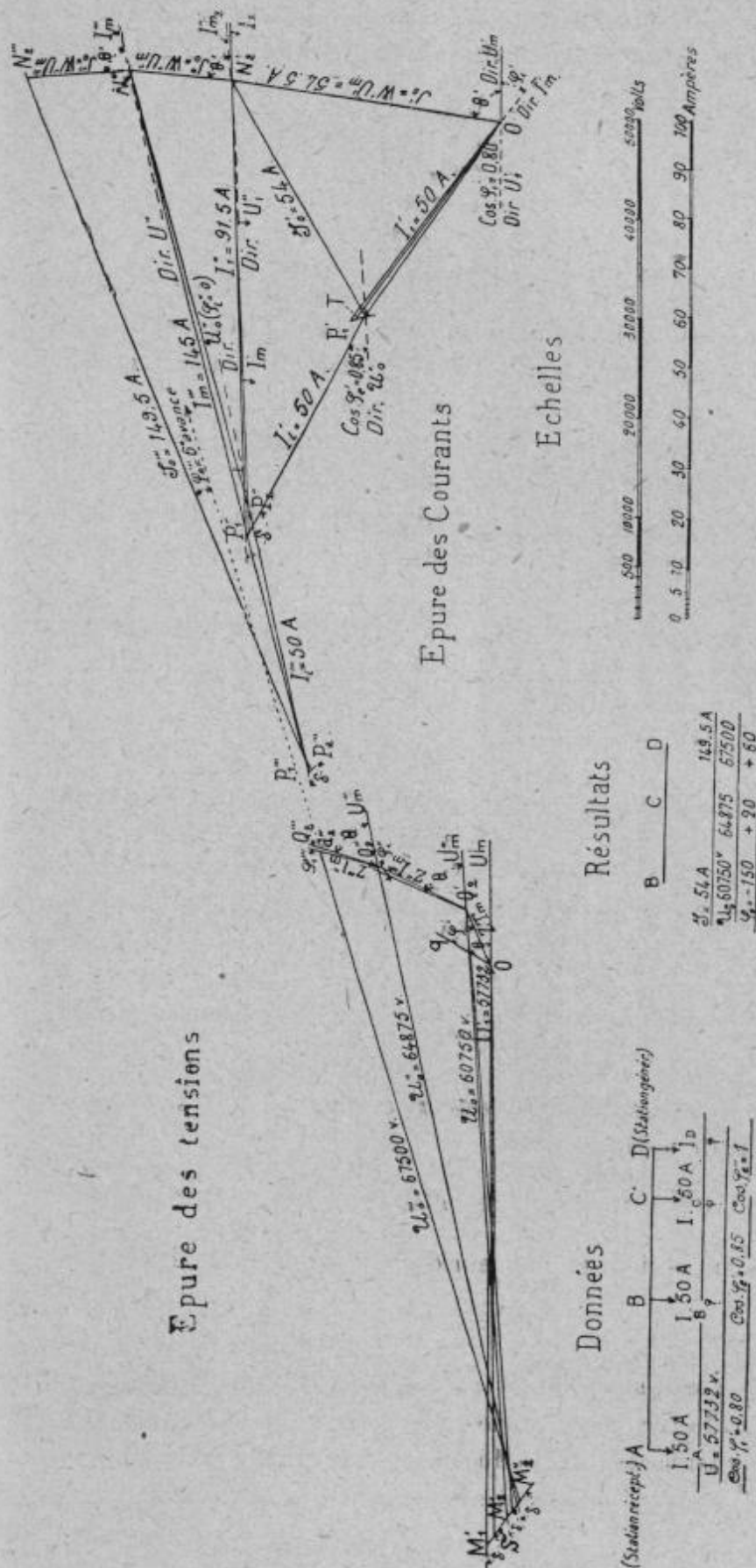
Ces divers effets ont, pour conséquence, en définitive, une augmentation du courant de départ (195 ampères au lieu de 158,5) qui n'est pas en proportion avec le courant distribué le long de la ligne dans le second cas.

Cas de plusieurs stations. — Il suffit de connaître pour chaque tronçon le régime d'entrée U_0, β_0 du tronçon qui le précède en remontant. On considère cet U_0 comme le U_1 du nouveau tronçon et on prend pour son I_1 la résultante de β_0 et du courant fourni au centre de distribution qu'il dessert, en rapportant le décalage et le courant au voltage local, c'est-à-dire à U_0 .

La suite des calculs est donc très simple et n'exige qu'un peu de patience ; elle est rapide si on se contente de la méthode simplifiée, c'est-à-dire en négligeant les puissances x^4 inclusivement (ce qui est parfaitement légitime, étant donné que les tronçons sont généralement plus courts que toutes les lignes étudiées ci-dessus).

QUATRIÈME EXEMPLE. — *Ligne à très haute tension, 100.000 volts, de 1.200 kilomètres, pour transport et distribution à 3 stations, formée des mêmes conducteurs qu'au premier exemple.* — Reprenons le transport à très grande distance, étudié dans le premier exemple, et supposons que, en outre du centre de consommation (50 ampères par conducteur) situé à son extrémité d'arrivée A, la ligne comprenne deux autres centres de distribution de même importance (50 ampères) situés respectivement aux points B et C, à 600 et 1.000 kilomètres de la station réceptrice ; supposons, en outre, que les facteurs de puissance globaux de ces trois consommations soient respectivement 0,80 en A, 0,85 en B, et 1,00 en C. Ces conditions sont résumées sur l'épure de la (fig. 1313) par le tableau des données, qui montre les trois tronçons AB, BC, CD de la ligne. Il s'agit de déterminer le régime aux points B, C et D.

Les constantes des conducteurs sont, par hypothèse, les mêmes que pour le premier exemple, et nous supposons encore une perte d'énergie



de 2.500 watts par kilomètre pour l'ensemble des trois conducteurs. Les constantes, qui en ont été déduites pour le calcul de la ligne, sont :

$$\begin{aligned} z &= 0,204476 \text{ ohms,} \\ w &= 0,000001614 \text{ ohms,} \\ \theta &= 61^{\circ}46'5'', \\ \theta' &= 84^{\circ}5'20'', \\ \delta &= 142^{\circ}51'25''. \end{aligned}$$

On construit de proche en proche à la fois l'épure des tensions et l'épure des courants, en appelant pour chaque tronçon U_1, I_1, φ_1 les tension, intensité et décalage à l'aval, c'est-à-dire à l'extrémité du côté de l'arrivée, et U_0, I_0, φ_0 , les mêmes grandeurs à l'entrée du côté amont ou côté départ ; en outre, à chaque station intermédiaire, nous appellerons I_l et φ_l , l'intensité et le décalage du courant *local*, rapportés à la tension qui existe en ce point. Nous désignerons le rang des tronçons par un, deux, trois accents, etc., suivant leur ordre, en partant de la station réceptrice.

Premier tronçon. — On trace d'abord les vecteurs $\overline{M_1'O} = U_1' = 57.732$ volts ; $\overline{P_1'O'} = I_1' = 50$ ampères, décalé en arrière de U_1' de l'angle $\varphi_1 = \arccos 0,80$.

On a pour ce premier tronçon :

$$\begin{aligned} Z &= 600z = 122,6856 \text{ ohms ;} & W &= 600w = 0,0009683 \text{ ohm ;} \\ \frac{Z'W'}{2} &= 0,05936. \end{aligned}$$

On trace, sous l'angle δ par rapport aux deux lignes précédentes, les deux vecteurs correctifs :

$$\overline{M_1'M_2'} = \frac{ZW'(600)^2}{2} U_1' = 3.429 \text{ volts ;} \quad \overline{P_1'P_2'} = \frac{ZW'(600)^2}{2} I_1' = 2,968 \text{ amp.}$$

En prenant les tiers des vecteurs correctifs, on lit sur l'épure la tension et l'intensité moyennes :

$$\overline{S'O'} = U_m' = 56.750 \text{ volts ;} \quad \overline{TO'} = I_m' = 49,8 \text{ ampères.}$$

D'où l'on obtient la longueur du vecteur de chute de tension :

$$\overline{OQ_2} = Z'I_m' = 6.001 \text{ volts,}$$

que l'on porte sous l'angle $\varphi_1' = 36^{\circ}52'10''$ en retard par rapport à la direction \overline{Oq} formant l'angle θ en avance sur la tension moyennée U_m' ; cela pour tenir compte du décalage φ_1' qui existe entre U_m' et I_m' .

La ligne $\overline{M_2'Q_2'}$ représente la tension à la station B :

$$U_0' = 60.750 \text{ volts.}$$

Le courant de charge $ON_2' = J_0$ s'obtient en traçant l'angle $\theta' + \varphi_1'$ en avance par rapport à la direction de I_m' et sa valeur lue sur l'épure est 54,5 ampères. Le courant total à l'entrée du premier tronçon est donc représenté par la résultante J_0 dont la valeur lue est environ 54 ampères et le décalage correspondant $\varphi'\theta = 31^\circ 47' 16''$.

Station B. — Pour avoir le courant total à la station B, il suffit de combiner le courant J_0' avec un courant $I_1 = 50$ ampères décalé de l'angle φ_1 par rapport à la tension de la station U_0' . La résultante $\overline{P_1P_2}$ définit le courant $I_1 = 91,5$ ampères à l'arrivée du second tronçon, et U_0' devient le U_1'' correspondant. Il n'y a plus qu'à recommencer pour le second tronçon, en partant de ces deux valeurs et de leur décalage angulaire qui représente φ_1'' (environ $-1^\circ 5'$), toutes les opérations faites pour le premier tronçon. L'accent suffit à distinguer le second du premier.

Deuxième tronçon. — On a ici, pour les 400 kilomètres du tronçon :

$$Z'' = 400z = 81,7904; \quad W'' = 400w = 0,00064157;$$

d'où :

$$\frac{Z''W''}{2} = 0,02167; \quad \frac{Z''W''}{2} U_1' = 1,781 \text{ volts}; \quad \frac{Z''W''}{2} I_1'' = 2,4016 \text{ ampères}.$$

On porte ces vecteurs respectivement en $\overline{M_2'M_2''}$ et $\overline{P_1'P_1''}$.

En prenant les tiers de ces vecteurs, on en déduit comme plus haut la tension moyenne $\overline{S''Q_2''}$ et le courant moyen $\overline{T''N_2'}$ ayant respectivement les valeurs :

$$U_m'' = 60,125 \text{ volts}; \quad I_m'' = 90,75 \text{ ampères}.$$

Puis l'on en déduit $Z''I_m''$ que l'on porte en $\overline{Q_2'Q_2''}$, direction obtenue en portant d'abord à partir de U_m' l'angle θ et en retranchant ensuite φ_1'' qui est ici négatif; de même le segment $W''U_m''$ est porté sous l'angle θ' à partir de la direction I_m' et donne ainsi le point N_2'' . Le segment $\overline{P_1''P_2''}$ représente le courant de départ du second tronçon J_0'' et sa valeur lue sur l'épure est 96 ampères environ.

De même, la tension U_0'' en C représentée par le vecteur $\overline{M_2''Q_2''}$ a pour valeur lue sur l'épure 64,875 volts.

Station C. — A la station C, nous avons à combiner maintenant le courant J_0'' avec le courant local $P_2''P_1''' = 50$ ampères tracé en phase avec U_0'' . (La résultante $I_1''' = \overline{P_1'''N_2''}$ se trouve par hasard passer sensiblement par le point P_1'' , mais ce n'est qu'une coïncidence fortuite.) L'angle φ_1''' qui s'en déduit égale environ 2° .

Troisième tronçon. — On a pour les 200 kilomètres du tronçon :

$$Z'' = 40,8952; \quad W'' = 0,00032279; \quad \frac{Z''W''}{2} = 0,0066.$$

On en déduit :

$$\frac{Z''W''}{2} U_1'' = 423,63 \text{ volts} \quad \text{et} \quad \frac{Z''W''}{2} I_1'' = 0,957 \text{ ampères.}$$

On porte, comme plus haut, ces vecteurs sous l'angle δ à partir de U_1'' et I_1'' respectivement, et l'on en déduit les valeurs moyennes, puis les vecteurs $\overline{Q_2''Q_2'''} = 5.930$ volts et $\overline{N_2''N_2'''} = 20.94$ ampères; d'où, finalement, les vecteurs résultants :

$$U_0'' = 67.500 \text{ volts}; \quad \mathfrak{D}_0'' = 149,5 \text{ ampères,}$$

et l'angle $\varphi_0''' = + 6^\circ$.

Il est facile, comme on le voit, d'exécuter ainsi l'étude de la ligne par tronçons; une fois qu'on a fait ce cheminement pour un certain voltage, le résultat peut être appliqué par similitude si l'on fait varier à la fois toutes les intensités et tous les voltages suivant une même proportion.

Cas d'un câble distributeur. — On a considéré, jusqu'ici, une ligne de transport dont le débit principal a lieu à l'extrémité d'arrivée ou en des centres de consommation concentrée.

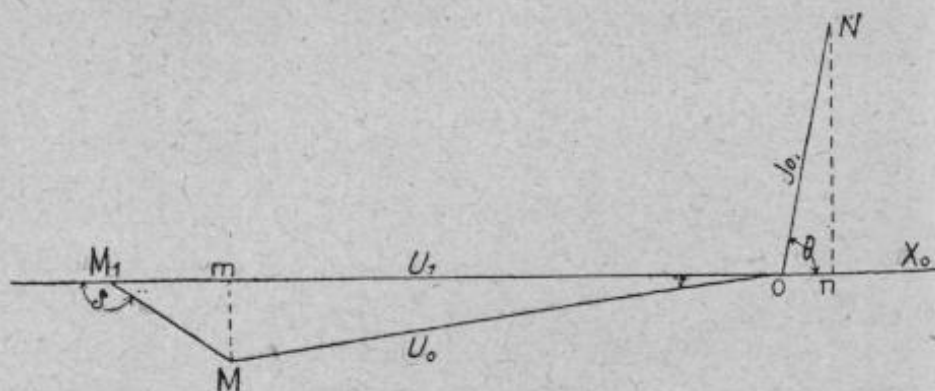


FIG. 1314. — Épure du câble distributeur.

Un autre cas particulier intéressant est celui d'un câble distributeur dont tout le débit est supposé uniformément réparti. Ce n'est qu'une application particulière du cas déjà traité dans l'exemple 2.

On fait encore ici l'hypothèse simplificatrice qui consiste à remplacer le débit uniforme par une distributance et une excitance uniformes, comme si le voltage était constant.

En appelant φ le décalage du courant débité et p la puissance en watts distribuée par kilomètre par l'ensemble des conducteurs formant la ligne, le débit watté sera représenté par la distribution $g = \frac{P}{3U^2}$ et le débit déwatté par une excitation $k = g \tan(\arccos \varphi)$, qui se retranche de la capacitance ωc .

La construction graphique à suivre dans ce cas n'est autre que celle de la (fig. 1298) du régime à vide corrigée par les constructions des (fig. 1301 et 1302).

Si l'on applique la correction simplifiée (fig. 1306 et 1307) en négligeant les termes en x^4 , cette figure se réduit simplement à la (fig. 1314) dans laquelle M_1M représente une correction de premier ordre $\frac{zx^2}{2}$, portée sous l'angle δ en avant de la direction OM_1 (ou $\pi - \delta$ en arrière de la phase du vecteur U_1).

Le point S est pris au tiers de M_1M et déterminé la tension moyenne $\overline{SO} = U_m$; il n'y a plus qu'à construire les deux composantes $\overline{OF} = GU_m$ et $\overline{FN} = \omega CU_m$, en posant :

$$x_0 = \text{longueur du câble}; \quad G = (g' + g'')x_0; \\ \text{et} \quad \omega C = (\omega c - k)x_0,$$

pour obtenir le vecteur ON représentant le courant débité.

511. Graphique de M. P. Ferrier. — Le calcul d'une longue ligne de transmission peut être rendu relativement simple en divisant la ligne en tronçons assez courts et en construisant pour chacun le graphique classique. Cette méthode a l'avantage de permettre d'avoir sur un seul graphique les variations des constantes de la ligne et de la distribution d'énergie en cours de route. Elle offre en outre le moyen de déterminer immédiatement la tension et le courant en un point quelconque de la ligne, puisque l'on construit la courbe des tensions et des intensités. En opérant sur des tronçons de 10 kilomètres et en adoptant une échelle suffisante, l'approximation que l'on obtient est largement adéquate aux besoins de la pra-

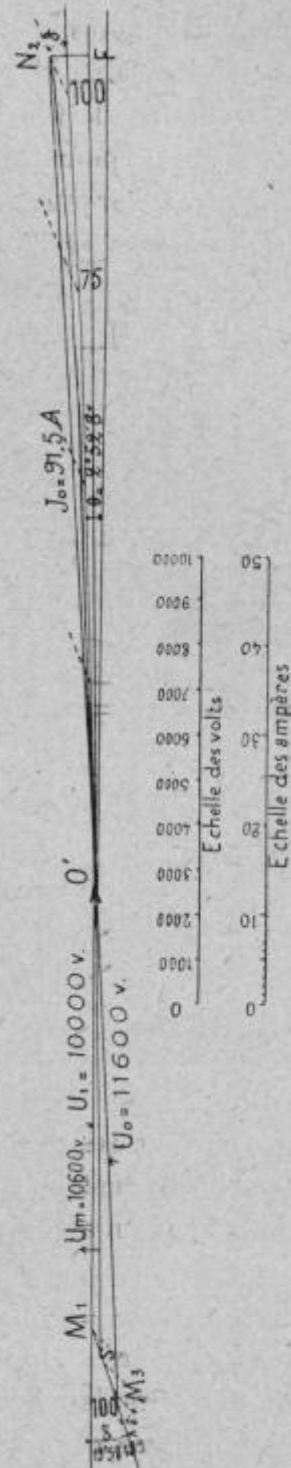


FIG. 1315. — Câble distributeur.

tique. Pour l'application de la méthode, il faut, pour les lignes à courant triphasé, n'opérer que sur une phase étoilée, c'est-à-dire avec le courant de un fil de ligne et la tension entre ce fil et le neutre.

Pour le calcul des coefficients L et C , on possède pour L les tables de M. A. Blondel. Mais il serait intéressant de dresser des tables à double entrée donnant à la fois L et C en fonction de la distance et du diamètre des conducteurs pour les dimensions courantes, soit en mono, soit en triphasé pour les diamètres de 3 millimètres à 10 millimètres en fils et jusqu'à 40 millimètres en câble (à cause de l'aluminium qui commence à se ré-

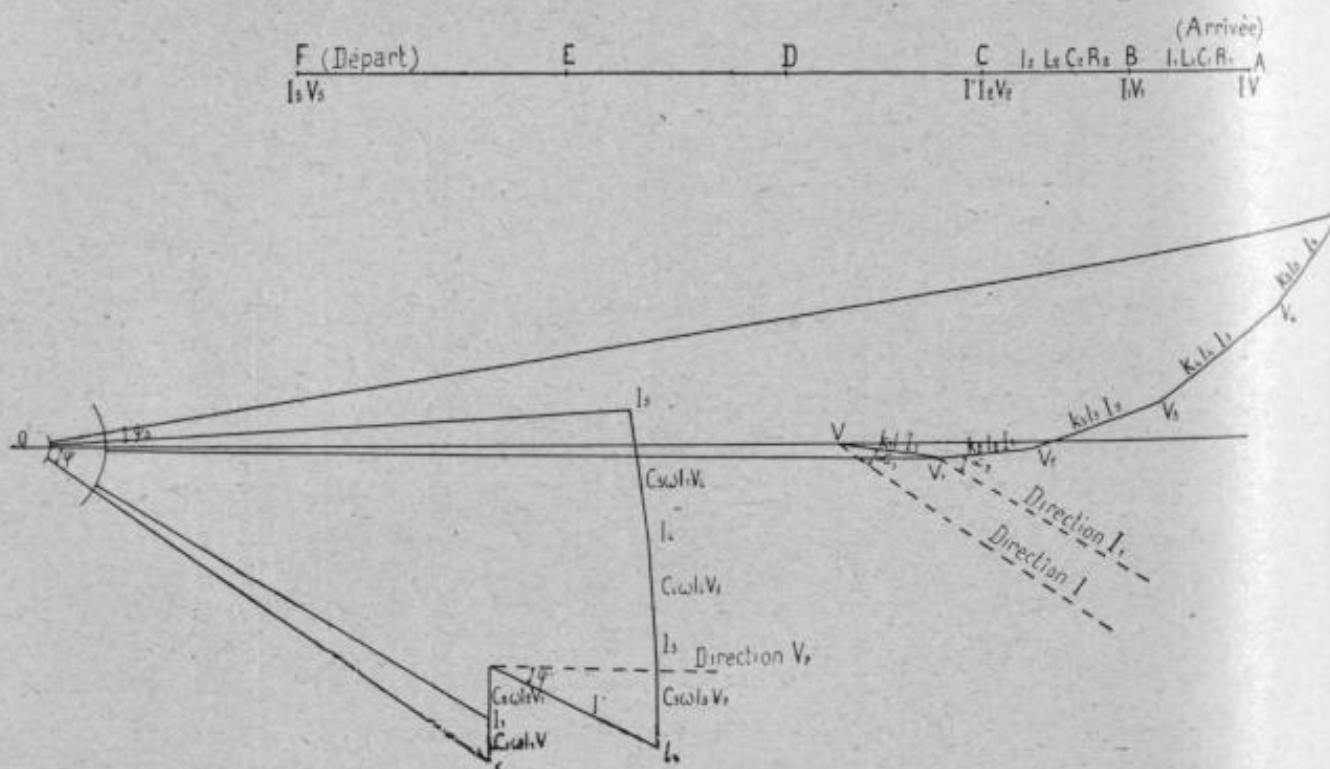


FIG. 1316.

pandre) et pour des distances de 10 centimètres en 10 centimètres jusqu'à 1^m,50 et de 25 centimètres en 25 centimètres jusqu'à 2^m,50 ou 3 mètres, distances que l'on atteint pour les très hautes tensions avec isolateurs suspendus.

Soit (fig. 1316) une ligne AF transportant de l'énergie de F en A, alimentant en cours de route une dérivation ayant son point de départ en C sur son parcours. Nous la divisons en tronçons AB, BC, CD, DE et EF, en choisissant comme points de division ceux où les constantes de la ligne de l'énergie transportée varient et d'autres points répartis, si les premiers donnent des tronçons trop longs.

Comme données du problème, nous avons IV et φ en A, I_1V_1 en B, I_2V_2 en C, etc., et pour ce dernier $I'V_{2\varphi}$; puis pour chaque tronçon : l' la longueur de la ligne, L et C les coefficients unitaires respectifs de self et de

capacité et enfin R la résistance linéaire. Enfin nous supposons que le coefficient ($K = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$) varie le long de la ligne et qu'il change de valeur à chaque tronçon, de même que C .

A partir d'un point 0 nous traçons les deux vecteurs I et V faisant un angle φ . Pour obtenir V_1 , nous portons le vecteur $K_1 I_1 I$ faisant un angle α_1 avec la direction de V . En I perpendiculairement à V , nous déterminons le point I_1 en portant une longueur égale à la valeur de $C_1 \omega l_1 V$. En opérant autant de fois qu'il y a de tronçons, on arrive à déterminer I_5 et V_5 au départ de la ligne.

Comme dans l'exemple que nous nous sommes donné, il y a un courant dérivé I' en C , nous portons, de ce fait, à la suite du vecteur $C_2 \omega l_2 V_1$, qui est perpendiculaire sur V_1 , le vecteur I' faisant un angle φ' avec la direction V_2 dont la ligne représentative est construite au préalable ; on obtient ainsi I_2 . On continue de même jusqu'à I_5 .

En général, la courbe qui relie les points V et V_5 en passant par les points intermédiaires a une faible amplitude par rapport à OV , ce qui oblige, pour la construire à une échelle suffisante, de prendre OV très grand, nécessitant ainsi un format de papier plutôt gênant. On tourne la difficulté en établissant une courbe homotétique de la première en partant de $v = \frac{3}{4} V$, avec des vecteurs, qui ont tous comme longueurs les $\frac{3}{4}$ des longueurs des vecteurs de la première courbe et leur sont parallèles. La longueur $v_n - V_n$ est partout $\frac{1}{4} V_n$, et on a également la direction de V_1, V_2 , etc.

On peut opérer de la même façon avec I ; mais la nécessité s'en fait moins sentir en général.

Le rendement en puissance de la ligne se déduit immédiatement de la construction graphique, et on a :

$$\rho = \frac{IV \cos \varphi}{I_5 V_5 \cos \varphi_5}.$$

Si maintenant on veut avoir le rendement en énergie, on détermine le rendement aux différents régimes de charge, en construisant un graphique pour chacun d'eux. Mais le plus souvent on s'en tient à ceux correspondant à la pleine charge et à la marche à vide. Pour ce dernier cas, il est bon d'admettre le réseau d'utilisation branché avec ses transformateurs à vide.

On a ainsi :

En charge :	$I_0 V_0 \varphi_0$ (départ)	et	$IV \varphi$ (arrivée) ;
A vide :	$I'_0 V'_0 \varphi'_0$ (départ)	et	$I'V \varphi'$ (arrivée).

Pour passer à un régime quelconque, il faut se donner la tension de ce régime à l'arrivée, en déduire l'intensité et interpoler entre les diverses données des épures construites. Si l'on prend toutes les quantités proportionnelles, l'interpolation est des plus simples ; il suffit de prendre les quantités cherchées sur les droites reliant les données des régimes extrêmes, ainsi que l'on peut s'en rendre compte à l'inspection de la (fig. 1317) où l'on a interpolé le régime de moitié de la charge.

Le rendement en énergie n'intéresse d'ailleurs guère que les distributions d'énergie avec moteurs à vapeur ou avec chutes d'eau à réservoir de capacité suffisante pour une régularisation totale, ce qui est plutôt rare. Il suffit, en pratique, de transformer le graphique de consommation en graphique équivalent à tranches et d'appliquer à chacune d'elles le

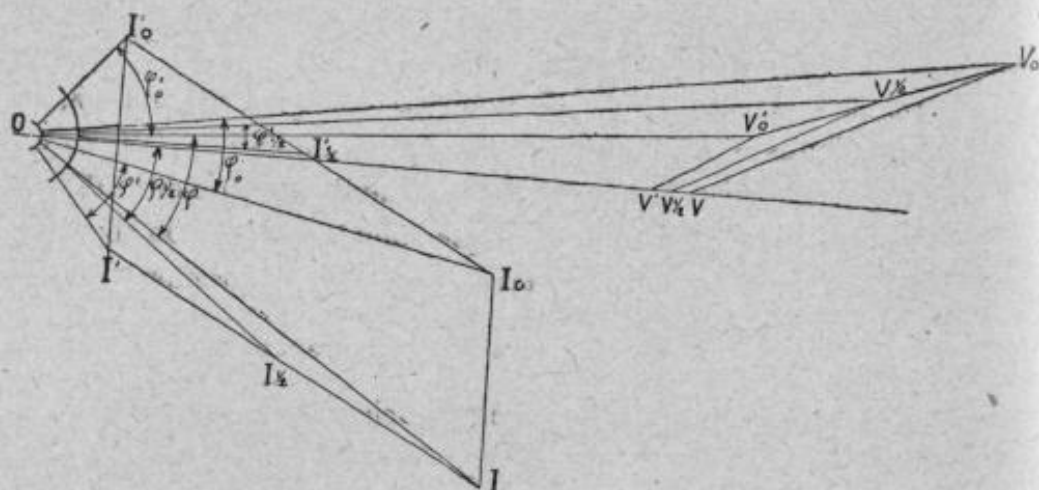


FIG. 1317.

rendement correspondant. Celui-ci augmente beaucoup lorsque la charge diminue. On arrive donc ainsi, même avec une forte chute de tension en charge, à un très bon rendement en énergie.

512. Abaques de M. Barris.—Les formules de départ de la méthode proposée sont les suivantes :

$$(1) \quad \pi V^2 = AL^2 M; \quad (2) \quad M = \frac{100}{p \cos \varphi}; \quad (3) \quad S = \frac{\pi}{Ld} 10^2; \quad (4) \quad \varepsilon = \frac{1.000}{US \cos \varphi}.$$

où : L = longueur d'un fil de ligne en centimètres ; π , poids d'un fil en kilogrammes par kilowatt ; V , tension simple au départ en volts telle que

$U = V \left(1 - \frac{p}{100}\right)$; U , tension simple au récepteur en volts ; p , coefficient

qui est pris égal à $\frac{RI}{V}$, chute ohmique de tension par fil, en pour 100

[on peut le confondre pratiquement avec la chute de tension étoilée

$\left(n = \frac{V-U}{V}\right)^2$]; S, section d'un fil en millimètres carrés; δ , densité de courant en ampères par millimètre carré; d , poids spécifique du métal conducteur; A, coefficient égal à $d\rho$, ρ étant la résistivité du métal conducteur en ohms par centimètre.

Appréciations des termes entrant dans les formules. — Pour le cuivre, $d = 8,9$ et $\rho = 2.10^{-6}$; pour l'aluminium, $d = 2,8$ et $\rho = 3,6.10^{-6}$. Pour $\cos \varphi$ on admet que l'approximation sur cette donnée est $\pm 10\ 0/0$ ⁽¹⁾.

Applications de l'abaque. — **PROBLÈME I: Détermination du centre de distribution.** — Une région à desservir est donnée; une enquête préalable a fixé approximativement les gisements, l'utilisation et la puissance de pointe des clients futurs.

Quelle est la position optimum du ou des centres de distribution?

Ce qu'on peut essayer de déterminer ici, c'est un ou plusieurs points fictifs qu'il est bon de connaître pour savoir ce qu'on fait et quels sacrifices on consent en choisissant tel ou tel lieu qui s'impose pour une des raisons précédentes.

La formule (1) peut s'écrire :

$$\pi = PL^2;$$

P la puissance à transmettre avec le poids π , L la distance du récepteur à la source, exprimées dans des unités convenables.

Il est facile de prouver que, dans le cas d'une distribution, le problème économique consiste à rendre $\Sigma\pi$ minimum; il en résulte que le centre de distribution C doit se trouver au centre de gravité G des puissances P; le poids de cuivre total est proportionnel au moment d'inertie de ces puissances par rapport à C.

Si C est distant de G, le poids de cuivre supplémentaire nécessaire, toutes choses égales d'ailleurs, sera :

$$\overline{CG}^2 \Sigma P.$$

La position de G doit être déterminée de façon grossière : la méthode suivante, purement mécanique, suffira.

Sur un plan vertical, tel qu'un mur, on fixe la carte de la région $\left(\frac{1}{80.000} \text{ ou } \frac{1}{200.000}\right)$: en chaque point puissance, on pique un clou

⁽¹⁾ Le facteur de puissance n'est bien défini à un instant donné qu'en un point des conducteurs, car il varie du récepteur à l'usine génératrice, dans l'espace et dans le temps.

ou une épingle sur lequel est enfilé un petit rhéa à gorge; on capèle sur la gorge un brin de fil à pêche (pesant quelques grammes à l'hectomètre et rompant sous des charges d'au moins 20 kilogrammes); à une extrémité du brin, on suspend un poids (plomb de chasse perforé) proportionnel à la puissance de pointe requise en ce point (1 gramme par kilowatt, par exemple); l'autre extrémité du brin porte un hameçon minuscule qu'on accroche à un anneau léger complètement libre.

Sous l'influence des divers poids, l'anneau prend une position d'équilibre; son centre est le point G.

On mesure à vue la longueur de chaque brin entre G et le clou correspondant, en majorant de 15 à 20 0/0 pour les sinuosités du tracé; on a ainsi pour les points P deux séries de valeurs : P_n et L_n .

Le poids de cuivre total sera proportionnel à :

$$\Sigma (P_n L_n^2) + \overline{CG}^2 \Sigma P_n.$$

L'abaque (fig. 1318) donnera instantanément des nombres égaux ou proportionnels à chacun des termes de cette somme, si l'on prend pour $V \cos \varphi$ et p des valeurs données ou quelconques.

En combinant cette méthode mécanique et l'abaque, on pourra faire rapidement des comparaisons instructives sur la dépense globale de métal et des lignes, dans diverses hypothèses, sur l'étendue et la forme de la zone à faire desservir par chaque station.

La détermination du nombre et du tracé approximatif des lignes pourrait être faite par des considérations analogues.

PROBLÈME II : Choix de la tension de distribution. — L'emplacement du centre général de distribution, le tracé des artères étant déterminés, quelle est la valeur optimum de la tension à employer?

Il s'agit, par un calcul grossier, de se fixer l'ordre de grandeur des valeurs limites, dont il convient de ne pas sortir.

Dans ces limites, le choix sera guidé par des considérations pratiques dont les plus importantes sont :

1° Préférer la tension la plus basse comme plus maniable, moins dangereuse pour le matériel en cas de surtension, réduisant les effets de capacité et donnant un meilleur isolement ;

2° Choisir une tension pour laquelle existent un matériel et un appareillage appropriés ayant fait leurs preuves.

On peut, par exemple, se fixer comme conditions d'avoir des fils de ligne dont le diamètre sera compris entre 40/10 et 80/10 (pour des raisons mécaniques), avec $\cos \varphi = 0,80$, et une chute de tension au point extrême $p = 0,05$ aux heures de pointe.

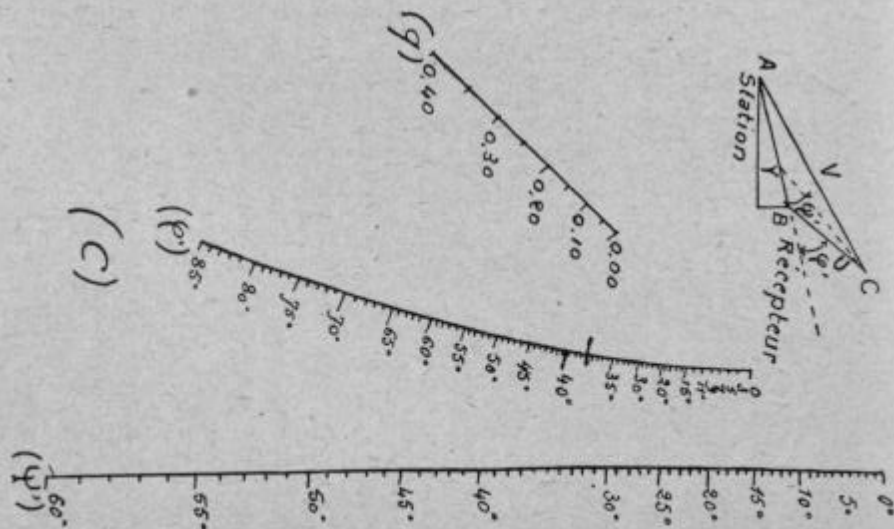
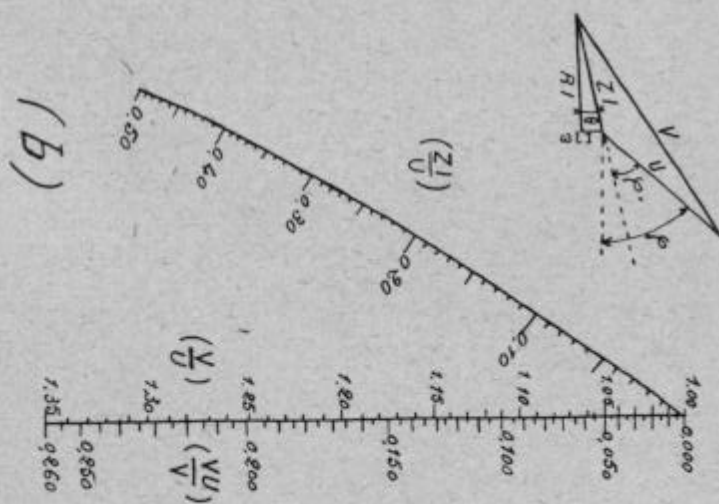
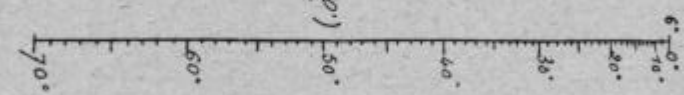
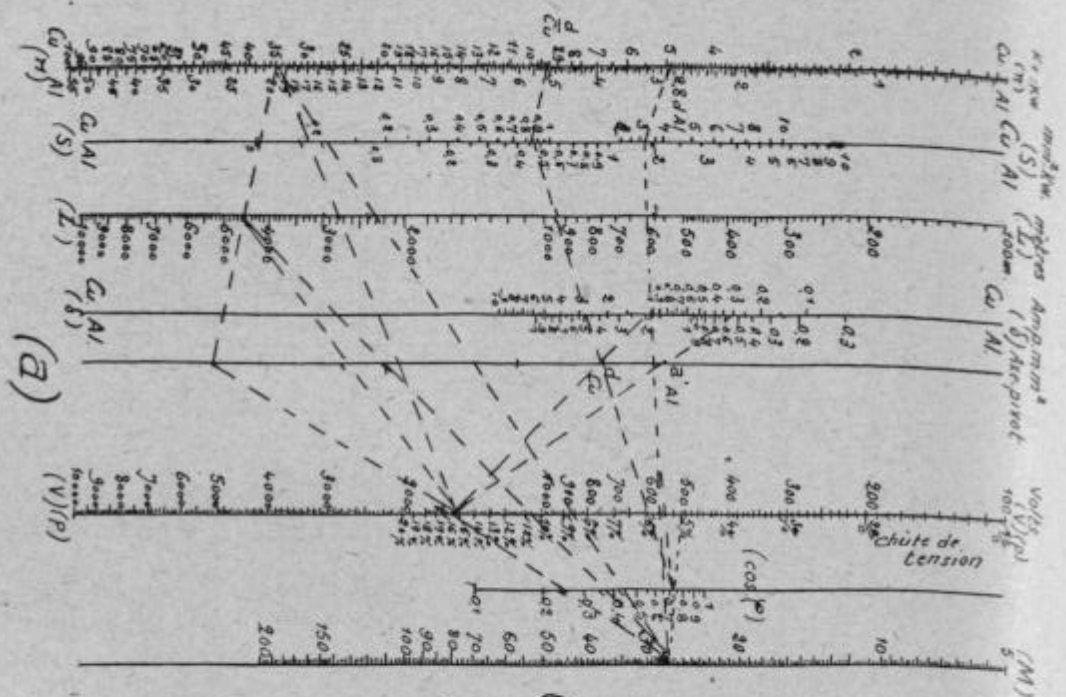


FIG. 1318.

Si P_n est la puissance de pointe à transmettre par une ligne L_n , les sections limites par kilowatt seront :

$$\begin{array}{ll} 40/10 \dots\dots\dots & \frac{12^{mm^2},5}{P_n} = S_{min.} \\ 80/10 \dots\dots\dots & \frac{78^{mm^2},5}{P_n} = S_{max.} \end{array}$$

telles que :

$$\frac{S_{max}}{S_{min}} = \frac{78,5}{12,5} = 6,3.$$

L'abaque fournira immédiatement pour cette ligne les deux valeurs correspondantes de la tension :

$$V_{80/10 \text{ min}} \quad \text{et} \quad V_{40/10 \text{ max}} = \sqrt{6,3} V_m = 2,5 V_{min}.$$

Pour l'ensemble des lignes, l'abaque fournira donc deux séries de valeurs de la tension :

$$\begin{array}{lll} V_{m1}, & \dots, & V_{n1}, \\ V_{m2}, & \dots, & V_{n2}, \\ \dots, & \dots, & \dots, \\ V_{mp}, & \dots, & V_{np}. \end{array}$$

On déduira donc immédiatement deux limites extrêmes de la tension : dans la série V_{nj} la plus basse, et dans la série V_{mi} la plus élevée ; elles seront telles que le diamètre de l'une quelconque des lignes ne sortira pas des limites imposées 40/10 et 80/10.

Comment, dans ces limites, choisir la position optimum ?

Il faut rendre minima la somme des dépenses annuelles.

On voit facilement que, p étant donné *a priori*, les pertes RI^2 sont indépendantes de la tension.

Il suffit donc de rendre minimum le coût d'établissement total entre le point où le courant est livré et vendu par l'usine génératrice et le point où la tension du courant est abaissée pour la distribution locale.

On résoudra le problème graphiquement.

1° On déterminera en fonction de la tension d'après le type de ligne, d'appareillage, de poste, etc., d'après la longueur des lignes et la puissance à transmettre, le coût d'installation du kilowatt de la pointe, non compris le cuivre.

D'où une courbe telle que ABC (*fig. 1319*), ou plusieurs si l'on considère divers matériels.

2° Avec l'abaque on déterminera le poids du cuivre par kilowatt pour chaque tension intermédiaire entre V_{mi} et V_{nj} : la courbe est une

parabole qu'on tracera très facilement avec trois ou quatre points, soit DEF.

On totalisera les ordonnées des deux courbes, d'où HIJ ; l'ordonnée résultante minima donnera la tension cherchée. Du même coup nous aurons déterminé le type de notre appareillage HT.

Comme on peut s'y attendre (fonction passant par un minimum) V n'est pas rigoureusement déterminée; c'est alors qu'on s'inspirera des considérations exposées précédemment.

Par des procédés analogues, mais un peu plus compliqués, on déterminerait les limites d'emploi d'une tension intermédiaire entre HT et BT; autrement dit on apprécierait l'utilité de créer des sous-stations MT.

PROBLÈME III : *Calcul des sections et poids des lignes.* — Le tracé du réseau et la tension étant déterminés, calculer les sections et le poids de cuivre des lignes.

C'est le problème le plus usuel : il y aurait bien des distinctions à faire suivant qu'on calcule un tronçon d'artère ou une dérivation, ou un branchement, ou un distributeur, bouclés ou non.

Soit, comme cas simple, à fournir en triphasé une puissance de 30 kilowatts à un consommateur situé à 4.500 mètres d'un centre de distribution, le facteur de puissance étant estimé à 0,75.

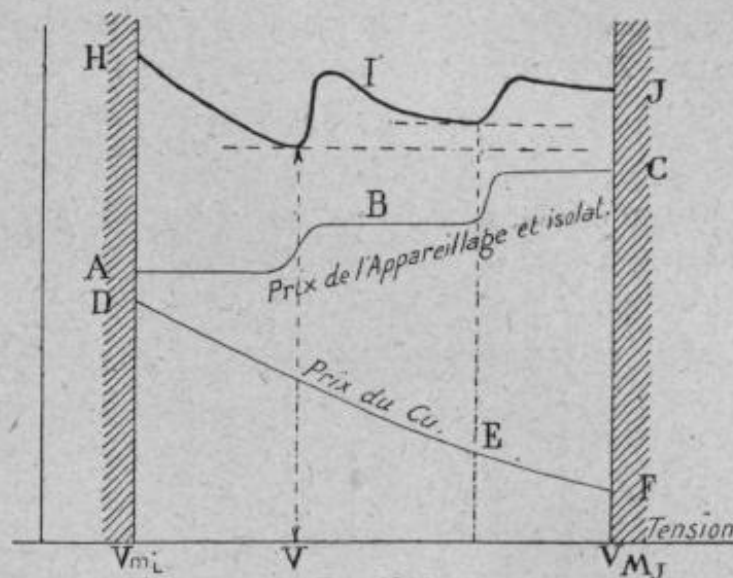
La tension étoilée est réglée au centre de distribution ; elle est en moyenne de 1.650 volts (tension triphasée 2.850 volts).

Quelle section faudra-t-il donner à chaque fil de ligne pour ne pas dépasser une chute de tension de 5 0/0 chez le client?

Quel sera le poids de cuivre et la densité de courant?

Section et poids. — Sans rien tracer sur l'abaque, avec un rapporteur transparent percé d'un trou d'aiguille en son centre, on joint le point 5 0/0 de l'échelle (p) au point 0,75 de l'échelle $\cos \varphi$, d'où le point 27 sur (M).

On joint ensuite M_{27} à V_{1650} , on obtient le point de pivotement a sur l'axe pivot ; on fait tourner autour de la pointe d'un crayon engagé dans



le trou du rapporteur, celui-ci autour du point a , et l'on fait passer le trait du rapporteur par le point L_{4500} : on lit, sur l'échelle Π , 35 kilogrammes par kilowatt.

Du point c , intersection de l'alignement précédent avec l'échelle (S), on porte avec un compas ou un bout de papier une longueur égale à la distance 35 à 8,9 mesurée sur Π ; on trouve :

$$S = 0,9 \text{ mm}^2 : \text{kw.}$$

(ce qui revient à mener par le point $d = 8,9$ de l'échelle Π une parallèle à l'alignement $\pi_{35} L_{4500}$).

La puissance à transmettre par fil étant de :

$$\frac{30}{3} \frac{1}{0,95} = \frac{10}{0,95} = 10,5 \text{ kilowatts,}$$

le poids de cuivre par fil sera 367 kilogrammes environ et la section $0,9 \times 10,5 = 9 \text{ mm}^2,5$, soit un fil de 35/10.

On aurait pu prendre les alignements autrement :

1° Joindre M_{27} à L_{4500} , pivoter autour de b et joindre V_{1650} à b , d'où $\Pi_{cu} = 35$ kilogrammes ; mais, pour avoir S , il aurait fallu donner au rapporteur un mouvement de plus que précédemment : joindre Π_{35} et L_{4500} , pour déterminer c .

Toutefois, ce deuxième procédé permet une utile vérification du premier.

2° On aurait pu encore joindre V_{1650} à L_{4500} , puis par M_{27} mener une parallèle à cet alignement jusqu'en Π_{35} .

Pour ce procédé, un rapporteur portant un réseau de traits parallèles espacés de 1 ou 2 millimètres serait nécessaire. Il est d'ailleurs très facile de faire soi-même un tel transparent sur papier calque.

Densité de courant. — Joignons $S_{0,9}$ à $\cos \varphi_{0,75}$, d'où le pivot d .

La tension U à l'arrivée est égale à $V \times 0,95 = 1.570$ volts ; mettons 1.550 volts.

Prenons l'alignement $V_{1550}d$, d'où :

$$\delta = 0,97 \text{ amp} : \text{mm}^2.$$

Quand p est petit, on peut pratiquement prendre V pour U ; l'erreur sur δ est insignifiante, eu égard au peu de précision requise sur cette variable.

Pour l'aluminium, on trouve :

$$\begin{aligned} \pi &= 20 \times 10,5 = 210 \text{ kilogr. ;} \\ S &= 1,6 \times 10,5 = 16 \text{ mm}^2,8, \text{ soit du } 46/10 ; \quad \delta = 0,54. \end{aligned}$$

Si les prix s'y prêtent, au point de vue mécanique, l'avantage reste ici à l'aluminium. Voici donc un cas où la substitution de l'aluminium au cuivre semble indiquée : l'abaque nous en prévient instantanément.

Multiplicateurs correspondants. — Remarquons que l'abaque permet de faire les calculs pour des données sortant des limites des échelles.

Dans le problème précédent, supposons qu'il s'agisse de transporter P kilowatts à une distance de 45 kilomètres sous une tension étoilée de 16.500 volts.

Ces valeurs ne sont pas sur les échelles L et V.

On prend donc des valeurs dix fois plus petites, soit 1.650 volts et 4.500 mètres, en observant simplement que, la tension réelle étant dix fois plus grande, le poids de cuivre devra être 10^2 fois plus petit que celui trouvé : on multipliera donc par 10^2 le résultat donné par l'abaque.

De même, la distance réelle étant 10 fois plus grande, le poids de cuivre devra être 10^2 fois plus grand : on multipliera donc le résultat trouvé par 10^2 . Finalement, le poids de cuivre par kilowatt n'aura pas changé. On vérifie ainsi une loi bien connue, et on tire cette conclusion : *Pour conserver même densité de courant, la tension doit être proportionnelle à la distance à franchir.*

Autre problème. — Un problème inverse fort intéressant peut encore être résolu très rapidement par l'abaque.

Supposons qu'on se soit fixé, par exemple, par la loi de Kelvin, une *densité économique* : on veut déterminer soit la tension à employer pour distribuer jusqu'à une certaine distance limite, soit au contraire déterminer la distance limite jusqu'à laquelle on peut distribuer sous une tension donnée.

Supposons d'abord la tension donnée : par une marche inverse de la précédente, on déterminera la section, puis le poids et enfin la longueur limite.

Si la distance est donnée, on se servira de la remarque faite plus haut : pour la densité donnée, une tension de 1.000 volts permet de distribuer jusqu'à une distance $L_{v=1000}$ que donne l'abaque ; donc la tension donnée V permet de distribuer jusqu'à une distance L_x , telle que :

$$\frac{L_x}{L_{v=1000}} = \frac{V}{1000}.$$

REMARQUE. — Quand les intersections des alignements seront défectueuses, on pourra obtenir plus de précision en utilisant la propriété des multiplicateurs correspondants.

ABAQUE DE CORRECTION OU DE RÉGLAGE

Les lignes étant calculées ou construites, il est intéressant de contrôler les valeurs des paramètres suivant diverses hypothèses sur $\cos \varphi$ et la charge.

Le problème courant est celui du réglage de la tension : pour obtenir

une tension U aux bornes du récepteur absorbant un courant I , quel coefficient de surtension adopter au départ?

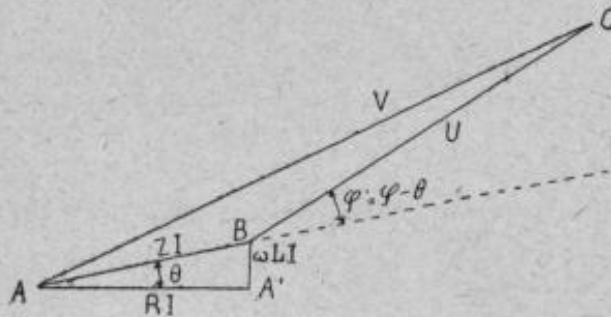


FIG. 1320.

Sur le graphique classique (fig. 1320), cela revient à résoudre le triangle ABC où $\frac{U}{V}$ est l'inconnue, ou encore

$\frac{V-U}{V}$ = chute relative de tension ; U est imposé ; Z , impédance de la ligne, est connue ; $\cos \varphi$ et I sont les seuls paramètres.

L'abaque permet de résoudre simplement ce petit problème : mais la construction est sensiblement plus laborieuse que celle du précédent. Voici la marche à suivre :

On part de la formule donnée par ABC :

$$\frac{V^2}{U^2} = 1 + \frac{Z^2 I^2}{U^2} + 2 \frac{ZI}{U} \cos \varphi' ; \quad (5)$$

posant pour simplifier :

$$\frac{V}{U} = b \quad \text{et} \quad \frac{ZI}{U} = a,$$

on peut écrire :

$$D \begin{vmatrix} (x) & (y) \\ b^2 - 1 & 0 - 1 \\ 2 \cos \varphi' & 1 \quad 0 \\ -a^2 & a \quad 1 \end{vmatrix} = 0.$$

La bonne disposition de l'abaque et la régularité des graduations amènent à prendre pour la construction l'abaque homographique suivant :

$$\Delta \begin{vmatrix} (x) & (y) \\ 0 & 200 \cos \varphi' & 1 \\ 250 & -160(b^2 - 1) & 1 \\ \frac{1250}{8a + 5} & -\frac{800a^2}{8a + 5} & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

L'échelle (φ') est graduée suivant la fonction cosinus avec module = 200 millimètres.

L'échelle $\frac{V}{U} = b$ est graduée suivant la fonction $(b^2 - 1)$ avec module = 160 millimètres.

Le support de l'échelle $a = \frac{ZI}{U}$ est une hyperbole, dont l'équation est :

$$x^2 + 4xy - 500x + 250^2 = 0,$$

en prenant pour axes Oy l'échelle (φ') , l'origine au point $\cos = 0$, Ox une oblique faisant avec Oy un angle dont la tangente $= \frac{150}{200}$.

Pour construire et graduer ce support, l'auteur a défini chaque cote par l'intersection des rayons homologues des faisceaux suivants :

1^o Lignes de rappel menées par les divisions d'une échelle $\frac{1250}{8a + 5}$ portée sur l'axe des x , cette échelle étant elle-même construite comme homographique de l'échelle métrique a .

2^o Faisceau ayant pour sommet l'origine ($\cos \varphi' = 0$) en remarquant qu'alors : $b^2 - 1 = a^2$.

Donc, en joignant le point coté 90° de (φ') aux différentes cotes de (b) , on détermine un point de la conique dont la cote est $\sqrt{b^2 - 1}$, c'est-à-dire égale à la racine carrée du segment porté sur l'échelle (b) ; si b progresse par cotes rondes, $\sqrt{b^2 - 1}$ progressera aussi par cotes rondes, car il sera un carré parfait.

3^o A titre de vérification, on peut calculer quelques ordonnées de la conique par :

$$y = -\frac{800a^2}{8a + 5}.$$

REMARQUE I. — *Abaque auxiliaire.* — Dans l'abaque précédent, M. A. Barris a adopté comme paramètre le courant débité I plutôt que la puissance au récepteur; il est évident, en effet, que l'électricien du tableau trouve cette valeur par simple lecture de l'ampèremètre.

Le paramètre choisi n'est pas I , mais $\frac{Z_1 I L}{U}$, Z_1 étant l'impédance kilométrique, L la longueur de la ligne en kilomètres.

On peut très facilement mettre en abaque les quatre paramètres :

$$a_1 = \frac{Z_1 I}{U}. \quad (6)$$

C'est un abaque à points alignés à quatre échelles parallèles.

La règle à calcul donnera du premier coup :

$$a = a_1 l. \quad (7)$$

REMARQUE II. — *Autres abaques auxiliaires.* — Rien de plus facile également que de mettre en abaques les formules qui lient entre eux les divers paramètres propres à la ligne : d , diamètre d'un fil ; D , distance entre fils ; f , fréquence ; R_1 , ωL_1 , Z_1 , résistance, réactance (en négligeant la capacité), impédance kilométrique d'un fil ; et enfin :

$$\tan \theta = \frac{\omega L_1}{R_1}.$$

Toutes simplifications opérées, on peut écrire ces relations comme suit :

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \log_{10} 26 \frac{D}{d}, & L_1 &= \frac{2,89 \times 10^{-3}}{2\pi} \alpha, & (8) \\ \tan \theta &= \frac{2,89 \times 10^{-3} f \alpha}{R_1} & (9) \\ Z_1 &= R_1 \sec \theta, & R_1 &= f(d). & (10) \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

Ces formules équivalent en fait aux tables de M. Kennelly (1893) étendues à toutes les fréquences possibles, et aux tables de M. Blondel donnant la self-inductance et l'inductance mutuelle : (8) et (10) seront représentées par deux abaques à points alignés à trois échelles parallèles ; (9) par un abaque à quatre échelles parallèles sur lesquelles on substituera avantageusement les cotes d et θ à celles en R_1 et $\sec \theta$, pour passer plus facilement au paramètre $\varphi' = \varphi - \theta$ de la relation (5).

Les abaques de (6), (8), (9) et (10) sont très faciles à construire et du même type que ceux qui composent l'abaque des relations (I) ⁽¹⁾.

Calcul des dérivations. — On peut étendre l'usage de ces abaques aux calculs d'un réseau complexe comportant des dérivations, distributeurs et branchements.

A cet effet, voici un abaque permettant de tenir compte de la variation du facteur de puissance avec la distance au récepteur des divers points de la ligne considérée.

⁽¹⁾ On peut, par un *seul abaque* à points alignés, représenter *tous* les paramètres des formules (II). Cet abaque offrirait l'avantage que les échelles (L_1), (ωL_1), (R_1), ($\tan \theta$) et (Z_1) seraient régulières et donneraient une même approximation (aussi grande qu'on voudra) dans toutes leurs parties. Il est également possible de faire un abaque pour la réactance de capacité et les divers coefficients posés par M. Blondel dans ses magistrales études sur les calculs des lignes.

Remarquons encore qu'à défaut de table d'inductance, on peut facilement faire le calcul par la règle logarithmique : on pose $\alpha = \log_{10} D - \log_{10} d$, qu'on lit au dos de la règle, puis on forme $L_1 = 0,461\alpha + 0,649$, valeur de l'inductance en millihenrys par kilomètre.

Si on considère le point Y situé entre la station A et le récepteur B, à une distance y de ce dernier, exprimée en partie de L , et si l'on pose :

$$q = \frac{Z_1 I}{U} y, \quad (11)$$

on trouve facilement la relation :

$$\tan \psi' = \frac{\sin \varphi'}{\cos \varphi' + q}. \quad (12)$$

L'abaque de la relation (11) est précisément celui de (6) et (7), où y remplace L .

L'abaque de (12) est représenté (fig. 1318).

Usage de ces abaques. — Les lignes sont supposées construites ou déterminées ; on veut se rendre compte pour diverses hypothèses de charge simultanée dans les branchements du réseau, de ce que sera le régime de la tension à la station.

On part de chaque récepteur n , où l'on veut maintenir la tension à la valeur U_n , sous un courant i_n et un facteur de puissance $\cos \varphi_n$.

A la jonction du branchement n avec le distributeur, on calcule la tension nécessaire comme si ce point était la station de réglage, soit $b'U_n$ la valeur fournie par l'abaque.

On détermine ψ_n' au point de jonction par l'abaque (fig. 1318); puis on repart de ce point situé à la distance y_n de n avec les données :

$$\Sigma i_n \cos \psi_n', \quad \cos \psi_n' = \frac{\Sigma i_n \cos \psi_n'}{[\Sigma i_n]} \quad \text{et} \quad b'U_n,$$

$[\Sigma i_n]$ étant une somme géométrique.

De proche en proche par le distributeur, la dérivation et l'artère, dont on connaît pour chacun les Z et θ par les abaques (II), on arrive jusqu'à la station où il faut régler la tension à une valeur :

$$V = b'b'' \dots b^{(m)} U_n.$$

L'abaque (fig. 1321) montre que généralement on commettra une erreur négligeable en prenant $\cos \varphi_n$ pour $\cos \psi_n$; on simplifiera également beaucoup ces investigations en prenant, sans erreur sensible, $\cos \psi_n' =$ moyenne des $\cos \psi_n'$ au lieu de $\frac{\Sigma i_n \cos \psi_n'}{[\Sigma i_n]}$.

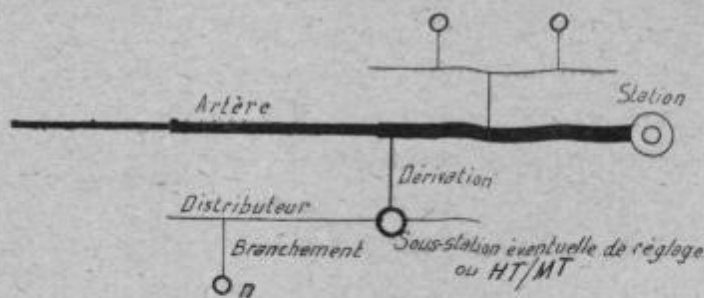


FIG. 1321.

Dans cette marche pas à pas, il sera donc facile de déterminer les par-

ties faibles et les points exacts où il serait éventuellement nécessaire d'installer des régulateurs de potentiel.

Cette méthode suppose légitime la composition entre eux des vecteurs du courant pris par chaque récepteur ; elle paraît aussi exacte que les autres méthodes où l'on néglige la capacité linéique et la conductance de perte de la ligne.

513. Abaques de M. Herdt. — Le diagramme de la (fig. 1322)

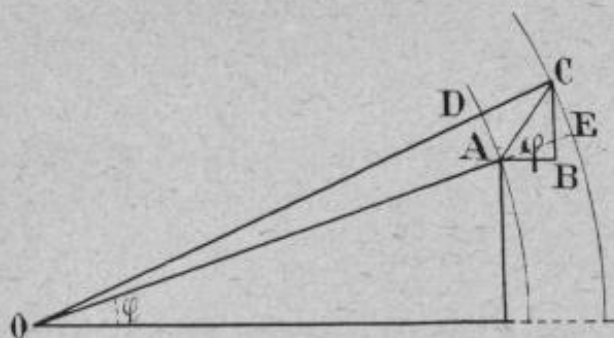


FIG. 1322. — Principe du diagramme de Herdt.

donne le principe de la méthode employée par M. Herdt.

La tension au départ est représentée par le vecteur OC, tandis que OA représente la tension à l'arrivée ; on voit que la chute de tension en ligne sera CD, c'est le terme que l'auteur désigne sous le nom de « régulation » ⁽¹⁾.

Soit φ l'angle de décalage introduit par le circuit récepteur, AB la chute de tension en volts due à la résistance de la ligne et AC la chute de tension en volts due à l'impédance, l'inductance étant représentée par BC.

L'angle EAB étant égal à φ , si l'on prolonge OA jusqu'au cercle extérieur, AE représente la régulation, car AE = CD.

Naturellement ce diagramme peut être tracé à une échelle quelconque suivant chaque cas particulier ; on peut également l'établir pour qu'il donne la régulation en volts par kilomètre et par ampère pour chacune des lignes envisagées.

C'est ainsi que les courbes de la (fig. 1323) ont été tracées en portant en abscisses la chute de tension en volts par kilomètre et par

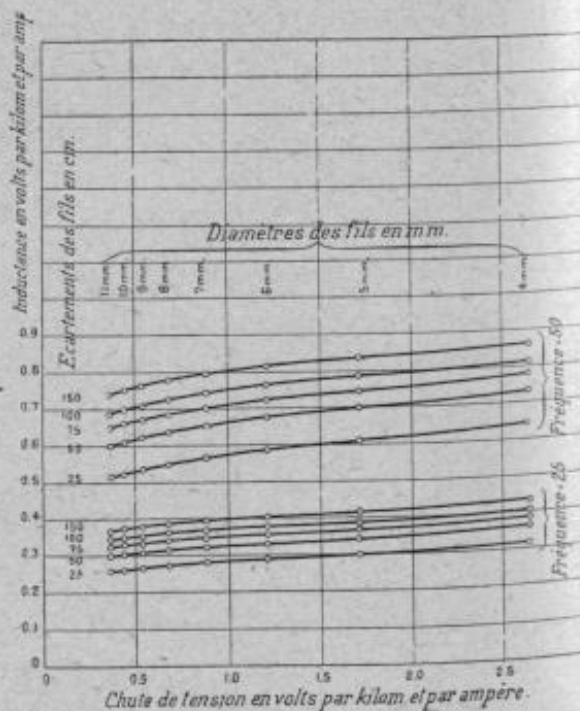


FIG. 1323. — Chute de tension. Abaque de Herdt.

⁽¹⁾ Ce terme anglais de « régulation » indique l'élévation de tension à donner au départ pour maintenir à l'arrivée une tension déterminée.

ampère due à la résistance, et en ordonnées la chute de tension en volts due à l'inductance par kilomètre et par ampère. On a donné ces courbes pour des fils de diamètres différents placés à des distances diverses ; elles ont été établies pour la fréquence de 50 p : s et pour celle de 25.

Chacune de ces courbes représente le lieu géométrique du point C pour un écartement donné des fils.

Si l'on transporte cet abaque au point A (*fig. 132*), la ligne OA étant prolongée d'une longueur *Al* égale à la perte en ligne, on voit que l'indication du diamètre du fil donnant lieu à cette perte s'obtiendra par l'intersection d'un arc de cercle décrit avec *Ol* comme rayon avec la courbe tracée pour l'écartement fixé.

Le point C de la (*fig. 12*) correspond à des fils de 6 mm de diamètre distants de

1^m,50 pour une fréquence de 50 p : s. On voit qu'au lieu de prendre l'arc *Cl* on peut se contenter de la tangente menée du point *l* au cercle de rayon *Ol*, car, pratiquement, on aura la même intersection C.

Si l'on supprime sur la (*fig. 12*) toutes les lignes allant au point O, il restera la partie quadrillée du diagramme que l'on pourra tracer à une échelle plus grande pour obtenir plus de précision. L'erreur que l'on commet en remplaçant l'arc par la tangente est pratiquement négligeable ; elle ne le serait pas pour un facteur de puissance égal à l'unité ; mais comme, en somme, on ne se trouve jamais dans ce cas, il n'y a pas lieu de s'en préoccuper.

Les courbes de la (*fig. 132*), établies pour des distances entre fils de 25, 50, 75, 100 et 150 centimètres avec des fréquences de 25 et 50 p : s et des facteurs de puissance variant de 0,7 à 1, permettent de déterminer :

- 1° Le diamètre du fil pour une chute de tension donnée en volts ;
- 2° Le diamètre du fil pour une perte en watts donnée ;
- 3° La perte en watts et la chute de tension en volts pour un diamètre donné des fils ;
- 4° L'effet du facteur de puissance sur la chute de tension pour différents diamètres de fil.

On pourra donc résoudre très facilement par ce procédé les problèmes industriels les plus importants.

Emploi pratique de l'abaque. — a) Supposons que l'on se donne la chute de tension en centièmes de la tension à l'arrivée et proposons-nous de déterminer le diamètre des fils.

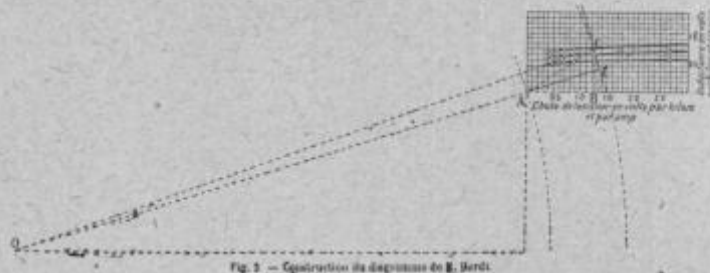


FIG. 1324. Construction du diagramme de Herdt.

On calcule la chute de tension en volts par kilomètre et par ampère pour le facteur de puissance adoptée et on cherche la longueur correspondante sur la ligne menée du point O portant l'indication du $\cos \varphi$ donné.

Les différents arcs de cercle tracés avec O comme centre coupent les différentes lignes de $\cos \varphi$ à des distances du centre assez rapprochées pour qu'on puisse trouver facilement et rapidement la valeur cherchée.

Au point ainsi obtenu on élève une perpendiculaire sur la ligne du $\cos \varphi$ et on obtient, au point d'intersection de cette perpendiculaire avec

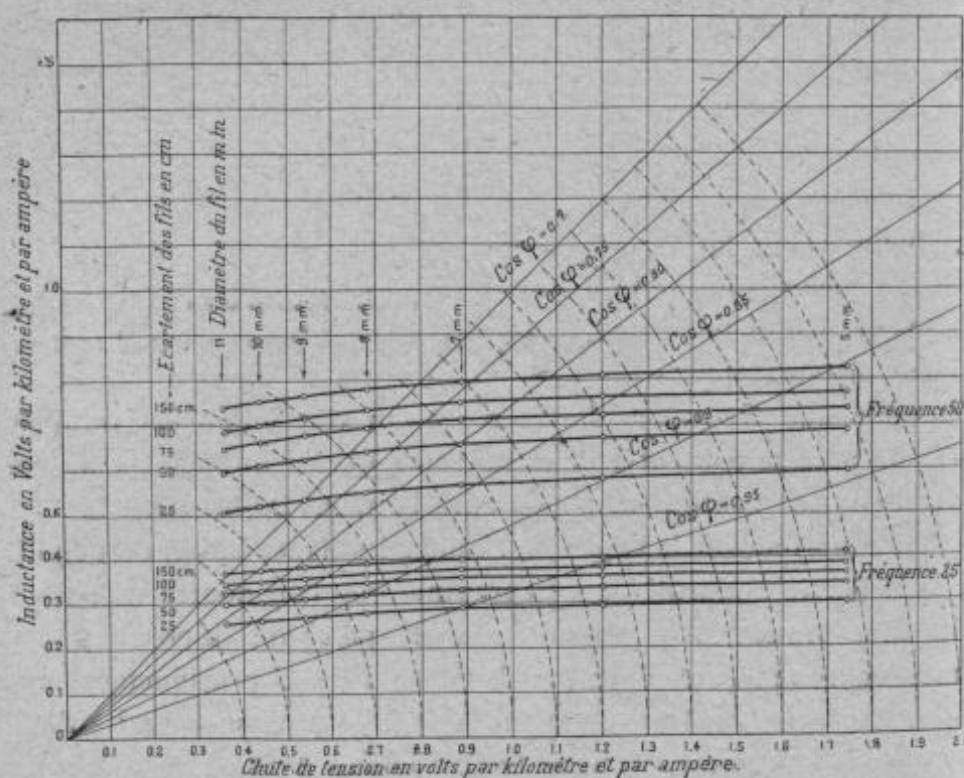


FIG. 1325. — Abaque de Herdt.

la courbe qui correspond à l'écartement des fils, le diamètre cherché du conducteur. En pratique il suffira de prendre la valeur la plus voisine.

Si la perte en watts dans la ligne est donnée en centièmes de la puissance à l'arrivée, on déterminera le fil à employer de la façon suivante : on calcule la perte en volts par kilomètre et par ampère ; en partant de cette donnée, on la cherche sur l'abscisse de l'abaque, puis, en suivant le cercle, on détermine, comme précédemment, le diamètre du fil à adopter.

Si, étant donnés le diamètre et l'écartement des fils, on veut trouver la chute de tension en ligne pour un certain facteur de puissance, au point de l'abaque correspondant au diamètre des fils et à leur espacement, on abaisse une perpendiculaire sur la ligne du $\cos \varphi$ indiqué. La longueur comprise sur cette ligne entre le point O et l'intersection avec la perpendiculaire représente la chute de tension par ampère et par kilo-

mètre. En multipliant le chiffre obtenu par l'intensité du courant et par la longueur de la ligne en kilomètres, on aura la perte en volts. La perte en watts sera égale au produit de cette perte en volts par l'intensité.

514. Rappel des formules et principes généraux pour le calcul des conducteurs à courant continu. — Le fil de cuivre pur et recuit est employé principalement pour les câbles isolés, les câbles souterrains et sous-marins.

La résistance moyenne à la rupture de ces fils est de 22 kilog. par mm^2 et leur allongement à la rupture atteint 22 0/0.

Les fils de bronze phosphoreux, silicieux, chromeux, etc., sont des sortes d'alliage, à proportions variables. Ces fils sont caractérisés par une conductivité décroissante à mesure qu'augmente la résistance électrique.

Les fils de haute conductibilité sont employés pour les lignes aériennes ainsi que pour les lignes télégraphiques et téléphoniques à grande distance. La conductibilité est égale à 0,8 0/0 de celle du cuivre pur, la résistance moyenne à la rupture à 45 kilog. par mm^2 et l'allongement à la rupture 1 0/0 et la densité, 8,91.

Pour les lignes télégraphiques et téléphoniques situées dans les régions montagneuses et froides, on emploie des fils de 80 0/0 de conductivité avec une résistance mécanique de 50 kilog. et un allongement de 1 0/0. Dans les réseaux téléphoniques urbains, on utilise des fils de 42 0/0 de conductibilité avec une résistance mécanique de 75 kilog et un allongement de 1 0/0.

Les résistances d'isolement pour les fils isolés destinés aux tableaux de distribution, postes de transformateurs, machines, sont généralement celles ci-après : pour tension de 220 volts, 600 mégohms-kilomètre ; pour 500 volts, 1.200 mégohms-kilomètre ; pour 1.500 volts, 3.000 mégohms-kilomètre ; pour 3.000 volts, 5.000 mégohms-kilomètre ; pour 5.000 volts, 5.000 mégohms-kilomètre ; pour 10.000 volts, 5.000 mégohms-kilomètre ; pour 15.000 volts, 5.000 mégohms-kilomètre.

Les fils en aluminium ⁽¹⁾ ont une grande résistance mécanique par rapport à leur poids spécifique et leur conductibilité par unité de section transversale n'est pas aussi élevée que celle du cuivre.

La résistivité de l'aluminium commercialement pur à 99,5 0/0 et écroui, de densité 2,7 est de 2,777 microhms centim. La résistivité du métal recuit est de 1 ou 2 0/0 plus faible. La conductivité est de 60 0/0 de celle du cuivre (1,67 microhm-centim. à 0°). Le rapport du poids de l'aluminium au cuivre est de 0,6 ; celui des sections 1,67, des diamètres 1,3 et de la résistance mécanique, 0,84 (cette dernière est de 22^k,8 par mm^2 , à la rupture).

(¹) Leur emploi date de l'année 1898.

Dans les conditions ordinaires atmosphériques, l'aluminium pur peut être considéré comme inaltérable mais pour les endroits exposés aux fumées des usines chimiques ils ne sont pas recommandés. Tous les joints de l'aluminium avec d'autres métaux doivent être soigneusement isolés pour éviter les effets d'électrolyse.

Soient L la longueur du conducteur, ρ la résistivité du métal, S la section du conducteur, R la résistance qu'il oppose au passage d'un courant d'intensité I et enfin u la chute de tension déterminée par l'écoulement du fluide, on a, pour la valeur de cette dernière valeur (1).

$$u = \rho \frac{L}{S} I \quad (1)$$

On prend $\rho = 1,8$ microhm-centimètre pour les conducteurs enfermés dans des moulures ou autres dispositifs, 2 pour les fils découverts, s'il s'agit de fils de cuivre et 3 pour ceux en aluminium. Mais il faut éviter un échauffement anormal dans les conducteurs en raison de l'effet Joule (RI^2t) et la question revient à déterminer le conducteur qui correspond au minimum d'échauffement et au maximum d'économie.

D'après Kennelly et autres expérimentateurs l'élévation de température pour un fil quelconque ou pour un câble varie à peu près comme le carré de l'intensité. Il y a donc lieu de faire intervenir dans l'établissement ou dans le contrôle des calculs la notion de la densité de courant $\left(\frac{I}{S}\right)$.

Si dans la formule (1) on fait u en volts, I en ampères, L longueur du circuit en mètres et $\rho = 1,6 \times 10^{-6}$ ohms centimètre à 0° , S en millimètres carrés, on obtient pour la valeur de la perte de charge :

$$u = 0,032 L \frac{I}{S}$$

Le tableau ci-après renseigne sur les résistivités d'un conducteur en cuivre correspondant à différentes températures :

Températures	Résistivité	Coefficients	Coefficient de température 0,004 par degré centigrade
0°	$1,6 \times 10^{-6}$	0,032	
15°	$1,7 \times 10^{-6}$	0,034	
30°	$1,8 \times 10^{-6}$	0,036	
40°	$1,9 \times 10^{-6}$	0,038	
58°	2×10^{-6}	0,040	

On prend généralement 30° .

Par suite :

$$u = 0,036 L \frac{I}{S} \quad \text{et} \quad S = \frac{0,036}{u} LI.$$

(1) Nous rappellerons que la conductance, qui est l'inverse de la résistance a pour unité le *ohm* ; que la résistivité ou résistance spécifique a pour unité l'ohm-centimètre ; que la conductivité ou conductibilité (inverse de la résistance) a pour unité ohm par centimètre et que le coulomb international est l'unité pratique de quantité d'électricité.

Si dans cette formule on prend $I = 1$, on a :

$$S = \frac{0,036}{u} L,$$

qui fixe le nombre de mm^2 à donner à la section du conducteur pour chaque ampère qui la traverse, la chute de tension supposée à l'avance étant u . On obtient la section du câble en faisant le produit du nombre trouvé, au moyen de cette dernière formule, par le nombre d'ampères.

Pour les fils isolés on admet généralement les chiffres suivants pour un service normal prolongé :

1 à 5 mm^2 de section	—	3 ampères mm^2 .
5 à 50 —	—	2 — —
Au dessus	—	1 — —

Et, si on a affaire à des fils ou câbles nus :

5 mm^2	20 ampères	75 mm^2	140 ampères
9 —	30 —	100 —	175 —
14 —	40 —	125 —	210 —
25 —	60 —	150 —	240 —
38 —	85 —	175 —	270 —
50 —	105 —	200 —	300 —
60 —	120 —	250 —	350 —

Le calcul des conducteurs à courant continu peut s'opérer rapidement à l'aide du graphique indiqué par M. Ch. Wallet par application de sa méthode de détermination de la section d'un câble en la rapportant à la densité de courant (*fig. 1326*), qu'un simple exemple numérique en fera bien saisir l'utilité.

Soit une canalisation de 80 mètres de longueur. L'ordonnée menée par le point $L = 80$ coupe toutes les droites du réseau en des points dont la cote, lue sur l'échelle des S , donne la section par ampère correspondant aux diverses chutes de tension portées en regard dans la colonne de droite.

Section en mm^2 par ampère	Chute de tension correspondante en volts
2,88	1
1,92	1,5
1,44	2
0,87	5
0,145	20
0,095	30

Les chiffres de la colonne de gauche sont proportionnels aux poids de cuivre, donc aux prix des câbles ; ceux de la colonne de droite, à la perte d'énergie ; on a donc ainsi en regard tous les éléments d'appréciation qui peuvent guider dans le choix à faire.

Méthodes graphiques. — M. G. Semenza s'est proposé de déterminer la chute de tension la plus avantageuse en faisant connaître en outre les variations de cet avantage pour différentes valeurs de la chute de tension.

Soient : P la puissance en kilowatts devant être transmise à une distance L , A le coût de l'installation de l'usine, B celui de la ligne, C la dépense variable proportionnelle au poids du cuivre qui sera employé,

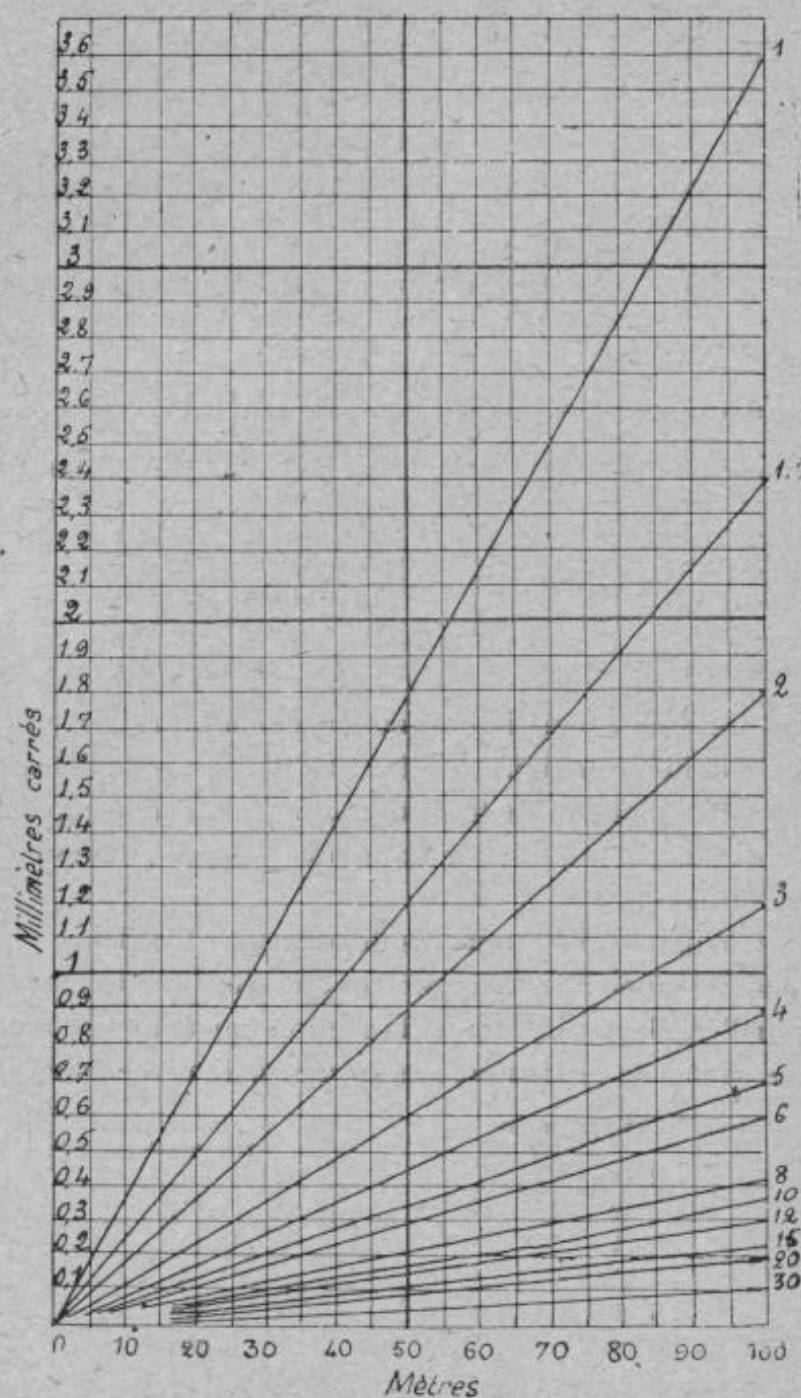


FIG. 1326.

a le prix de vente du kilowatt, h la valeur des frais d'exploitation et d'entretien, d le prix variable du cuivre ; P' le nombre de kilowatts disponibles à l'extrémité de la ligne.

Le bénéfice f que l'on peut réaliser est traduit par l'expression :

$$f = \frac{aP' - bd}{A + B + C}.$$

A l'aide de cette formule on peut déterminer le pourcentage de la chute de tension x qui permettra d'obtenir f maximum, en portant :

$$P' = P - xP; d = aC \quad \text{et} \quad C = \frac{h}{x},$$

a étant le taux d'amortissement, intérêts et entretien du cuivre de la ligne.

Pour obtenir la valeur de f , M. Semenza établit une courbe représentant la fonction f que l'on obtient en traçant la droite figurative de B et la courbe C en fonction de x , ce qui donne une hyperbole équilatère ; en faisant la somme des 3 ordonnées et en procédant de même pour aP' , b et aC , on obtient 2 courbes résultantes. On établit ensuite les rapports des ordonnées correspondantes de ces courbes, ce qui permet de déterminer facilement les ordonnées de la courbe cherchée, à l'effet d'obtenir la valeur exacte de la chute de tension pour réaliser le bénéfice maximum.

Le tableau suivant donne la spécification des conducteurs aériens de sections courantes, spécification également applicable aux câbles isolés.

SECTIONS, POIDS ET RÉISTANCES ÉLECTRIQUES DES CABLES
EN CUIVRE PUR

SECTION du CABLE	DIAMÈTRE du FIL ÉQUIVALENT de même section	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du fil équivalent	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du câble nu à 1 toron	RÉSISTANCE électrique à 0° en ohms de 1 000 mètres câble cuivre pur
millimètres carrés	millimètres	kilogrammes	kilogrammes	ohms
20	5,05	178,200	187,110	0,806
21	5,18	187,110	196,465	0,766
22	5,30	196,020	205,821	0,732
23	5,42	204,930	215,176	0,700
24	5,53	213,840	224,532	0,672
25	5,65	222,750	233,887	0,644
26	5,76	231,660	243,243	0,619
27	5,87	240,570	252,598	0,596
28	5,98	249,480	261,954	0,575
29	6,08	258,390	271,309	0,556
30	6,19	267,300	280,665	0,536
31	6,29	276,210	290,020	0,519
32	6,39	285,120	299,376	0,503
33	6,49	294,030	308,731	0,488
34	6,58	302,940	318,087	0,475
35	6,68	311,850	327,442	0,460
36	6,77	320,760	336,798	0,448
37	6,87	329,670	346,153	0,435
38	6,96	338,580	355,509	0,424
39	7,05	347,490	364,864	0,413
40	7,14	356,400	374,220	0,403
41	7,23	365,310	383,575	0,393
42	7,32	374,220	392,931	0,383
43	7,40	383,130	402,286	0,375
44	7,49	392,040	411,642	0,366
45	7,57	400,950	420,927	0,358

SECTION du CÂBLE	DIAMÈTRE du FIL ÉQUIVALENT de même section	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du fil équivalent	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du câble nu à 1 toron	RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE à 0° en ohms de 1 000 mètres câble cuivre pur
millimètres carrés	millimètres	kilogrammes	kilogrammes	ohms
46	7,66	409,860	430,353	0,350
47	7,74	418,770	439,708	0,343
48	7,82	427,680	449,064	0,336
49	7,90	436,590	458,419	0,329
50	7,98	445,500	467,775	0,323
51	8,06	454,410	477,130	0,316
52	8,14	463,320	486,486	0,310
53	8,22	472,420	495,831	0,304
54	8,29	481,140	505,197	0,299
55	8,37	490,050	514,552	0,293
56	8,45	498,960	523,908	0,288
57	8,52	507,870	533,263	0,283
58	8,60	517,080	542,934	0,278
59	8,67	525,690	551,974	0,273
60	8,75	534,600	561,330	0,268
61	8,82	543,510	570,685	0,264
62	8,89	552,420	580,041	0,260
63	8,96	561,330	589,396	0,256
64	9,03	570,240	598,762	0,252
65	9,10	579,150	608,107	0,248
66	9,17	588,060	617,460	0,244
67	9,24	596,970	626,800	0,240
68	9,31	605,880	636,200	0,236
69	9,38	614,790	645,600	0,233
70	9,44	623,700	655,000	0,230
71	9,51	632,610	664,200	0,227
72	9,58	641,520	674,000	0,224
73	9,64	650,430	683,000	0,221
74	9,71	659,340	693,000	0,218
75	9,77	668,250	701,600	0,215
76	9,84	677,150	711,000	0,212
77	9,90	686,070	721,000	0,210
78	9,97	694,980	730,000	0,206
79	10,02	703,890	739,000	0,204
80	10,09	712,800	748,500	0,202
81	10,15	721,710	758,000	0,199
82	10,21	730,620	767,200	0,197
83	10,27	739,530	776,500	0,195
84	10,34	748,440	786,000	0,192
85	10,40	757,350	795,300	0,190
86	10,46	766,260	804,600	0,188
87	10,52	775,170	814,000	0,185
88	10,58	784,080	823,300	0,183
89	10,64	792,990	833,000	0,181
90	10,70	801,900	845,001	0,179
91	10,76	810,810	855,000	0,177
92	10,82	819,720	862,000	0,175
93	10,88	828,630	870,000	0,173
94	10,93	837,540	880,000	0,172

SECTION du CABLE	DIAMÈTRE du FIL ÉQUIVALENT de même section	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du fil équivalent	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du câble nu à 1 toron	RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE à 0° en ohms de 1 000 mètres câble cuivre pur
millimètres carrés	millimètres	kilogrammes	kilogrammes	ohms
95	10,99	846,450	849,000	0,170
96	11,03	853,360	898,000	0,168
97	11,11	864,270	908,000	0,166
98	11,17	873,180	917,000	0,164
99	11,22	882,090	927,000	0,163
100	11,28	891,000	936,000	0,161
105	11,56	935,550	983,000	0,153
110	11,83	980,100	1 030,000	0,146
115	12,10	1 024,650	1 075,000	0,140
120	12,36	1 069,200	1 125,000	0,134
125	12,61	1 113,750	1 170,000	0,129
130	12,86	1 158,300	1 215,000	0,124
135	13,11	1 202,850	1 270,000	0,119
140	13,35	1 247,400	1 340,000	0,115
145	13,58	1 291,950	1 356,000	0,111
150	13,81	1 336,500	1 404,000	0,107
155	14,04	1 381,050	1 451,000	0,104
160	14,27	1 425,600	1 497,000	0,101
165	14,49	1 470,150	1 544,000	0,097
170	14,71	1 514,700	1 591,000	0,095
175	14,92	1 559,250	1 638,000	0,092
180	15,13	1 603,800	1 684,000	0,089
185	15,34	1 648,350	1 731,000	0,087
190	15,55	1 692,900	1 778,000	0,085
195	15,75	1 737,450	1 825,000	0,082
200	15,95	1 782,000	1 872,000	0,080
225	16,92	2 004,750	2 105,000	0,071
250	17,84	2 227,500	2 389,000	0,064
275	18,71	2 450,250	2 573,000	0,058
300	19,54	2 673,000	2 807,000	0,053
325	20,34	2 895,750	3 041,000	0,049
350	21,10	3 118,500	3 275,000	0,046
375	21,85	3 341,250	3 509,000	0,043
400	22,56	3 564,000	3 743,000	0,040
425	23,26	3 786,750	3 977,000	0,038
450	23,93	4 009,500	4 210,000	0,035
475	24,58	4 232,250	4 445,000	0,034
500	25,23	4 445,000	4 680,000	0,032
525	25,85	4 677,750	4 915,000	0,030
550	26,46	4 900,500	5 130,000	0,029
575	27,05	5 123,250	5 380,000	0,028
600	27,63	5 346,000	5 615,000	0,026
625	28,20	5 568,750	5 850,000	0,025
650	28,76	5 791,500	6 090,000	0,024
675	29,31	6 014,250	6 320,000	0,023
700	29,85	6 237,000	6 550,000	0,023
725	30,38	6 439,750	6 790,000	0,022
750	30,90	6 682,500	7 020,000	0,021
775	31,41	6 905,250	7 260,000	0,020

SECTION du CABLE	DIAMÈTRE du FIL ÉQUIVALENT de même section	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du fil équivalent	POIDS en kilogrammes AU KILOMÈTRE du câble nu à 1 toron	RÉSISTANCE électrique à 0° en ohms de 1 000 mètres câble-cuivre pur
millimètres carrés	millimètres	kilogrammes	kilogrammes	ohms
800	31,91	7 158,000	7 490,000	0,020
825	32,40	7 300,750	7 720,000	0,019
850	32,88	7 573,500	7 960,000	0,019
875	33,37	7 796,250	8 190,000	0,018
900	33,85	8 019,000	8 420,000	0,017
925	34,31	8 241,750	8 660,000	0,017
950	34,77	8 464,500	8 890,000	0,016
975	35,23	8 687,250	9 130,000	0,016
1 000	35,68	8 910,000	9 360,000	0,015
1 025	36,12	9 132,750	9 590,000	0,015
1 050	36,56	9 355,500	9 820,000	0,014
1 075	36,99	9 578,250	10 060,000	0,014
1 100	37,42	9 801,000	10 300,000	0,013
1 125	37,84	10 023,750	10 530,000	0,013
1 150	38,6	10 291,500	10 810,000	0,013
1 175	38,67	10 469,250	10 990,000	0,013
1 200	39,1	10 692,000	11 950,000	0,013

NOMBRE DE FILS DU TORON, DIAMÈTRES, SECTIONS, POIDS
ET RÉSISTANCES DES CABLES EN CUIVRE PUR

NOMBRE DE FILS dans le toron	DIAMÈTRE de CHAQUE FIL	DIAMÈTRE du CÂBLE	CONDUCTEUR SOLIDE ÉQUIVALENT		POIDS par KILOMÈTRE	RÉSISTANCE par KILOMÈTRE à 15,5° C
			diamètre	section		
	millimètres	millimètres	millimètres	millim. car.	kilogrammes	ohms
3	0,508	1,07	0,863	0,583	6	29,07
3	0,609	1,29	1,06	0,893	8	20,10
3	0,711	1,50	1,24	1,216	11	14,83
7	0,508	1,54	1,35	1,423	13	12,430
7	0,609	1,83	1,62	2,075	19	8,630
7	0,711	2,13	1,90	2,840	25	6,337
7	0,762	2,28	2,03	3,242	29	5,525
7	0,838	2,51	2,23	3,923	35	4,561
7	0,914	2,74	2,43	4,65	42	3,835
7	1,02	3,04	2,71	5,77	52	3,1079
7	1,22	3,66	3,25	8,30	74	2,158
7	1,42	4,27	3,78	11,28	100	1,585
7	1,63	4,88	4,34	14,73	132	1,213
7	1,83	5,49	4,87	18,66	166	0,9589
7	2,03	6,10	5,41	22,98	205	0,7785
19	0,914	4,57	4,03	12,74	113	1,404
19	1,02	5,08	4,47	15,72	140	1,137
19	1,22	6,10	5,35	22,66	201	0,7897
19	1,42	7,10	6,27	30,91	274	0,6704
19	1,63	8,12	7,16	40,25	358	0,4445
19	1,83	9,14	8,05	50,96	453	0,3512
19	2,03	10,1	8,94	62,77	559	0,2845
19	2,34	11,6	10,7	83,20	740	0,2151
19	2,64	13,2	11,6	106,3	945	0,1683
37	1,63	11,3	10,0	78,6	699	0,2274
37	1,83	12,8	11,2	99,58	885	0,1797
37	2,03	14,2	12,5	122,9	1 093	0,1456
37	2,34	16,3	14,3	162,6	1 445	0,1101
37	2,64	18,4	16,2	207,7	1 847	0,0861
61	2,34	21,0	18,5	268,7	2 389	0,0666
61	2,64	23,7	20,9	343,4	3 052	0,0521

On calcule le poids d'un câble nu en cuivre en majorant le poids du fil équivalent (même section) de :

5 0/0 pour les câbles à un toron.

10 0/0 — — à plusieurs torons.

Le poids kilométrique d'un câble à un toron s'exprime en multipliant le nombre de millimètres carrés de la section par 9,35 et par 9,8 pour un câble à plusieurs torons.

Le tableau suivant représente les intensités maxima admissibles pour différents fils suspendus dans l'air et calculés au moyen des formules déterminées par ces expériences :

INTENSITÉS ADMISSIBLES POUR LES CONDUCTEURS EN CUIVRE
SUSPENDUS A L'EXTÉRIEUR

SECTIONS en MILLIMÈTRES CARRÉS	INTENSITÉ ADMISE EN AMPÈRES	
	cuivre brillant $m = 1$	cuivre noirci $m = 2$
304,02	706	744
278,69	662	698
253,35	618	652
228,02	572	602
202,68	524	552
177,35	476	500
152,01	425	477
126,68	372	391
107,219	329	346
85,028	278	292
67,431	236	247
53,504	199	209
42,409	169	177
33,632	141	148
26,670	121	127
21,151	103	108
16,773	88	91
13,301	75	78
10,548	63	66
8,366	54	56
6,635	46	48
5,260	40	41
4,172	34	35
3,309	29	30
2,618	25	25,8
2,081	21,5	22,2
1,650	18,5	19,1
1,309	16	16,5
1,038	13,8	14,2
0,793	12	12,3
0,634	10,4	10,7
0,517	9	9,2

III. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE PAR COURANT CONTINU A HAUTE TENSION

515. Transport à haut voltage système Thury. — Il semblait tout à fait acquis que le courant continu ne pouvait se prêter aux transports de l'énergie à haute tension, lorsque les installations et les expériences concluantes entreprises par l'ingénieur Thury ramenèrent l'attention sur ce genre de production de l'électricité, éclipsé par la découverte du courant triphasé.

Déjà la Compagnie de l'industrie électrique de Genève avait réalisé industriellement les transports de force de Combe-Garot dans le Val-Travers (48 kilomètres), dont nous avons donné la description au (§ 363), de Saint-Maurice-Lausanne (5.000 HP ; 56 kilomètres à 23.000 volts), quand M. Thury résolut d'élever la tension de ses machines de façon à obtenir un voltage trois fois plus élevé que celui de Saint-Maurice, soit 70.000 volts. Des essais furent alors faits pour examiner la façon dont se comporteraient les isolateurs comparativement avec du courant alternatif à la même tension efficace (la fréquence du courant alternatif était de 50 périodes). Au cours de ces expériences, on constata que la distance explosive dans l'air pour le courant continu ne dépassait pas 44 millimètres pour 40.000 volts (entre pointe et plateau), contre 100 millimètres pour l'alternatif.

Les isolateurs résistèrent à une tension continue notablement supérieure à celle de l'alternatif et, en général, l'étincelle éclatait à l'extérieur, entre la ferrure et la ligature du fil de ligne. A 60.000 volts, on n'apercevait aucune lueur entre fils, à 50 centimètres l'un de l'autre.

Pour des tensions de 60.000 volts, le courant continu supportait une tension 1,30 fois supérieure à celle de l'alternatif ; de même pour tous les corps isolants qui furent soumis à la perforation dans ces expériences. De plus ceux-ci n'ont jamais chauffé d'une quantité appréciable, ce qui s'explique par l'absence des effets de la capacité.

D'après ces résultats, il semble acquis, avec les moyens dont on dispose actuellement, que la tension limite du courant continu peut dépasser celle de 70.000 volts entre fils de ligne et terre. Avec une pareille tension on peut transmettre du courant continu à 335 kilomètres avec 10 0/0 de perte seulement, 30 kilogrammes de cuivre par cheval transmis, et à 1.000 kilomètres avec le même poids et 30 0/0 de perte.

L'emploi de la terre comme conducteur ou comme limitatrice de tension statique permet de doubler ces distances, à égalité de tension, perte et poids de cuivre, ou de réduire la tension de moitié. Avec la terre,

comme retour, à dépense égale de cuivre, on a une économie de trois quarts dans l'énergie perdue, la résistance de la terre étant négligeable.

Si on compare le courant continu au courant alternatif, on sait que dans ce dernier la tension maxima entre chaque conducteur et la terre est de 1,41 fois plus forte que la tension efficace indiquée par les instruments de mesure. Il résulte en outre des dernières expériences de M. Thury que, si les machines génératrices ne donnent pas une force électromotrice sinusoïdale, la tension maxima, en tenant compte des dentelures probables, est au moins le double de la tension moyenne efficace. Le même isolement entre fils d'une ligne permet ainsi d'employer une tension 2 fois plus élevée en courant continu qu'en alternatif mono ou triphasé. De même, un isolement entre chaque fil et la terre offre le moyen d'utiliser une tension entre fils 2 fois plus élevée en courant continu qu'en courant monophasé avec point neutre à la terre, et 2,3 fois ($4 : 1,732$) qu'en courant triphasé avec point neutre à la terre.

Enfin, avec le courant continu, les tensions employées n'ayant pas besoin d'être plus élevées que ne l'exige à chaque instant la puissance transportée, l'effet moyen de rupture auquel sont soumis les isolateurs pendant une journée reste bien inférieur à celui qui correspond à la tension maxima prévue.

Des essais récents effectués sur des câbles souterrains ont permis de pousser la tension d'essai jusqu'à 300.000 volts en courant continu ; un tel résultat paraît ouvrir un vaste champ, pour les lignes à très grande distance, au courant continu avec l'emploi de câbles souterrains.

Un système mixte mérite de retenir l'attention : c'est la combinaison du transport à courant continu comportant génératrices et moteurs en série avec un transport à courant triphasé.

Le système continu se trouve alors travailler dans les meilleures conditions, puisqu'il se limite à un ou deux centres de distribution où l'énergie est fournie à puissance constante et où le courant triphasé, tout en pourvoyant peut-être à la majeure partie de la distribution fait, en outre, l'appoint nécessaire pour faire face aux variations de débit.

La construction générale des génératrices à haute tension et à courant continu est simple. L'inducteur est en fer lamellé et tourne à l'intérieur d'un anneau en deux pièces constituant l'induit, qui est fixe.

Les bobines induites des machines à 20.000 volts sont au nombre de 48 et encastrées dans autant de rainures pratiquées dans l'anneau. Chaque bobine élémentaire comprend 50 spires de fil de cuivre d'un demi-millimètre de diamètre isolé à la soie, et il y a 2.400 spires induites faites d'avance au moule. Le collecteur, composé de 96 segments séparés par un espace d'air, est fixe et, comme nous l'avons dit ci-avant, des condensateurs sont branchés entre chaque lame du collecteur pour éviter

l'amorcement d'arcs. La vitesse périphérique de l'induit est, à 600 tours, de 18^m,22 par seconde.

Si le courant continu évite les effets de self-induction et d'induction mutuelle qui entraînent, par suite de la subdivision des conducteurs, à l'établissement de supports fort dispendieux, il oblige, par contre, à décharger continuellement la ligne — par suite des charges statiques qui se produisent — en la mettant en rapport avec la terre par l'intermédiaire de résistances élevées. En outre, il faut prendre des dispositions spéciales contre les effets de la foudre ainsi que pour avoir un isolement parfait entre la terre et les machines et entre la terre et le personnel qui peut être appelé à toucher aux machines.

Les expériences de M. Thury ont laissé entrevoir la possibilité d'applications nouvelles et très intéressantes, telles que la télégraphie sans fil et la fabrication des produits azotés par l'air.

Tout en reconnaissant au courant continu de nombreuses et remarquables qualités, il convient de ne pas oublier que, pour l'instant, l'alternateur à haute tension est de construction plus facile que la machine à courant continu équivalente, que le courant alternatif est d'une transformation, et par cela même, d'une distribution plus simple, et qu'enfin le courant continu donne lieu à des effets fâcheux d'électrolyse.

Le transport par courant à haute tension, tel que le préconise M. Thury, consiste à placer en série sur un même circuit les génératrices d'une part, les réceptrices d'autre part, et à faire varier, suivant la demande de puissance, la tension à l'usine génératrice. Le réglage des génératrices, actionnées à vitesse constante, peut s'opérer par variation du champ ; si les machines sont à excitation indépendante, le réglage consiste à faire varier automatiquement leur excitation, de façon à abaisser ou élever la tension dans la proportion voulue. On peut aussi faire un réglage combiné assurant le réglage indépendant et direct de chacune des unités génératrices à l'aide d'un régulateur qui agit à la fois, ou séparément sur le champ magnétique et le calage des balais. Le réglage des balais avec celui du champ peut être obtenu depuis la marche en court-circuit jusqu'au voltage le plus élevé. Un tel régulateur se compose d'un petit inducteur parcouru par le courant de ligne qui actionne une armature très légère munie de deux buttoirs (*fig. 1327*), agissant sur un double encliquetage et permettant à un renvoi de mettre en mouvement dans un sens ou dans l'autre, soit la poignée mobile du rhéostat de réglage, soit le porte-balais.

Quand les génératrices sont à vitesse variable, le réglage se produit à l'aide d'un simple interrupteur de court-circuit, et on opère à la main ou automatiquement. Ce dernier réglage peut se faire à l'aide d'un régulateur unique pour la station génératrice ou par un appareil individuel

correspondant à chaque unité. Dans un cas comme dans l'autre, les turbines hydrauliques sont munies de leurs organes de régulation, sauf le pendule-tachymètre, dont l'action est remplacée par le jeu du régulateur électrique. Les génératrices sont auto-excitées en série, permettant ainsi un calage fixe des balais sans étincelle au collecteur.

Le rendement du système série augmente du fait de la surcharge et l'abaissement de l'intensité qui en résulte, et les pertes de charge en ligne n'influent pas sur le fonctionnement des réceptrices, puisque celui-ci ne dépend que de l'intensité du courant, laquelle est la même dans

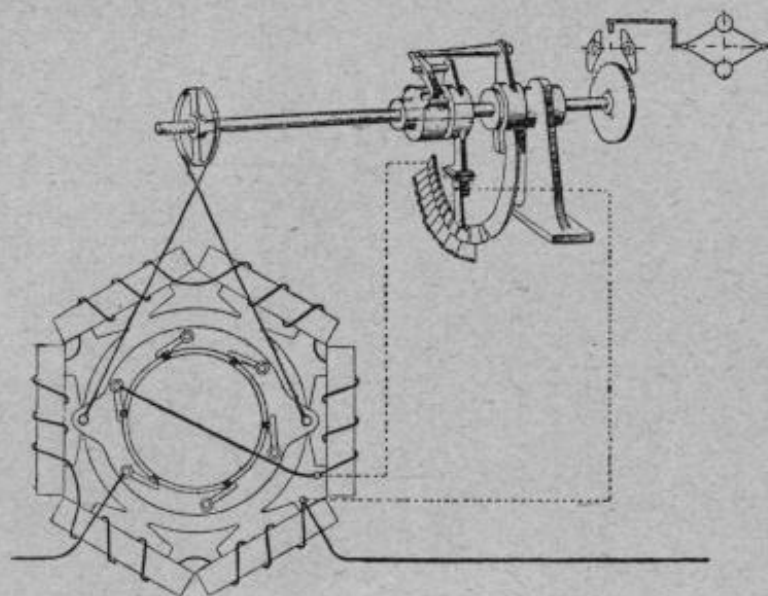


FIG. 1327.

toutes les parties de la ligne, dans l'hypothèse d'un isolement électrique parfait.

Les réceptrices sont toujours des moteurs série mais avec adaptation de régulateurs d'intensité dans lesquels le solénoïde régulateur est remplacé par un régulateur à force centrifuge commandant généralement le plateau porte-balais. De plus on munit les machines de manchons d'accouplement très lourds. Ces régulateurs doivent être très sensibles pour maintenir l'intensité rigoureusement constante.

Parmi les modes de réglage des réceptrices, celui par shuntage des inducteurs est particulièrement employé pour les unités inférieures à 100 HP. Dans la marche à vide, l'inducteur est shunté par un court-circuit complet. Lorsque les unités dépassent 100 HP, on règle par un shuntage des inducteurs, combiné avec le décalage des balais. On obtient ce réglage au moyen d'un tachymètre système Thury, agissant sur le curseur du rhéostat shunt et en même temps sur le porte-balais.

L'appareillage d'une distribution série est des plus simples : il com-

porte des interrupteurs de court-circuit munis de parc-étincelles, des appareils de contrôle (ampèremètre, voltmètre) et des appareils de sécurité représentés par un disjoncteur spécial dit « by-pass », qui a pour but de mettre en court-circuit une partie de l'installation, quand la différence de potentiel dans cette partie devient trop grande, par des déclencheurs de vitesse et d'inversion, ces derniers ayant pour effet de mettre en court-circuit une génératrice dès qu'elle a tendance à fonctionner en réceptrice.

La mise en marche des moteurs a lieu en court-circuitant leurs enroulements au moyen d'interrupteurs, mais, au préalable, on doit placer les balais perpendiculairement à la ligne neutre, c'est-à-dire alors que le couple moteur est très faible. Puis on met graduellement en vitesse en agissant sur les balais.

Pour opérer l'arrêt, on réduit la vitesse au moyen des balais et quand la différence de potentiel entre les bornes du moteur est à peu près nulle, on le met en court-circuit. Ainsi que nous l'avons dit ci-avant, on dispose l'usine d'arrivée auprès du centre à alimenter. Dans cette usine ou sous-station on met les groupes convertisseurs rotatifs (moteurs série à intensité constante et dynamos à tension constante).

Pour éviter toute interruption de service dans ce système, on peut installer deux boucles concentriques reliées de distance en distance par des embranchements aboutissant à des postes de visite reliés aux deux lignes et munis des appareils voulus pour qu'on puisse instantanément mettre une section quelconque hors circuit, pendant que la section parallèle transmet seule la totalité de l'énergie.

Dans les transports à grande distance par courant continu, on peut compter sur les rendements ci-après : transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique 93 0/0 ; transformation de l'énergie électrique à haute tension en énergie mécanique 93 0/0 ; transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique à basse tension, 99 0/0 et, si on adopte un rendement de ligne de 72 0/0, on arrive à un rendement total de 58 0/0.

516. Transports de force de Saint-Maurice et de Moutiers. —

Transport de Saint-Maurice. — La description de l'aménagement hydraulique de cette installation a été donnée au (§ 334).

L'installation de l'usine réceptrice est composée de :

- 1^o Trois groupes d'alternateurs dont les caractéristiques et les fonctions sont indiquées plus loin. Chaque groupe a son tableau spécial de mise en marche, d'ailleurs très simplifié comme manœuvre ;
- 2^o Deux groupes de transformateurs rotatifs composés chacun d'un moteur à courant continu à haute tension et d'une génératrice à courant continu ; chacune d'elles développe 442 ampères sous 600 volts ;

3° Cinq groupes de transformateurs rotatifs pour les tramways de la ville de Lausanne ;

4° Un groupe générateur servant de survolteur-dévolteur ;

Et 5° deux groupes de transformateurs rotatifs composés chacun d'un moteur asynchrone triphasé de 50 HP, tournant à 730 tours sous tension de 3.000 volts, 50 périodes et d'une génératrice à courant continu débitant 270-187 ampères sous 125-180 volts.

Les alternateurs des trois groupes du (§ 1) fournissent du courant pour la force et l'éclairage de la ville de Lausanne et de sa banlieue. Pour la ville, les courants sont dirigés sous une tension de 3.000 volts, 50 périodes à des sous-stations qui abaissent la tension à 215 volts pour la force et 125 volts pour l'éclairage. Pour la banlieue, la tension est portée à 6.000 volts à l'aide de transformateurs Alioth. Aux lieux d'utilisation, la tension est abaissée comme pour la ville. Les deux groupes du (§ 2) servent à la charge d'une batterie d'accumulateurs d'une capacité de 1.000 ampères-heures. Les deux groupes du (§ 5) sont utilisés pour l'excitation des alternateurs.

Transport de Moutiers. — Ce grand transport [Moutiers (Savoie) (*Usine de la Pomblière*) à Lyon] a une longueur de près de 200 kilomètres. La tension est de 56.000 volts et l'intensité de 75 ampères, soit une puissance de 4.200 kilowatts. La tension de chaque induit des génératrices a été fixée, en pleine charge, à 3.500 volts, et ces induits sont montés par quatre sur un bâti commun formant un groupe d'une tension de 14.000 volts. Puis quatre groupes semblables fournissent le voltage de 56.000 volts au départ.

Le régulateur à l'usine génératrice, actionné par le courant principal, agit sur le vannage des turbines. La ligne de transmission est établie pour une perte en ligne de 12,5 0/0 de la puissance, soit environ 535 kilowatts. A l'usine réceptrice (Vaux-en-Velin, près de Lyon), les groupes transformateurs sont composés de moteurs série de 725 HP, entraînant directement des génératrices à courant continu de 600 volts et de 500 kilowatts. Un régulateur à force centrifuge actionne le plateau porte-balais des moteurs.

Le rendement général (de l'arbre des turbines au tableau de 600 volts) est de 70,5 0/0, en y comprenant celui de la ligne.

En temps normal, aucun point de l'installation n'est mis directement à la terre ; il n'y a de mise à la terre directe qu'en cas de réparations sur la ligne. La ligne de transport d'énergie est composée d'une ligne aérienne de 180 kilomètres de longueur aboutissant à Vaux-en-Velin et d'une canalisation souterraine allant jusqu'à la station centrale des Tramways de Lyon. Les conducteurs de la ligne aérienne ont 9 millimètres de diamètre. Les poteaux métalliques, qui portent en outre la ligne triphasée, que

nous signalons plus loin, ont 16 mètres de hauteur et sont espacés de 100 mètres. Quinze postes de surveillance sont répartis le long de la ligne. Le câble souterrain, système Berthoud-Borel, a une épaisseur d'isolant de 18 millimètres, protégé par deux gâmes de plomb et deux couches de feuillard. Sa capacité kilométrique est de 0,12 micro-farad.

Comme secours, l'usine réceptrice comporte des moteurs-générateurs synchrones recevant du courant triphasé à 26.000 volts de la Société grenobloise de Force et Lumière et le transformant à 600 volts continu. De cette façon, on peut soit alimenter le réseau alternatif à 26.000 volts par la transmission Moutiers-Lyon, après transformation, soit, en cas d'arrêt de cette dernière transmission, alimenter les tramways de Lyon.

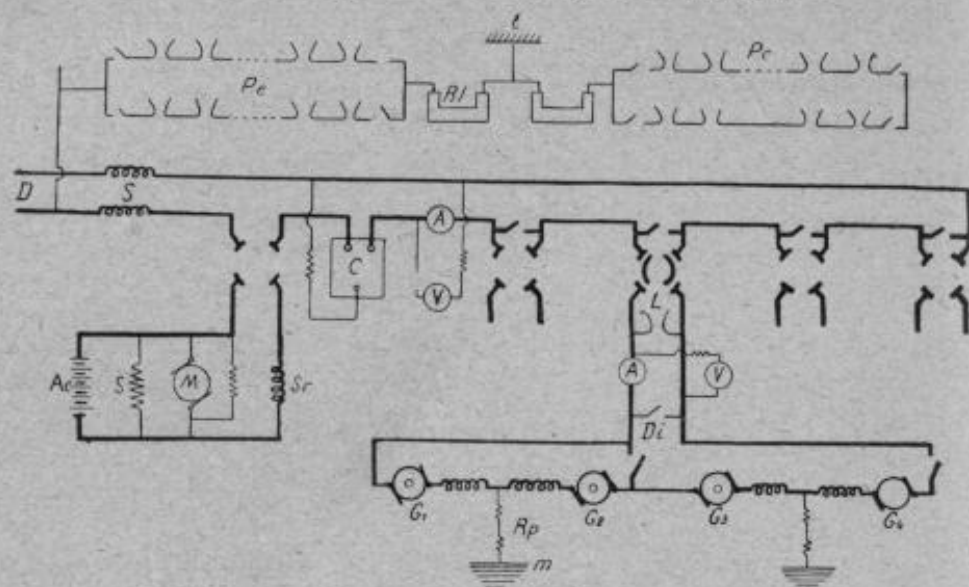
Une batterie d'accumulateurs de 2.080 ampères-heures, suffisante pour alimenter pendant une demi-heure le réseau des tramways, en cas d'un arrêt brusque et accidentel de l'usine, est installée dans le sous-sol. Pendant ce temps les machines à vapeur de secours peuvent être mises en marche pour assurer le service, le cas échéant. Tout le matériel électrique de cette importante installation, qui comporte les derniers perfectionnements du système Thury, a été fourni par la Compagnie électrique et mécanique de Genève ; les génératrices à 600 volts ont été construites par les établissements Schneider. La (fig. 1328) donne les schémas des connexions de l'usine génératrice et de l'usine réceptrice.

517. Réseau de la Metropolitan Electric Supply Company. — Ce système a été adopté, comme se présentant le plus économique et comme pouvant répondre le plus rapidement à une extension à de très longues distances.

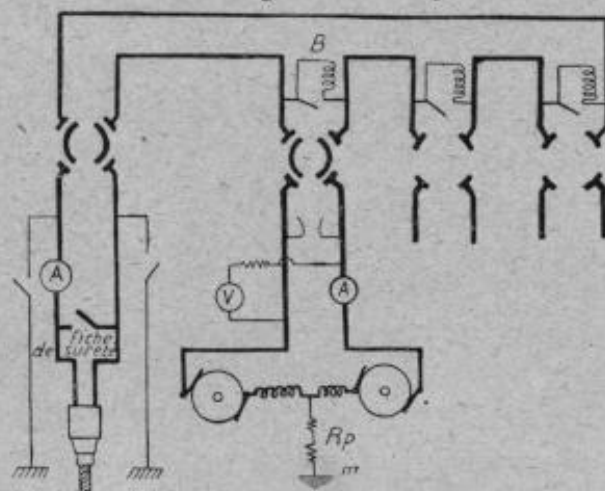
La ligne est constituée par deux câbles de 80^{mm}²,6 sous plomb avec isolement au papier de 12^{mm},6 suffisant pour la tension de 100.000 volts, chaque câble étant placé dans un tuyau en fonte ; la terre est prise comme conducteur de secours en cas d'un accident sur l'un des conducteurs.

La ligne s'étend sur une longueur de 11 kilomètres ; les joints sont isolés à l'aide de papier et enfermés dans des boîtes spéciales en fonte. La (fig. 1329) représente un de ces joints, qui sont peu coûteux et très sûrs.

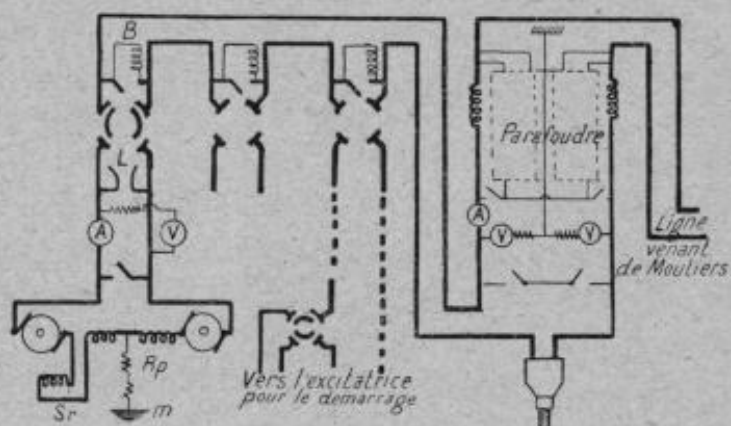
Chaque longueur de câble de 200 mètres a été préalablement essayée en usine à 75.000 volts, courant alternatif, 60 périodes, la tension étant appliquée pendant dix minutes ; un bout prélevé de 1^m,80 sur chaque longueur de câble manufacturé a été essayé à 130.000 volts et chaque joint à 150.000 volts sans claquer, pendant cinq minutes. Après pose, la longueur totale du câble a été essayée à 20.000 volts, courant alternatif pendant cinq minutes.



Usine génératrice à Lyon.



Sous-Station VAUX EN VELIN.



B, bypass automatique.
 C, compteur d'énergie.
 S, bobine de self.
 D, départ de la ligne.
 Pc, parafoudre à cornes.
 Ac, batterie d'accumulateurs.
 t, terre.
 Sr, solénoïde du régulateur automatique de tension.

M, moteur de ce régulateur.
 Rl, résistance liquide.
 G, dynamos génératrices.
 Di, interrupteur par inversion.
 Rp, résistance à foudre.
 m, masse des dynamos.
 L, limiteur de tension entre les bornes d'un groupe de 4 inducts.

FIG. 1328. — Schéma de l'usine centrale de la Pomblière (courant continu).

Pour plus de sûreté on décida d'essayer les câbles sous tension continue à 150.000 volts et, à cet effet, on construisit une machine spéciale, consistant en une génératrice type Woss commandée directement par un moteur tournant à 1000 tours à la minute enfermé dans une enveloppe en fonte remplie d'azote à la pression de $14^{\text{kg}},1$ par centimètre carré.

La génératrice est isolée de la terre de la même façon que l'ensemble de la machine est isolé. Cette machine a maintenu, pendant environ trente minutes, une tension de 130.000 volts et pour de courtes périodes une tension de 150.000 volts, l'énergie totale mise sur les câbles et appareils étant approximativement de 500 watts.

L'extrémité de chaque câble est connecté à l'usine à son propre tableau

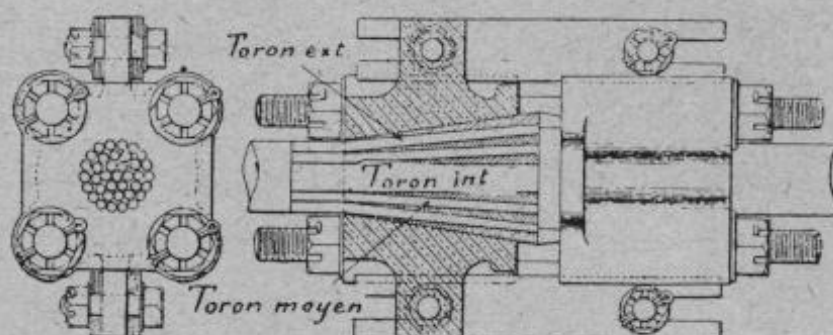


FIG. 1329.

composé de deux interrupteurs, l'un pour brancher directement le câble au réseau, l'autre pour mettre le circuit de la station à la terre. Les deux interrupteurs sont solidaires de manière que l'on ne puisse pas manœuvrer l'un avant que l'autre soit fermé. Des ampèremètres et voltmètres complètent le panneau. Les panneaux sont à double isolation et les châssis sont eux-mêmes isolés de la terre.

Les génératrices sont actionnées par des moteurs synchrones alimentés avec l'énergie fournie par les génératrices à courant alternatif. Les génératrices à courant continu sont à six pôles avec collecteur de 150 centimètres, une longueur de 17 centimètres et 1.439 lames. Le courant maximum étant de 120 ampères, deux paires de balais suffisent pour assurer la commutation. Le courant peut varier de 70 à 120 ampères et la tension normale de 5.000 volts, la plus haute tension pratiquée à ce jour dans une machine de ce genre.

Le courant est maintenu constant par un régulateur qui règle le champ par déplacement des balais entre leurs positions de pleine charge et de marche à vide, et en même temps, en shuntant une partie du courant d'oscillation.

Ce régulateur est actionné au moyen d'une courroie et de poulies, par

l'extrémité d'arbre de la génératrice. Il consiste en une petite turbine entièrement immergée dans l'huile. A l'intérieur est une palette et, suivant que l'huile sous pression arrive sur l'une ou l'autre face de la palette, l'arbre vertical, sur lequel elle est montée, tourne dans l'un ou l'autre sens. Le mouvement de cet arbre se transmet par roues dentées à un arbre horizontal qui actionne le croisillon porte-balais. La valve qui dirige l'huile sur la palette est commandée par un solénoïde traversé par le courant principal, c'est donc un régulateur du type à relais.

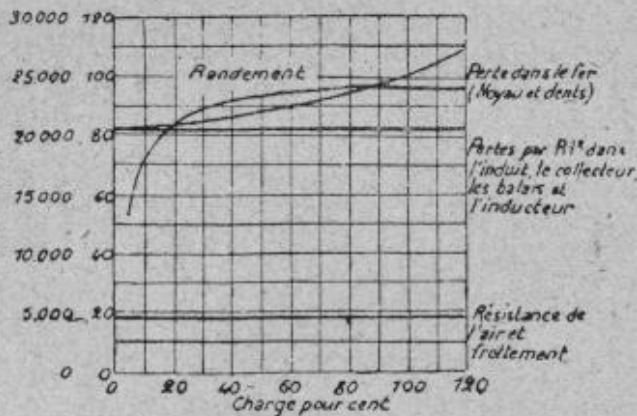


FIG. 1330. — Courbe de rendement des machines à courant continu, force 5.000 volts de la transmission d'énergie de la Metropolitan Company.

Les génératrices sont actionnées par l'intermédiaire de manchons du type Zedel isolés, consistant en deux plateaux munis de tourillons et de rouleaux portant la courroie principale de commande et la courroie de retour, celle-ci étant nécessaire pour permettre de démarrer le groupe du côté continu et pour maintenir rigide-

ment l'ensemble de l'accouplement, lequel possède en outre un dispositif de glissement.

En plus du régulateur, chaque génératrice est munie d'un interrupteur de mise en court-circuit et d'un mécanisme fermant cet interrupteur, c'est-à-dire court-circuitant la génératrice en cas d'inversion de sens de marche.

L'interrupteur est du type rotatif à quatre points ; il est monté sur pilier portant également un interrupteur à contacts à charbon fonctionnant en parallèle avec l'interrupteur rotatif, de façon à protéger ce dernier contre l'arc formé à l'ouverture du circuit inductif de la génératrice. La colonne porte, en outre, un ampèremètre et un voltmètre, ladite colonne montée sur le socle de la machine elle-même (fig. 1331).

En plus de ces interrupteurs, des couteaux sont placés sur le sol et ont pour but de mettre hors circuit les interrupteurs de la machine ; ces couteaux sont à rupture dans l'huile et enfermés dans une double boîte en fonte, ces deux boîtes fortement isolées électriquement l'une de l'autre. Tous ces interrupteurs ont été essayés à 110.000 volts alternatifs appliqués pendant dix minutes.

Les génératrices elles-mêmes sont soigneusement isolées de la terre. L'isolement en fondations a été particulièrement bien compris et il diffère

essentiellement du système consistant à supporter les machines par des isolateurs en forme de pots.

Le sol de l'usine lui-même est en béton recouvert soigneusement d'une couche d'asphalte de 5 centimètres d'épaisseur.

Une résistance de 0,8 mégohm est fixée sur le châssis de la machine, ses extrémités étant reliées aux bornes et le point central connecté au châssis, de sorte que la tension totale entre l'un des pôles et le châssis est limitée à la moitié de la tension fournie par la génératrice, et un opérateur monté sur le socle de la machine et touchant un des pôles, ne peut pas recevoir plus de courant que la grande

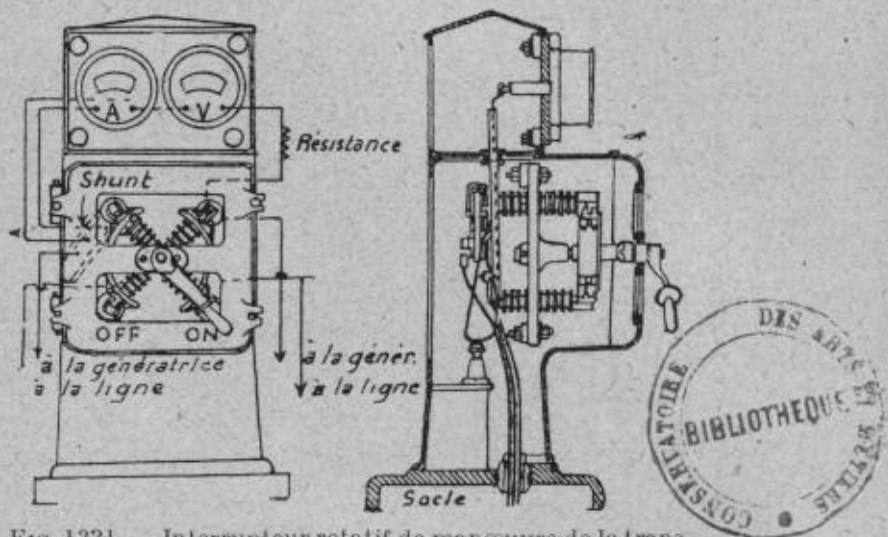


FIG. 1331. — Interrupteur rotatif de manœuvre de la transmission d'énergie courant continu — série de la Metropolitan Company.

résistance ne peut en laisser passer. Des dispositifs de garde sont prévus sur chaque groupe pour empêcher tout contact accidentel entre le bâti isolé de la génératrice et le bâti à la terre du moteur à courant alternatif.

Trois moteurs générateurs sont actuellement installés à l'usine génératrice dont deux sont munis de moteurs à courant alternatif pour démarrage par le côté alternatif, le troisième groupe étant démarré à l'aide de la génératrice à courant continu.

Station réceptrice. — Elle comprend trois moteurs à courant continu actionnant trois génératrices de 250 kilowatts qui débitent du courant triphasé à 30.000 volts, 50 périodes. La vitesse des machines est de 500 tours à la minute. Les moteurs entraînent les génératrices par l'intermédiaire d'un accouplement isolant mais sans organe de glissement. La vitesse des groupes est maintenue constante par un régulateur de type analogue à ceux de la station génératrice, sauf que le piston-valve, au lieu d'être contrôlé par un solénoïde, l'est par la pression produite par la turbine à huile. Ce régulateur est très sensible.

Les organes de distribution sont analogues à ceux de l'usine génératrice. Les génératrices sont connectées au tableau principal de distribution duquel partent les feeders à 3.000 volts.

A la suite de nombreux essais prolongés, judicieusement, minutieu-

sement et méthodiquement appliqués au point de vue de l'emploi du retour par la terre on reconnut que la mise à la terre est très effective bien qu'on n'eût employé que trois plaques et que ces plaques placées près de la surface du sol présentent plus de résistance qu'à une profondeur considérable.

L'usage de la terre a comme conducteur un avantage commercial très important lorsqu'on l'emploie comme conducteur de réserve. Et si l'on emploie les câbles en parallèle pour les deux conducteurs et la terre comme deuxième conducteur, la perte en ligne est réduite dans des proportions importantes. L'un des câbles pouvant d'ailleurs supporter à lui tout seul la pleine charge, on voit que l'on dispose du même coup d'un système double complet de transmission. Le rendement industriel a été reconnu de 77 0/0 (*fig. 1330*).

Pour mettre une génératrice en circuit on la fait généralement démarrer du côté continu et le moteur est mis en parallèle dans le circuit. Les moteurs de l'usine réceptrice sont démarrés en ouvrant l'interrupteur et déplaçant les balais jusqu'à ce que la pleine vitesse soit atteinte lorsque le régulateur est mis en action.

Remarques sur les dimensions des génératrices. — La limite sûre actuelle de la tension sur un simple collecteur semble être d'environ 5.000 volts. Pour une tension en ligne de 50.000 volts en ligne, il faudra 10 génératrices et si ces génératrices sont commandées deux par deux, le système nécessitera cinq groupes ou unités. Le débit de chaque unité dépend du courant de ligne adopté ; une ligne de 300 ampères nécessiterait cinq unités de chacune 3.000 kilowatts. Il semblerait que les génératrices pourraient être commandées par turbines à vapeur par l'emploi d'un système analogue à la transmission à double hélice employée par Parsons pour les machines marines. Il apparaît d'autre part que le coût d'une usine génératrice à courant continu par haute tension n'est généralement pas plus élevé que celui d'une usine analogue à courant alternatif.

Le coût de l'usine réceptrice, comparé à une usine à courant alternatif avec emploi de transformateurs abaisseurs, est moins élevé pour la distribution série.

La ligne de transmission est pour le système série moins coûteuse que la ligne triphasée de même capacité, avec emploi de câbles armés dans les deux cas et dans beaucoup de cas on pourrait constater que le coût d'un réseau souterrain, système Thury, ne dépasse pas le coût d'un réseau aérien triphasé comparable.

518. Transport à courant continu de Trollhättan à Copenhague. — MM. A. Rossander et Centerwall chargés de l'étude

de l'utilisation des 20.000 chevaux restant disponibles à l'usine de Trollhättan sur les 100.000 chevaux aménagés ont conclu à l'adoption du courant continu série pour le transport de force Trollhättan-Copenhague. Entre autres avantages, ils ont fait ressortir la simplicité de la ligne et de sa production, la tension inférieure dans les sous-stations, l'inutilité de la transformation pour la traversée du Sund. La ligne, avec poteaux en bois, unipolaire et retour par la terre, a été adoptée.

On a examiné deux hypothèses. Dans la première, la ligne est aérienne à la tension de 100.000 volts de Trollhättan à Helsingborg où la tension est transformée à 20.000 volts. La traversée du Sund se fait par un câble de 5^{km},5 jusqu'à Helsingör (Danemark) où on relève la tension jusqu'à 100.000 volts et la ligne aérienne se continue jusqu'à Copenhague. La longueur de la ligne est de 325 kilomètres. Pour avoir une réserve suffisante, on passerait quatre câbles triphasés de 3×95 millimètres carrés entre Helsingborg et Helsingör. Pour la ligne aérienne, formée de pylônes en fer avec isolateurs suspendus, la section serait de 3×75 millimètres carrés. On compte sur une puissance primaire de 20.000 chevaux à Trollhättan ; en réalité une puissance de 11.600 kilowatts à 10.000 volts et 25 périodes y serait disponible, ou 10.440 volts à 50 périodes après transformation.

Les frais d'établissement, dans cette hypothèse, seraient les suivants (en marks).

Deux groupes de 10.000 chevaux à Trollhättan :	
turbines, génératrices triphasées, transforma-	
teurs, tableaux.....	872.000 marks
Lignes aériennes sur pylônes.....	2.840.000 —
Trois stations de transformateurs.....	800.000 —
Câbles à travers le Sund.....	473.000 —
Imprévu.....	965.000 —
Sous-station de trois commutatrices à Copenhague,	
11.600 kw., tableaux et imprévu.....	675.000 —
Total.....	6.625.000 marks

Les dépenses annuelles, concernant les taux d'amortissement et d'intérêt et l'entretien s'élèveraient à 681.000 marks selon le tableau ci-après :

Station de Trollhättan.....	96.100 marks
Ligne aérienne.....	253.300 —
Sous-station de transformateurs.....	92.700 —
Câbles.....	58.600 —
Imprévu et administration.....	100.300 —
Sous-station de Copenhague.....	80.000 —
Total.....	681.000 marks

La seconde hypothèse concerne l'emploi du courant continu série à haute tension.

En admettant une puissance de 14.720 kilowatts sur les arbres des turbines et un courant continu de 150 ampères, avec un rendement de 93 0/0 des génératrices, la tension continue maxima qui serait nécessaire est de 91.250 volts.

Le projet prévoit 20 génératrices en série ; la tension, par génératrice, de 4.560 volts. Un procédé consiste à faire actionner ces génératrices par groupe de quatre, par cinq turbines de 5.000 chevaux. Suivant un autre procédé, on installerait deux turbo-alternateurs triphasés de 10.000 chevaux, c'est-à-dire les mêmes unités que celles actuellement installées à l'usine de Trollhättan ; le courant continu serait produit par des moteurs générateurs.

Dans l'évaluation des dépenses, le rendement des génératrices triphasées est supposé de 0,96 et celui des moteurs triphasés, de 0,94.

La ligne serait exécutée soit aérienne, bipolaire ou unipolaire avec un retour à la terre. D'Helsingborg à Helsingör on utiliserait des câbles à 90.000 volts. La section de cuivre pour la ligne bipolaire est de 2×170 millimètres carrés et 120 millimètres carrés pour la ligne unipolaire (séparée pour la sécurité en deux lignes distinctes) de 60 millimètres carrés. Dans le système bipolaire on a toujours la terre comme secours d'une des deux lignes. Les pertes en ligne sont pour la transmission bipolaire de 1.520 kilowatts et pour la ligne unipolaire de 1.075 kilowatts. A Copenhague le courant continu serait transformé en triphasé.

Les dépenses de premier établissement avec génératrices à courant continu accouplées directement, poteaux en bois, sont les suivantes :

Batiments, maçonnerie.....	179.800 marks
Machines de Trollhättan :	
Quatre turbines de 5.000 chevaux, dynamos à courant continu.....	1.237.000 —
Câbles.....	181.000 —
Total.....	1.597.000 marks

A ajouter :

	Unipolaire.	Bipolaire.
Ligne aérienne avec poteaux en bois.	1.417.000 marks	2.997.000 marks
Imprévu.....	584.000 —	914.000 —
Sous-station de Copenhague, commutatrices triphasées-continu.....	1.407.000 —	1.355.000 —
Totaux.....	5.005.000 marks	6.863.000 marks

Par l'emploi de pylônes en fer, ces sommes s'élèvent respectivement à 5.287.000 et 7.145.000 marks.

La solution qui prévoit la transformation du courant triphasé en continu à Trollhättan, les frais d'établissement avec poteaux en bois sont les suivants :

Bâtiments des commutatrices.....	225.000 marks
Machines de Trollhättan :	
2 turbines de 10.000 HP, génératrices triphasées, moteurs triphasés et dynamos.....	1.775.000 —
Ligne de câbles	181.000 —
Total.....	2.181.000 marks

A ajouter :

	Unipolaire.	Bipolaire.
Ligne aérienne avec poteaux en bois.	1.417.000 marks	2.997.000 marks
Imprévu	727.500 —	1.001.000 —
Sous-station de commutatrices.....	1.293.000 —	1.237.000 —
Totaux.....	3.618.500 marks	7.416.000 marks

L'emploi de pylônes élève ces totaux respectivement à 5.901.000 et 7.757.000 marks.

Les dépenses annuelles, pour la solution comportant des dynamos accouplées directement, sont évaluées à 521.000 marks pour une ligne unipolaire, 655.000 marks pour une ligne bipolaire avec poteaux bois et 542.000 marks et 678.000 marks respectivement avec des pylônes. Par contre, dans le cas de transformation en continu à Trollhättan, les mêmes totaux deviendraient respectivement 590.000, 726.000, 612.000 et 751.000 marks.

Il résulte que la solution avec courant continu est, dans l'ensemble, plus économique que les systèmes à courant alternatif.

IV. — APPLICATIONS NUMÉRIQUES. — TRANSPORTS DE FORCE A GRANDE DISTANCE

519. Calcul d'une transmission de puissance par courant continu. — Soient : l la distance en mètres entre la station génératrice et la station réceptrice, E la différence de potentiel à l'arrivée, e la chute de tension en ligne, α et β les rendements commerciaux du moteur et du générateur, λ celui de la ligne, s la section du conducteur en centimètres carrés et I le courant.

Pour une puissance n en chevaux, on a :

$$I = \frac{736n}{E\alpha}.$$

Supposons que le conducteur présente une résistance de m ohms par mètre et par centimètre carré de section, on aura, pour la résistance de la ligne :

$$\frac{2lm}{s}.$$

La chute de potentiel est alors définie par l'expression :

$$e = \frac{736n}{E\alpha} \times \frac{2lm}{s} = \frac{1.472nlm}{E \times \alpha \times s} \quad \text{ou} \quad = \frac{1.472nlm}{E \times \alpha \times e}$$

Appelons d le poids de cuivre par mètre de longueur et par centimètre carré de section et b le prix du cuivre, on obtient pour le prix de la ligne (2l) :

$$\frac{2.944n \times l^2 \times m \times d \times b}{E \times e \times \alpha}$$

La puissance électrique produite par la génératrice est :

$$\frac{E + e}{E} \times \frac{n}{\alpha} \times \frac{1}{\beta}$$

Si K représente le prix de premier établissement par cheval-vapeur de l'usine génératrice complète, on a comme dépense :

$$\frac{E + e}{E \times \alpha \times \beta} nK.$$

Enfin, soient : P le prix des poteaux isolateurs et de la pose de la ligne et M celui de l'installation de l'usine réceptrice par cheval-vapeur; on trouve pour les dépenses totales par cheval :

$$\frac{E + e}{E \times \alpha \times \beta} K \times \frac{2.944ml^2db}{E \times e \times \alpha} + \frac{P}{n} + M.$$

La condition pour laquelle la dépense de premier établissement est minima est donnée par l'expression :

$$\frac{K}{\beta} = \frac{2.944m \times l^2 \times d \times b}{e^2},$$

de laquelle on tire :

$$e = 54,2l \sqrt{\frac{m \times d \times l \times \beta}{K}}.$$

On voit ainsi que la valeur de e pour laquelle les dépenses sont minima est fonction de l et indépendante de la force électromotrice du moteur.

La valeur de λ est fournie par l'expression :

$$\lambda = \frac{E \times \alpha \times \beta}{E + e};$$

d'où l'on tire :

$$e = \frac{\alpha\beta - \lambda}{\lambda} E.$$

Et pour les dépenses :

$$\frac{2K}{\lambda} - \frac{K}{\alpha \times \beta} + \frac{P}{n} + M.$$

Le rapport entre la dépense de fil et celle d'établissement de l'usine génératrice dépend des rendements commerciaux et nullement du prix du matériel par unité de puissance

520. Calcul d'une transmission de puissance par courant alternatif simple. — PREMIER CAS. — Prenons une ligne de 20 kilomètres composée de deux fils de 6,5 millimètres de diamètre, les fils écartés de 60 centimètres et alimentant une distribution de lampes à incandescence sous la fréquence de 50 périodes à la seconde.

La charge varie de 0 à 200 kilowatts et la tension efficace à l'arrivée est de 10.000 volts. La résistance électrique du fil de cuivre à 0° est de 0,481 ohm par kilomètre et la résistance totale de : $0,481 \times 40 = 19,24$ ohms.

Admettons 10 0/0 d'augmentation pour température supérieure, impureté de cuivre, etc., on aura : 21 ohms 20.

L'intensité du courant dans la ligne, à plein débit, est :

$$I = \frac{200.000}{10.000} = 20 \text{ ampères,}$$

le courant étant en concordance de phase avec la tension.

La perte par effet Joule est donnée par l'expression :

$$21,20 \text{ ohms} \times (20 \text{ amp.})^2 = 8.480 \text{ watts, soit } 4,2 \text{ 0/0}$$

de la puissance totale.

On tire la valeur de l'inductance de la ligne de :

$$L_s = 2l \left(\frac{1}{2} + 6 \log e \frac{l'}{r} \right) \text{ unités C. G. S.}$$

$$\text{Mais } 2l = 4.000.000 \text{ centim. ; } \log e \frac{l'}{r} = \log e \frac{30}{0,325} = 5,4.$$

$$\text{Par suite } L_s = 4.000.000 \left(\frac{1}{2} + 2 \times 5,4 \right) = 42.800.000 \text{ unités C. G. S.}$$

Soit en unités pratiques = 0,0428 henry.

La chute de tension due à la résistance ohmique est :

$$21,20 \times 40 = 848 \text{ volts, soit } 850 \text{ volts.}$$

Celle due à l'inductance est :

$$\omega L_s I = 2\pi \times 50 \times 0,0428 \times 20 = 268 \text{ volts, soit } 270 \text{ volts}$$

La tension au départ est donnée par l'équation :

$$\sqrt{(10.000 + 850)^2 + (270)^2} = 10.850 \text{ volts.}$$

La chute de tension est fournie par le rapport :

$$\frac{855}{10.855} = 8 \text{ 0/0.}$$

On peut se proposer de déterminer la tension au départ de la ligne pour une tension déterminée à l'arrivée et constante pour des charges variant de 50 en 50 kilowatts, le facteur de charge du réseau $\cos \varphi$ pouvant varier de $-0,7$, à $+0,7$ en passant par les valeurs intermédiaires.

L'intensité du courant dans la ligne est donnée par :

$$I_1 = \frac{I}{\cos \varphi}$$

I étant l'intensité du courant qui correspond à une charge moyenne du réseau pour $\cos \varphi$.

B étant égal à C, la formule :

$$\tan \delta = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} (B - C)}{A - \frac{1}{2} (B + C)} \text{ donne } \tan \delta = 0, \text{ puisque } B = C.$$

Le coefficient d'induction apparente exprimé en unités absolues et par centimètre de longueur est 10,2 et pour la longueur, en unités pratiques :

$$10,2 \times \frac{5.000.000}{10^9} = 0,051 \text{ henry.}$$

Si $\cos \varphi = 1$, l'intensité du courant serait :

$$I = \frac{900.000}{\sqrt{3} \times 15.000} = 35 \text{ ampères.}$$

Dans ces conditions, la chute de tension produite par la résistance ohmique et par l'inductance dans chaque circuit particulier constitué par un fil et par un neutre hypothétique pour lequel $R = 0$ et $L_s = 0$, serait :

$$RI = 75 \times 35 = 2.625 \text{ volts et } \omega L_s I = 314 \times 0,051 \times 35 = 560 \text{ volts.}$$

Donc si OA (fig. 1332) représente la tension étoilée à l'arrivée de $\frac{15.000}{\sqrt{3}} = 8.700$ volts, et si, à la même échelle, on représente par AB = 2.625 volts et par BC = 560 volts les composantes de la chute de tension lorsque $\cos \varphi = 1$, le vecteur OC donne la valeur de la tension au départ lorsque la charge est de 1.800 kilowatts et

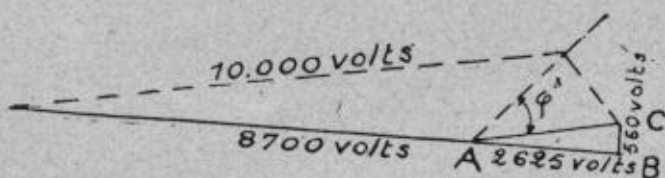


FIG. 1332.

que le facteur de puissance du circuit d'utilisation est $\cos \varphi = 0,8$.

Dans les conditions de charges données, la tension au départ est de 10.000 volts.

On obtient donc un rapport égal à :

$$\frac{1.300}{10.000} = 13 \text{ 0/0.}$$

Si les 6 conducteurs sont disposés comme sur la (fig. 1333), les fils de la même phase présentent la même inductance ⁽¹⁾.

Soit une ligne de 60 kilomètres devant transporter 300 kilowatts, la différence de potentiel entre deux conducteurs étant de 20.000 volts et $\omega = 40$ périodes seconde.

A la station génératrice et à la station réceptrice les tensions doivent être de 2.600 volts, et les transformateurs sont montés en étoile. Diamètre du fil de ligne 8 millimètres et distance entre deux conducteurs 60 centimètres.

⁽¹⁾ *Canalisations électriques*, par A. Montpellier. — Dunod, éditeur.

On demande quelle est la tension à appliquer au départ pour la pleine charge, le $\cos \varphi$ à l'arrivée étant de 0,8.

L'inductance apparente des trois conducteurs x' , y' , z' , calculées comme dans l'exemple, précédent à les valeurs respectives 9,9, 10,18 et 11,8 en unités absolues par centimètre de longueur. Pour les trois autres conducteurs x'' , y'' et z'' , les inductances sont respectivement identiques, soit comme valeur moyenne 10,4.

Alors :

$$\omega Ls_1 = 2\pi \times 40 \frac{10,4 \times 6.000.000}{10^9} = 16 \text{ ohms.}$$

Nous cherchons les impédances équivalentes aux transformateurs, en négligeant les pertes à vide, en admettant que les primaires ont 4 ohms de résistance et les secondaires 0,03 et une dispersion de 3,0/0. D'autre part, le rapport de transformation $m = 10$.

On a alors :

$$4 + m^2 0,03 = 4 + (100 \times 0,03) = 7 \text{ ohms.}$$

Et la charge de chaque transformateur, au nombre de 6, dans chacune des stations de départ et d'arrivée étant de 500 kilowatts, la valeur de la réactance à pleine charge est, en remarquant que la tension aux bornes de l'enroulement à haute tension a pour valeur $\left(\frac{20.000}{\sqrt{2}} = 14.142\right)$:

$$\frac{0,03}{500.000} (14.142)^2 = 8 \text{ ohms.}$$

Chaque conducteur transportant 500 kilowatts mesurés à l'arrivée, l'intensité en ligne a pour valeur :

$$14.142 \cos \varphi = 500.000 \text{ watts}$$

$$\text{Par suite } I = 54 \text{ ampères.}$$

La tension au départ doit alors avoir pour valeur, en laissant de côté le facteur de réduction et en rappelant que la résistance d'un fil de ligne à la température maxima de 30° = 21 ohms, que la résistance correspondant au transformateur de départ et d'arrivée = 7 ohms pour chacun, que la réactance des transformateurs est de 8 ohms et que la réactance apparente d'un fil de ligne est de 16 ohms, on voit que :

$$Rt = 7 + 21 + 7 = 35 \text{ ohms et } \omega Lt = 8 + 16 + 8 = 32 \text{ ohms}$$

Et :

$$(U_p) = 14.142 + [54 \times 0,8 (35 + j 32)] - j 54 \times 0,6 (35 + j 32)$$

$$(U_p) = 14.142 + 43,2 (35 + j 32) - j 32,4 (35 + j 32)$$

$$(U_p) = 14.200 + j 250.$$

$$\text{soit ; } U_p = \sqrt{(14.200)^2 + (250)^2} = 14.202 \text{ volts.}$$

Le décalage de phase entre le vecteur U_u et celui de U_a est :

$$\tan \delta = \frac{250}{14.200} = 0,018 \text{ et } \delta = 1^{\circ}2'$$



FIG. 1333.

Il faut donc obtenir aux barres du tableau une tension de :

$$\frac{14.200}{10} \sqrt{3} = 2.470 \text{ volts.}$$

Nous prenons maintenant le cas d'une ligne triphasée double, composé de 6 conducteurs devant transporter 1.800 kilowatts à son extrémité. La longueur est de 50 kilomètres et la tension composée à l'arrivée de 15.000 volts. Perte en ligne adoptée 10 0/0. Enfin $\cos \varphi = 0,80$ et $\infty = 50$. Chacune des lignes devra donc transporter 900 kilowatts et l'intensité du courant se tire de l'équation :

$$P = \sqrt{3} 15.000 \times I \times 0,80 = 900.000 \text{ watts.}$$

D'où on a : $I = 43,5$ ampères dans chaque fil.

La perte d'énergie dans chacun des fils est :

$$\frac{900.000 \times 0,1}{3} = 30.000 \text{ watts.}$$

La résistance de chacun d'eux est :

$$R = \frac{30.000}{(20)^2} = 75 \text{ ohms.}$$

D'où :

$$S = 0,018 \frac{50.000}{75} = 62 \text{ mm}^2,$$

et $d = 8,9$, soit $r = 4,45 \text{ mm.}$

Admettons pour les conducteurs la disposition de la (fig. 1334).

Nous cherchons le coefficient de self-induction du conducteur n° 1, soit :

$$L_s = 0,5 - 2 \log 0,445 \text{ soit } L_s = + 2,30.$$

Le coefficient d'induction mutuelle se calcule au moyen de la formule :

$$L_m = - 2 \log l'.$$

On l'établit pour chaque conducteur par rapport aux cinq autres.

Ainsi pour le conducteur 1 par rapport aux conducteurs 2 et 6 on a :

$$L_m 1.2 = L_m 1.6 = - 2 \times 2,30 \log 10,60 = - 2 \times 409 = - 8,18.$$

Par rapport aux conducteurs 3 et 5 on obtient : $- 9,28$ et par rapport au conducteur 4 : $- 9,56$.

Par suite on a :

$$A = L_s + L_m 1.4 = + 2,30 - 9,56 = - 7,26;$$

$$B = L_m 1.2 + L_m 1.3 = - 8,18 - 9,28 = - 17,46$$

$$C = L_m 1.3 + L_m 1.6 = - 9,28 - 8,18 = - 17,46.$$

En appliquant la formule :

$$L_{s1} = \left\{ A - \frac{1}{2} (B + C) \right\}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2} (B - C)^2,$$

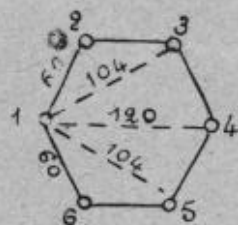


FIG. 1334.

on a :

$$L_{s1} = \left\{ -7,26 - \frac{(17,46 + 17,46)}{2} \right\} + \frac{\sqrt{3}}{2} (0) \left\{^2\right.$$

d'où :

$$L_{s1} = (-7,26 + 17,46) = 10,2.$$

On construit le triangle ABC, en faisant à l'échelle AB = 850 volts et BC = 270 volts (fig 1335).

On fait partir de A des lignes en pointillés faisant avec la ligne AC des angles correspondant aux $\cos \varphi$ et on divise la même ligne AC en cinq parties égales

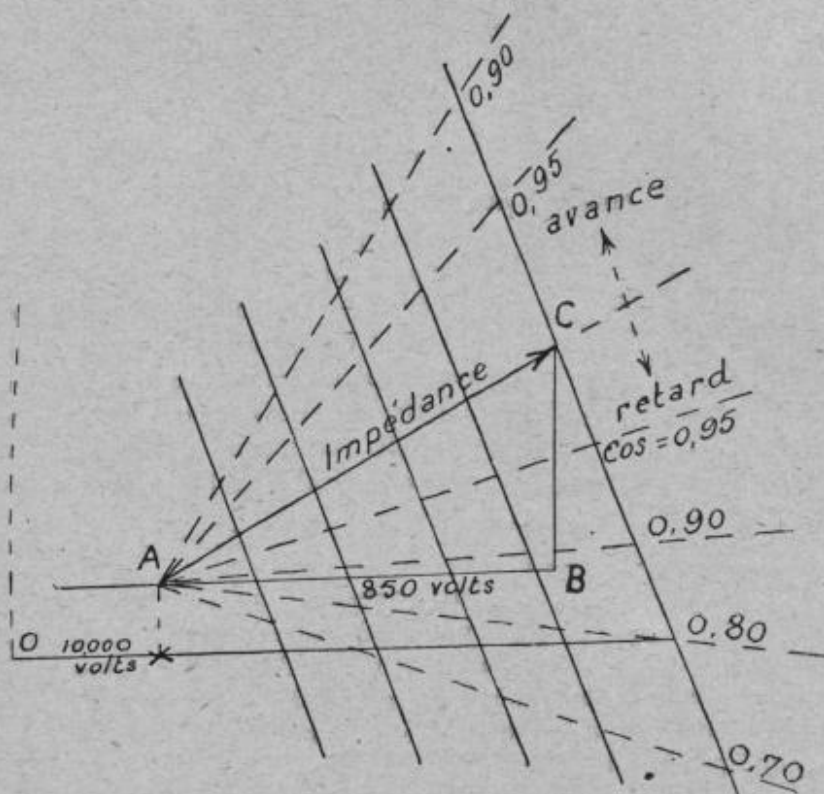


FIG. 1335.

et on trace par les points de division qui correspondent aux différentes charges des parallèles à CC'.

Les points d'intersection des droites ainsi tracées donnent, pour chaque valeur de $\cos \varphi$ et pour les différentes charges déterminées (200, 160, 120, 80, 40 et 0 kilowatts), les extrémités des vecteurs de la tension à appliquer au départ, c'est-à-dire au point O. Cette règle est générale, toutes les fois que l'impédance du circuit de ligne peut être considérée comme constante aux différentes charges.

DEUXIÈME CAS. — Soit une ligne de 50 kilomètres (aller et retour) constituée par deux fils de 7^{mm},5 de diamètre, écartés de 70 centimètres l'un de l'autre et transportant un courant de 60 ampères au voltage initial de 20.000 volts, à la fréquence de 50 périodes par seconde.

Nous admettons un rendement de 92 0/0 pour les alternateurs et de 96 0/0 pour les transformateurs.

La puissance W disponible aux bornes de la ligne, si W_1 est celle disponible sur les arbres des turbines à l'usine centrale, est :

$$W = W_1 \times 0,92 \times 0,96 = W_1 \times 0,883.$$

Les moteurs asynchrones, les transformateurs statiques, les alternateurs possédant une self-induction sensible, les réseaux présentent donc des décalages variés dont la tangente est donnée par l'expression : $\tan \varphi = \frac{L\omega}{R}$, dans laquelle ω , vitesse angulaire de variation du courant ou vitesse de pulsation, a pour valeur $2\pi\sim$, et où L est le coefficient de self-induction totale du réseau et R la résistance du réseau tout entier.

D'autre part, nous savons que le cosinus du décalage du réseau de distribution est donné par l'équation :

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{L^2\omega^2 + R^2}},$$

et qu'il est toujours possible, au moyen de certains dispositifs, d'abaisser la valeur du cosinus du décalage à un chiffre compris entre 0,75 et 0,80.

Pour arriver à la détermination des valeurs de E et de φ , nous considérons deux axes rectangulaires et, sur l'axe des X , nous convenons de porter les valeurs efficaces des intensités (fig. 1336). Nous prenons un angle AOX égal à φ , décalage à l'arrivée, tel que :

$$\cos \varphi = 0,75 \quad (\varphi = 40^\circ 30');$$

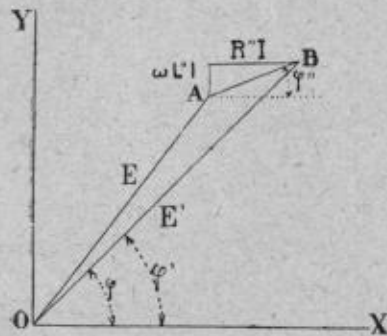


FIG. 1333.

puis, nous portons sur la direction OA un vecteur OA égal à E , voltage à l'arrivée. Si

nous appelons R' et L' la résistance et le coefficient de self-induction de la ligne de transmission, nous pourrions tracer, à partir de A , le vecteur $L'\omega I$ et $R'I$, admettant que la direction de la résultante AB corresponde à un angle φ' donné par la relation :

$$\tan \varphi' = \frac{L'\omega}{R'}.$$

Le voltage E' au départ est donné par le vecteur OB .

D'après l'examen de la figure on a :

$$E' \cos \varphi' = E \cos \varphi + R'I; \quad E' \sin \varphi' = E \sin \varphi + L'\omega I,$$

d'où :

$$E'^2 = (E \cos \varphi + R'I)^2 + (E \sin \varphi + L'\omega I)^2, \quad (1)$$

et :

$$\rho = \frac{E \cos \varphi}{E \cos \varphi + R'I}.$$

En nous référant aux conditions d'installation fixées plus haut, on trouve, pour la valeur du coefficient d'inductance apparente kilométrique L' , d'après les valeurs indiquées dans les formulaires :

$$L' = 0,000240 \text{ henry} + 0,000850 \text{ henry} = 0,001090 \text{ henry}.$$

Dans cette équation, la première fraction du second membre a trait au paramètre dépendant du diamètre du fil, et la seconde au paramètre se rapportant à la distance existant entre les deux fils dans l'espace.

Alors :

$$L' = 0,001090 \times 50^{\text{km}} = 0,0545 \text{ henry.}$$

L'équation (1) développée fournit :

$$E'^2 = E^2 + R'^2 + L'^2 \omega^2 I^2 + 2EI (R' \cos \varphi + \omega L' \sin \varphi),$$

qui permet de déterminer E, tension à l'arrivée.

Mais on peut obtenir un résultat suffisamment approché en appliquant la formule simplifiée :

$$E' = L' \omega I \sin \varphi + R' I \cos \varphi + E.$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, en effectuant et remarquant que $R' = 20$ ohms pour les 50 kilomètres, on a :

$$E' = 0,0545 \times (2 \times 3,1416 \times 50) \times 60 \times 0,65 + 20 \times 60 \times 0,75 + E,$$

ou :

$$E' = 4.570 + E.$$

Par suite :

$$E' = 20.000 - 4.570 = 18.430 \text{ volts.}$$

Quant au rendement de ligne, il est donné par l'expression :

$$\rho = \frac{18.430 \times 0,75}{18.430 \times 0,75 + (20 \times 60)} = 0,92.$$

Et enfin le rendement total de l'installation est de :

$$0,883 \times 0,92 = 0,812.$$

Si on traite le problème à l'aide de la formule de M. A. Blondel, on voit que le voltage à l'arrivée est un peu plus faible que celui que nous venons de trouver, soit 18.210 volts au lieu de 18.430. En effet :

$$E' = (E + RI) \sqrt{1 + m^2 p^2 + 2(p - p^2)(\cos \varphi + m \sin \varphi - 1)};$$

or :

$$m = \frac{2\pi \omega L}{R} = \frac{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,0545}{20} = 0,80.$$

et :

$$p = \frac{RI}{E + RI} \times \frac{20 \times 60}{18.210 + 20 \times 60} = 0,06.$$

Par suite :

$$E' = (18.210 + 20 \times 60) \sqrt{1 + 0,80^2 \times 0,06^2 + 2(0,06 - 0,06^2)(\cos 0,75 + 0,80 \sin 0,65 - 1)}$$

et :

$$E' = 19.410 \times 1,03 = 20.000 \text{ volts.}$$

TROISIÈME CAS. — Transport de force monophasé de 50 kilomètres alimentant

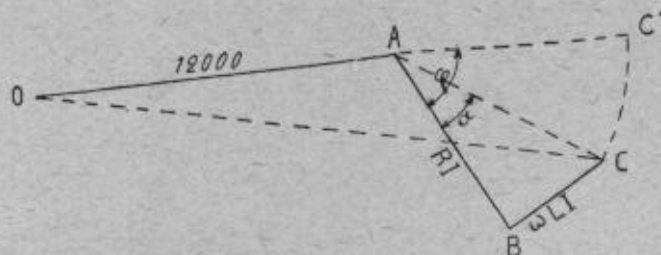


FIG. 1337.

des récepteurs ayant un $\cos \varphi = 0,70$. La puissance absorbée est de 240 kilowatts, l'écartement des fils $0^m,60$, leur diamètre = 7 millimètres, la tension aux bornes des récepteurs 12.000 volts et la fréquence est de 50. La

tension au départ égale la tension à l'arrivée plus la perte ohmique (RI) et la perte par inductance ωLI (fig. 1337).

On a :

$$R = \rho \frac{l}{s} = 1,6 \frac{2 \times 5 \times 10^6}{\pi \frac{0,7^2}{4}} = 1,6 \frac{10 \times 10^6}{0,385} \text{ microhms ;}$$

d'où :

$$R = 10^{-6} \frac{16 \times 10^6}{0,385} = 41,6 \text{ ohms.}$$

Le courant I égale :

$$\frac{P}{E} = \frac{240.000}{12.000} = 20 \text{ ampères.}$$

Et RI égale :

$$41,6 \times 20 = 832 \text{ ohms.}$$

$$\tan \alpha = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi \times 50 \times L}{\rho l}.$$

Les tables donnent :

$$2\pi L = 0,26 \begin{cases} d = 60 \text{ centimètres;} \\ 2r = 0^m,7. \end{cases}$$

Mais :

$$\begin{cases} l = 2 \times 50^{\text{km}} = 100^{\text{km}} = 10 \times 10^6 \\ \rho = 1,6 \times 10^{-6} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \\ \rho l = 16; \end{array} \right.$$

d'où :

$$\tan \alpha = \frac{0,26 \times 50}{16} = 0,81.$$

$$\cos \varphi = 0,70$$

$$\alpha = 39^\circ 10'$$

$$\varphi - \alpha = 6^\circ 20'$$

$$\varphi = 45^\circ 30'$$

$$\cos \alpha = 0,775$$

$$\cos (\varphi - \alpha) = 0,994.$$

La perte de voltage en ligne égale :

$$\frac{RI \cos (\varphi - \alpha)}{\cos \varphi} = \frac{832 \times 0,994}{0,775} = 1.064 \text{ volts.}$$

La tension au départ égale :

$$12.000 + 1.064 = 13.064 \text{ volts.}$$

La perte par chaleur Joule :

$$RI^2 = 41,6 \times 20^2 = 16,6$$

La perte par inductance :

$$\omega LI = 2\pi \times 50 \times 20 = 4,6$$

21,2 kilowatts.

521. Calcul de lignes pour transport d'énergie par courant triphasé. — PREMIER CAS. — Soient E_{eff} la tension entre fils de ligne, I_{eff} le courant par ligne, φ le décalage du courant sur la tension, W la puissance aux bornes de l'alternateur que nous savons égale à $E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sqrt{3} \cos \varphi$, l la longueur d'un fil de ligne, p la perte consentie en ligne et s la section d'un conducteur en millimètres carrés.

Si nous appelons r la résistance d'un des fils constituant la ligne, on a la relation :

$$\sqrt{3} r I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}} \cos \varphi \times p}{100}.$$

Or la valeur de r est donnée à 0° et à 15°, pour le fil de cuivre, par les formules respectives :

$$r = \frac{l}{60 \times s} \quad \text{et} \quad r = \frac{l}{57 \times s}.$$

On peut donc écrire :

$$\frac{\sqrt{3} \times l \times I_{\text{eff}}}{57s} = \frac{E_{\text{eff}} \cos \varphi \times p}{100},$$

les conducteurs étant supposés à une température de 15°.

Multipliant les deux termes par $E_{\text{eff}} \cos \varphi$, il vient :

$$\frac{\sqrt{3} E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi \times l}{57s} = \frac{E_{\text{eff}}^2 \cos^2 \varphi \times p}{100} = \frac{W \times l}{57s};$$

d'où :

$$s = \frac{100}{57} \times \frac{Wl}{E_{\text{eff}}^2 \cos^2 \varphi \times p} = 1,75 \frac{Wl}{E_{\text{eff}}^2 \cos^2 \varphi \times p}.$$

Soit, par exemple, à déterminer la section d'une ligne triphasée en fils de cuivre capable de transmettre à 40 kilomètres une puissance de 500 kilowatts sous une tension de 15.000 volts entre fils, la perte consentie étant de 5 0/0, $\cos \varphi = 0,85$, et le réseau, supposé équilibré.

On aura :

$$s = 1,75 \frac{500.000 \times 40.000}{15.000^2 \times 0,85^2 \times 5} = 43 \text{ millimètres carrés.}$$

L'intensité I égale :

$$\frac{500.000}{15.000 \times 0,85} = 40 \text{ ampères en nombre rond ;}$$

Et la densité de courant égale :

$$\frac{40}{43} = 0,93 \text{ ampère par millimètre carré.}$$

On pourrait pareillement s'imposer la section de la ligne et chercher la tension nécessaire, pour limiter la perte en ligne à un pourcentage déterminé, ou encore évaluer la perte en pour 100 en fonction des autres quantités connues.

Toutes choses égales d'ailleurs, on remarquera que la section du conducteur est inversement proportionnelle au carré de $\cos \varphi$ et qu'il y a une importance réelle à diminuer le décalage dans les circuits parcourus par des courants alternatifs.

DEUXIÈME CAS. — *Méthode simplifiée de M. Boucherot.* — Cette méthode permet de simplifier notablement le calcul des réseaux à courant alternatif. Elle est basée sur le théorème ci-après : *Dans un réseau de circuits à courants alternatifs ne comprenant ni collecteurs, ni commutateurs tournants, ni résistances variables pendant la période, la somme des puissances dévattées est nulle, comme la somme des puissances réelles.*

Soit, en un point quelconque du réseau, un appareil soumis à une tension E_{eff} et absorbant un courant I_{eff} décalé sur la tension d'un angle φ .

La puissance réelle absorbée par l'appareil sera :

$$P_w = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \phi,$$

et la puissance dévattée :

$$P_d = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \varphi.$$

Si ψ est l'angle de décalage entre E_{eff} et une origine quelconque, la force électromotrice instantanée a pour expression :

$$E_{\text{max}} \sin (\omega t + \psi) = E_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin (\omega t + \psi);$$

de même l'intensité est donnée par :

$$I_{\text{max}} \sin (\omega t + \psi + \varphi) = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin (\omega t + \psi + \varphi).$$

La puissance instantanée absorbée par l'un des appareils du réseau sera donc égale au produit de la force électromotrice instantanée par l'intensité instantanée, soit :

$$2E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin (\omega t + \psi) \sin (\omega t + \psi + \varphi).$$

Et comme la somme des puissances instantanées est nulle, nous pouvons écrire :

$$\Sigma 2E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin (\omega t + \psi) \sin (\omega t + \varphi) = 0,$$

ou :

$$\Sigma 2E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin (\omega t + \psi) [\sin (\omega t + \psi) \cos \varphi + \sin \varphi \cos (\omega t + \varphi)] = 0,$$

égalité qui entraîne les égalités suivantes :

$$\Sigma 2E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin^2 (\omega t + \psi) \cos \varphi = 0 \quad \text{et} \quad \Sigma 2E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin (\omega t + \psi) \cos (\omega t + \psi) \sin \varphi = 0.$$

En intégrant la première pendant une période, et la seconde de $-\psi$ à $-\psi + \frac{\pi}{2}$, il vient :

$$\Sigma E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi \quad \text{ou} \quad \Sigma P_w = 0$$

et :

$$\Sigma E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \varphi \quad \text{ou} \quad \Sigma P_d = 0,$$

ce qui démontre le théorème ci-dessus.

APPLICATION. — Supposons une fraction de réseau comportant une ligne de 30 ohms de résistance et de 35 ohms de réactance, au bout de laquelle se trouve un transformateur ayant une tension de 4.000 volts aux bornes du primaire, et sur le secondaire duquel se trouvent branchés :

- 1° Un moteur synchrone surexcité de 20.000 volts-ampères avec $\cos \varphi = 0,8$;
- 2° Un moteur asynchrone de 30.000 volts-ampères avec $\cos \varphi = 0,9$;
- 3° Un moteur asynchrone de 10.000 volts-ampères avec $\cos \varphi = 0,8$;
- Et 4° 15.000 watts en lampes à incandescence.

L'on sait que, lorsqu'en un point quelconque d'un réseau, un appareil inducteur est soumis à une tension E_{eff} , absorbant un courant I_{eff} décalé sur la tension d'un angle φ , la puissance réelle absorbée par l'appareil a pour valeur :

$$P_w \text{ (Puissance wattée)} = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi,$$

et :

$$P_d \text{ (Puissance déwattée)} = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \varphi.$$

Pour le moteur synchrone surexcité, la puissance déwattée est négative, car le courant est décalé en avant de la tension, et $\sin \varphi = 0,6$; avec le deuxième appareil, $\sin \varphi = 0,436$; avec le troisième, $\sin \varphi = 0,6$, et pour les lampes à incandescence, $\sin \varphi = 0$.

On a donc :

	Puissance wattée	Puissance déwattée
1° Appareil inductif.....	16.000 watts	— 12.000 watts
2° — — — — —	27.000 —	+ 13.000 —
3° — — — — —	8.000 —	+ 6.000 —
4° Lampes.....	15.000 —	»
Ensemble.....	66.000 watts	+ 7.000 watts

à fournir aux bornes du secondaire du transformateur.

Si on admet que celui-ci absorbe 2,5 0/0 d'énergie pour ses pertes et 5 0/0 pour la puissance déwattée, il faudra donc au primaire :

$$\frac{66.040}{0,975} = 67.700 \text{ watts de puissance wattée,}$$

et :

$$7.000 + \frac{66.000 \times 5}{100} = 10.300 \text{ watts en puissance déwattée.}$$

La puissance apparente égale par suite :

$$\sqrt{67.700^2 + 10.300^2} = 68.4000 \text{ watts apparents,}$$

ou 17,2 ampères sous 4.000 volts, tension existant aux bornes du primaire du transformateur.

D'autre part, on a :

$$1^\circ \quad RI^2 = 30 \times 17,2^2 = 8.875 \text{ watts (puissance réelle);}$$

$$2^\circ \quad L\omega I^2 = 35 \times 17,2^2 = 10.355 \text{ watts (puissance déwattée).}$$

Il faudra donc fournir au bout de la ligne :

$$\text{Une puissance wattée égale à.....} \quad 68.400 + 8.875 = 77.275 \text{ watts}$$

$$\text{Et une puissance déwattée de.....} \quad 10.300 + 10.355 = 20.655 \text{ —}$$

soit une puissance apparente égale à : $\sqrt{77.275^2 + 20.655^2} = 80.000$ watts, qui représente : 17,2 ampères et 4.650 volts.

Et le $\cos \varphi$ de la distribution est donné par :

$$\frac{77.275}{80.000} = 0,97 \text{ en chiffre rond.}$$

TROISIÈME CAS. — *Calcul d'une ligne triphasée de transport d'énergie par application de la règle de Thompson.* — Soient :

W^0 la puissance au départ, et W_1 celle à l'arrivée, en watts ;

E_0 et E_1 les tensions simples au départ et à l'arrivée ;

I l'intensité efficace dans chaque fil ;

R la résistance d'un fil de ligne ;

l la longueur de la ligne ;

ρ la perte en ligne ;

K la perte relative ;

S la section à déterminer ;

δ le poids spécifique du métal ;

c le prix de l'unité de poids ;

a le prix des poteaux et des isolateurs, pose et accessoires, par unité de longueur ;

α le taux d'amortissement ;

et K le prix moyen du watt-an.

Le prix de la ligne a pour expression :

$$l (3\delta cS + a).$$

L'amortissement est défini par :

$$\alpha l (3\delta cS + a).$$

La perte en ligne a pour valeur :

$$\rho = 3RI^2 = \frac{\rho l W_1^2}{3SE_1^2 \cos^2 \varphi}.$$

La perte d'argent est :

$$\frac{K\rho l W_1^2}{3SE_1^2 \cos^2 \varphi}.$$

Il s'agit de rendre minimum l'expression :

$$\alpha l (3\delta cS + a) + \frac{K\rho l W_1^2}{3SE_1^2 \cos^2 \varphi},$$

ou, ce qui revient au même :

$$3\alpha E_1^2 \cos^2 \varphi (3\delta cS + a) + K\rho W_1^2 S^{-1}. \quad (1)$$

On obtient :

$$9\alpha\delta c E_1^2 \cos^2 \varphi - K\rho W_1^2 S^{-2} = 0, \quad (2)$$

en égalant à 0 la dérivée de la fonction (1) par rapport à S .

De la formule (2) on tire :

$$S = \frac{W_1}{3E_1 \cos \varphi} \sqrt{\frac{K\rho}{\alpha\delta c}}. \quad (3)$$

D'autre part, on a :

$$K = \frac{3RI^2}{3E_1I \cos \varphi + 3RI^2} = \frac{RI}{E_1 \cos \varphi + RI}; \quad W_1 = 3E_1I \cos \varphi; \quad R = \frac{\rho l}{S}.$$

Et :

$$S = \frac{1-K}{K} \frac{\rho l W_1}{3E_1^2 \cos^2 \varphi}. \quad (4)$$

Mais $W_1 = W_0 (1 - K)$, W_0 étant la puissance au départ qui seule est connue. Composons les équations (3) et (4); il vient :

$$K = \frac{\rho l}{l + E_1 \cos \sqrt{\frac{K}{\alpha \delta c}}};$$

par suite :

$$S = \frac{KW_0}{3\alpha \delta c \left(l + E_1 \cos \varphi \sqrt{\frac{K}{\alpha \delta c \rho}} \right)}. \quad (5)$$

Faisons dans cette formule :

$$\alpha = 6 \times 10^{-2}; \quad \delta = 89 \times 10^{-4}; \quad c = 3 \times 10^{-3}; \quad \rho = 18 \times 10^{-3}; \quad \cos \varphi = 0,8;$$

$$K = 55 \times 10^{-3}, \text{ et } E_1 = 3.350.$$

Le calcul donne :

$$S = \frac{550W_0}{48(l + 11.700.000)}. \quad (6)$$

De cette dernière formule, pour $W_0 = 4.440.000$ et $l = 1.450$ mètres, on déduit que l'on peut adopter, tout au moins à titre de première approximation, 430 millimètres carrés pour la section de chacun des fils. Le poids à employer pour la ligne sera alors de 17.000 kilogrammes.

Or, nous avons :

$$W_0 = 3E_1I \cos \varphi + 3RI^2; \quad (7)$$

mais :

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \times 1.450}{430} = 0,06; \quad \frac{K}{1-K} = \frac{RI}{E_1 \cos \varphi} = 0,0000225I.$$

De l'équation (7) on tire : $I = 546$ ampères; d'où :

$$\frac{K}{1-K} = 0,00123. \quad (8)$$

Pour le calcul du voltage au départ, nous prenons la formule de M. A. Blondel mise sous la forme suivante :

$$E_0 = E_1 \sqrt{1 + 2 \frac{K}{1-K} \cos \varphi (\cos \varphi + m \sin \varphi) + \cos^2 \varphi (1 + m^2) \left(\frac{K}{1-K} \right)^2}. \quad (9)$$

Pour la fréquence 25 et un écartement de 600 millimètres, on a pour la valeur sous le radical dans la formule (9) : 1,0255.

Le voltage au départ sera donc : $3.350 \times 1,0255 = 3.469$, soit une tension composée de 6.000 volts.

De la formule (8) on déduit : $K = 1,20/0$, soit en pratique 20/0.

SECONDE MÉTHODE. — On se propose de rechercher la section la plus économique pour transporter une puissance électrique déterminée et obtenir une différence de potentiel, également fixée, en bout de ligne.

Soient : U la différence de potentiel à la station réceptrice.

P , la puissance en kilowatts produite à la station génératrice.

L , la longueur (par conducteur simple) de la ligne de transmission.

F , le coût du kilowatt-année à la station génératrice.

a , le prix du conducteur au kilogramme.

f , le taux d'intérêt et d'amortissement des conducteurs de ligne.

r , la résistivité du métal conducteur en ohms-kilomètre.

p , le poids du métal conducteur par kilomètre-centimètre carré.

R , la résistance totale de la ligne, supposée monophasée.

S , la section droite du conducteur en centimètres carrés.

x , la perte en centièmes de la puissance développée P .

Par suite : le coût annuel de la perte en ligne est : xPF .

Le prix d'achat des conducteurs est : $2LSpa$.

Le montant de l'intérêt de l'amortissement est : $2LSpaf$.

La résistance en ohms de la ligne, compris conducteur de retour est : $R = r \frac{2L}{S}$,
et la chute ohmique en ligne :

$$\frac{xU \cos \varphi}{1 - x} = \frac{1.000PR (1 - x)}{U \cos \varphi}.$$

D'où section droite du conducteur S en centimètres carrés :

$$S = \frac{2.000P (1 - x)^2 rL}{U^2 \cos^2 \varphi x}.$$

Le prix de revient annuel de la ligne se compose de la perte par effet Joule d'une part et de l'intérêt et de l'amortissement du capital immobilisé correspondant, d'autre part. En substituant et dérivant, on trouve la valeur cherchée pour S .

A. — Ligne monophasée :

(a) P en kilowatts produits :

$$x = \sqrt{\frac{A}{FU^2 + A}}, \quad S = \frac{2.000 (1 - x)^2 PrL}{xU^2 \cos^2 \varphi};$$

(b) P en kilowatts fournis :

$$x = \frac{1}{U} \sqrt{\frac{A}{F}}, \quad S = \frac{2.000PrL}{U^2 x}.$$

B. — Ligne triphasée :

(a) P en kilowatts produits :

$$x = \sqrt{\frac{3A}{4FU^2 + 3A}}, \quad S = \frac{1.000 P (1 - x)^2 rL}{U^2 \cos^2 \varphi x}.$$

(b) P en kilowatts :

$$x = \frac{0,866}{U} \sqrt{\frac{A}{F}}, \quad S = \frac{1.000 PrL}{U^2 x \cos^2 \varphi}.$$

Si la section trouvée ne correspond pas à celles du commerce, on prendra

la section la plus voisine, et on calculera la perte en ligne z' par la formule suivante où S' est la section adoptée et R' la résistance correspondante.

(a) P en kilowatts produits :

$$z' = \frac{(2K + 1) \mp \sqrt{4K + 1}}{2K},$$

d'où :

$$K = \frac{R'P}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{z'}{1 - z'^2}.$$

(b) P en kilowatts fournis :

$$z' = \frac{R'P}{U^2 \cos^2 \varphi}.$$

QUATRIÈME CAS. — Calcul d'une ligne triphasée à très haute tension de 500 kilomètres de longueur, formée de trois conducteurs ayant un diamètre extérieur de 17 millimètres et enroulés sur une âme en chanvre de 6^{mm},5, et espacés d'axe en axe de 3 mètres. La tension à l'arrivée est de 100.000 volts entre fils et la puissance transportée pour l'ensemble de la ligne, 20.000 kilowatts (A. Blondel) ⁽¹⁾.

On a d'abord :

$$U_1 = \frac{100.000}{\sqrt{3}}; \quad I_1 = \frac{200}{\sqrt{3}}.$$

On suppose que la perte par les isolateurs et par l'air atteint 1.500 watts par kilomètre et que cette ligne débite 6.000 watts par kilomètre.

La perdittance g est composée de deux parties :

1° Une perte :

$$g = \frac{1.500}{(100.000)^2} = \frac{15}{10^8} \text{ ohms par kilomètre};$$

2° Une conductance utile :

$$g' = \frac{60}{10^8} \text{ ohms par kilomètre},$$

les trois phases comprises. Ce débit en ligne est supposé complètement watté, ce qui correspond à une charge d'incandescence; on a vu (§ 514) comment l'hypothèse peut être complétée, si le débit est plus ou moins déphasé, par l'emploi d'un coefficient d'excitance k .

Cela posé, voici la suite des calculs (sans reproduire les opérations arithmétiques, qui peuvent être faites par la règle ou mieux par logarithmes).

Constantes de 1^{re} espèce. — 1° Résistance par kilomètre r :

$$r = \frac{17}{s} \text{ ohms} = \frac{17}{150} = 0,11333 \text{ ohm}.$$

⁽¹⁾ Pour la signification des lettres, des expressions et des signes, se reporter au (§ 508).

2° Self-induction par kilomètre :

$$l = \frac{1}{10^4} \left[4,605 \log \text{vulg.} \frac{d}{a} + 0,50 \left(1 - \frac{a'^2}{a^2} \right) \right] \text{ henry.}$$

$$= \frac{1}{10^4} \left\{ 4,605 \log \text{vulg.} \frac{300}{0,85} + 0,50 \left[1 - \left(\frac{0,325}{0,85} \right)^2 \right] \right\} = 0,0012159 \text{ henry.}$$

3° Capacité par kilomètre :

$$C = \frac{0,0241}{10^6} \left[\frac{1}{\log \text{vulg.} \frac{d}{a'}} + \frac{1}{\log \text{vulg.} \frac{2h}{a'}} \right] \text{ farad.}$$

$$= \frac{0,0241}{10^6} \left[\frac{1}{\log \text{vulg.} \frac{800}{0,85}} + \frac{1}{\log \text{vulg.} \frac{1,600}{0,85}} \right] = 1,6819 \times 10^{-8} \text{ farad.}$$

4° Perditance $g = g' + g'' = \frac{75}{10^8}$ ohms par kilomètre.

Constantes de 2° espèce. — Réactance linéique par kilomètre :

$$\omega l = 2\pi n l = 6,28 n l = 6,28 \times 25 \times 0,0012159 = 0,191.$$

Impédance linéique par kilomètre :

$$z = \sqrt{r^2 + l^2 \omega^2} = \sqrt{0,11333^2 + 0,191^2} = 0,22299.$$

Admittance linéique par kilomètre :

$$w = \sqrt{g^2 + \omega^2 c^2} = \sqrt{\frac{60^2}{10^{16}} + 0,000002642^2} = 2,39 \times 10^{-6}.$$

Constantes auxiliaires p et q :

$$p = \omega^2 l c - g r = 2\pi \times 25^2 \times 0,0012159$$

$$\times 0,000000016819 - \frac{60}{10^8} \times 0,11333 = -4,3661 \times 10^{-7};$$

$$q = \omega c r + \omega l g = 2\pi \times 25 \times 0,0716819 \times 0,11333$$

$$+ 2\pi \times 25 \times 0,0012159 \times \frac{60}{10^8} = 4,739 \times 10^{-7}.$$

Coefficient d'amortissement le long de la ligne :

$$= \sqrt{\frac{wz - p}{2}} = \sqrt{\frac{2,39 \times 10^{-6} \times 0,22209 + 4,3661 \times 10^{-7}}{2}} = 0,00030198.$$

Coefficient angulaire de rotation des phases le long de la ligne :

$$b = \sqrt{\frac{wz + p}{2}} = \sqrt{\frac{2,39 \times 10^{-6} \times 0,22209 - 4,3661 \times 10^{-7}}{2}} = 0,00066304.$$

Coefficient d'influence du courant sur la force électromotrice :

$$m = \sqrt{\frac{z}{w}} = \sqrt{\frac{0,22209}{2,39 \times 10^{-6}}} = 304,843.$$

Régimes composants. — 1° Facteurs auxiliaires :

$$\begin{aligned}\alpha &= \sqrt{\frac{\cosh 2ax + \cos 2bx}{2}} = \sqrt{\frac{\cosh (0,30198) + \cos (0,66304)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{1,0474 + 0,7881}{2}} = 0,95798, \\ \beta &= \sqrt{\frac{\cosh 2ax - \cos 2bx}{2}} = \sqrt{\frac{\cosh (0,30198) - \cos (0,66304)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{1,0474 - 0,7881}{2}} = 0,36006.\end{aligned}$$

2° Angles auxiliaires pour l'application des phases :

$$\begin{aligned}\gamma &= \arctg \frac{\omega c}{g} - \arctg \frac{b}{a} \\ &= \arctg^2 \frac{\pi \times 25 \times 1,6819 \times 10^{-8}}{60} = \arctg \frac{0,00066304}{0,00030198} = 6^\circ 11' 52''; \\ \sigma &= \arctg \frac{\sinh 2bx}{\sinh 2ax} = \arctg \frac{\sinh (0,66304)}{\sinh (0,31908)} = \arctg \frac{0,6155}{0,3115} = 63^\circ 9' 24''.\end{aligned}$$

D'où les angles :

$$\psi = \sigma - \gamma = 56^\circ 57' 32'' \quad \text{et} \quad \xi = \sigma + \gamma = 69^\circ 21' 16''.$$

En supposant ici $\varphi_1 = 0$, nous avons $\zeta = \psi$; $\chi = \xi^{(1)}$.

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \arctg (\tanh ax \tanh bx) = \arctg [\tanh (0,15099) \tanh (0,33152)] \\ &= \arctg (0,1504 \times 0,3442) = 2^\circ 57' 50''.\end{aligned}$$

Régimes résultants. — 1° Solution pour le cas où U_1 est donné et U_0 cherché :

$$\begin{aligned}I_1 &= 115,4 \text{ ampères}; \quad U_1 = \frac{100000}{\sqrt{3}} = 57.736 \text{ volts}; \\ U_0 &= \alpha U_1 = 0,95798 \times 57.736 = 55.310 \text{ volts}; \\ V_0 &= m \beta I_1 = 304,84 \times 0,36006 \times 115,4 = 12.673,8 \text{ volts}; \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{V_0 \sin \zeta}{U_0 + V_0 \cos \zeta} = \frac{12673,8 \times \sin (56^\circ 57' 32'')}{55310 + 12673,8 \cos (56^\circ 57' 32'')} \\ &= \frac{12673,8 \times 0,8383}{55310 + 12673,8 \times 0,5453} = 0,4707; \\ \delta &= 9^\circ 41' 24''; \\ U_0 &= \frac{\sin \zeta V_0}{\sin \delta} = \frac{\sin (56^\circ 57' 32'') \times 12673,8}{\sin (9^\circ 41' 24'')} = \frac{0,8383 \times 12673,8}{0,1683} = 63.120 \text{ volts}; \\ I_0 &= \alpha I_1 = 0,95798 \times 115,4 = 110,62; \\ J_0 &= \frac{\beta}{m} U_1 = \frac{0,36006 \times 57.736}{304,84} = 68,19 \text{ ampères};\end{aligned}$$

(1) Si l'on prenait $\cos \varphi_1 = 0,8$ ou $\varphi_1 = 36^\circ 52'$, on aurait de même :

$$\begin{aligned}\zeta &= \sigma - \gamma - \varphi_1 = 56^\circ 57' 32'' - 36^\circ 52' = 20^\circ 5' 32'' \\ \chi &= \sigma + \gamma + \varphi_1 = 69^\circ 21' 16'' + 36^\circ 52' = 106^\circ 13' 76''\end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{J_0 \sin \chi}{I_0 + J_0 \cos \chi} = \frac{68,19 \times \sin (69^\circ 21' 16'')}{110,62 + 68,19 \cos (69^\circ 21' 16'')} \\ = \frac{68,19 \times 0,9358}{110,62 + 68,19 \times 0,3526} = 0,4739;$$

$$\delta = 25^\circ 21' 18'';$$

$$\delta_0 = \frac{\sin \chi J_0}{\sin \delta} = \frac{68,19 \times \sin (69^\circ 21' 16'')}{\sin (25^\circ 21' 18'')} = \frac{68,19 \times 0,9358}{0,4282} = 149,02 \text{ ampères};$$

$$\varphi_0 = \delta - \delta' + \varphi_1 = 9^\circ 41' 24'' - 25^\circ 21' 18'' = -15^\circ 39' 46''.$$

2° Solution pour le cas où U_0 est donné et U_1 cherché :

$$I_1 = 115,4 \text{ ampères}; \quad U_0 = 63.120 \text{ volts};$$

$$V_0 = m\beta I_1 = 304,84 \times 0,36006 \times 115,4 = 12.673,8 \text{ volts};$$

$$\sin \delta = \sin \xi \frac{V_0}{U_0} = \sin (69^\circ 21' 16'') \times \frac{12673,8}{63120} = 0,9358 \times \frac{12673,8}{63120} = 0,1683;$$

$$\lambda = \pi - (\pi - \xi) - \delta = \xi - \delta = 47^\circ 16' 8'';$$

$$U_0 = \frac{U_0 \sin \lambda}{\sin \xi} = \frac{63120 \times \sin (47^\circ 16' 8'')}{\sin (56^\circ 57' 32'')} = \frac{63120 \times 0,7345}{0,8383} = 55.310 \text{ volts};$$

$$U_1 = \frac{U_0}{\alpha} = \frac{55310}{0,95798} = 57.736; \quad I_0 = \alpha I_1 = 0,95798 \times 115,4 = 110,62;$$

$$J_0 = \frac{\beta}{m} U_1 = \frac{0,36006 \times 57.736}{304,84} = 68,19 \text{ ampères};$$

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{J_0 \sin \chi}{I_0 + J_0 \cos \chi} = \frac{68,19 \sin (69^\circ 21' 16'')}{110,62 + 68,19 \cos (69^\circ 21' 16'')} \\ = \frac{68,19 \times 0,9358}{110,62 + 68,19 \times 0,3526} = 0,4739;$$

$$\delta' = 25^\circ 21' 18'';$$

$$\delta_0 = \frac{\sin \chi J_0}{\sin \delta'} = \frac{\sin (69^\circ 21' 16'')}{\sin (25^\circ 21' 18'')} 68,19 = \frac{0,9358 \times 68,19}{0,4282} = 149,02 \text{ ampères}.$$

522. Calcul de la ligne du transport d'énergie du Haut-Rhône à Paris (A. Blondel). — Tension, 120.000 volts. Puissance, 150.000 HP. Longueur, 450 kilomètres.

Capacité par kilomètre des conducteurs. — Données : d , distance des fils = 300 centimètres, a , leur rayon = 1 centimètre; l , leur longueur = 10^5 .

Posons :

$$u = \frac{d^2 - 2a^2}{2a^2} = \frac{300^2 - 2 \times 1^2}{2 \times 1^2} = 45.000.$$

La capacité c_3 par kilomètre d'un conducteur par rapport à un seul des autres a pour valeur :

$$c_3 = \frac{l}{2 \log_e (u + \sqrt{u^2 - 1})} \frac{10^{-11}}{9} \text{ farad} \\ = \frac{10^5}{2 \log_e (45.000 + \sqrt{45.000^2 - 1})} \frac{10^{-11}}{9} = 0,00487 \cdot 10^{-5} \text{ farad}.$$

La capacité c_1 d'un conducteur par rapport aux deux autres est :

$$c_1 = 2c_3 = 0,00974 \cdot 10^{-5} \text{ farad}.$$

La capacité c_2 d'un conducteur par rapport au sol est :

$$c_2 = \frac{l}{2 \log e} \frac{2l}{a} \frac{10^{-11}}{9} \text{ farad} = \frac{10^5}{2 \log e} \frac{2 \times 10^3}{1} \frac{10^{-11}}{9} \text{ farad} = 0,00733 \cdot 10^{-6} \text{ farad.}$$

Par suite :

$$c_1 + c_2 = 0,010707 \cdot 10^{-6} \text{ farad.}$$

En tenant compte de la capacité des isolateurs, M. A. Blondel prend la valeur $\gamma = c_1 + c_2 = 0,0177 \cdot 10^{-6} \text{ farad.}$

Coefficient de self-induction d'un conducteur par kilomètre. — On pose :

$$\begin{aligned} \Lambda &= 2l \left(2 \log e \frac{d}{a} + \frac{1}{2} \right) 10^{-3} \text{ henry} \\ &= 2 \times 10^5 \left(2 \log e \frac{300}{1} + 0,5 \right) = 2 \times 0,0012 \text{ henry.} \end{aligned}$$

Le coefficient de self-induction cherché $\lambda = 0,0012 \text{ henry.}$

La fréquence du courant étant 25, on a :

$$\alpha = 2\pi \times 25 = 157 \quad \text{et} \quad \alpha\lambda = 0,19 \text{ ohm.}$$

Résistance d'un conducteur par kilomètre. — Le conducteur, qui a 20 millimètres de diamètre, a une section brute de $3\text{cm}^2,14$; mais il est composé de fils ronds juxtaposés. Sa section réelle est donc seulement de :

$$3,14 \times 0,785 = 2\text{cm}^2,47.$$

La résistivité de l'aluminium étant de 2,6 microhms, la résistance par kilomètre sera de :

$$\frac{10^5}{2,45} \times 2,6 \times 10^{-6} = 0,105 \text{ ohm.}$$

Mais, pour tenir compte de l'effet Thomson et de l'accroissement de la longueur due à la flèche des conducteurs, on prendra $\rho = 0,113 \text{ ohm.}$

Si on considère l'impédance de chacun des conducteurs par kilomètre, on a :

$$\sqrt{\rho^2 + \alpha^2 \lambda^2} = 0,224 \text{ ohm.}$$

Vitesse de propagation des courants le long des conducteurs. — On a :

$$\frac{1}{\sqrt{\gamma\lambda}} = 217500 \frac{\text{km}}{\text{sec}} \sqrt{\frac{2\alpha\lambda}{\alpha\lambda + \sqrt{\rho^2 + \alpha^2 \lambda^2}}} = \sqrt{\frac{0,38}{0,411}} = 0,964.$$

Le courant fondamental parcourra la ligne avec une vitesse :

$$W = 217500 \times 0,964 = 209.000 \text{ km/sec.}$$

Coefficient d'amortissement u :

$$u = \frac{1}{2} \gamma \rho W = \frac{1}{2} 0,0177 \times 10^{-6} \times 0,113 \times 209.000 = 0,000209.$$

M. A. Blondel admet qu'il est le même pour le courant fondamental et ses premiers harmoniques.

Perte de tension le long du conducteur pendant la marche en charge. — On suppose un $\cos \varphi$ voisin de 0,9 obtenu en surexcitant les commutatrices du réseau.

On pose :

$$p = 400 \quad \text{et} \quad q = 200; \quad \sqrt{p^2 + q^2} = 447 \quad \text{et} \quad \cos \varphi = \frac{400}{447} = 0,895;$$

si la tension composée à l'arrivée est de 100.000 volts, la tension simple est :

$$\frac{100.000}{\sqrt{3}} = 57.600 \text{ volts,}$$

et alors :

$$I_t = \frac{57600}{447} = 128,9.$$

Travail apparent par conducteur, 7.340 kilowatts; travail réel par conducteur, 6.650 kilowatts; travail réel transmis par chaque ligne, 19.950 kilowatts. Le rapport des tensions, au départ et à l'arrivée, est donné par la formule :

$$E_0 = \frac{E_t}{2 \sqrt{p^2 + q^2}} \times \sqrt{(m^2 + n^2) \left[e^{2\alpha l} + e^{-2\alpha l} - 2 \cos \frac{2\alpha l}{W} \right] + (p^2 + q^2) \left[e^{2\alpha l} + e^{-2\alpha l} + 2 \cos \frac{2\alpha l}{W} \right] - 2(mp + nq)e^{2\alpha l} - e^{-\alpha l} + 4(np - mq) \sin \frac{2\alpha l}{W}}.$$

Mais :

$$m = -\frac{1}{\alpha \gamma W}; \quad n = \frac{u}{\alpha \gamma}; \quad m^2 + n^2 = \frac{\sqrt{p^2 + q^2}^2}{\alpha \gamma}.$$

D'où, en remplaçant les lettres par leurs valeurs ci-dessus, on obtient :

$$\alpha \gamma = 2,78 \times 10^{-6}; \quad m^2 + n^2 = 79.000 \quad \text{et} \quad p^2 + q^2 = 200.000;$$

$$mp + nq = \frac{uq - \frac{p^2}{W}}{\alpha \gamma} = \frac{0,000209 \times 200 - \frac{157 \times 400}{209.000}}{2,78 \times 10^{-6}} = -93.200;$$

$$np - mq = \frac{up + \frac{q^2}{W}}{\alpha \gamma} = \frac{0,000209 \times 400 + \frac{157 \times 200}{209.000}}{2,78 \times 10^{-6}} = 84.000.$$

On a aussi :

$$l = 450;$$

d'où :

$$\frac{2\alpha}{Wl} = 2\pi \frac{50 \times 450}{209.000} = 2\pi \times 0,1076;$$

$$\cos \frac{2\alpha l}{W} = \cos 38^\circ 45' = 0,780 e^{2\alpha l} = 1,2068;$$

$$\sin \frac{2\alpha l}{W} = \sin 38^\circ 45' = 0,628 e^{-2\alpha l} = 0,830.$$

Et enfin :

$$E_0 = \frac{E'}{2 \times 447} \sqrt{79000 \times 0,4768 + 200000 \times 3,5960 + 186400 \times 0,3768 + 336 \times 0,628}$$

$$= \frac{1020}{894} E_l = 1,14 E_l.$$

La chute de tension le long de la ligne est donc de 12 0/0 environ.

Rapport des intensités efficaces au départ et à l'arrivée pendant la marche en pleine charge. — On a :

$$\frac{A_0}{A_l} = \frac{1}{2 \sqrt{m^2 + n^2}} \times$$

$$\sqrt{(m^2 + n^2) \left[e^{2ul} + e^{-2ul} + 2 \cos \frac{2\pi l}{W} \right] + (p^2 + q^2) \left[e^{2ul} + e^{-2ul} - 2 \cos \frac{2\pi l}{W} \right]}$$

$$- 2mp + nq (e^{2ul} - e^{-2ul}) - 4(np - mq) \sin \frac{2\pi l}{W}}$$

$$\frac{A_0}{A_l} = \frac{1}{562} \sqrt{79000 \times 3,5968 + 200000 \times 0,4768 + 186400 \times 0,3768 - 33600 \times 0,628}$$

$$= \frac{489}{562} = 0,87.$$

Ainsi l'intensité au départ est sensiblement inférieure à celle à l'arrivée.

Variations de la tension, le long de chaque conducteur, lorsqu'il est ouvert à son extrémité. — Des calculs fondamentaux établis par M. A. Blondel, il résulte que la tension en un point quelconque du conducteur ne pourra dépasser que d'une quantité négligeable la tension à son extrémité, pendant la marche à vide. Il suffit donc de déterminer les valeurs de la tension à l'extrémité du conducteur.

On a :

$$E_l = \frac{2E_0}{\sqrt{e^{2ul} + e^{-2ul} + 2 \cos \frac{2\pi}{W} l}}$$

Le tableau suivant donne les éléments du calcul du rapport $\frac{E_l}{E_0}$ pour le courant fondamental et ses 23 premiers harmoniques impairs.

Rang de l'harmonique	$\cos 2 \frac{\pi l}{W}$	$\sqrt{e^{2ul} + e^{-2ul} + 2 \cos \frac{2\pi}{W} l}$	$\frac{E_l}{E_0}$
1 (courant fondamental)	0,780	1,890	1,059
3	— 0,453	1,062	1,88
5	— 0,971	0,308	6,52
7	+ 0,020	1,410	1,42
9	+ 0,981	2,000	1,00
11	+ 0,406	1,682	1,19
13	— 0,801	0,660	3,04
15	— 0,755	0,725	2,76
17	— 0,484	1,032	1,94
19	— 0,959	1,983	1,02
21	— 0,535	0,932	2,14
23	— 0,989	0,242	8,28

Il résulte de ces nombres que la surtension à l'extrémité de la ligne sera insignifiante pour le terme principal et n'est à redouter que pour le 5^e harmonique.

Courant de charge de chaque conducteur, pendant la marche à vide. — L'intensité du courant qu'il faut fournir à chaque conducteur a pour expression :

$$A_0 = \frac{E_l}{2 \sqrt{m^2 + n^2}} \sqrt{e^{2ul} + e^{-2ul} - 2 \cos \frac{2\alpha}{W} l}.$$

Pour le courant fondamental :

$$m^2 + n^2 = \frac{0,221}{157 \times 0,0177 \times 10^{-6}} = 79.000 \quad \text{et} \quad \sqrt{m^2 + n^2} = 281.$$

On a, comme précédemment :

$$e^{2ul} + e^{-2ul} = 2,0368; \quad \cos \frac{2\alpha l}{W} = 0,780;$$

d'où :

$$\sqrt{e^{2ul} + e^{-2ul} - 2 \cos \frac{2\alpha}{W} l} = 0,785; \quad A_0 = 0,00123 E_l;$$

ou, puisque $E_l = 1,059 E_0$:

$$A_0 = 0,00130 E.$$

E_0 représente la tension du conducteur, par rapport au point neutre. On a donc :

$$E_0 = \frac{120.000}{\sqrt{3}} = 69.500;$$

d'où :

$$A_0 = 90,4 \text{ ampères.}$$

Résonances entre les alternateurs et la ligne. — Supposons d'abord que la ligne soit ouverte à son extrémité et qu'on y envoie un courant alternatif de fréquence $\frac{\alpha}{2\pi}$, le coefficient Λ_1 et la résistance I_1 de chaque conducteur mesurés à à leur origine ont pour valeur :

$$I_1 = \frac{\frac{1}{\gamma W} [e^{2\alpha l} - e^{-2\alpha l}] - \frac{2W}{\alpha} \sin 2\alpha \frac{l}{W}}{e^{2ul} + e^{-2ul} - 2 \cos \frac{2\alpha l}{W}};$$

et :

$$\alpha \Lambda_1 = \frac{-\frac{2W}{2\alpha} [e^{2\alpha l} - e^{-2\alpha l}] - \frac{2}{\gamma W} \sin 2\alpha \frac{l}{W}}{e^{2ul} + e^{-2ul} - 2 \cos \frac{2\alpha l}{W}}.$$

Supposons que le produit $\alpha \Lambda_1$ soit négatif pour un certain harmonique, que le coefficient de self-induction de chacun des circuits de l'alternateur soit pré-

cisement égal à Λ_1 et que la résistance ohmique de ce circuit soit négligeable; soient e la force électromotrice qui tend à produire l'harmonique de fréquence α , i l'intensité du courant de cette fréquence: $i = \frac{e}{I_1}$. La tension à l'entrée de la ligne sera:

$$\frac{e}{I_1} = \sqrt{I_1^2 + \alpha^2 \Lambda_1^2};$$

et le facteur de surtension égal à:

$$\frac{\sqrt{I_1^2 + \alpha^2 \Lambda_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{4}{\gamma^2 W^2} + \frac{\rho^2 W^2}{\alpha^2} \right) \left[4 \sin 2 \frac{\alpha l}{W} + (e^{2\alpha l} - e^{-2\alpha l})^2 \right]}}{\frac{1}{\gamma W} (e^{2\alpha l} - e^{-2\alpha l}) - \frac{\rho W}{\alpha} \sin 2\alpha \frac{l}{W}}.$$

D'après ces données on trouve les valeurs suivantes pour les coefficients de self-induction Λ_1 :

Harmoniques: 3°, -0,835; 7°, -1,87; 9°, -0,0457; 13°, -0,08; 15°, -0,181; 21°, -0,321, et 23°, -0,0993.

Or, les alternateurs envisagés pour la transmission d'énergie qui nous occupe (10.000 kilowatts, 12.000 volts), donnent pour le coefficient Λ_1 , 0,01245, nombre beaucoup plus petit en grandeur absolue que tous ceux signalés ci-dessus et qui auraient pu seuls donner lieu à résonance, si leur grandeur absolue se fût rapprochée de celle du coefficient de self-induction d'un des circuits générateurs.

Maintenant, si nous supposons la ligne fermée sur une résistance de valeur ρ_2 et ayant un coefficient de self-induction λ_2 , l'on démontre que les choses se passent au départ, comme si la ligne avait un coefficient de self-induction l_1 donné par la formule:

$$\alpha l_1 = \frac{-\alpha (R_1 + \rho_2) (\lambda_2 I_1 - \Lambda_1 \rho_2) + \alpha (I_1 + \lambda_2^2) [I_1 (I_1 + \rho_2) + \alpha^2 \Lambda_1 (\Lambda_1 + \lambda_2)]}{(I_1 + \rho_2) + \alpha^2 (\Lambda_1 + \lambda_2)^2}.$$

La valeur de R_1 est donnée par l'expression:

$$R_1 = \frac{\frac{1}{\gamma W} (e^{2\alpha l} - e^{-2\alpha l}) + \frac{\rho^2}{\alpha} \sin 2\alpha \frac{l}{W}}{-e^{2\alpha l} + e^{-2\alpha l} + 2 \cos \frac{2\alpha l}{W}}.$$

En appliquant la formule ci-dessus fournissant la valeur de αl_1 au cas actuel, on trouve que, lorsque l_1 prend une valeur négative, sa valeur absolue est toujours beaucoup plus grande que 0,01224, quand on fait aussi $\lambda_2 = 0,01224$.

Comme on a toujours intérêt à faire travailler les lignes en pleine charge ou presque en pleine charge, le coefficient λ_2 des appareils récepteurs sera naturellement de même ordre de grandeur que celui des appareils générateurs, ou encore plus petit si une grande quantité de puissance transformée est travaillée dans des commutatrices. Il n'y a donc pas à craindre de résonance entre les appareils générateurs et la ligne pendant la marche en charge. En donnant à ρ_2 une valeur négative convenable, on verrait de même que les appareils récepteurs ne peuvent résonner avec la ligne.

523. Calcul d'une ligne triphasée à haute tension de 20.000 kilowatts transportés à 150 kilomètres (A.-R. Garnier). — On connaît, en outre de la charge et de la longueur de la ligne, le facteur de puissance en charge $\cos \varphi = 0,85$, la fréquence = 50 périodes sec., le prix de revient du kilowatt-an = 400 francs, le taux commun d'intérêt et d'amortissement de la ligne = 10 0/0, le prix du kilogramme de métal conducteur (cuivre) = 2 francs le kilogramme.

Les notations adoptées sont : U, différence de potentiel à la station réceptrice ; P, puissance en kilowatts produite à la station génératrice ; L, longueur (par conducteur simple) de la ligne de transmission ; F, coût du kilowatt-an à la station génératrice ; a, le prix du conducteur au kilogramme ; f, taux d'intérêt et d'amortissement des conducteurs de la ligne ; z, la résistivité du métal conducteur en ohms-kilomètres ; p, poids du métal conducteur par kilomètre-centimètre carré ; R, résistance totale de la ligne ; S, section droite du conducteur en centimètres carrés ; x, la perte en centièmes de la puissance développée P.

On prend U = 100.000 volts ; t, température moyenne de la ligne = 15° C. ; $r = 0,17$; $p = 890$ kilogrammes.

La valeur de x, correspondant à la perte la plus économique, se tire de la formule :

$$x = \sqrt{\frac{3A}{4FU^2 + 3A}} ; \quad \text{avec} \quad A = \frac{4000pafL^2r}{\cos^2 \varphi} ;$$

d'où :

$$A = \frac{4000 \times 890 \times 2 \times 0,1 \times 150^2 \times 0,17}{0,722} = 382.166 \times 10^4$$

et :

$$x = \sqrt{\frac{3 \times 382.166 \times 10^4}{4 \times 400 \times 10^{10} \times 3 \times 382.166 \times 10^4}} = 0,0266 = 2,66 \text{ 0/0.} \quad (1)$$

Pour la section on a :

$$S = \frac{1.000 (1 - x)^2 PrL}{U^2 \cos^2 \varphi \times x} = \frac{1.000 (1 - 0,0266)^2 \times 20.000 \times 0,017 \times 150}{10^{10} \times 0,722 \times 0,0266} \\ = 2,50 \text{ centimètres carrés (soit pratiquement 2,44 centimètres carrés).}$$

Le poids total du conducteur est :

$$M = 3LSp = 3 \times 150 \times 2,44 \times 8,90 = 977.220 \text{ kilogrammes.}$$

Le prix C du conducteur a pour expression :

$$C = Ma = 977.220 \times 2 = 1.954.440 \text{ francs.}$$

(1) Pour une ligne monophasée on appliquerait les formules suivantes ;

a) P kilowatts produits :

$$x = \sqrt{\frac{A}{FU^2 + A}} ; \quad S = \frac{2.000 (1 - x)^2 PrL}{xU^2 \cos^2 \varphi} ;$$

b) P kilowatts fournis :

$$x = \frac{1}{U} \sqrt{\frac{A}{F}} ; \quad S = \frac{2.000 PrL}{U^2 x} ;$$

L'intérêt global annuel I uniquement provoqué par les conducteurs de ligne est :

$$I = Cf = 1.954.440 \times 0,1 = 195.444 \text{ francs.}$$

La résistance ohmique d'un conducteur simple de la ligne est :

$$R_1 = r \frac{L}{S} = 0,17 \times \frac{150}{2,5} = 10,20.$$

L'accroissement de résistance dû à l'effet Kelvin étant, pour le conducteur et la fréquence adoptés, de 1,0165 0/0, la résistance réelle par conducteur sera :

$$R = 10,2 \times 1,0165 = 10,368 \text{ ohms.}$$

Maintenant que l'on connaît la résistance réelle du conducteur, on peut calculer à nouveau la perte réelle x' dans le conducteur, perte légèrement différente de celle initialement calculée en vue de l'économie maxima.

On a alors :

$$\frac{1.000 \text{ RP}}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{x'}{(1-x')^2};$$

d'où, en posant :

$$\begin{aligned} \frac{1.000 \text{ RP}}{U^2 \cos^2 \varphi} &= K; \\ x' &= \frac{(2K+1) \pm \sqrt{4K+1}}{2K}. \end{aligned}$$

En remplaçant, on obtient :

$$K = \frac{1.000 \times 10,368 \times 20.000}{10^{10} \times 0,722} = 0,0287,$$

et :

$$x' = \frac{1,0574 \pm \sqrt{1,1448}}{0,0574} = 0,0278.$$

La perte en kilowatts π dans la ligne est égale à :

$$\pi = RI^2, \text{ équivalente à } P_{x'} = 20.000 \times 0,0278 = 556 \text{ kilowatts.}$$

Les kilowatts fournis à 100.000 volts avec $\varphi = 0,85$ sont donnés par l'expression :

$$20.000 - 556 = 19.444 \text{ kilowatts.}$$

Et les kilovolts-ampères fournis à la station réceptrice sont déterminés par le rapport :

$$\frac{19.444}{0,85} = 22.875 \text{ K. V. A.}$$

L'intensité du courant à la station réceptrice a pour valeur :

$$I = \frac{22.875.000}{100.000 \sqrt{3}} = 133 \text{ ampères.}$$

La capacité de la ligne est, en appliquant la formule :

$$C = \frac{0,012}{\log \frac{D}{r}} \text{ microfarads par kilomètre,}$$

et en prenant $D = 2^m,50$ pour l'espacement des conducteurs :

$$C = \frac{0,012}{\log \frac{250}{0,9}} = \frac{0,012}{\log 277,7} = \frac{0,012}{2,443} = 0,0049, \text{ soit } 0,005.$$

Et la capacité totale égale :

$$0,005 \times 150 = 0,750 \text{ microfarad.}$$

Le courant de charge par fil de ligne est donné par la relation connue :

$$i = \omega C U^v = 6,28 \times 50 \times 0,750 \times 100.000 \times 10^6 = 23,55 \text{ ampères.}$$

La self-induction, le conducteur étant supposé toronné, de 20 millimètres de diamètre, on applique la formule connue :

$$L = 0,46 \log \frac{d}{r} + 0,05 ;$$

avec $d = 2^m,50$, on trouve :

$$L = 1,1530 \text{ millihenry.}$$

D'où la self-induction par conducteur simple de ligne égale :

$$1,1530 \times 150 = 172,95 \text{ millihenrys.}$$

La réactance inductive par fil simple au kilomètre (ωL) a pour valeur :

$$\frac{2 \times 3,14 \times 50 \times 1,1530}{100} = 0,362.$$

Et la réactance triphasée :

$$1,732 \times 0,362 = 0,627 \text{ par kilomètre,}$$

soit pour la totalité de la ligne :

$$0,627 \times 150 = 94 \text{ ohms.}$$

Calcul d'une ligne triphasée 22.000 volts. — Nous supposons : une ligne de 60 kilomètres, 800 kilowatts de puissance au départ, section du fil = 38 millimètres carrés, distance entre conducteurs 70 centimètres, $\cos \varphi$ de la ligne = 0,70 et fréquence = 50 périodes seconde.

On a perte en énergie :

$$P = \frac{\rho LP}{E^2 \times S \times \cos^2 \varphi} = \frac{1,67 \times 60 \times 800}{22.000^2 \times 38 \times 0,72} = 8,88 \text{ 0/0 soit } 9 \text{ 0/0.}$$

Résistance de la ligne :

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{1}{60} \times \frac{60.000}{38} = 26,3 \text{ ohms.}$$

Puissance disponible à l'arrivée :

$$800 - 800 \frac{9}{100} = 800 - 72 = 728 \text{ kw.} \quad \text{et} \quad R = 26,7 \text{ ohms.}$$

La résistance totale de la ligne est donnée par :

$$R' = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad \text{où} \quad \omega = 2\pi f = 2\pi 50.$$

Il faut déterminer la valeur de L :

$$L = \left[\left(4,6 \times \log \frac{d}{s} + 0,50 \right) 10^{-4} \right] \sqrt{3} = \left[\left(4,6 \log \frac{70}{0,38} + 0,50 \right) 10^{-4} \right] \sqrt{3} \\ = 0,00192 \text{ henry par kilomètre.} \\ L \text{ total} = 0,00192 \times 60 = 0,115 \text{ henry.}$$

D'où :

$$R' = \sqrt{26,7^2 + (31,4 + 0,115)^2} = 45 \text{ ohms.}$$

Le courant en ligne est fourni par :

$$I = \frac{P}{E \sqrt{3} \cos \varphi} = \frac{800.000}{22.000 \sqrt{3} \times 0,7} = 34 \text{ ampères.}$$

Et la chute de tension en ligne est :

$$R' I \sqrt{3} = 45 \times 34 \sqrt{3} = 2.340 \text{ volts} = 10,62 \text{ 0/0.}$$

La tension à l'arrivée est par suite :

$$22.000 - 2.340 = 19.660 \text{ volts.}$$

CHAPITRE XXVI

LIGNES DE TRANSPORT DE FORCE A HAUTE TENSION

ÉTABLISSEMENT DES RÉSEAUX

I. — CALCUL DES CONDUCTEURS AÉRIENS

524. Flèches des fils des lignes aériennes. — Les causes qui affectent la stabilité des conducteurs peuvent être rangées en deux catégories : 1^o celles dont on peut par l'étude préalable des lieux et du matériel employé prévoir l'effet maximum et dont on peut, par suite, calculer les effets et combattre efficacement les conséquences, telles que la température, le vent, la neige collante, le givre, le verglas, l'usure aux points d'attache, la corrosion sous les actions chimiques, etc.; 2^o celles dont la grandeur ne peut être prévue à l'avance et auxquelles le calcul ne s'applique pas : avalanches, chutes d'arbres ou de grosses branches, éboulements des rochers, incendie, foudre, etc.

Il est indispensable de réduire la tension mécanique moyenne du conducteur à une valeur qui donne toute sécurité à la plus basse température. Les excès de tension aux basses températures sont d'autant plus considérables que les portées sont plus courtes.

Les ruptures sont moins fréquentes avec des conducteurs de gros diamètre, bien que les efforts soient proportionnels à la section, cela parce que les ligatures cèdent ou que les appuis fléchissent.

Les surcharges provenant du givre, neige collante, du verglas, se produisent presque tous les hivers dans certaines régions, non seulement dans les montagnes, mais parfois à des altitudes modérées. Des manchons de glace compacte atteignant 4,5 et dépassant même 8 centimètres de diamètre s'observent presque chaque année dans certaines régions de la Savoie, du Dauphiné, du Jura, des Cévennes et des Vosges. Ces charges, qui disparaissent brusquement de certaines portées, amènent la rupture des attaches aux isolateurs, l'abaissement des fils au voisinage du sol, et fréquemment des mélanges et des ruptures. Ces phénomènes, quoique moins fréquents en pays de plaine, s'y produisent aussi quelquefois.

Trois moyens peuvent être employés pour augmenter le coefficient de sécurité d'un conducteur exposé à des surcharges : la réduction des portées, l'accroissement de la section et enfin l'emploi d'un métal de résistance mécanique élevée ou d'un câble porteur. La résistance à la traction des fils de cuivre est de 28 kilogrammes par millimètre carré, laquelle s'élève à 45 et même 50 kilogrammes pour le bronze à 97 0/0 de cuivre et 85 0/0 de conductibilité ; celle de l'aluminium est de 22 kilogrammes avec une conductibilité de 59 0/0. Ces chiffres s'entendent pour la résistance à la rupture du métal et la conductibilité à 0° C. Le rapport des sections des conducteurs en cuivre et des conducteurs en aluminium est $\frac{97}{59} = 1,65$ et le rapport des diamètres $= \sqrt{1,65} = 1,3$.

Lorsqu'un fil ou câble est tendu entre deux appuis au même niveau, espacés de a mètres, au moyen d'un poids p (en kilogrammes), par mètre courant, donnant au fil une flèche f (en mètres), la tension T (en kilogrammes) agissant sur le câble au point le plus bas est donnée par l'expression :

$$T = \frac{pa^2}{8f}. \quad (1)$$

De cette formule on tire :

$$f = \frac{pa^2}{8T} \quad \text{et} \quad a = \sqrt{\frac{8fT}{p}}. \quad (1)$$

Si on désigne par t la tension en kilogrammes par millimètre carré, la densité du bronze étant de 8,91, on déduit de la formule (1) :

$$t = 0,001125 \frac{a^2}{f}. \quad (2)$$

Alors l'effort total $T = t \times$ par la section du fil en millimètres carrés. De la formule (2) on tire :

$$f = 0,001125 \frac{a^2}{t}. \quad (3)$$

La tension T_1 aux points d'attache ou aux points d'appui est un peu plus élevée que celle T au point le plus bas de la chaînette ; sa valeur est donnée par :

$$T_1 = \frac{pa^2}{8f} + pf, \quad (4)$$

(1) Si on appelle δ la densité du métal (0,0089 pour le cuivre et 0,0027 pour l'aluminium), R la charge de rupture par millimètre carré, n le coefficient de sécurité (3 pour les voies publiques et 5 dans les agglomérations), la formule peut s'écrire comme ci-après :

$$f_1 = \frac{\alpha^2 \delta n}{8R}.$$

et la longueur de la chaînette nous est fournie par la formule :

$$L = a + \frac{8f^2}{3a}; \quad (5)$$

d'où :

$$f = \sqrt{\frac{3a(L-a)}{8}}, \quad (6)$$

qui représente la valeur de la nouvelle flèche correspondant à la longueur développée de la chaînette.

La distance maxima entre deux poteaux est fournie par l'expression :

$$L_{\max} = \frac{4sR}{3p}; \quad (7)$$

s , section du fil en millimètres carrés, et R , tension de sécurité par unité, prise égale à $\frac{1}{5}$ de la charge de rupture. Dans cette formule, la relation

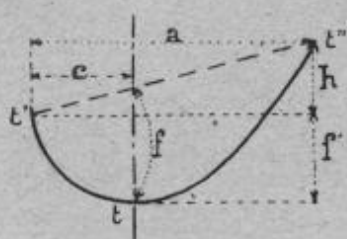


FIG. 1333.

du minimum de tension est supposée réalisée.

En remplaçant f par sa valeur dans la formule (5), on obtient :

$$L = a + \frac{p^2 a^3}{24T^2}. \quad (8)$$

Lorsque les points d'appui ne sont pas au même niveau et si c est la distance entre le point le plus bas du fil et l'appui inférieur (fig. 1338), on a :

$$c = \frac{4f' - h}{8f} a.$$

La valeur de f' est donnée par l'expression :

$$f' = \frac{c^2 h}{a^2 - 2ac}.$$

La tension au point bas est : $t = p \frac{a - 2c}{2h} a$.

La tension à l'appui inférieur : $t' = t + pf$.

La tension à l'appui supérieur : $t'' = t + p'f' + h$.

Ces formules ne concernent que le cas où les fils ne sont soumis qu'à leur propre poids de cuivre. Il est bon aussi de retenir que les joints abaissent la résistance des conducteurs de 15 0/0 environ.

Pour les câbles, il y a lieu de majorer de 4 0/0, pour tenir compte du câblage, le poids qui correspond à celui d'un fil unique de même section que le câble qui le remplace.

Il peut être intéressant de connaître la hauteur du poteau placé à l'intersection d'un terrain horizontal et d'un terrain en pente, c'est-à-dire au changement de pente. Les parties entre les poteaux étant les mêmes, ainsi que les flèches, et β désignant l'angle de la partie de terrain en pente, h la hauteur d'attache des isolateurs des poteaux extrêmes, h' la hauteur d'attache du poteau intermédiaire, on a :

$$h' = h + \frac{1}{2} \alpha \sin \beta - 4f;$$

si on était ainsi conduit à une hauteur trop exagérée (ou trop faible si $\beta < 0$), l'on pourrait adopter pour la distance 2α une distance moindre que le double de la portée normale.

525. Influence du vent, de la neige, de la glace et de la température. — Les fils utilisés pour les lignes aériennes ont un diamètre variant de 3 à 8 millimètres. Au-dessus de ce dernier chiffre on fait usage de conducteurs câblés dont la résistance mécanique est plus uniforme que celle des fils (câbles à un seul toron). On emploie le fil recuit, plus résistant et moins malléable. Pour le calcul des conducteurs, on se fixe la tension maxima que le conducteur doit subir des actions combinées de son propre poids, du vent, des variations de température et des surcharges de neige et de glace. Dans les circonstances les plus défavorables, la tension ne doit pas dépasser le $1/5$ de celle qui produit la rupture, soit 8 à 9 kilogrammes par millimètre carré de section pour les fils de bronze.

Le vent agit sur le conducteur en produisant une surcharge analogue à une charge uniformément répartie sur le fil et en augmente la tension. Les efforts de tension dus au poids du fil sont parallèles à la ligne, tandis que ceux du vent lui sont perpendiculaires ; ces derniers s'ajoutent aux premiers, et il y a lieu d'en déterminer la résultante. Si p est la tension due au poids du câble et q celle du vent, on a, pour la valeur de la tension résultante :

$$\sqrt{p^2 + q^2}.$$

La pression exercée par le vent sur les fils tendus varie avec la vitesse de ce dernier. Sur une surface plane normale à la direction du vent, cette pression P , par mètre carré, a pour valeur :

$$P = 0,135V^2, \text{ en kilogrammes.}$$

qui est réduite à : $0,6 \times 0,135V^2 = 0,08V^2$ pour une surface cylindrique ⁽¹⁾.

(1) L'ingénieur G. Rébora s'est donné la tâche d'étudier le cas très particulier de l'effet du vent sur les fils et poteaux à section circulaire. Les expériences ont été réali-

Les vents soufflant en tempête (ouragan), étant animés d'une vitesse de 30 mètres par seconde, on a :

$$P = 0,08V^2 = 0,08 \times 30^2 = 72 \text{ kilogrammes } ^{(1)}.$$

Un tel chiffre, introduit dans les calculs, permet de parer à tout accident provenant du fait de l'action du vent sur les lignes aériennes.

Par suite, si d est le diamètre du câble en mètres, l sa longueur en mètres entre poteaux, on aura pour l'effort dû au vent :

$$F = d \times l \times 72 \text{ kilogrammes.}$$

La couche de neige ou de glace qui recouvre les fils dépasse rarement cinq fois le diamètre du conducteur, ce qui, étant données les densités de ces matières, met le poids de la surcharge à moitié environ de celui du conducteur ; par suite, dans les mêmes conditions de température, la tension sera augmentée dans le même rapport. Si celle-là vient à s'abaisser, la limite de sécurité en sera diminuée d'autant.

Si on connaît p' , somme des poids d'un mètre de fil et du givre qui le recouvre, on peut exprimer la nouvelle longueur L' par l'expression :

$$L' = a + \frac{a^3 p'^2}{24t^2};$$

t' , tension prise sous l'action de la surcharge.

En tenant compte du coefficient d'élasticité, ou rapport $\left(\frac{e}{s}\right)$ de l'allongement e que prend un fil du métal de 1 millimètre carré de section et de 1 mètre de longueur à la section s en millimètres carrés, on a :

$$L' = L \left[1 + \frac{e}{s} (t' - T) \right].$$

Il importe de se rendre compte que, la glace étant brisée par un vent donnant une pression de $7^{kg},2$ par mètre carré (ce qui correspond à une vitesse de 10 mètres par seconde), le plus grand vent ne coïncide pas avec le plus grand froid.

sées par deux méthodes : 1° l'air était en mouvement et le fil se déplaçait sous son action ; on mesurait la vitesse du vent et l'effort produit ; 2° l'air était tranquille et le fil se déplaçait au moyen d'un dispositif très simple et on écrivait l'équation du mouvement du fil dans l'air. Les résultats obtenus par les deux méthodes ont été à peu près concordants entre eux. La formule trouvée par M. Rébora est toujours du type : $F = KV^2S$, F effort en kilogrammes, V vitesse du vent en kilomètres par heure, S section en mètres carrés. Le résultat définitif de tous les essais a été un coefficient $K = 0,0045$. On obtient ainsi pour F une valeur environ 30 0/0 inférieure à celle de 72 kilogrammes adoptée par nous.

⁽¹⁾ C'est ce chiffre qui a été inscrit dans le règlement administratif du 21 mars 1908, annexe de la loi du 15 juin 1906.

D'autre part, sur une ligne en charge, la chaleur développée par le passage du courant aide à faire fondre la neige. Aussi le plus souvent ne calcule-t-on les câbles qu'en vue du plus grand froid. L'on se trouvera dans des conditions des plus favorables pour la bonne ordonnance de la ligne en se basant sur -20° C. (quant au climat de France) et sur un vent de 15 à 20 mètres de vitesse par seconde, soit 18 à 32 kilogrammes par mètre carré de section longitudinale du fil ⁽¹⁾.

En outre de l'action du froid, qui donne lieu à une contraction du câble et détermine, par suite, une augmentation de la tension, il faut tenir compte de l'élasticité naturelle du métal, ces deux actions se combinant.

Les coefficients de dilatation linéaire du cuivre sont : $\alpha = 0,0000175$ et $0,000023$ pour l'aluminium ; les coefficients d'allongement élastique : $\beta = 0,000078$ pour le cuivre et $0,0000165$ pour l'aluminium. La longueur primitive L de la ligne entre deux poteaux devient, sous l'action de la variation de température, en désignant celle-ci par θ :

$$L' = L (1 + \alpha \theta),$$

L'élasticité ajoutant son action, on a :

$$L'' = L (1 + \alpha \theta) (1 + \beta) (t' - t);$$

t , tension avant refroidissement, en kilogrammes par millimètre carré (tension initiale), et t' , tension après refroidissement (tension finale).

Or, pour L et L'' , on a, d'après la formule (8) :

$$L = a + \frac{a^3 p^2}{24 t^2} \quad \text{et} \quad L'' = a + \frac{a^3 p^2}{24 t'^2}.$$

Des formules ci-avant on tire :

$$L'' - L' = L [\alpha \theta + \beta (t' - t)] \quad \text{et} \quad L'' - L = \frac{a^3 p^2}{24} \left(\frac{1}{t'^2} - \frac{1}{t^2} \right);$$

et enfin :

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{a^3 p^2}{24} \times \frac{1}{t'^2} - \beta t' \right) - \left(\frac{a^3 p^2}{24} \frac{1}{t^2} - \beta t \right) \right],$$

en remarquant que la longueur L peut se confondre avec celle a .

A l'aide de cette dernière formule on détermine les valeurs de t' pour différentes valeurs de t et de a , selon les variations de θ .

⁽¹⁾ Le même règlement que nous venons de signaler indique le chiffre de 18 kilogrammes.

Le tableau suivant montre, pour les portées de 50 et de 80 mètres, l'influence de la température sur la tension des fils. Il est extrait de l'ouvrage de M. Picou sur *les Canalisations électriques* ⁽¹⁾.

VALEURS de t	PORTÉE 50 MÈTRES			PORTÉE 80 MÈTRES			
	Valeurs de t' pour $t =$			Valeurs de t' pour $t =$			
	2	2,5	3	4	4,5	5	5,50
10° C.	2,10	2,70	3,30	4,20	4,90	5,50	6,00
15°	2,15	2,80	3,40	4,40	5,10	5,70	6,30
20°	2,20	2,95	3,60	4,50	5,40	6,00	6,60
25°	2,25	3,10	3,80	4,70	5,60	6,30	7,10
30°	2,30	3,20	4,10	4,90	5,90	6,60	7,60
35°	2,35	3,30	4,30	5,10	6,20	7,00	8,10
40°	2,40	3,50	4,60	5,40	6,60	7,60	8,80
45°	2,45	3,70	4,90	5,60	6,90	8,10	9,30
50°	2,50	3,90	5,40	5,90	7,30	8,60	9,80

Il est rationnel de donner toujours une sécurité plus grande aux fils qu'aux poteaux, car toute rupture d'un fil d'une portée, laissant agir sur le poteau la tension d'une travée entière, donne lieu à des efforts bien plus considérables qu'en temps normal, et qui rendent souvent impossible de faire cette hypothèse extrême au point de vue de la résistance des supports.

En ce qui concerne les lignes constituées avec de gros câbles, la portée est plutôt limitée par la résistance des supports (quand ils sont en bois) que par celle du métal, quand on évalue l'action du vent.

Les tables de *Nicolâus* permettent de déterminer rapidement les valeurs des flèches pour la pose des conducteurs. Dans ces tables l représente la portée en mètres, t la température en degrés centigrades, p la tension spécifique en kilogrammes par millimètre carré, et f la flèche en centimètres.

Au moment de la pose le fil (poids spécifique 2,75) soumis à une charge due uniquement à son propre poids doit être tendu suivant la température de façon à obtenir la tension et la flèche indiquées par la table. Les valeurs des tensions et des flèches portées dans les tables sont choisies de telle sorte que lorsque, au poids du fil viennent s'ajouter des surcharges accidentelles (glace ou vent) de 0^{kg},015 par mètre et millimètre carré et pour une température de — 5°, le fil ne soit pas soumis à une tension supérieure à la tension maximum indiquée à la dernière ligne de la table.

MM. Maxime et Robert Weill ont dressé les tableaux I, II et III

(1) Gauthier-Villars, éditeur.

ci-après qui permettent de calculer rapidement les flèches des conducteurs. Ces tableaux sont basés sur les considérations suivantes :

Tension maximum + 15°, vent de 72 kilogrammes par mètre carré, correspondant à tension de — 20° et vent de 18 kilogrammes par mètre carré.

Exemple d'application.

Soit un câble en cuivre de 35 millimètres carrés de section, la tension maximum admise $p_{\max} = 10$ kilogrammes par millimètre carré.

Le diamètre de ce câble est 7^{mm},5.

On a suivant le tableau II :

$$x_p = 80,40.$$

Lorsque $x < x_p$.

La résultante du poids propre du conducteur et de la surcharge en kilogrammes par centimètre cube est donnée par la formule :

$$\rho^0 = \sqrt{\delta^2 + \left(\frac{Z}{s}\right)^2} = \sqrt{(0,0089)^2 + \left(\frac{0,75 \times 0,0018}{0,35}\right)^2} = 0,0097;$$

δ poids propre du conducteur par centimètre carré de section et par centimètre courant, en kilogrammes par centimètre cube ; Z, surcharge totale du conducteur par centimètre carré en kilogrammes;

$$t' = t_0 + \frac{\alpha}{\theta} \left(1 - \frac{\delta}{\rho^0}\right) p_{\max} = -20 + \frac{1}{1,7 \cdot 1,3 \cdot 10} \left(1 - \frac{0,0089}{0,0097}\right) 1.000 = -16^0$$

et :

$$p_{\text{const}} = \frac{\delta}{\rho^0} p_{\max} = \frac{0,0089}{0,0097} 1.000 = 918 \text{ kg : cm}^2.$$

Lorsque $x > x_p$:

$$\rho = \sqrt{(0,0089)^2 + \left(\frac{0,75 \times 0,0072}{0,35}\right)^2} = 0,0178$$

$$t' = +15 + \frac{1}{1,7 \cdot 1,3 \cdot 10} \left(1 - \frac{0,0089}{0,0178}\right) 1.000 = +37^0,6$$

et :

$$p_{\text{const}} = \frac{0,0089}{0,0178} \times 1.000 = 500 \text{ kg : cm}^2.$$

TABLEAU I

MATIÈRE	δ kg : cm ³	θ par rapport. à 1° C	α cm ² : kg	x_p en cm (p_{\max} en kg : cm ² , s en cm ² , d en cm)	
				Conducteurs câblés	Fils
I. Cuivre.....	8,9 . 10 ⁻³	1,7 . 10 ⁻⁵	1/1,3 . 10 ⁶	$x_p = 17,46 \frac{s}{d} p_{\max}$	$x_p = 13,49 dp_{\max}$
II. Bronze (Résistance 7.000 kg par cm ² , fil téléphonique).....	8,65 . 10 ⁻³	1,66 . 10 ⁻⁵	1/1,3 . 10 ⁶	$= 16,95 \frac{s}{d} p_{\max}$	$= 13,30 dp_{\max}$
III. Aluminium.....	2,75 . 10 ⁻³	2,3 . 10 ⁻⁵	1/0,715 . 10 ⁶	$= 19,95 \frac{s}{d} p_{\max}$	$= 15,68 dp_{\max}$
IV. Acier.....	7,95 . 10 ⁻³	1,1 . 10 ⁻⁵	1/2,2 . 10 ⁶	$= 13,80 \frac{s}{d} p_{\max}$	$= 10,85 dp_{\max}$
V. Fer (résistance 4.000 kg : cm ² , fil télégra- phique).....	7,79 . 10 ⁻³	1,23 . 10 ⁻⁵	1/1,9 . 10 ⁶	$= 14,60 \frac{s}{d} p_{\max}$	$= 11,47 dp_{\max}$

TABLEAU II. — Conducteurs câblés.

p_{max} kg : mm ²	x_p EN MÈTRES											
	$s = 10$ $d = 4,0$		20 5,7		35 7,5		50 9,0		75 11,2		100 mm ² 13,0 mm	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
4	16,4	19,0	23,9	27,8	31,4	36,5	36,9	42,8	45,6	52,8	53,7	62,4
6	20,5	28,5	35,9	41,7	47,2	54,8	55,3	64,2	68,4	79,3	80,5	93,6
8	32,7	38,0	47,8	55,5	62,9	73,0	73,8	85,6	91,2	105,6	107,3	124,8
10	40,8		59,7		80,4		92,1		113,8		134,1	
12	49,0		71,8		94,4		110,6		136,6		161,0	
14	57,2		83,8		110,0		129,0		159,2		187,9	
16	65,5		95,7		123,8		147,4		182,0		214,7	
18	73,6		107,5		141,4		165,9		205,5		241,5	
20	81,7		119,5		157,1		184,3		227,6		268,2	

TABLEAU III. — Fils.

p_{max} kg : mm ²	x_p EN MÈTRES							
	$s = 10$ $d = 3,6$		20 5,0		35 6,7		50 mm ² 8,0 mm	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
4	19,6	22,6	27,0	31,4	36,3	42,0	43,2	50,2
6	29,1	33,9	40,5	47,0	54,4	63,0	64,8	75,3
8	38,8	45,2	54,0	62,7	72,5	84,0	86,4	100,4
10	48,5		67,5		90,7		107,9	
12	58,2		81,0		108,9		129,6	
14	67,9		94,5		127,5		151,1	
16	77,7		107,9		145,0		172,7	
18	87,3		121,3		163,2		194,3	
20	97,0		134,9		181,4		205,8	

Les (fig. 1339 à 1342) reproduisent graphiquement les résultats obtenus ; elles se rapportent au conducteur envisagé ci-dessus, c'est-à-dire à un conducteur câblé en cuivre, de 35 millimètres carrés de section, et se basent, pour la matière, sur les constantes indiquées plus haut (tableau I).

Les courbes des (fig. 1339 et 1340) sont calculées en supposant que, dans le cas le plus défavorable (suivant l'arrêté ministériel en vigueur), la tension mécanique atteigne juste la limite maximum de 10 kilogrammes

par millimètre carré. Elles permettent de relever directement, pour toutes les portées jusqu'à 200 mètres, la tension et la flèche du conducteur envisagé, telles qu'elles se présentent aux températures situées entre -20° et $+40^{\circ}$ (1), et sans surcharge ; on peut donc s'en servir utilement pour le montage. Il y a lieu de faire observer que les fonctions tracées (x,p) et (x,f) ne représentent pas des variations effectives d'un état du conducteur à l'autre ; elles ne sont qu'un moyen commode pour déterminer les grandeurs en question.

La (fig. 1340) fait ressortir clairement la signification de la portée x_p .

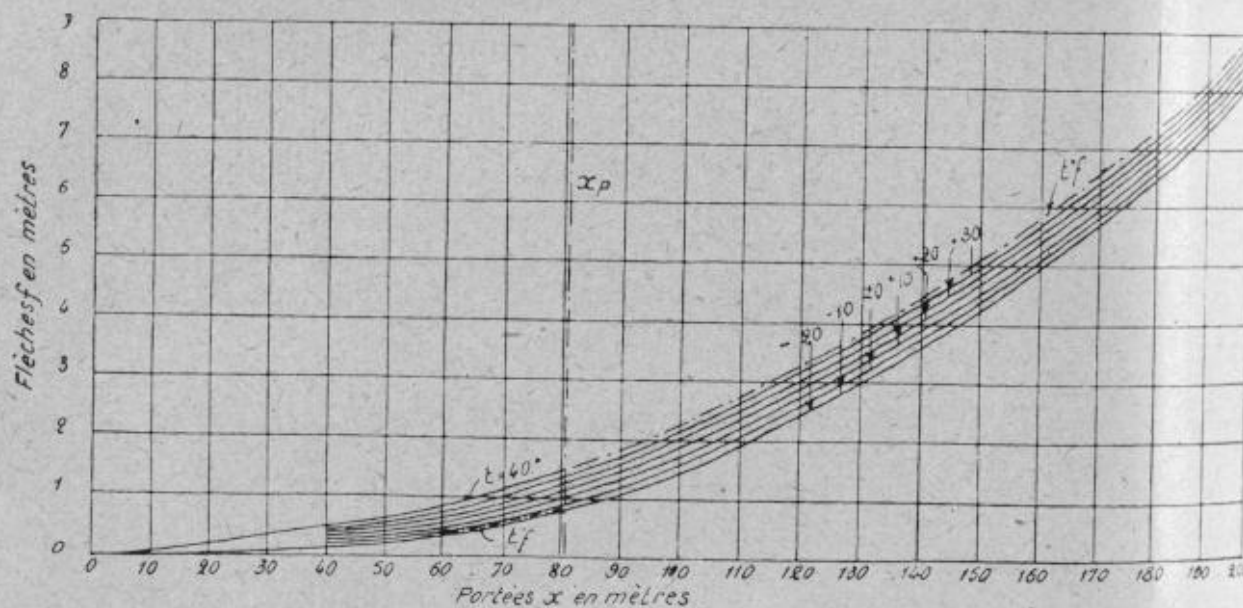


FIG. 1339.

Pour toutes les portées supérieures à x_p , la tension maximum se trouve, comme nous l'avons vu, à $+15^{\circ}$ et sous une surcharge horizontale de 72 kilogrammes par mètre carré ; c'est-à-dire que, pour toutes les portées $x > x_p$ la droite $p = p_{\max} = 10$ kilogrammes par millimètre carré, correspond à l'état du conducteur à $+15^{\circ}$, et sous la surcharge indiquée. Si la surcharge disparaît, la température restant constante à $+15^{\circ}$, la tension diminue jusqu'à une valeur qui, pour chaque abscisse x , est à peu près moyenne entre les ordonnées des courbes correspondant à $+10^{\circ}$ et à $+20^{\circ}$. Si, ensuite, la température se modifie également, la tension p prend les valeurs déterminées par les points d'intersection de l'ordonnée en question avec les courbes relatives aux différentes températures. A ces variations, se rapportant à une même portée x , correspondent les

(1) On aurait pu étendre ces courbes jusqu'à la température de $+60^{\circ}$ C ; toutefois, comme il s'agit ici de données pour le montage, il suffit de se limiter à $+40^{\circ}$ C, attendu que le tirage de la ligne ne se fera jamais aux températures extrêmes. |

fonctions (l, p) et (l, f) qui ont une importance particulière. Il ressort encore de la (fig. 1340) que la tension à -20° , sans surcharge, n'atteint jamais la valeur p_{\max} .

Le même commentaire s'applique aux portées inférieures à x_p , sauf que là $p_{\max} = 10$ kilogrammes par millimètre carré se présente à -20° et sous une surcharge horizontale de 18 kilogrammes par millimètre carré.

En x_p , les courbes d'égale température se rencontrent ; c'est-à-dire qu'il est indifférent, pour le calcul de la fonction, de choisir, comme état

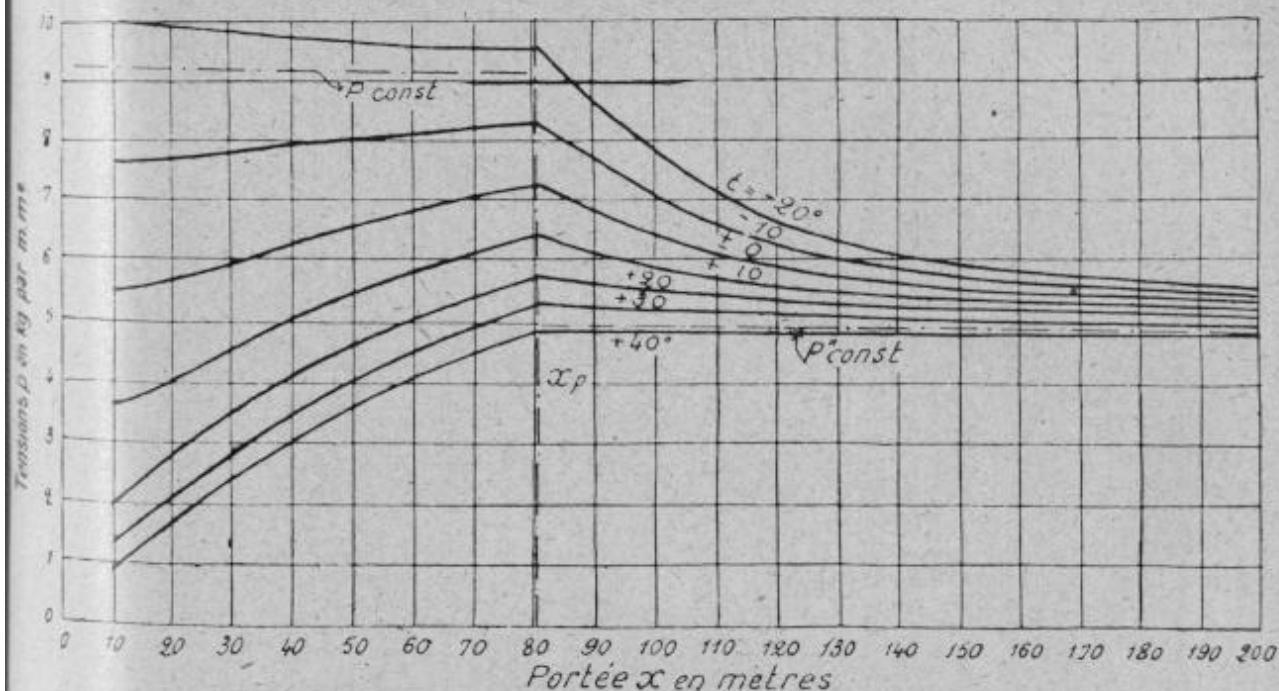


FIG. 1340.

initial, $+15^\circ$ avec surcharge de 72 kilogrammes par mètre carré, ou -20° avec surcharge de 18 kilogrammes par mètre carré.

Les valeurs p_{const} et t_f sont également exprimées dans les (fig. 1340 et 1341). Dans la première, pour $x < x_p$, la droite $p = p'_{\text{const}} = 9^{\text{kg}}, 18$ par millimètre carré se présente comme isotherme à la température $t' = -16^\circ$ on démontre facilement qu'elle est l'asymptote des courbes relatives aux autres températures.

De même, pour les portées $x > x_p$, la droite $p = p''_{\text{const}} = 5$ kilogrammes par millimètre carré est l'asymptote des autres courbes de tension ; elle correspond à la température $+37^\circ, 5$.

Dans la (fig. 1340) on a représenté en traits interrompus les courbes des flèches relatives aux températures $t'_f = -16^\circ$ et $t''_f = +37^\circ, 5$. Ces courbes indiquent en même temps les flèches à -20° et sous 18 kilogrammes par mètre carré, d'une part, et à $+15^\circ$ et sous 72 kilogramme par mètre carré, d'autre part.

Les courbes ont été calculées au moyen de l'équation (a) :

$$f = \frac{p}{8p_{\text{const}}} x^2, \quad \text{ou} \quad f = \frac{p_0}{8p_0} x^2$$

qui, considérée comme fonction (f, x) , représente une parabole.

La (fig. 1341) montre que, même pour de grandes portées, les flèches aux diverses températures t ne diffèrent pas sensiblement de celle à t_f :

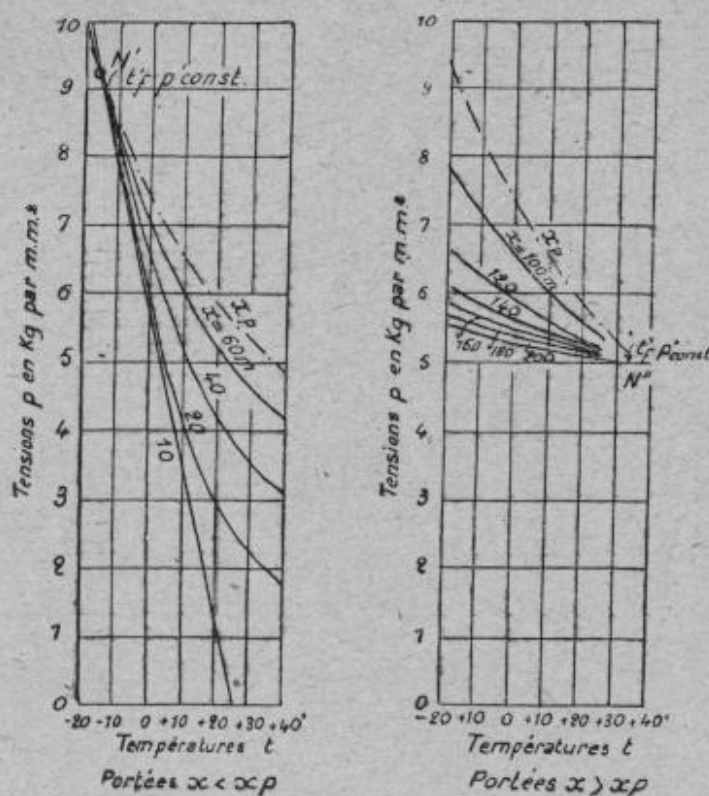


FIG. 1341. — Variations de la tension en fonction de la température pour quelques portées.

cette dernière, qui est très facilement déterminée au moyen de l'équation (a), donne donc une bonne approximation pour de très grandes portées n'ayant pas été prévues dans la (fig. 1342).

Les auteurs appliquent à la méthode M. A. Blondel les résultats obtenus.

Lorsque l'abaque universel n'est plus assez étendu, la portée fictive étant trop grande, la température t_f nous fournit le moyen de remédier à cet inconvénient.

Déterminons, au moyen de l'équation (a), la flèche correspondant à p_{max} et p_0 , ou p_0 est la résultante du poids propre et d'une surcharge horizontale de 18 ou 72 kilogrammes par mètre carré, suivant que la portée $x \leq x_p$;

reportons la valeur de cette flèche sur l'ordonnée de l'abaque universel correspondant à la portée envisagée et appelons l_f le point ainsi trouvé. La tension et la flèche, à toute autre température et sous la charge du poids propre seul, se détermineront alors de la manière habituelle, par addition de la différence de température $t - t_f$. L'exactitude de

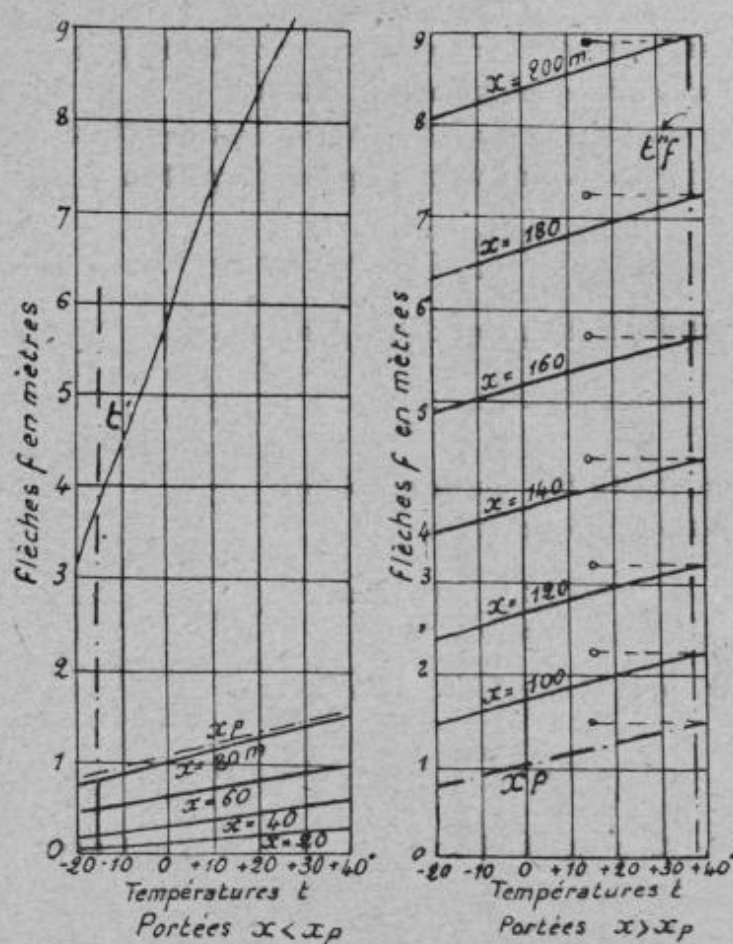


FIG. 1342. — Variations de la flèche en fonction de la température pour quelques portées.

cette méthode est évidente, après ce que nous avons exposé précédemment.

Dès lors, il est inutile de calculer les abaques de M. A. Blondel pour des portées plus grandes qu'elles ne se présentent en réalité.

526. Application numérique. — Soit un fil de bronze de 8 millimètres de diamètre posé sur des supports distants de 50 mètres, les appuis étant à la même hauteur du sol. En prenant 40 kilogrammes pour la charge de rupture du métal et un coefficient de sécurité de 5 (endroits particulièrement dangereux), la traction maxima qui pourra être admise

sur les conducteurs sera de : $\frac{40}{5} = 8$ kilogrammes par millimètre carré de section du fil ⁽¹⁾.

Le problème, dans ces conditions, consiste à déterminer la flèche à donner au fil pour ne pas dépasser la tension ci-dessus dans les deux hypothèses du règlement administratif savoir : a) hiver, température moyenne de la région et vent de 72 kilogrammes par mètre carré de section transversale ; b) été, température minima de la région et vent de 18 kilogrammes dans les mêmes conditions.

Le poids du conducteur par mètre courant est de 0^{kg},447.

La pression du vent par mètre de longueur (hypothèse a) a pour valeur :

$$\frac{8 \text{ mm} \times 72}{1000} = 0^{\text{kg}},576.$$

Le coefficient de surcharge est donné par la relation :

$$\frac{(0,447 + 0,576) 1000}{50,2 \times 9,81} = 2,07;$$

50,2, section du fil, et 9,81, densité du métal.

Par suite, la flèche a pour valeur :

$$\frac{2,07 \times 9,81 \times 50^2}{8000 \times 8 \text{ kg}} = 0^{\text{m}},80.$$

La longueur de la chaînette est alors :

$$50 + \frac{8 \times 0,80^2}{3 \times 50} = 50^{\text{m}},034.$$

Envisageons maintenant l'hypothèse b. Si on admet une température moyenne de + 10° C. et une température minima de — 20°, la différence de variation de température est de 30° C.

La nouvelle longueur de la chaînette est :

$$50,034 (1 - 30 \times 0,00001718) = 50^{\text{m}},010,$$

et la flèche correspondante a pour valeur :

$$\sqrt{\frac{3}{5}} 50 (50,010 - 50) = 0^{\text{m}},45.$$

Mais, dans ce cas, le facteur de surcharge n'est plus que :

$$\frac{(0,447 + 0,144) 1000}{50,2 \times 9,81} = 1,2,$$

0,144 représentant l'effort dû au vent de 18 kilogrammes.

(1) Ligne normale, coefficient de sécurité = 3; endroits particulièrement dangereux = 5; voies publiques, voies ferrées, agglomérations = 10.

Et la traction sur le câble est de :

$$\frac{50^2 \times 1,2 \times 8,91}{8000 \times 0,45} = 7^{ks,4}.$$

Le coefficient de sécurité, dans ce cas, égale :

$$\frac{40}{7,4} = 5,7,$$

supérieur à celui que nous avons admis pour notre calcul.

A l'effet de soulager l'effort sur les ferrures et les poteaux, il convient de prendre un chiffre un peu inférieur à celui pris plus haut, soit 5 kilogrammes, et la flèche calculée aura pour valeur :

$$\frac{2,07 \times 9,81 \times \overline{50}^2}{8000 \times 5} = 1^m,25.$$

Tension de pose. — 1° Hypothèse a).

La surcharge du vent :

$$72 \times 8 \times 10^{-3} = 0^k,576 \text{ mm}^2.$$

La charge totale :

$$\sqrt{(0,447)^2 + (0,576)^2} = 0^k,73 \text{ mm}^2.$$

Coefficient de surcharge :

$$\frac{0,73}{0,447} = 1,63.$$

En appliquant la formule de la tension de pose :

$$t^2 (t + 0,0423 \frac{\overline{50}^2 \times 1,63}{8^2} + 0,218 \times 25^{\circ} - 8) = 0,0423 \times \overline{50}^2$$

en remarquant que $35^{\circ} - 10^{\circ} = 25^{\circ}$,

On trouve :

$$t^2 (t + 0,67) = 103,73$$

d'où :

$$t = 4^k,60 \text{ mm}^2.$$

2° Hypothèse b).

La surcharge du vent :

$$48 \times 8 \times \overline{10}^3 = 0^k,144 \text{ mm}^2.$$

La charge totale :

$$\sqrt{(0,447)^2 + (0,144)^2} = 0^k,47.$$

Coefficient de surcharge :

$$\frac{470}{447} = 1,05.$$

Tension de pose :

$$t^2 (t + 0,0423 \frac{50^2 \times 1,05}{8^2} + 0,218 (35 + 25) - 8) = 0,0423 \times 50^2$$

d'où :

$$t^2 (t + 13 \times 15) = 103,75.$$

Et :

$$t = 2^k,6 \text{ mm}^2.$$

On prend le chiffre le plus faible, soit 2^k,6.

Et la flèche a pour valeur :

$$f = \frac{50^2 \times 0,447}{8 \times (40 \times 2,6)} = 1^m,35.$$

Les tables suivantes permettent de se rendre compte rapidement des valeurs des flèches et des tensions pour des fils qui ne sont pas soumis à des surcharges :

COEFFICIENT DE SÉCURITÉ à adopter	TEMPÉRATURES EN D° C. CORRESPONDANT AUX PORTÉES DE									
	40 m.	50 m.	60 m.	70 m.	80 m.	90 m.	100 m.	125 m.	150 m.	200 m.
1/4	-29,4	-30,8	-32,5	-23,4	-25,3	-27,4	-29,6	-23,4	-29,4	-22,7
10/45	-19,4	-20,6	-21,9	-14,3	-15,6	-17,0	-18,6	-11,6	-14,6	0,0
1/5	-11,5	-12,2	-13,2	-6,7	-7,4	-8,1	-9,0	0,0	0,0	23,5
10/55	-5,2	-5,6	-6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3	14,9	48,5
1/6	0,0	0,0	0,0	6,1	6,9	7,7	8,7	23,2	30,3	74,8
10/65	4,5	4,9	5,5	11,8	13,4	15,2	17,2	34,9	46,3	102,8
1/7	8,4	9,3	10,5	17,3	19,8	22,5	25,7	47,2	63,4	132,6
10/75	11,9	13,4	15,2	22,7	26,2	30,1	34,4	59,8	80,6	163,2
1/8	15,2	17,3	19,8	28,2	32,6	37,6	43,3	73,1	98,7	176,8
10/85	18,3	21,0	24,3	33,3	38,9	45,2	52,2	86,8	117,8	230,4
1/9	21,1	24,5	28,5	38,8	45,4	53,1	61,7	101,2	138,8	"
10/95	24,0	28,0	32,9	44,1	52,1	61,2	71,3	116,3	"	"
1/10	26,6	31,4	37,2	49,7	58,0	69,6	81,3	131,1	"	"
10/100	29,2	34,9	41,6	55,2	65,9	78,1	91,5	"	"	"

527. Abaques pour le calcul des lignes aériennes. — L'établissement des lignes aériennes demande des comparaisons et des tâtonnements pour le choix du diamètre des fils, de l'espacement des supports, des flèches admissibles, tâtonnements qui sont rendus souvent laborieux

— comme le fait si bien observer M. A. Blondel ⁽¹⁾ — par la forme de l'équation du 3^e degré [formule (2) ci-après], qui relie entre elles les variables fondamentales du problème qui nous occupe.

Dans le but d'abrégier les calculs, MM. Picou et Loppé ont dressé des tables donnant les variations de température et de l'effort par mètre courant et permettant d'obtenir la flèche d'une ligne aérienne ainsi que la tension aux points bäs et aux appuis. M. Émile Pierrard, ingénieur principal des Télégraphes et professeur à l'Université de Bruxelles, a dressé des abaques généraux des tensions et des flèches.

Abaque universel. — M. A. Blondel a simplifié le problème en élaborant une méthode graphique qui consiste en une épure unique permettant, par de simples artifices, de tenir compte des efforts étrangers et de mettre bien en évidence les comparaisons des influences des divers facteurs.

En mettant les équations de la flèche et les changements de conditions sous les formes :

$$(1) \quad f = \frac{\pi a^2}{8t} \quad \text{et} \quad \alpha (\theta - \theta') = \frac{a^2}{24} \left(\frac{\pi^2}{t^3} - \frac{\pi'^2}{t'^3} \right) - \frac{t - t'}{\beta}, \quad (2)$$

où π représente la pression uniformément répartie (poids propre, poids du verglas, pression du vent), les autres lettres ayant les mêmes significations que celles précisées plus haut. Remarquant que l'équation (2) contient au second membre une différence de deux valeurs d'une fonction,

savoir : $y = a\theta = \frac{\pi a^2}{24t^2} - \frac{t}{\beta}$ M. A. Blondel prend cette fonction

comme variable ou, ce qui revient au même, la valeur θ correspondante. Par suite, en construisant les courbes de θ , on obtient les variations de température en faisant simplement la différence des ordonnées.

L'épure s'établit en prenant comme abscisses les portées et comme ordonnées, d'une part, les valeurs de θ et, d'autre part, les valeurs correspondantes de f . On obtient ainsi deux familles de courbes indépendantes, rapportées seulement à des abscisses communes. Dans la première famille, les courbes se différencient par les valeurs fixes attribuées à la tension par millimètre carré t . Pour toutes, on suppose la force répartie π constante et égale à celle due au poids propre du conducteur, c'est-à-dire que π est le poids spécifique dans ce cas.

On peut tracer un abaque de ce genre pour chaque nature de métal, caractérisé par ses coefficients d'élasticité β et de dilatation α , et son poids spécifique π . M. A. Blondel a dressé un abaque applicable au mé-

⁽¹⁾ *Compte Rendu du 1^{er} Congrès de la Houille blanche.*

tal le plus usuel en pareil cas, le bronze siliceux ou phosphoreux (Pl. XVI) en lui attribuant les constantes suivantes :

$$\pi = 0,0089, \quad \beta = 43 \times 10^3, \quad \alpha = 0,000018.$$

Le réseau des courbes t , paraboliques d'aspect, est celui des fonctions θ , pour des coefficients de travail T variant de kilogramme en kilogramme de 1 à 20 kilogrammes par millimètre carré. Bien que, en général, il ne faille pas dépasser un pareil chiffre, il a été ajouté à titre de document les courbes correspondant à 22,5 et 25 kilogrammes : mm².

Les ordonnées indiquent les températures rapportées à un zéro arbitraire et dénué de toute signification. La graduation ne doit servir qu'à mesurer des *différences* d'un point à un autre.

Le second réseau de lignes tombantes f , désignées chacune par un chiffre de flèche, est déduit du premier en déterminant sur les courbes de celui-ci les points correspondant à une même flèche et les réunissant ensuite par une courbe continue.

Les flèches varient d'abord de 5 en 5 centimètres, puis de 10 en 10, et enfin de 25 en 25, pour les portées croissantes, de façon à permettre de lire l'abaque toujours à peu près avec une même précision.

Les portées représentées par les abscisses, à raison de 0,8 millimètre pour 2 mètres (à l'échelle de la figure), se prolongent jusqu'à 300 mètres, non pas qu'on ait en vue des portées aussi considérables, car, en général, on ne dépasse guère 60 mètres, mais parce que cette extension permet de calculer les efforts dus au vent, par l'artifice indiqué plus loin avec détails.

Il nous reste maintenant à expliquer la façon d'employer l'épure pour le calcul ; nous indiquerons successivement deux cas, celui où les conducteurs ne travaillent que sous leur poids propre, et celui où ils sont soumis à des efforts supplémentaires par l'action du vent et du verglas.

1° *Conducteurs soumis seulement à l'action de leur poids propre.* — On cherche, sur l'axe des abscisses, la longueur correspondant à la portée choisie et on suit la verticale à partir de ce point. Les points de rencontre avec les courbes d'efforts définissent ces derniers ; et leurs positions rapportées au réseau des courbes de flèches indiquent, à simple vue, les flèches correspondant à ces divers derniers du métal, ou inversement. On peut donc, en suivant la verticale de la portée fixée, voir la relation entre la flèche et le travail du métal.

Les comparaisons des flèches et des efforts pour diverses portées s'en déduisent aussi facilement. Il suffit de suivre, par exemple, une courbe de flèche constante et de prendre ses intersections avec les courbes d'efforts, puis de lire les abscisses correspondantes, pour connaître les portées compatibles avec chaque coefficient de travail du métal sous la

En abscisses: les portées. En ordonnées: les variations de température

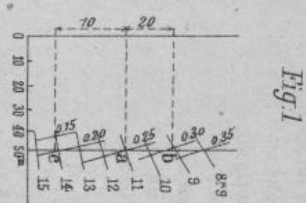


Fig. 1

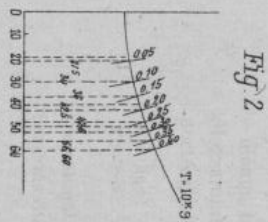


Fig. 2

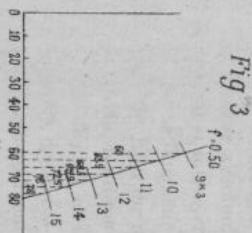


Fig 3

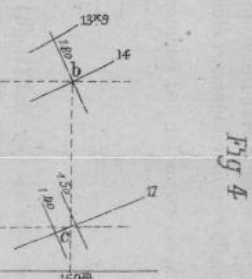


Fig. 4

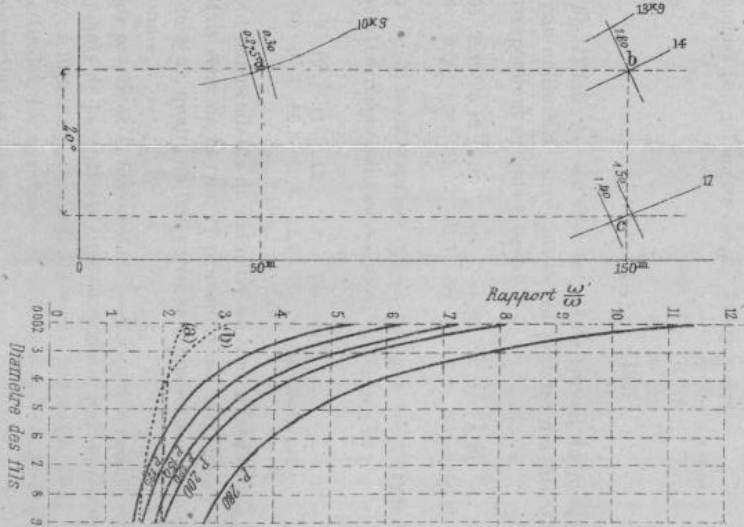
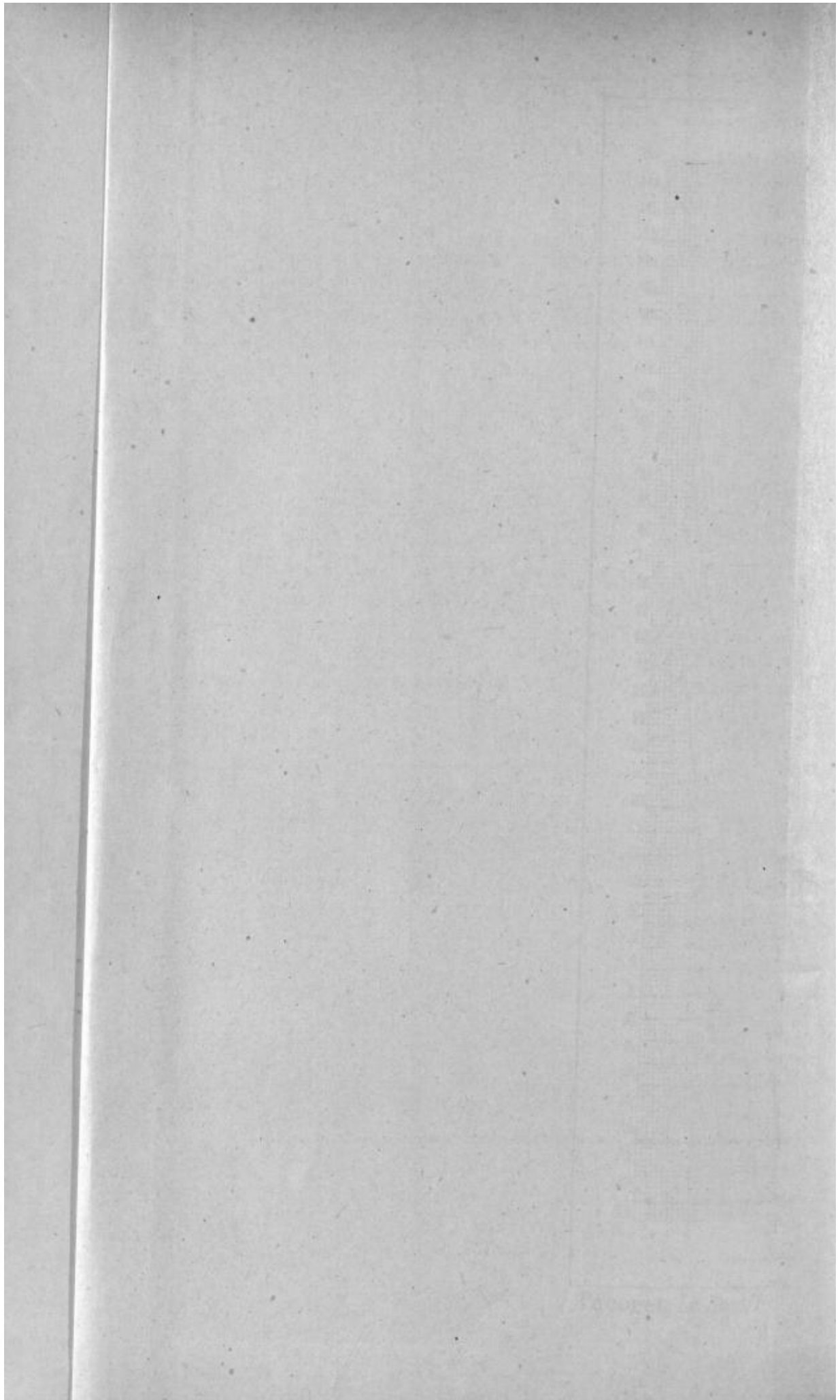


Fig. 5



flèche constante donnée. Réciproquement, en suivant une courbe d'efforts, on verra quelles flèches sont compatibles avec chaque portée.

Les (*fig. 1, 2, 3, Pl. XVI*) donnent des exemples numériques de ces applications immédiates : on opère, en plaçant sur l'abaque un papier calque sur lequel on suit les lignes au crayon ou à la plume. Nous reproduirons les lectures à part.

La (*fig. 1*) montre qu'avec une portée de 50 mètres, des coefficients de travail différents correspondent aux flèches suivantes :

T, 8 kilogrammes par millimètre carré.	Flèche 0 ^m ,35
— 9 — — —	— 0 ,315 environ
— 10 — — —	— 0 ,28
— 11 — — —	— 0 ,25
Etc...	Etc...

De même, la (*fig. 2*) fait voir qu'avec un même travail du métal de 10 kilogrammes par millimètre carré, on devra prendre des flèches et des portées se correspondant comme il suit :

Flèches :	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40.
Portées :	21,5	30,30	36	42,5	47,5	52	56	60 environ.

Inversement, la (*fig. 3*) montre qu'une flèche constante de 0,50 produit des tensions du métal correspondant aux portées comme il suit :

Tensions :	9	10	11	12	13	14	15.
Portées :	60	61,5	66,5	69,5	72,5	75	78 mètres environ.

Ces résultats sont indépendants du diamètre du conducteur et ont une valeur absolue. Mais ceux de la (*fig. 1*) peuvent aussi s'appliquer à un seul et même conducteur, quand on fait varier sa température sans changer sa longueur donnée.

2^o *Effet du poids propre de la température.* — La portée restant constante, les divers points de la verticale correspondante, qui représentent des flèches et des coefficients de travail différents, indiquent aussi, par leurs distances verticales, les variations de température qui produisent ces changements de régime sur un même conducteur.

Par exemple, la (*fig. 1*) montre qu'un conducteur de 50 mètres de portée, avec flèche de 0^m,25, à une certaine température inconnue, travaille à 11 kilogrammes (point *a*), et qu'un changement de température de 10° en plus, qui déplace le régime de *a* en *b*, le fait travailler à 9^{kg},1 seulement en lui donnant une flèche de 0^m,305 environ. De même, un refroidissement de 20° au-dessous de *a*, mesuré sur les ordonnées, amène le point *a* en *c*, et on voit qu'alors le travail est accru jusqu'à 14^{kg},15 environ et la flèche réduite à un peu moins de 0^m,20.

3° *Influence des surcharges.* — On calcule préalablement, comme on l'indiquera plus loin, la valeur de π résultant de l'action d'un certain vent et d'un certain verglas, composée avec celle du poids propre, et il suffira d'introduire la nouvelle valeur π' dans les équations pour que celles-ci donnent la solution cherchée.

Mais, comme on ne peut songer à construire un nouvel abaque pour chaque valeur de π , M. A. Blondel a eu recours à l'artifice suivant, qui conserve le même abaque, et en déplace seulement la région d'application.

On remarque, en effet, que les équations (1) et (2), dont les seconds membres contiennent π , subissent des changements équivalents quand on multiplie par un certain facteur m soit π tout seul, soit f et a à la fois tout en laissant π constant. Au lieu de modifier π , et par suite l'abaque, on peut donc conserver le même abaque en modifiant f et a , c'est-à-dire en remplaçant la travée par une autre semblable, dont le rapport de similitude est le facteur par lequel on aurait dû multiplier le poids spécifique pour tenir compte de la surcharge.

Un exemple numérique éclaircit aisément cette méthode. Supposons, par exemple, que nous ayons à faire une travée de 50 mètres travaillant à 10 kilogrammes sous son poids seul à une température connue, et qu'on demande comment ce coefficient et la flèche seront modifiés à la même température par une surcharge dont l'action calculée équivaut à une augmentation de 200 0/0 du poids spécifique.

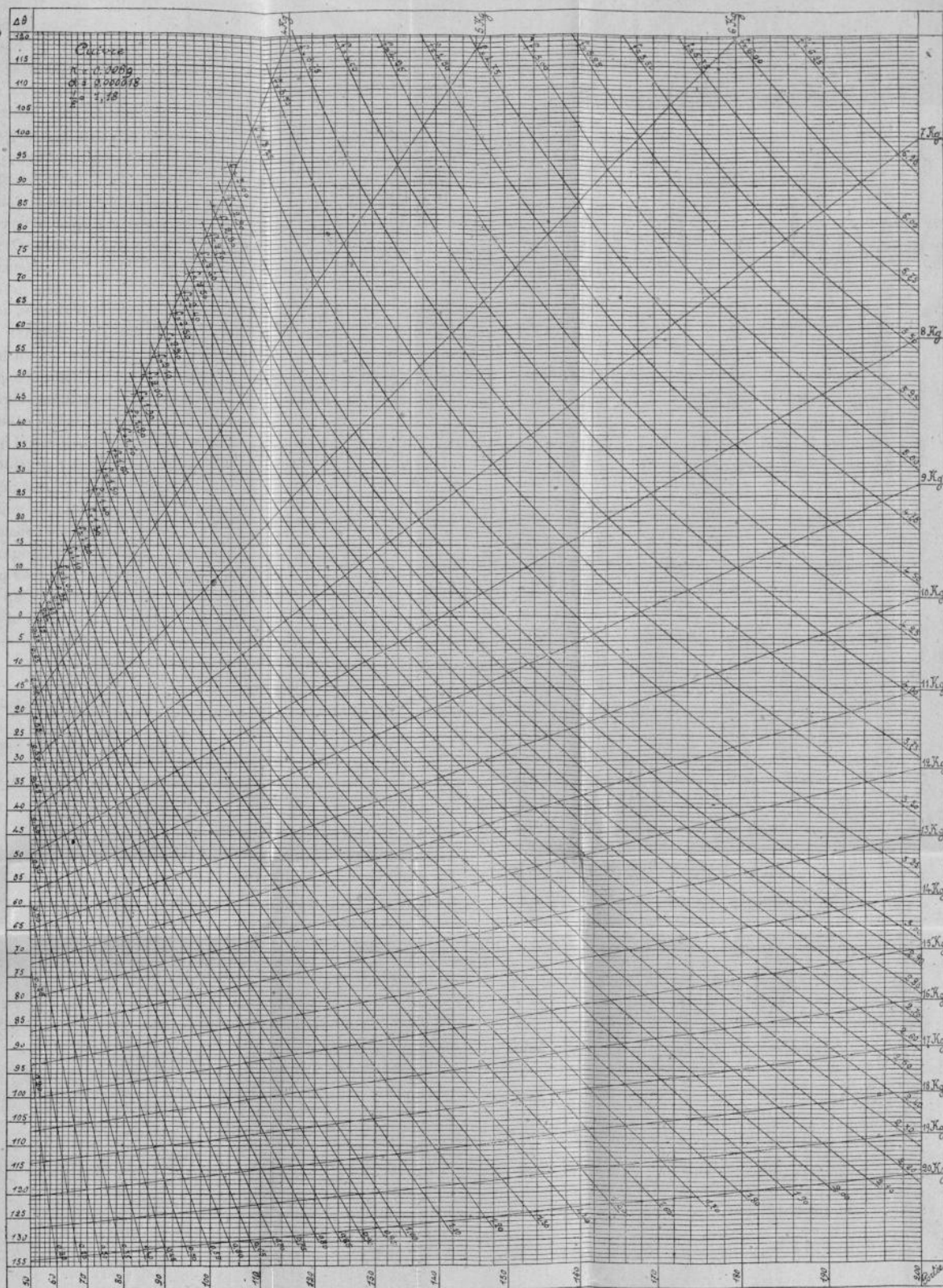
L'épure nous indique d'abord (*fig. 4*) que la flèche initiale est environ 0,275. Puisque la température reste constante, le nouveau point d'équilibre b sera sur la même horizontale que le point initial a . D'autre part, tripler le poids spécifique, comme on devrait le faire, équivaut, d'après ce qui précède, à tripler la portée et la flèche. Le point b est donc le point de l'horizontale ab qui correspond à l'abscisse 150. Il est ainsi déterminé. L'effort correspondant lu sur l'abaque directement est $13^{\text{kg}},85$ par millimètre carré environ, et la flèche sera le tiers de celle lue sur l'abaque 1,80, c'est-à-dire, par conséquent, 0,60.

Plus généralement, on peut tenir compte en même temps d'une variation de température en abaissant l'ordonnée du point représentatif d'une quantité correspondante.

Par exemple, supposons qu'à l'action de la surcharge de 200 0/0 ci-dessus s'ajoute l'effet d'un refroidissement de 20° . On comptera sur l'ordonnée de 150 mètres une hauteur de 20° au-dessous du point b , et le nouveau point c ainsi obtenu définira le nouvel équilibre. Il indique un travail du métal $T = 17$ kilogrammes par millimètre carré et une flèche $f = 1,47$. La flèche réelle est le tiers de ce chiffre, soit 0,49. Ainsi se trouve déterminé instantanément le changement dû à la surcharge combinée avec un refroidissement.

PLANCHE XVII

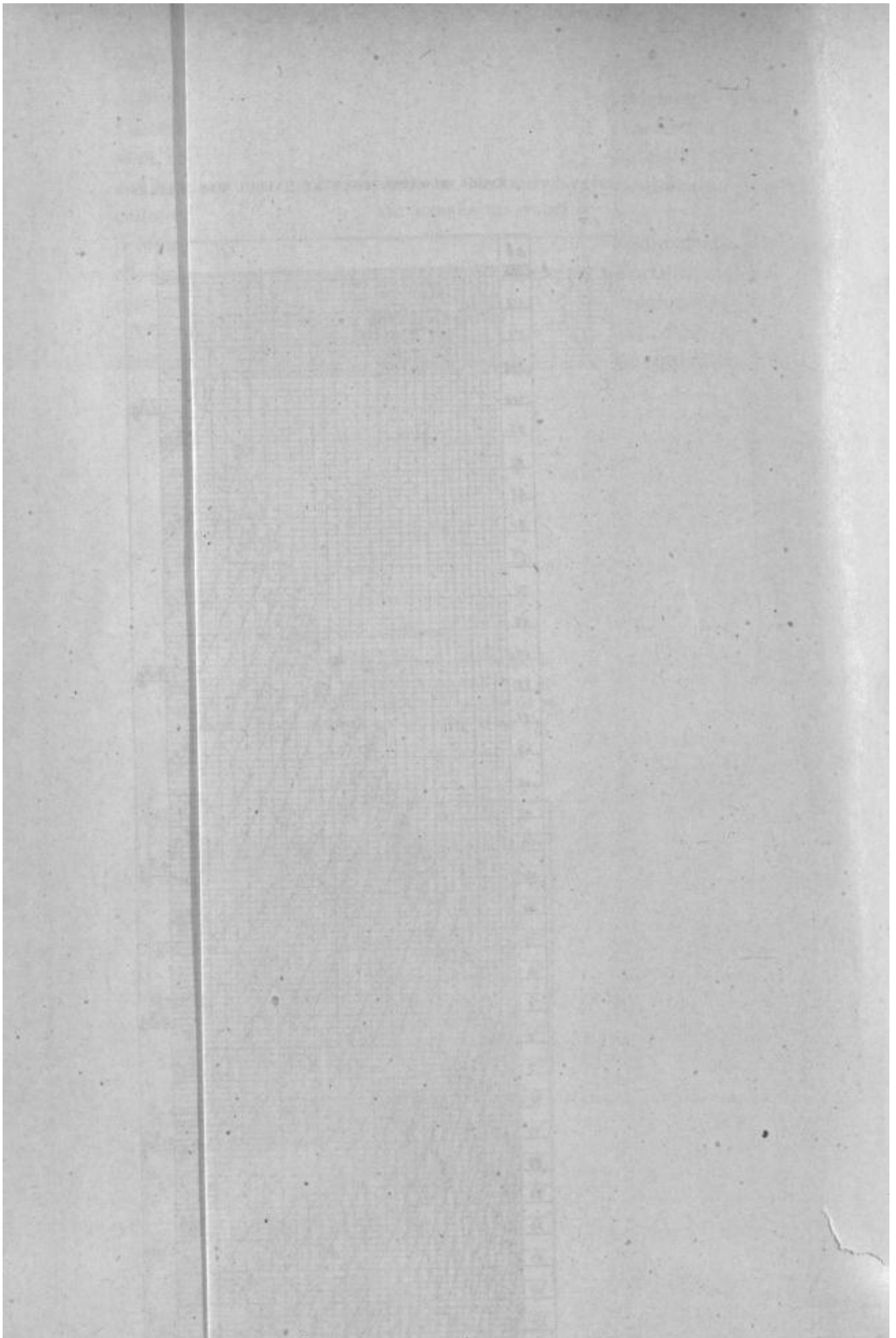
ABAQUE BLONDEL POUR LE CALCUL DES CABLES EN BRONZE PHOSPHOREUX POUR DIFFÉRENTES PORTÉES, EN PRENANT DES ABCISSES PROPORTIONNELLES AUX CARRÉS DES PORTÉES



$$\alpha = 0,0089; \quad \alpha = 0,000018; \quad \frac{1}{\alpha} = 1,18.$$

M. A. Blondel, en prenant comme abscisses des longueurs proportionnelles aux carrés des portées, obtient que les lignes représentatives des flèches se réduisent à des lignes droites. Pour tout le reste, le principe du calcul et le mode d'emploi de l'abaque sont exactement les mêmes que dans la forme de l'abaque de la (planche XVI). M. A. Blondel a en outre adopté pour ces câbles un coefficient d'élasticité déterminé d'après l'expérience qui n'est pas le même que pour les fils de bronze.

PACORET. — La Houille Blanche. — Page 2208-2209 (Tome III)



Marche rationnelle d'un calcul. — Il est aisé de voir, d'après ces applications, comment on doit diriger, en général, les tâtonnements du calcul des conducteurs satisfaisant aux prescriptions administratives.

Celles-ci imposent une hauteur minima. Le type du support fixe la hauteur des points d'attache. On peut donc considérer, en général, comme une donnée initiale la flèche maxima, correspondant à la température maxima, sans surcharge. (Il est aisé de voir que l'action du vent, qui accroît la flèche, incline le plan du conducteur, de telle sorte que la nouvelle flèche est l'hypoténuse d'un triangle formé par un déplacement horizontal, et une flèche verticale, qui ne dépasse jamais celle qu'on aurait sous l'influence du poids propre sans vent.)

Une seconde donnée est le refroidissement maximum accompagné d'une certaine surcharge de verglas. Une troisième donnée est la surcharge maxima produite par le vent à la température moyenne. Pour les petits fils, c'est en général cette dernière condition qui produit celle du travail maximum du métal. Il est rationnel de se fixer un maximum de ce travail qui, pour les bronzes usuels et le cuivre éroui, sera, par exemple, le tiers de la résistance limite, soit 15 kilogrammes. Dès lors la question à résoudre par l'abaque se réduit, en général, à celle-ci : connaissant la flèche maxima à la température maxima, en déduire le coefficient de travail à la température moyenne sous la surcharge maxima due au vent, et vérifier que ce coefficient T obtenu ne dépasse pas la limite qu'on s'impose, enfin tâtonner sur la portée jusqu'à ce qu'on se rapproche le plus possible de cette limite. Ensuite vérifier si elle n'est pas non plus dépassée par le froid le plus intense.

On peut réaliser dans l'emploi de l'abaque, pour la détermination de T et f , une précision de 5 0/0 environ, bien suffisante en général.

Enfin l'abaque permet, une fois les conditions d'installation fixées, d'en déduire aisément la tension de pose à n'importe quelle température et la flèche de pose correspondante à réaliser.

Calcul des coefficients de surcharge. — Il ne reste plus, pour compléter l'exposé de cette méthode, qu'à indiquer la manière de calculer l'effet de la surcharge, c'est-à-dire le coefficient π' représentant le poids spécifique fictif à substituer au poids spécifique ordinaire π du métal, ou plutôt le rapport $\frac{\pi'}{\pi}$.

M. A. Blondel part de la formule ci-après :

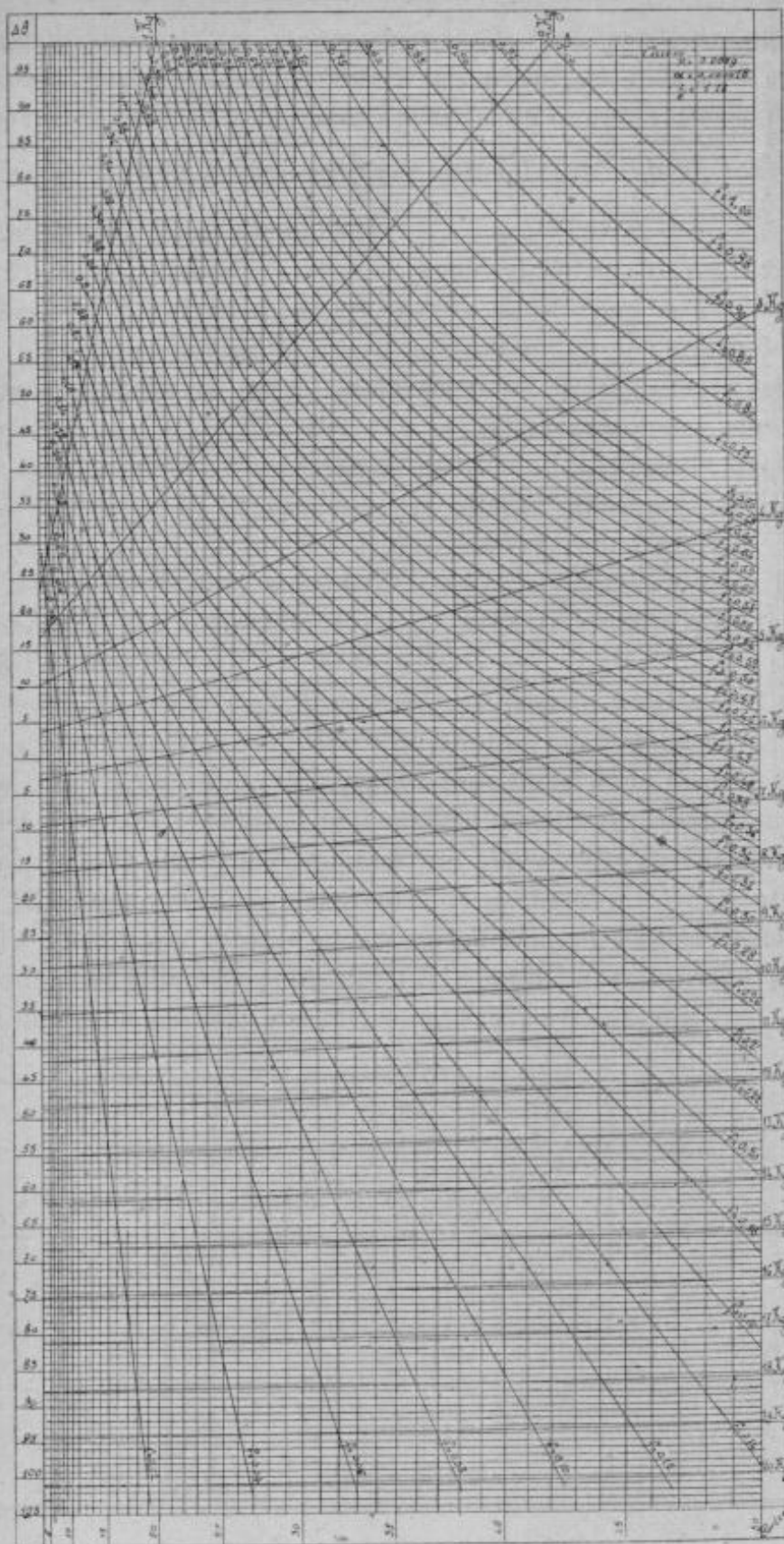
$$\pi' = \sqrt{p^2 + (0,001 \cdot 0,57 \cdot Pd)^2}$$

et en déduit :

$$\pi' = \sqrt{\pi^2 + \frac{1}{8^2} (0,001 \times 0,57 \times Pd)^2},$$

DIAMÈTRE du FIL (d)	SECTION du FIL (s)	EFFORT PAR MÈTRE DÙ AU VENT P DE (p = Pd × 0.57)					COEFFICIENT $\frac{\pi}{\pi}$ CORRESPONDANT						
		125	150	180	200	280 ⁴	125	150	180	200	280 ⁴	a	b
2 mm.	3,1416	0,1325	0,1710	0,2052	0,2280	0,3402	5,488	6,482	7,398	8,206	11,417	2,344	3,134
2,5	4,9087	0,1784	0,2137	0,2565	0,2850	0,3990	4,493	4,988	5,949	6,592	9,177	2,226	2,662
3	7,0686	0,2137	0,2565	0,3078	0,3420	0,4788	3,538	4,194	4,988	5,521	7,668	2,159	2,363
3,5	9,6211	0,2494	0,2993	0,3591	0,3993	0,5586	3,076	3,634	4,307	4,761	6,592	2,118	2,472
4	12,566	0,2850	0,3420	0,4104	0,4560	0,6384	2,735	3,214	3,800	4,494	5,789	2,091	2,034
4,5	15,904	0,3206	0,3847	0,4617	0,5130	0,7182	2,474	2,893	3,408	3,755	5,466	2,072	1,935
5	19,635	0,3562	0,4275	0,5130	0,5700	0,7980	2,269	2,640	3,098	3,408	4,670	2,059	1,859
5,5	23,758	0,3919	0,4702	0,5643	0,6270	0,8778	2,104	2,436	2,847	3,426	4,265	2,049	1,803
6	28,274	0,4275	0,5130	0,6156	0,6840	0,9576	1,970	2,269	2,640	2,893	3,930	2,041	1,759
6,5	33,183	0,4631	0,5557	0,6669	0,7410	1,037	1,858	2,158	2,467	2,698	3,648	2,035	1,722
7	38,485	0,4987	0,5985	0,7182	0,7980	1,117	1,765	2,011	2,321	2,533	3,408	2,030	1,693
7,5	44,179	0,5344	0,6412	0,7695	0,8550	1,197	1,686	1,912	2,195	2,391	3,201	2,026	1,670
8	50,266	0,5700	0,6840	0,8208	0,9420	1,277	1,618	1,825	2,088	2,269	3,021	2,023	1,650
8,5	56,745	0,6056	0,7267	0,8724	0,9690	1,357	1,560	1,751	1,994	2,162	2,843	2,020	1,633
9	63,617	0,6412	0,7690	0,9234	1,0260	1,436	1,510	1,686	1,912	2,068	2,724	2,018	1,620

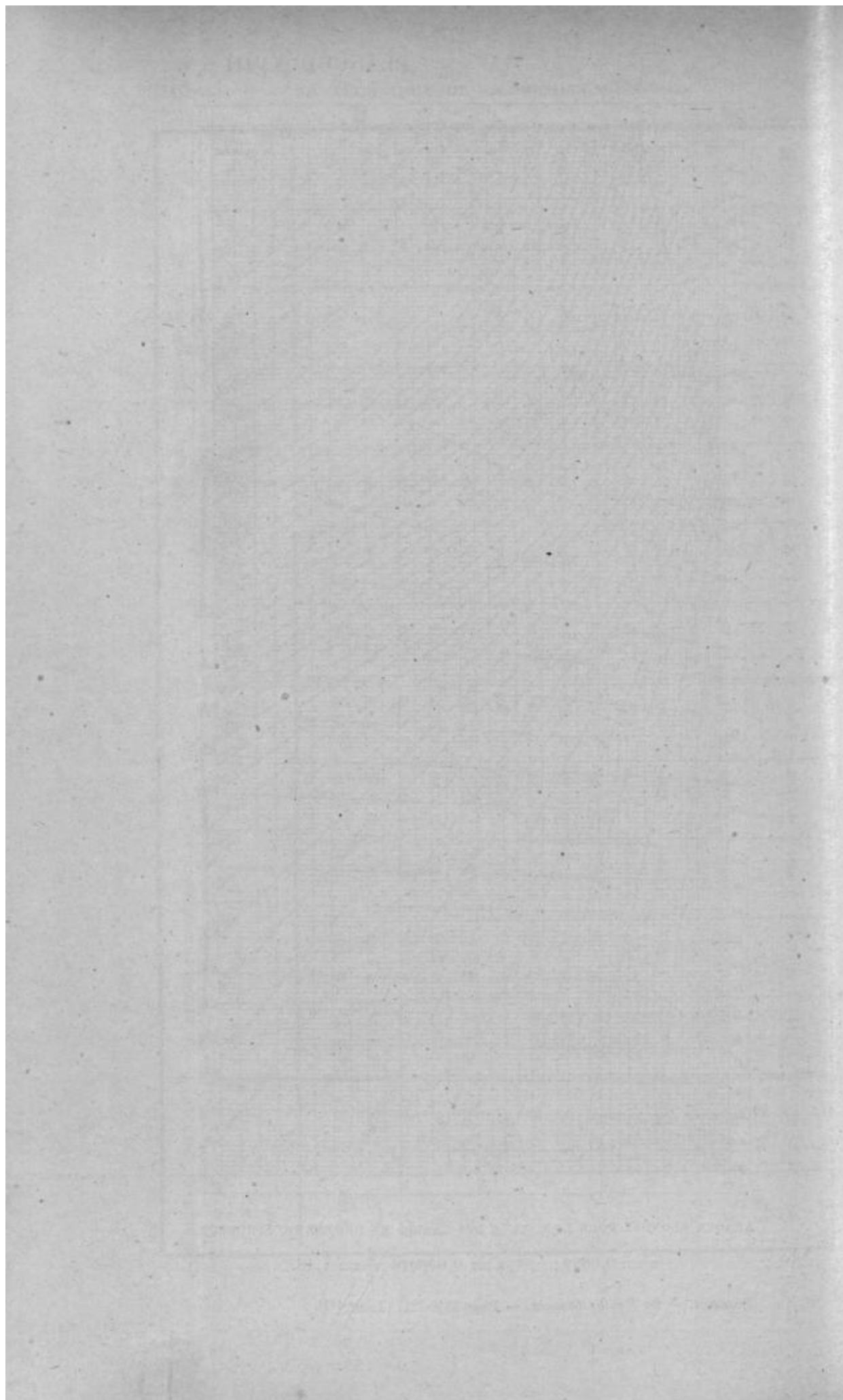
PLANCHE XVIII



ABaque BLONDEL POUR LE CALCUL DES CABLES EN BRONZE PHOSPHOREUX

$$\pi = 0,0089; \quad \alpha = 0,000018; \quad \frac{1}{\beta} = 1,18.$$

PAGORET. — *La Houille Blanche*. — Page 2210-2211 (Tome III).



dans lesquelles P est la pression exercée par le vent, par mètre carré de surface plane, supposé dans une direction horizontale, p le poids propre par unité de longueur et π' le poids apparent ou force résultante uniformément répartie. D'où le rapport $\frac{\pi'}{\pi}$ par lequel il faut multiplier la portée et la flèche dans le calcul par l'abaque.

M. A. Blondel a dressé le tableau ci-avant et la (*fig. 5*) qui le traduit en courbes. Ils indiquent quelques valeurs de ce rapport ainsi calculé pour des fils cylindriques de diamètres de 2 à 9 millimètres (on ne descend pas au-dessous et on va guère au-dessus pour des fils simples) et pour des efforts du vent P de 125, 150, 160 et 200 kilogrammes par mètre carré de surface plane. On dresserait aisément des tableaux analogues pour des fils câblés; ou bien on peut les calculer dans chaque application.

Dans le cas du verglas, le poids de celui-ci s'ajoute à p dans la formule précédente, en même temps que sa présence modifie le diamètre d soumis à l'action du vent.

De même que pour le vent, les surcharges dues au verglas sont passablement arbitraires. Pour compléter à ce point de vue le tableau et l'épure de la (*fig. 5*, Pl. XVI), M. A. Blondel fait deux hypothèses assez usuelles : un verglas doublant le poids et triplant le diamètre du conducteur combiné avec un vent de 10 kilogrammes par mètre carré de surface plane ($0,57 \times 10$ kilogrammes par mètre carré de section droite), ce vent étant celui qui suffit à briser la glace, et, en second lieu, un verglas doublant le diamètre et multipliant le poids par 1,5, combiné avec un vent un peu plus fort de 30 kilogrammes par mètre carré de surface plane.

t degrés C.	$l = 40 \text{ m.}$		$l = 60 \text{ m.}$		$l = 80 \text{ m.}$		$l = 100 \text{ m.}$		$l = 120 \text{ m.}$		OBSERVATIONS
	$\frac{p}{\text{kg} : \text{mm}^2}$	f cm	$\frac{p}{\text{kg} : \text{mm}^2}$	f cm	$\frac{p}{\text{kg} : \text{mm}^2}$	f cm	$\frac{p}{\text{kg} : \text{mm}^2}$	f cm	$\frac{p}{\text{kg} : \text{mm}^2}$	f cm	
-20	9	3	7,2	17	4,8	49	2,95	122	2,15	227	Poids propre seul.
-10	7,4	7	5,7	22	3,7	61	2,45	142	2	253	
0	5,6	10	4,3	30	2,8	79	2,15	168	1,9	278	
+10	4,2	15	3	40	2,2	100	1,9	194	1,8	302	
+20	3	22	2,2	52	1,9	122	1,75	220	1,7	328	
+30	2	30	1,8	67	1,7	145	1,65	246	1,6	352	Poids propre et surcharge de glace.
+5	8,5	41	9	89	9	167	9	246	9	355	

La comparaison de ces courbes a et b avec les précédentes montre que, pour les petits fils, les surcharges du vent jouent un rôle prépondérant, tandis que, pour les gros fils et les câbles, l'action du verglas devient

du même ordre. L'action combinée du froid et du verglas deviendra alors la plus importante pour le calcul des efforts maxima.

En outre, pour les fils usuels, plus gros que 3 millimètres, et pour les efforts normaux du vent, inférieurs à 150 kilogrammes par mètre carré de surface plane, le rapport $\frac{\pi'}{\pi}$ est inférieur à 5 en général.

Comme les portées moyennes sont de 50 mètres, M. A. Blondel n'a pas cru devoir étendre les portées fictives sur l'abaque au delà de 250 mètres pour la pratique ordinaire.

NOUVEL ABAQUE LOGARITHMIQUE DE M. BLONDEL (1913, Pl. XX). — Ici l'auteur cherche à employer d'autres variables que x et θ de l'épure de 1902.

1° Variables f et x .

Équation de la flèche en fonction de la portée :

$$\log f = \log \pi - \log 8 - \log t + 2 \log x$$

et si l'on pose :

$$f = y \quad \text{et} \quad \log x = z,$$

on a :

$$y = a + bz.$$

Si donc on porte en abscisses les logarithmes des portées et en ordonnées les logarithmes des flèches, les courbes isostases obtenues pour chaque valeur fixe de la tension t sont des lignes droites toutes parallèles entre elles.

D'autre part on déduit des équations précédentes :

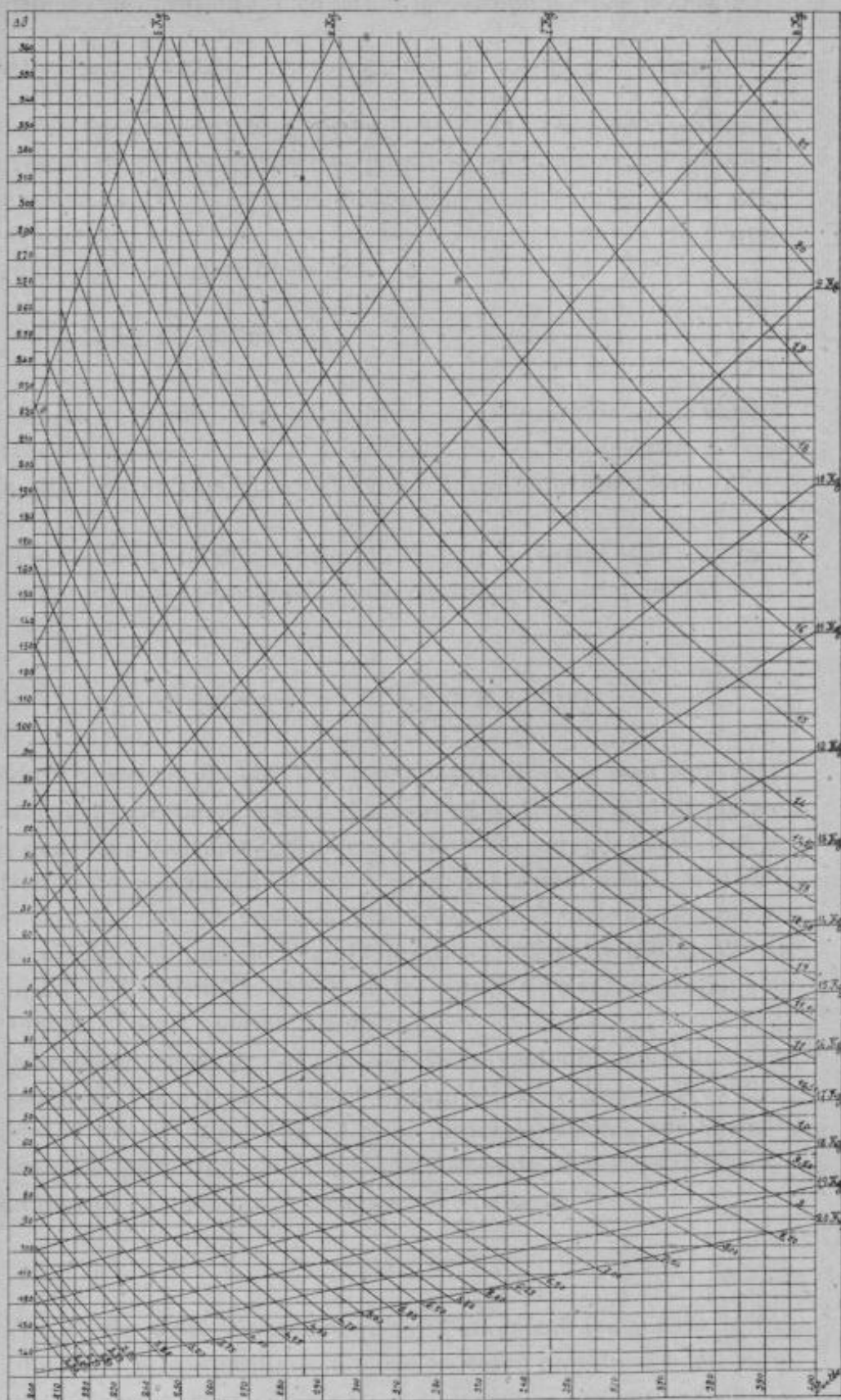
$$f = \frac{8t}{\pi} \left(\alpha \theta + \frac{t}{\beta} \right) \quad (1)$$

qui, pour une valeur constante de t , donne une relation linéaire entre f et θ .

Pour avoir les courbes isothermes, il suffit dans cette équation, de donner à θ une valeur constante et d'en déduire f correspondant. En traçant une horizontale de hauteur constante $y = \log f$ jusqu'à sa rencontre avec la ligne isostase de tension correspondante à cette flèche, c'est-à-dire $t = \frac{8f}{\pi a^2}$, on obtient un point de la courbe isotherme. Par points répétés on obtient un réseau de courbes isothermes. Mais l'épure présente des inconvénients (abaque 1912).

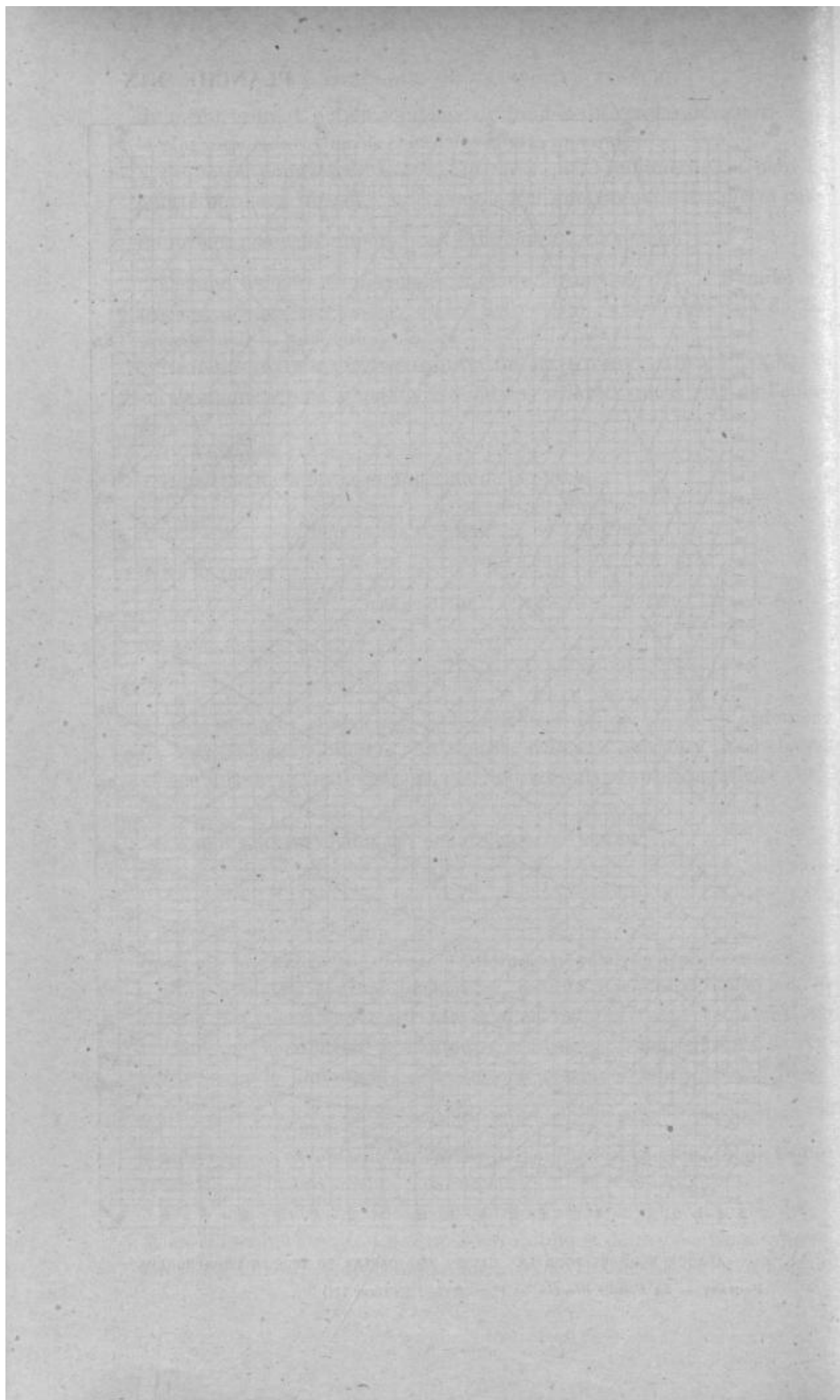
On a une solution plus satisfaisante en prenant pour variables t et f , et en éliminant ensuite f par un réseau oblique de droites isométriques. On porte d'abord en abscisses les logarithmes des flèches et en ordonnées

PLANCHE XIX



ABAQUE BLONDEL POUR LE CALCUL DES CABLES EN BRONZE PHOSPHOREUX

PACOBET. — *La Houille Blanche*. — Page 2212-2213 (Tome III).



les logarithmes des tensions. L'équation logarithmique des flèches est :

$$y = \log f = \log \pi + 2 \log \alpha - \log 8 - \log t = \log \pi + 2 \log \alpha - \log 8 - z,$$

en linéaire en fonction de y et z , quand α est donné. On peut donc tracer tout un réseau de droites isothermes parallèles en donnant à α une série de valeurs constantes et en prenant comme variables y et z . On peut ensuite tracer par points les courbes isothermes, au moyen de l'équation (1), qui s'écrit en logarithmes :

$$y = \log f = \log 8 - \log \pi + \log t + \log \left(\alpha \theta + \frac{t}{\beta} \right).$$

Pour chaque valeur fixée de θ on se donne un certain nombre de valeurs de t et l'on calcule les valeurs de y correspondantes. En prenant successivement diverses valeurs fixées de θ on obtient tout un réseau d'isothermes.

On trace l'épure pour des valeurs du travail T variant de 4 à 15 kilogrammes, dans l'hypothèse d'un bronze phosphoreux ordinaire ayant les constantes :

$$\pi = 0,0089; \alpha = 16,5 \cdot 10^{-6}, \frac{1}{\beta} = 78,9 \times 10^{-6}.$$

En faisant varier les flèches de 0 à 100, les indications sont suffisantes pour des calculs de lignes ayant des portées entre 25 et 150 mètres, puisque, dans les conditions ordinaires d'effort du vent, le coefficient de majoration m pour des conducteurs d'au moins 3 millimètres n'atteint pas la valeur 4. Les isothermes ont été créées de 2° en 2° au-dessous du zéro (zéro arbitraire), puis de 5° en 5° jusqu'à l'isotherme 100, de 25° en 25° jusqu'à l'isotherme 500; de 50° en 50° jusqu'à l'isotherme allant de 500 à 2.000 et de 100° en 100° au-dessus.

Exemples d'application de l'abaque. — En suivant différentes horizontales à partir de l'échelle des tensions jusqu'à leur rencontre avec l'isotherme de 50 mètres (*fig. 1343, a*) et en lisant les flèches sur l'échelle supérieure on a les valeurs de t pour une portée de 50 mètres, les coefficients de travail (K. par mm²) correspondant aux flèches :

$$t = 8, 9, 25, 40, 44; \quad f = 0,345, 0,30, 0,275 \quad \text{et} \quad 0,255.$$

De même la (*fig. 1343, b*) montre qu'avec un même travail du métal, de 10 kilogrammes par millimètre carré on devra prendre des flèches et des portées correspondant comme il est indiqué sur la figure : flèche en mètres, 0,25 ; portée en mètres, 47^m,50.

Inversement, on voit en suivant la verticale 0^m,50 jusqu'à la rencontre

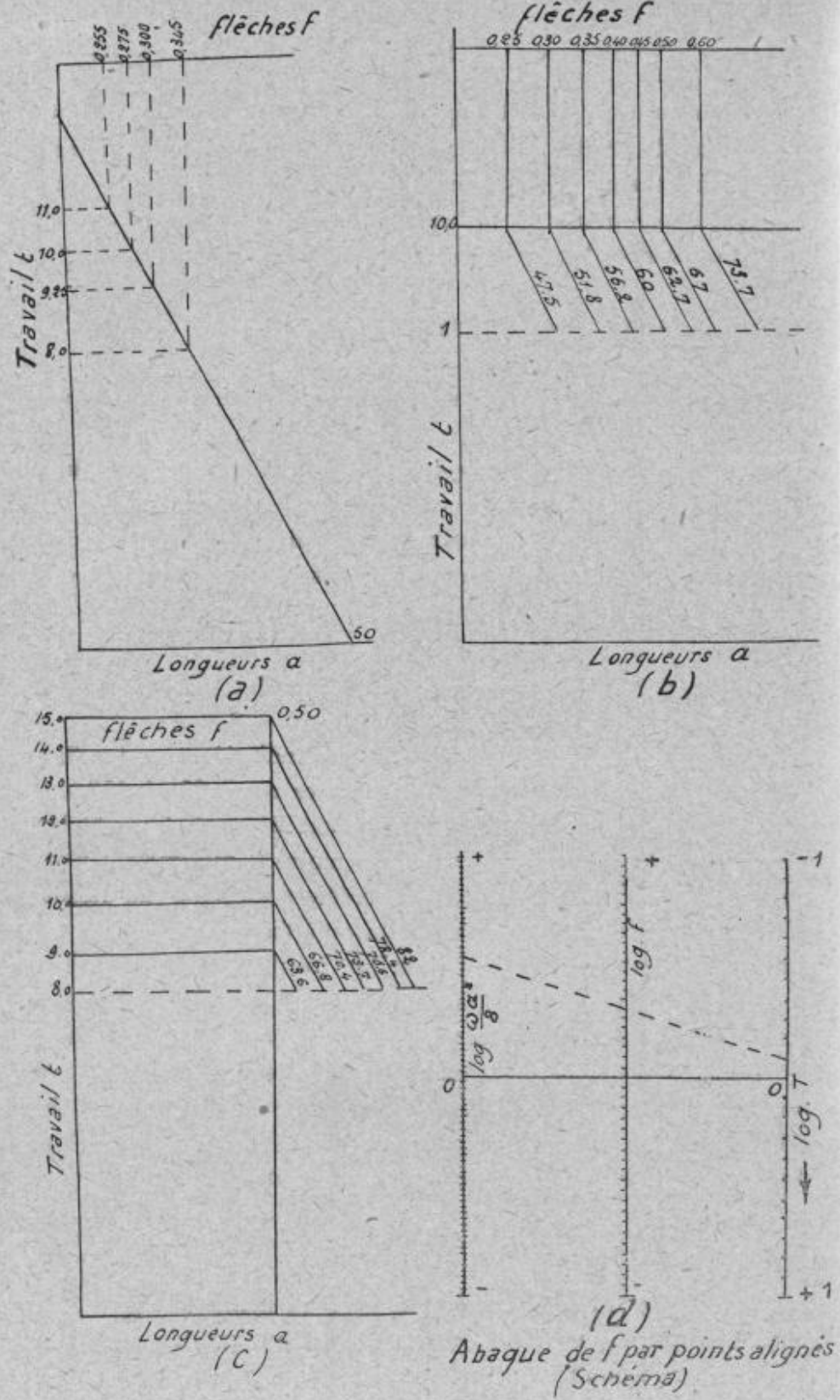
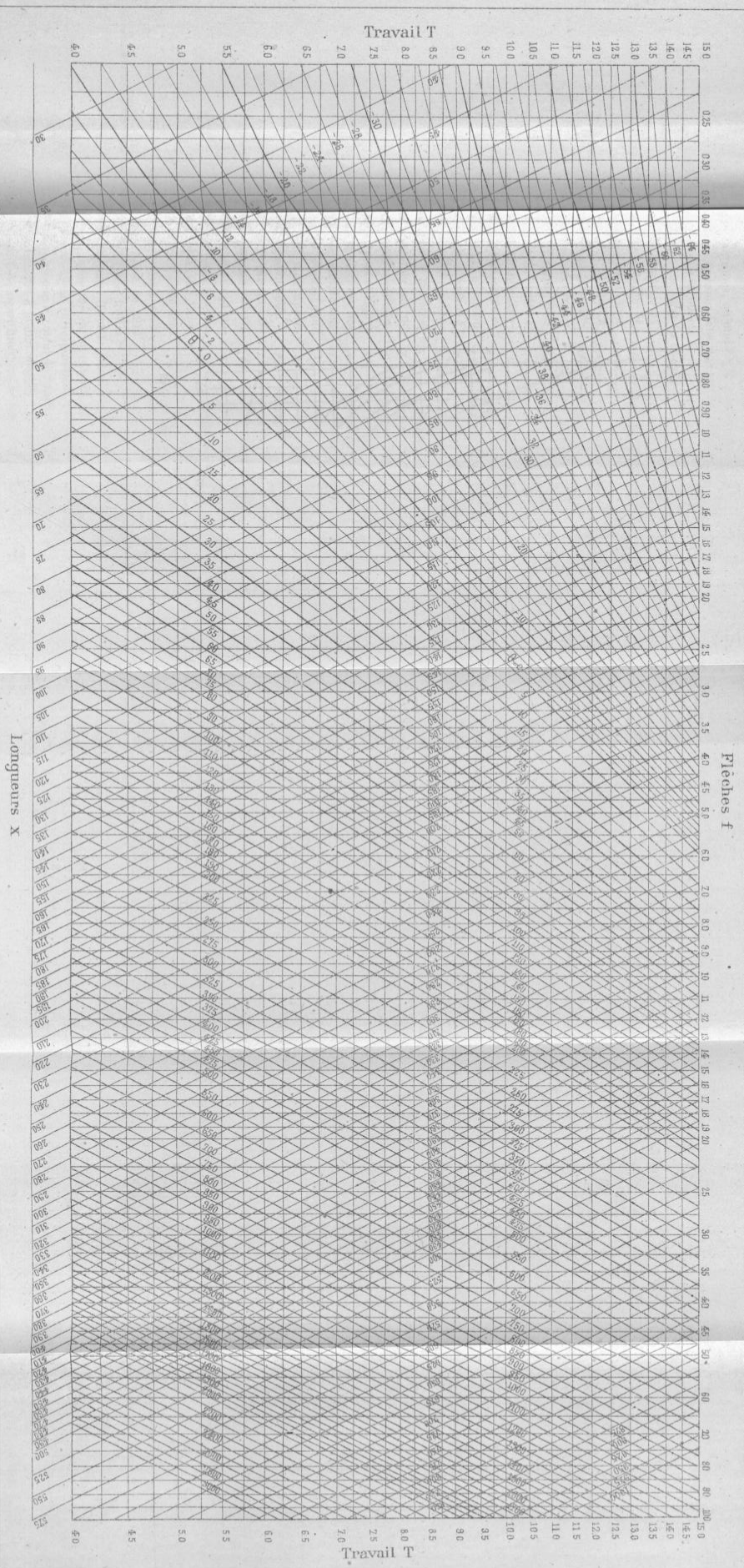
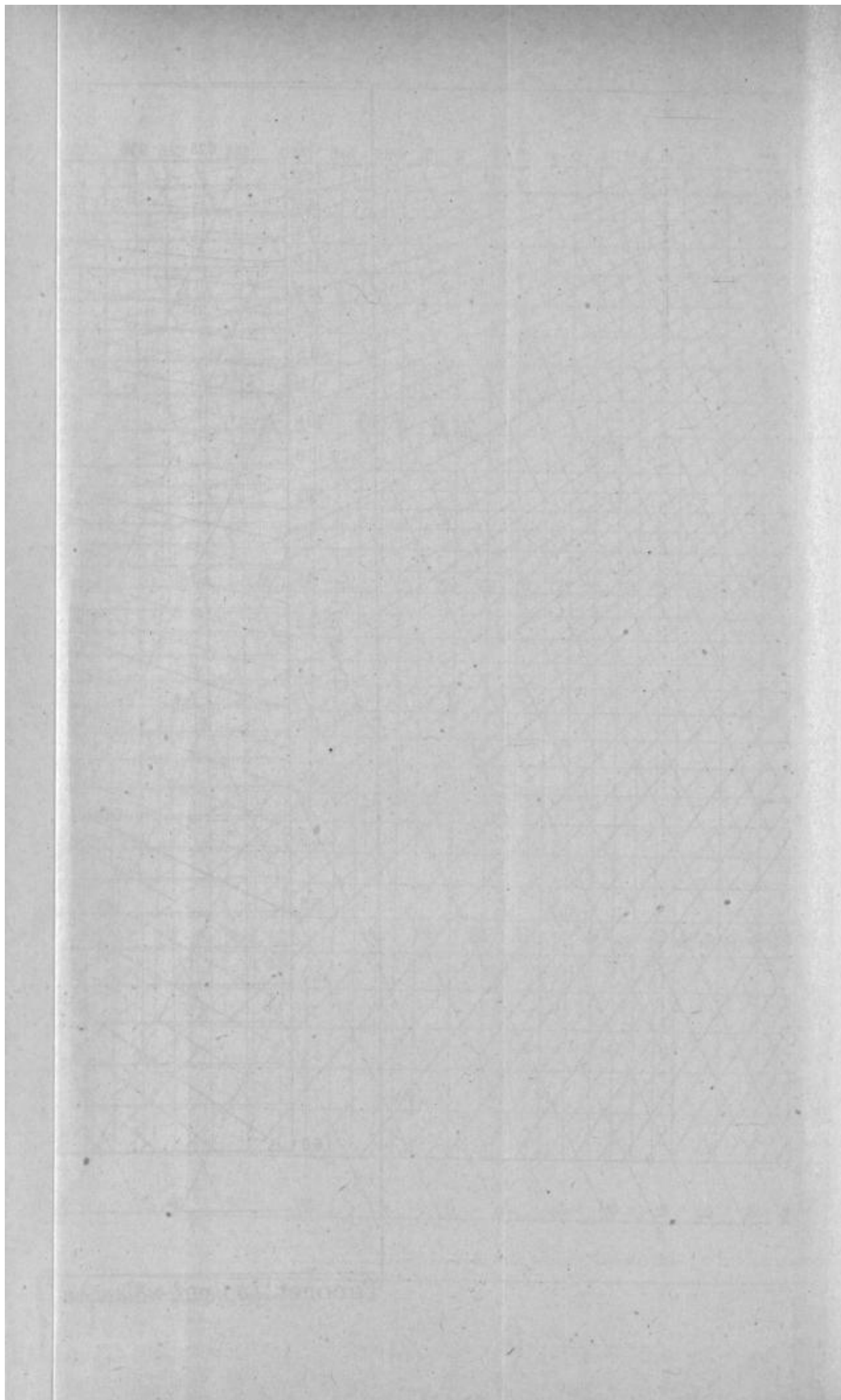


FIG. 1343.

Planche XX.





des isométriques, qu'une flèche f constante de 0,50 produit des tensions du métal correspondant aux portées comme il suit (fig. 1343, c) : tension 9, portée 63,60, etc.

Comparaison entre les abaques 1902 et 1913. — L'abaque de 1902 est le plus simple mais il est plus long à établir et ses dimensions sont grandes. L'abaque a son réseau isométrique formé de droites et a une forme plus réduite et se prête à une plus grande étendue de variation de a ; on lit l avec précision et facilité ; de même f . Mais le tracé est plus laborieux et la nécessité de tracer sur (un calque) des courbes interposées isométriques et isothermes est une sujétion supplémentaire. Le choix est donc une question d'appréciation personnelle.

Combinaison des deux abaques. — On peut combiner l'emploi des deux abaques en traçant sur l'abaque de 1912 seulement les courbes isostases et sur l'abaque de 1913 seulement les droites

isothermiques. Tout le calcul des tensions de pose se fait sur le premier abaque et une fois qu'on connaît la tension définitive on lit sur le deuxième abaque la flèche correspondante d'après la portée adaptée. L'abaque logarithmique pour le calcul de f peut d'ailleurs être remplacé par un abaque logarithmique à points alignés très simple (fig. 1343, d) en portant sur des échelles logarithmiques parallèles mais de sens inverse, respectivement les valeurs de $\log \frac{\pi a^2}{8}$ et de $\log l$, et traçant au milieu en r des

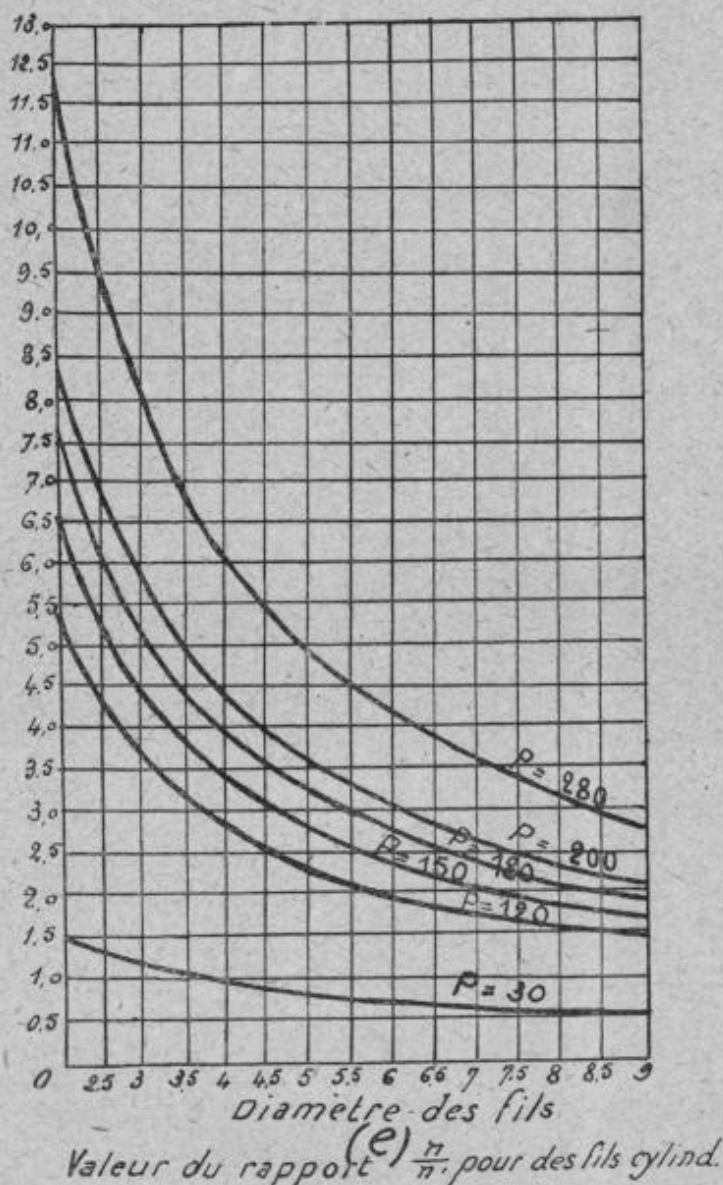
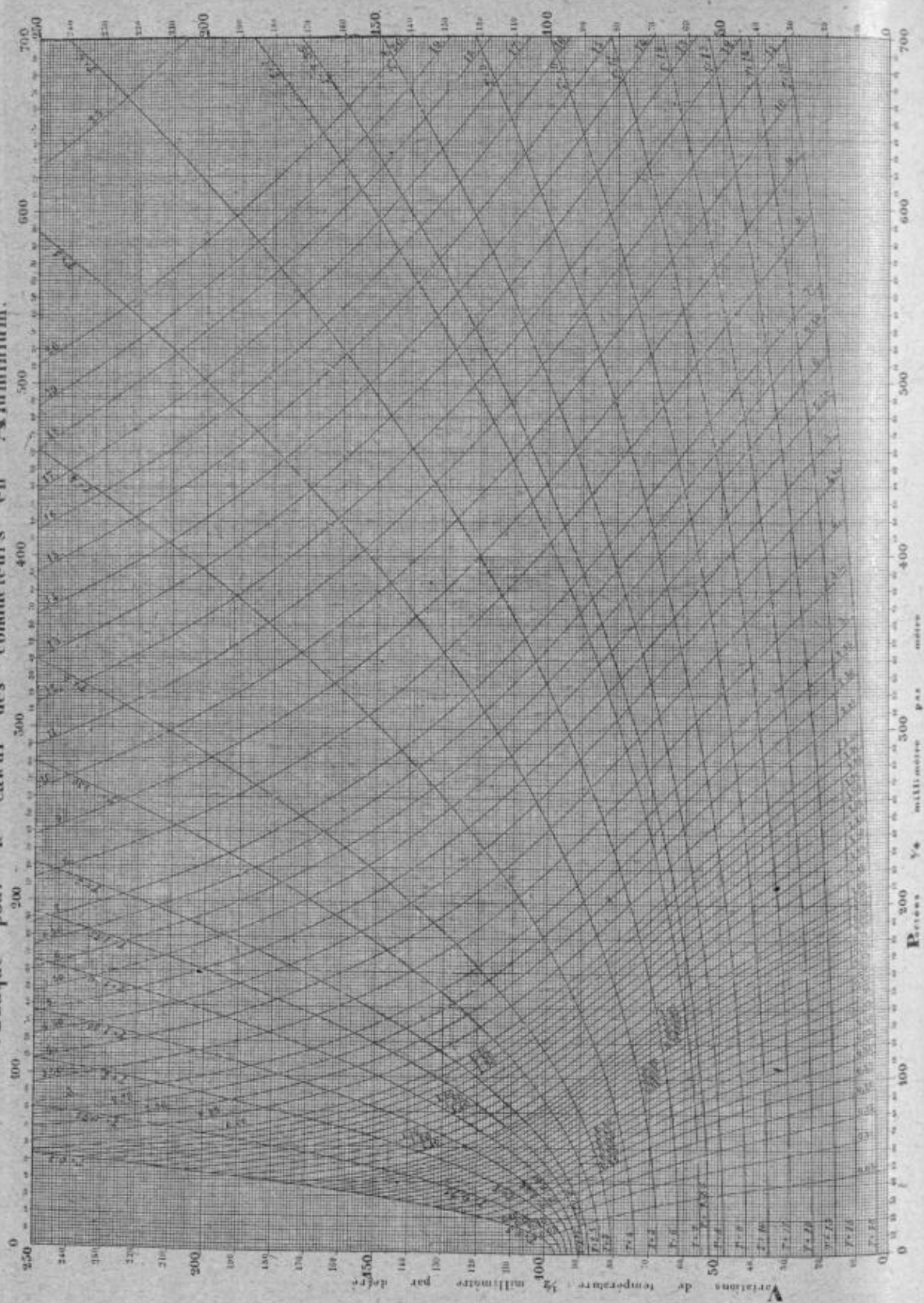


FIG. 1343 bis.

Abaque pour le calcul des conducteurs en Aluminium.



échelles une troisième échelle logarithmique graduée par rapport à $-\frac{\log f}{2}$.

On a en effet $\log f = \log \frac{\pi a^2}{8} + (-\log t)$, tandis que le segment inter-

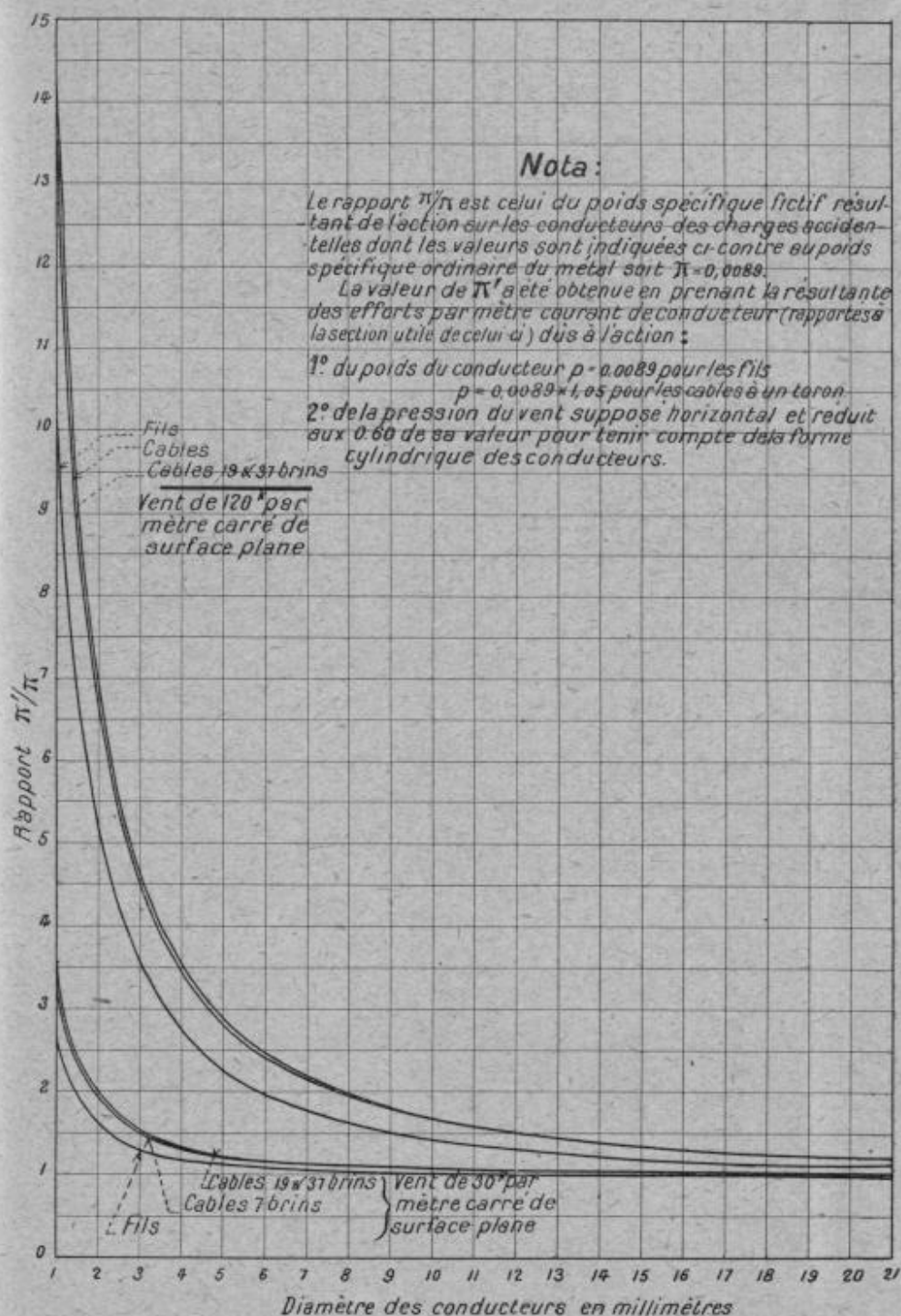


FIG. 1315.

cepté sur l'échelle centrale sera la moyenne des segments pris sur les deux échelles extrêmes.

L'aluminium, pour les raisons que nous avons données, entrant de plus en plus dans la pratique des lignes aériennes, on a songé à établir

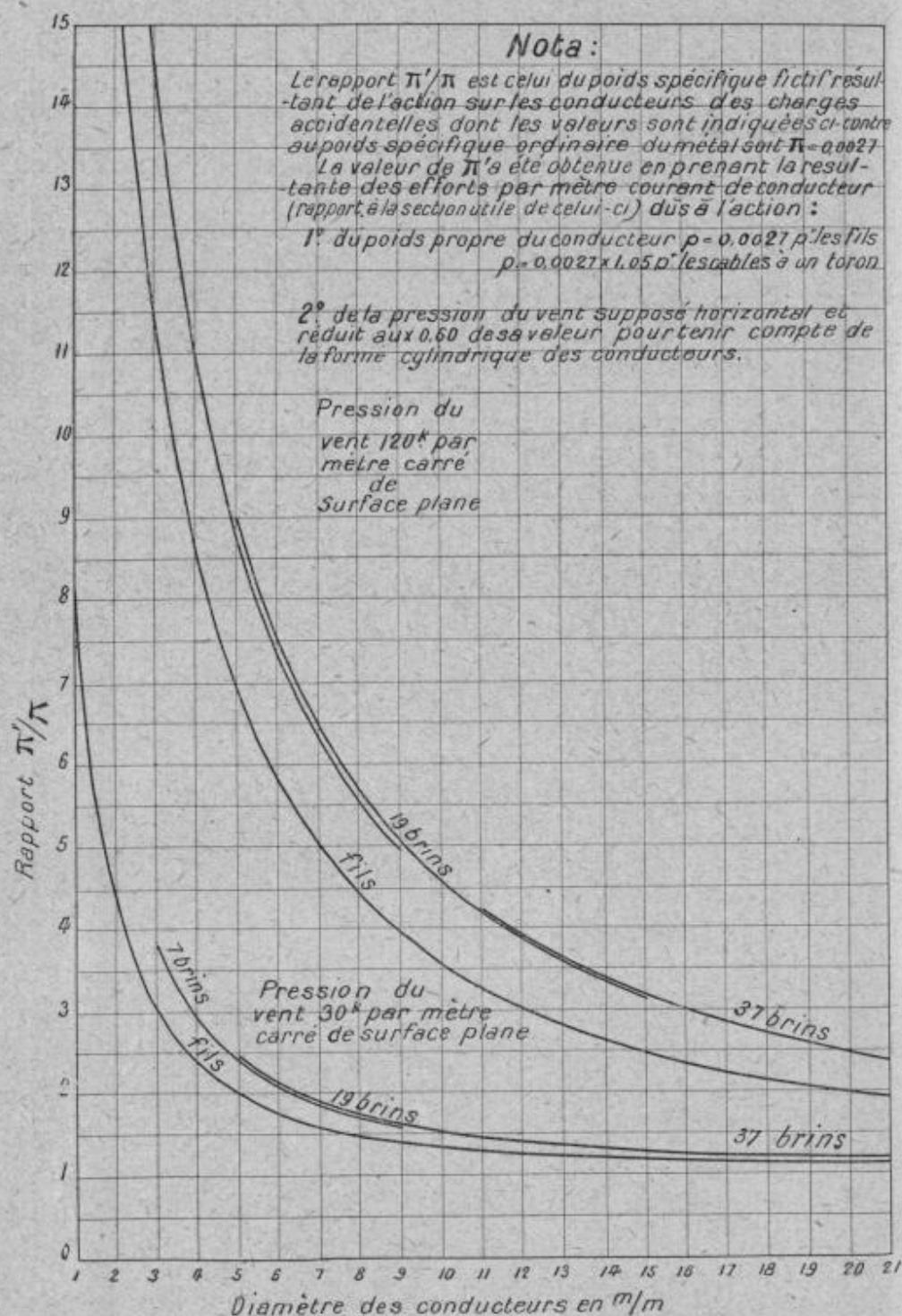
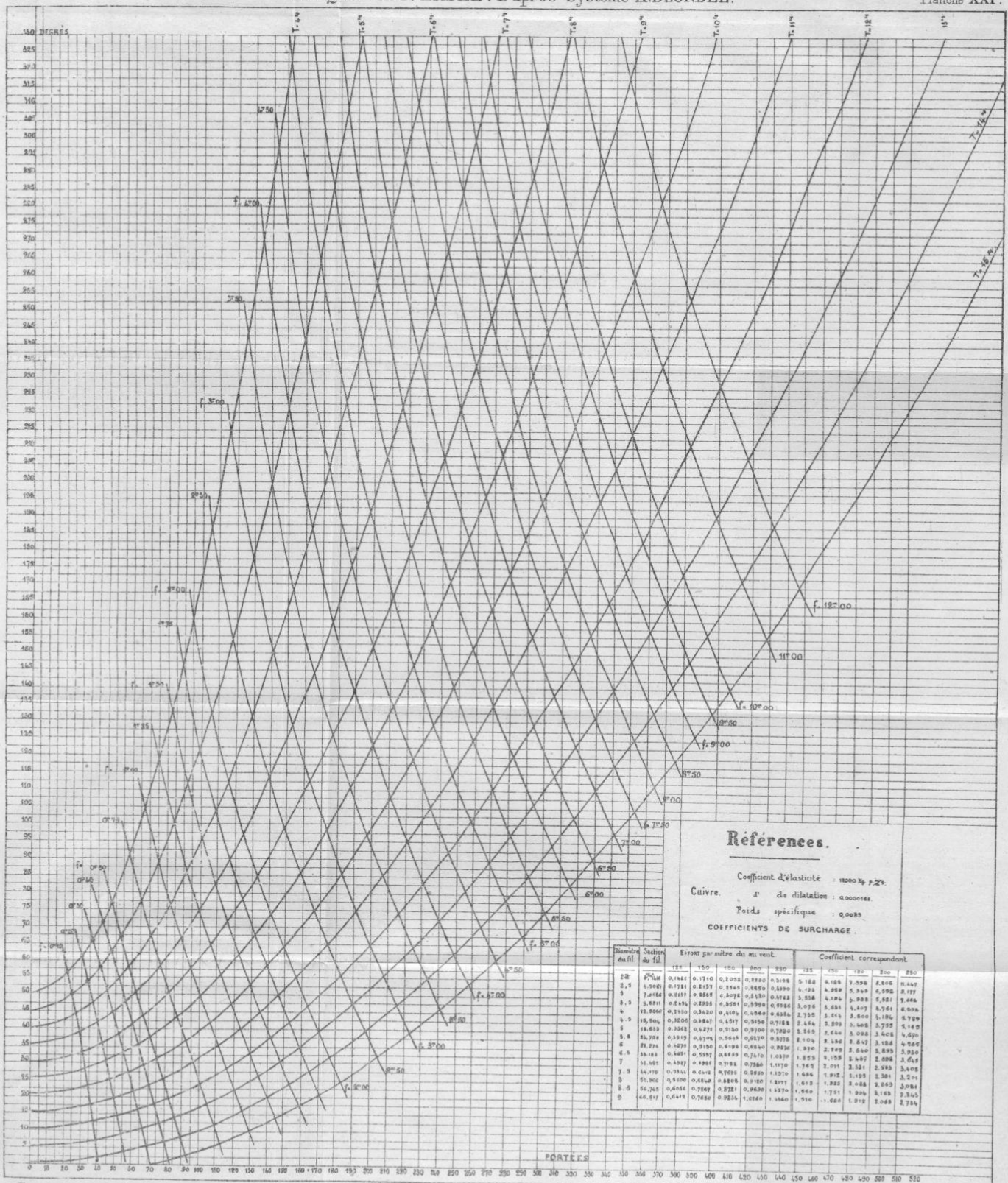


FIG. 1346.

des abaques pour ce métal utilisé comme conducteur d'énergie. Les planches (XXI et XXII) ont trait à un abaque calculé par M. P. Ferrier.

	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
1.2240	0.3198	5.188	7.396	8.806	10.447												
1.6650	0.3990	4.193	4.989	5.348	5.596	5.777											
1.1120	0.4723	3.538	4.194	4.988	5.521	7.428											
1.3998	0.5586	3.076	3.631	4.207	4.764	6.508											
1.4568	0.6324	2.735	3.213	3.800	4.394	5.789											
1.5150	0.7182	2.454	2.901	3.408	3.753	5.163											
1.5700	0.7980	2.169	2.640	3.028	3.408	4.670											
1.6270	0.8778	1.904	2.356	2.847	3.126	4.265											
1.6840	0.9576	1.670	2.149	2.640	2.895	3.930											
1.7410	1.0370	1.458	1.955	2.457	2.698	3.648											
2.7980	1.1170	1.263	2.011	2.321	2.523	3.408											
1.8550	1.1970	1.086	1.912	2.193	2.391	3.204											
1.9120	1.2771	0.918	1.825	2.088	2.269	3.081											
1.9690	1.3570	0.860	1.751	1.934	2.183	2.945											
2.0260	1.4360	0.810	1.686	1.812	2.068	2.784											

M. P. Ferrier *log^r de la S^{te} des Forces Motrices du Sud-Ouest*



References.

Coefficient d'élasticité : 12000 kg p. cm².
 Cuivre. α de dilatation : 0.000012.
 Poids spécifique : 8.930.
 COEFFICIENTS DE SURCHARGE.

Diamètre du fil	Section du fil	Erreur permise du au vent					Coefficient correspondant				
		100	150	200	250	300	100	150	200	250	300
2.0	0.0001	0.1482	0.1710	0.1932	0.2150	0.2368	5.182	4.185	3.538	3.008	2.647
2.5	0.0002	0.1781	0.2055	0.2328	0.2598	0.2865	4.121	3.288	2.748	2.377	2.117
3.0	0.0003	0.2081	0.2405	0.2728	0.3048	0.3365	3.538	2.885	2.448	2.147	1.947
3.5	0.0004	0.2381	0.2755	0.3128	0.3508	0.3865	3.075	2.585	2.248	1.997	1.817
4.0	0.0005	0.2681	0.3105	0.3528	0.3948	0.4365	2.735	2.345	2.048	1.847	1.707
4.5	0.0006	0.2981	0.3455	0.3928	0.4398	0.4865	2.475	2.145	1.898	1.727	1.627
5.0	0.0007	0.3281	0.3805	0.4328	0.4848	0.5365	2.275	1.995	1.798	1.667	1.587
5.5	0.0008	0.3581	0.4155	0.4728	0.5298	0.5865	2.125	1.885	1.728	1.627	1.567
6.0	0.0009	0.3881	0.4505	0.5128	0.5748	0.6365	1.975	1.775	1.648	1.587	1.547
6.5	0.0010	0.4181	0.4855	0.5528	0.6248	0.6965	1.825	1.655	1.558	1.517	1.487
7.0	0.0011	0.4481	0.5205	0.5928	0.6698	0.7465	1.675	1.525	1.448	1.427	1.407
7.5	0.0012	0.4781	0.5555	0.6328	0.7148	0.7965	1.525	1.395	1.338	1.327	1.317
8.0	0.0013	0.5081	0.5905	0.6728	0.7648	0.8565	1.375	1.265	1.228	1.227	1.227
8.5	0.0014	0.5381	0.6255	0.7128	0.8148	0.9165	1.225	1.135	1.108	1.107	1.107
9.0	0.0015	0.5681	0.6605	0.7528	0.8648	0.9765	1.075	1.005	0.988	0.987	0.987
9.5	0.0016	0.5981	0.6955	0.7928	0.9148	1.0365	0.925	0.875	0.868	0.867	0.867
10.0	0.0017	0.6281	0.7305	0.8328	0.9648	1.0965	0.775	0.745	0.748	0.747	0.747

M. Dusaughey, très partisan des conducteurs en aluminium, a dressé l'abaque représenté par la (fig. 1344). Dans cet abaque, le poids spécifique $\pi_a = 0,0027$, le coefficient d'élasticité $E_a = 6,75 \times 10^3$ et le coefficient de dilatation $\alpha_a = 0,000023$. Cet abaque est complété par les graphiques (fig. 1345 et 1346), qui donnent le rapport $\frac{\pi'}{\pi}$ (π' étant le poids spécifique fictif du fil soumis à l'effet d'une surcharge dans les deux hypothèses du règlement administratif du 21 mars 1908.

Comme dans le cas de l'aluminium, on a généralement affaire à du câble, M. Dusaughey a établi les valeurs du rapport $\frac{\pi'}{\pi}$ non seulement pour des fils, mais aussi pour des câbles à 7, 19 et 37 brins pour lesquels une même section ne correspond pas à un même diamètre apparent et en supposant que le coefficient cylindrique est le même pour des câbles que pour du fil. Il a même établi, pour permettre la comparaison complète au point de vue mécanique, entre l'aluminium et le bronze, les valeurs $\frac{\pi'}{\pi}$ du cuivre dans les deux hypothèses signalées plus haut. On voit, par l'examen du travail de ce distingué ingénieur, que sur les gros conducteurs en aluminium l'action du vent décroît rapidement à des valeurs de flèche très acceptables, que les flèches, toutes conditions égales, au moment de la température maxima, sont plus grandes pour l'aluminium que pour le bronze et que l'écart entre flèches est d'autant plus faible que les portées sont plus grandes, et enfin qu'à égalité des portées, l'écart est d'autant plus faible que les sections des conducteurs sont plus grandes.

Nous avons dit que la détermination des flèches à la température maxima est de toute importance pour fixer les hauteurs des supports, particulièrement dans les grandes portées; cela intéresse surtout les lignes en aluminium où la hauteur des appuis doit être plus grande que pour le cuivre. Mais, d'autre part, la résistance de ces supports, calculés pour résister au renversement en cas de rupture d'une nappe de fils, sera plus faible dans le cas d'une ligne en aluminium, du fait de la tension moindre totale de ces fils.

Méthode monographique. — Nous avons mentionné les hypothèses réglementaires que l'on doit envisager pour la détermination de la flèche des conducteurs. S'il se produit un changement dans les conditions initiales, c'est-à-dire si la température passe de la valeur θ à θ' et que p devienne p' , la tension T prend une nouvelle valeur donnée par l'expression :

$$\alpha (\theta - \theta') = \frac{a^2}{24} \left(\frac{p^2}{T^2} - \frac{p'^2}{T'^2} \right) - \left(\frac{T - T'}{E} \right).$$

Dans la première des hypothèses, T étant la valeur donnée à la tension au moment de la pose on a :

$$\text{Flèche de pose} = \frac{pa^2}{8T} \text{ et } p = \sqrt{p^2 + \left(\frac{72d}{s}\right)^2}.$$

Et le changement des conditions envisagées provoque une nouvelle tension T' , racine de l'équation de 3^e degré :

$$\theta = \left(\frac{a^2}{24} \frac{p^2}{T^2} - \frac{p'^2}{T'^2} \right) - \epsilon (T - T')$$

en rappelant que :

$$E = \frac{1}{\epsilon}.$$

Dans la seconde hypothèse on a :

$$\text{Flèche de pose} = \frac{pa^2}{8T} \text{ et } p' = \sqrt{p^2 + \left(\frac{18 \times d}{s}\right)^2}.$$

et la nouvelle tension T'' est la racine de l'équation de 3^e degré :

$$30 \alpha = \frac{a^2}{24} \left(\frac{p^2}{8T} - \frac{p'^2}{8T''} \right) - \epsilon (T - T'').$$

α , coefficient de dilatation de la matière du conducteur.

La nouvelle flèche prise par le conducteur est :

$$f'' = \frac{p'a^2}{8T''},$$

et la contrainte au point d'attache :

$$T_1'' = T'' + p'f''.$$

Enfin le coefficient est $\frac{R}{T''}$.

Par suite, la traction sur les supports dans la direction de la droite joignant les points d'appui a pour valeur :

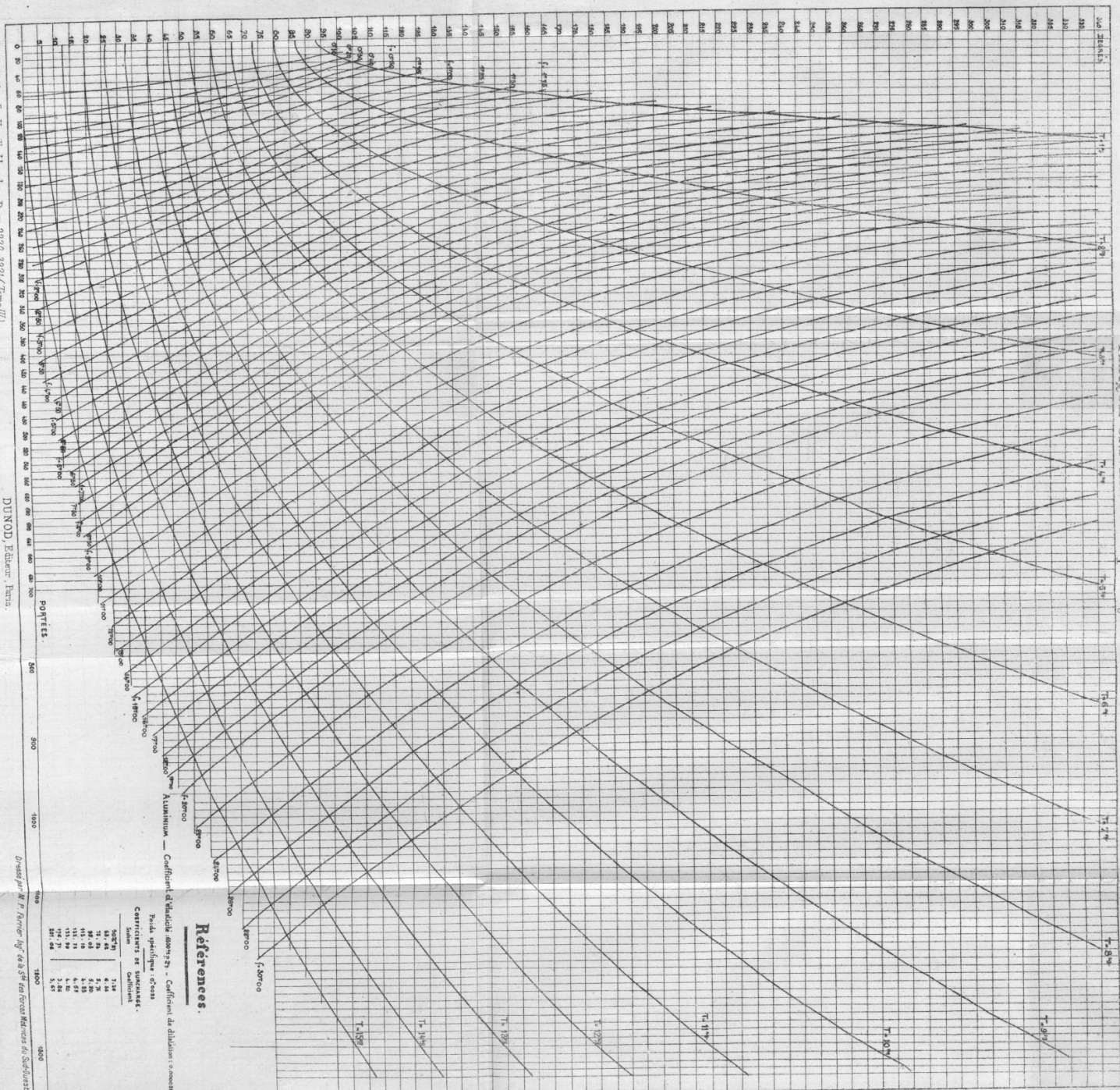
$$T_2'' = T_1'' \cos \beta.$$

β , angle de la direction de la tension de contrainte avec l'horizontale.

La difficulté du calcul réside dans la résolution de l'équation de 3^e degré.

Pour en faciliter l'application M. L. Potin a établi la représentation monographique de cette formule ainsi que celle de la formule :

$$\left(f = \frac{pa^2}{8T} \right).$$



Ainsi ces monogrammes offrent le précieux intérêt d'obtenir à vue les valeurs de la flèche au moment de la pose, de la nouvelle tension et de la nouvelle flèche correspondant à l'état de la température et du vent ⁽¹⁾.

II. — POSE DES CONDUCTEURS

528. Montage des conducteurs aériens. — Les transports d'énergie électrique à grande distance, qui mettent en jeu des puissances considérables et des voltages très élevés, nécessitent des canalisations aériennes étudiées et construites avec un soin tout spécial. En effet, il est arrivé fréquemment que les réseaux les mieux établis au point de vue des usines génératrices, des postes et des sous-stations, ont donné lieu à de nombreuses perturbations, voire même à de graves accidents provoqués par des lignes aériennes conçues et installées avec trop de précipitation.

L'effet des conditions climatiques est relativement plus grand pour les fils fins que pour les gros et, dans les mêmes conditions de flèche et de tension initiales, le fil le plus fin ne donnera pas autant de sécurité qu'un fil plus gros. En ce qui concerne les conducteurs en aluminium, leur limite d'élasticité étant inférieure de 44 0/0 à celle du cuivre et les effets de dilatation étant plus importants, il s'ensuit qu'ils doivent être moins tendus qu'avec le cuivre, que la force latérale sur les poteaux de lignes et les tiges d'isolateurs due à la pression du vent est de 25 0/0 inférieure environ avec les fils d'aluminium, et que la force de traction sur les poteaux d'angle provenant de la tension des fils est aussi plus grande, abstraction faite de l'effet du vent.

L'emploi des pylônes permettant d'augmenter la hauteur des fils par rapport au sol, ceux-ci se trouvent mieux protégés contre les branches d'arbres, les objets lancés, etc.

L'emplacement des pylônes, qui est relativement grand, peut présenter des inconvénients le long des voies fréquentées ou des voies de chemins de fer. On a alors le moyen de recourir à des poteaux tubulaires, mais ils sont dispendieux. En rase campagne, la solution des pylônes présente toute satisfaction.

La distance entre conducteurs est généralement calculée de telle sorte qu'en multipliant par 3,75 le chiffre de la tension en milliers de volts, on obtienne la distance en centimètres à laisser entre fils ; cette règle semble

⁽¹⁾ Le lecteur trouvera ces monogrammes dans l'excellent ouvrage de MM. J. Montpellier et F. A. C. Perrine, *Canalisations Électriques*, Dunod, éditeur, 1914.

Nous signalerons l'intéressant travail de M. l'Ingénieur Moreau paru dans le *Portefeuille Économique* (novembre 1912). Calcul de résistance des lignes électriques.

donner toute sécurité au point de vue des décharges et pour des poteaux écartés de 30 à 70 mètres. Une autre règle consiste à prendre, pour des tensions jusqu'à 40.000 et 50.000 volts, une distance représentée par 7,5VE, si les portées ne sont pas trop grandes. Pour les voltages supérieurs à 50.000 volts, il se produit le long de la ligne des pertes par décharge statique dont il convient de tenir compte. Enfin, d'après le professeur Ryan, les distances entre fils à différentes tensions, pour lesquelles se manifeste l'effet de décharge statique, sont, pour un fil de 30 millimètres de diamètre par exemple : à 46.000 volts, 56 centimètres ; à 50.700 volts, 89 centimètres ; à 54.000 volts, 132 centimètres ⁽¹⁾.

Nous indiquons les écartements ci-après pour les conducteurs aériens :

20.000 volts	60 à 80 mètres	0 ^m ,60 à 0 ^m ,80
30.000 —	80 à 100 —	0 ^m ,80 à 1 ^m ,00
40.000 —	70 à 110 —	1 ^m ,00 à 1 ^m ,20
50.000 —	75 à 120 —	1 ^m ,10 à 1 ^m ,30
60.000 —	80 à 125 —	1 ^m ,20 à 1 ^m ,40

Il est bon, dans les lignes de transport de force, d'admettre une distance d'au moins 10 mètres, pour les fils les plus bas, par rapport au sol, et de faire supporter la ligne téléphonique par des poteaux distincts ; autrement, en outre du danger considérable que court la ligne en cas d'avarie, elle risque d'être inutilisable à ce moment, c'est-à-dire au moment où elle serait le plus utile.

Dans les longues lignes, on traverse le plus souvent des régions qui se comportent d'une façon toute différente au point de vue de la conservation des poteaux. Bien qu'on laisse le long de ces derniers une zone entièrement libre pour arrêter les incendies de forêt, ceux-ci peuvent, sans provoquer la combustion des poteaux, amener la rupture des isolateurs, surtout quand ils sont en verre.

L'établissement des conducteurs se faisant autant que possible par un temps calme et à une température plus élevée que la température minima, il est nécessaire de calculer la tension à donner à la pose ou celle que l'on fait marquer par le dynamomètre en tenant compte des excès de pression qui interviennent du fait des intempéries atmosphériques, et qui, ajoutés à la tension de pose, donnent un chiffre qui, autant que possible, ne doit pas dépasser celui de 8 à 9 kilogrammes que nous avons déjà mentionné.

Selon que la ligne est à installer dans un pays de plaine ou en pays de

⁽¹⁾ Une charge inopinée de la ligne, comme celle produite par un *coup de foudre* (l'expression coup de foudre appliquée aux phénomènes qui se produisent dans les circuits électriques s'applique à toute variation anormale de tension et de fréquence se manifestant sur ces circuits, ou à tout autre changement local brusque), amène une variation de potentiel et, par suite, du courant qui circule sur la ligne. Quand la variation atteint la fin de la ligne, elle se réfléchit et retourne en arrière en formant un ensemble de maxima et de minima analogues aux nœuds et aux ventres des tuyaux sonores.

montagne, c'est l'action des grands vents qui est le plus à craindre dans le premier cas, et les plus grands froids dans le second cas.

La pose des lignes par la mesure de la flèche, d'après M. Picou, dont la haute compétence en électrotechnique donne tant d'autorité à ses avis, offre moins de précision que celle au moyen du dynamomètre, même pour les lignes disposées en terrain plat. On dispose à cet effet de petites mirettes graduées que l'on accroche aux isolateurs des deux poteaux limitant les portées et on vise avec une des mires sur l'autre, de façon à ce que le point le plus bas du fil soit sur la ligne de visée. La flèche, selon nous, ne peut guère être déterminée correctement que par des visées faites à l'aide d'une lunette disposée *ad hoc* sur les poteaux. Celle-ci étant en place sur le dernier poteau posé, on fait une visée suivant la ligne idéale qui joint les points d'appui du fil et la direction de la lunette, ainsi obtenue, est fixée d'une façon immuable. La lunette est ensuite descendue verticalement de la distance correspondant à la hauteur calculée de la flèche et, en visant, on repère dans l'espace une ligne parallèle à celle joignant les points d'appui. On arrête le tirage du fil au moment où le point le plus bas de la chaînette vient se poser tangentiellement à la ligne de visée.

La méthode qui consiste à déterminer la flèche d'une partie de ligne, en faisant osciller transversalement le fil et en comptant les oscillations, est plus commode que la détermination directe à l'aide d'un dynamomètre, en raison des secousses dues aux mouvements de la ligne qui déplacent continuellement l'aiguille de l'instrument.

L'Administration des Télégraphes allemands emploie depuis quelques années une méthode basée sur la propriété que possède la ligne d'osciller comme un pendule avec une oscillation propre dépendant de la flèche. Les oscillations sont provoquées en saisissant le fil de ligne avec la main à une petite distance du point d'attache et en déplaçant le conducteur transversalement. En suivant ces oscillations, il est possible de donner une impulsion au moment propice.

Appelons n le nombre d'oscillations simples par seconde, g l'accélération de la pesanteur, M la masse du fil, à la distance du centre de gravité du système à l'axe de rotation, K le moment d'inertie du pendule, le nombre d'oscillations d'un tel pendule est donné par la relation :

$$n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{gMa}{K}} \quad (1)$$

La courbe affectée par le fil peut être considérée comme une parabole et son moment d'inertie est fourni par l'expression :

$$K = \frac{8}{15} Mf^2,$$

f étant la flèche de la courbe.

On a d'autre part :

$$a = \frac{2}{3} f;$$

si l'on introduit les valeurs de K et de a dans l'équation (1), on a :

$$n_1 = 60 n = \frac{60}{\pi} \sqrt{\frac{15g M 2f}{8M \times 3f^2}} = \frac{60}{\pi} \sqrt{\frac{5}{4} \frac{g}{f}},$$

d'où :

$$f = \frac{60^2 \times 5 \times 980,6}{4 \pi^2 n_1^2} = \frac{447300}{n_1^2} = \left(\frac{669}{n_1}\right)^2,$$

n_1 étant le nombre d'oscillations par minute.

La formule est exacte pour toutes sortes de fils et toutes distances entre poteaux ; elle est également valable pour des lignes supportées par des poteaux de hauteurs inégales.

La ligne doit osciller d'un bloc et non être partagée en un certain nombre d'harmoniques supérieurs ; l'amplitude de l'oscillation ne doit pas dépasser 10° de chaque côté de la verticale. Quant au nombre d'oscillations, il peut être compté facilement par un ouvrier pendant que le conducteur muni d'un compte-secondes mesure le temps.

Les fils écrouis possèdent une résistance mécanique à la rupture double de celle des fils recuits, mais ils offrent moins de malléabilité pour la tension des conducteurs. Un fil, supérieur à 8 millimètres de diamètre, se tend mal, et on emploie rarement des câbles d'une section plus forte que 100 millimètres carrés, en raison de la difficulté pour les tendre et de l'emploi d'isolateurs de trop grandes dimensions. Au-dessus on dédouble la ligne. Les fils en bronze siliceux sont d'un bon usage pour les conducteurs de faible section, permettant, en raison de leur plus grande résistance mécanique, de porter la distance des appuis à un chiffre plus élevé (par exemple 80 mètres au lieu de 50 mètres).

Pour les traversées des fleuves ou les grandes distances, on constitue les conducteurs par un fil ou câble d'acier. La ligne triphasée de Colgate, pour la traversée de la baie de San-Francisco, possède deux énormes pylônes à treillis comportant quatre câbles d'acier (dont un de réserve) formés de dix-neuf fils et ayant un diamètre de 12 millimètres. La distance est de 1.328 mètres, la flèche de 30 mètres, et l'écart des câbles entre eux de 6 mètres.

Nous donnons ci-après les caractéristiques des conducteurs en aluminium, qui permettent d'utiliser des appuis et des ferrures d'isolateurs plus légères qu'avec les lignes en cuivre. Le coefficient de dilatation linéaire de l'aluminium étant 1,4 fois celui du cuivre, de ce fait la ligne est fortement tendue en hiver et pas suffisamment l'été. La pose en est aussi

plus difficile ; il faut éviter de tirer le métal sur les pierres et les corps durs et, en général, de traîner les fils sur le sol et de les laisser glisser sur la tige des isolateurs. Une bonne précaution consiste à faire reposer le fil sur des poulies de bois suspendues aux tiges des isolateurs et de munir les mâchoires de serrage d'une fourrure en bois.

Dans les transports à très haute tension on est conduit à employer des conducteurs en cuivre avec âme en chanvre, à cause de l'effet couronne. M. Blondel, pour le transport à 150.000 volts Rhône-Paris, a adopté un câble de 15 millimètres de diamètre et en éloignant les conducteurs les uns des autres de 3 mètres. L'aluminium peut être utilisé sans recourir à l'âme en chanvre. Parmi les principales installations faites à ce jour au moyen de conducteurs en aluminium nous citerons les lignes ci-après :

Société de la Haute-Durance.....	60.000 volts	120 km
Société des Forces motrices de l'Eau d'Olle	60.000 —	80 —
Société Électrique de la vallée du Rhône..	13.600 —	300 —
Ligne Grenoble St-Chamond.....	60.000 —	150 —
Réseau de Belgard (Poméranie).....	15.000 —	2.000 —
Réseau de Rjukanfos (Norvège).....	11.000 —	125.000 HP
Ontario H. E. Power.....	110.000 —	415 km
Washington Watter Power C ^{ie}	110.000 —	720 —
Southern Sierra Power C ^{ie}	140.000 —	380 —
Pacific Light Power C ^{ie}	150.000 —	450 —
Shawiman Watterand Power.....	100.000 —	145 —

Lorsqu'un angle de la ligne dépasse 25°, il est nécessaire de munir le support d'un armement spécial portant, pour chaque fil, un double isolateur autant pour écarter les fils du support que pour diminuer la fatigue de l'armement en général. On emploie généralement deux armatures simples accolées sur deux faces opposées du support.

Une construction rationnelle des lignes exige autant que possible l'égalité de toutes les portées, car si les tensions unitaires à une température donnée peuvent être les mêmes dans toutes les travées, elles deviennent différentes dès que la température change. Si on a des portées inégales, il faut n'y arriver que graduellement, de manière à reporter la différence sur une ou plusieurs portées adjacentes.

On fait usage de poteaux simples dans les parties droites ainsi que de poteaux doubles tous les cinq appuis environ pour renforcer la stabilité de la ligne. En courbe et dans les angles, on fait usage des poteaux doubles, alors un des poteaux est vertical, l'autre servant de jambe de force. Si la traction est forte ou l'angle prononcé, la jambe de force est doublée par l'accolement d'un second poteau placé dans le plan des deux autres et entretoisé de distance en distance. Quand la place manque, on emploie des poteaux jumelés, où les deux troncs sont séparés par des pièces en bois ou des blocs en fonte.

On obtient de très forts poteaux en bois en disposant des poteaux doubles à branches parallèles, consolidés par des croix de Saint-André et dans les courbes celles-ci sont dédoublées.

Pour les poteaux d'arrêt on les compose le plus généralement de deux poteaux jumelés ; enfin, pour les longues portées on constitue les supports par l'assemblage de poteaux simples, de poteaux pyramidaux plus ou moins complexes.

Une fois les poteaux dressés comme il est expliqué, on les arme de leurs isolateurs, puis on déroule les fils tout le long de la ligne. Pendant ce dévidage on procède à l'examen des défauts qui auraient pu se produire dans les fils (coques, coups, rétrécissements, ruptures, etc.) Le déroulage peut se faire au touret porté sur un chariot à poste fixe et le fil tiré à bras d'homme ou par un cheval, quand on opère dans des terrains mouvants ou d'accès difficiles. Lorsque la ligne est établie le long d'une route, on fixe le conducteur à un poteau et on fait déplacer le chariot tout le long de la ligne. On peut ainsi dévider plusieurs conducteurs à la fois avec plusieurs tourets, en évitant de laisser traîner les fils sur le sol.

Si les fils sont en aluminium on les fait reposer sur des poulies en bois à gorge arrondie que l'on accroche aux ferrures des isolateurs. Les conducteurs étant déroulés, on les monte à l'aide de fourches sur les traverses ou les ferrures des isolateurs et on procède au réglage de la ligne en donnant aux conducteurs la flèche et la tension préalablement calculés, en tirant sur la corde d'un palan amarré à une barre de fer dans le sol. Le crochet du palan est relié au conducteur au moyen d'un serre-fil ou d'une pince garnie d'une fourrure en bois. Entre le conducteur et le palan est fixé un dynamomètre. Puis on fixe les conducteurs dans la gorge ou contre le collet des isolateurs, en prenant la précaution, aux changements de direction, de les disposer de façon que la tension tende à les appuyer contre les isolateurs pour éviter de fatiguer leurs attaches. Les ligatures des conducteurs aux isolateurs se font à l'aide de fil de cuivre recuit de 3 millimètres de diamètre.

La jonction des conducteurs électriques au moyen de la soudure donne de bons résultats, à la condition d'être bien faite mais elle doit être limitée aux points où la tension des conducteurs est modérée. Dans la méthode ordinaire, on enduit les fils à souder d'une matière servant à dissoudre les oxydes (acide chlorhydrique, chlorure de zinc, sel ammoniac, etc.), opération qui doit toujours précéder l'application de la soudure, laquelle se fait à l'aide d'un fer à souder ou d'une lampe à souder.

On évite cette préparation en faisant usage de « Tinol, » car on dépose alors tout ce qui sert à la soudure sous forme de pâte, et il suffit de chauffer l'endroit soudé, pour achever le travail. La conductibilité assurée par

ce procédé est excellente et la résistance mécanique est assimilable à celle obtenue avec la soudure à l'étain.

Les modèles d'assemblages de fils et câbles métalliques sont assez nombreux ; on utilise en France le joint à manchon Baron, le joint Britannia et le joint Arld. Le manchon à cônes est un des plus employés.

Les dispositifs représentés par la (fig. 1347), étudiés par M. Bigot, direc-

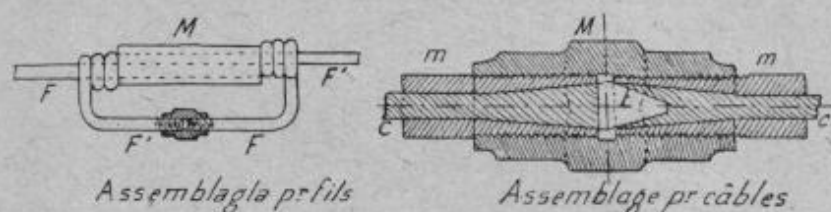


FIG. 1347.

teur de la Société Française de Métallurgie, sont à la fois simples et très pratiques. Le premier, destiné aux fils, consiste en un manchon M dans lequel on enfle les deux bouts des fils F et F' qu'on entortille ensuite chacun autour de l'autre fil ; quand on a fait quelques tours on les recourbe et on les réunit bout à bout par un raccord vissé, ou par une soudure quand on veut avoir une conductibilité électrique aussi grande que possible.

Pour les câbles on introduit leurs extrémités c, préalablement détordues, dans deux manchons filetés m à évidement tronconique ; une fourrure l, biconique, est intercalée dans les bouts de câbles, de sorte que, quand on visse le raccord extérieur M, ces bouts de câbles sont coincés et écrasés entre l et m.

Le raccord pour câbles (fig. 1348) se compose de cinq pièces : le corps du raccord (c) à 6 pans, qui comporte deux logements intérieurs, taraudés

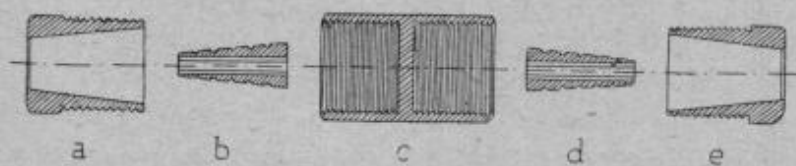


FIG. 1348.

et filetés à pas inverses ; deux bouchons (a et e) dont la tête est taillée à 6 pans et dont la tige filetée se visse à l'intérieur du corps c, bouchons percés chacun d'un trou conique destiné à recevoir l'extrémité d'un des câbles à raccorder ; deux cônes élastiques b et d, en cuivre étamé et à la surface ondulée, destinés à être placés au centre des brins du câble préalablement écartés les uns des autres.

Le câble est introduit dans le bouchon a, on en écarte les brins et on

introduit le cône élastique *b* à l'intérieur de ces brins dont les extrémités ne doivent pas dépasser la face plane du cône. Lorsque les deux bouchons sont munis chacun de leur câble, il ne reste plus qu'à les visser sur le corps du raccord et à serrer fortement les deux bouchons en même temps, en les maintenant au moyen d'une clé spéciale, tandis qu'avec une autre clé, on visse le corps lui-même.

Aux embranchements on place sur le support correspondant un ou deux isolateurs qui servent à arrêter la ligne dérivée. Tous les appuis sont numérotés et munis des étiquettes réglementaires.

On installe des sectionneurs pour faciliter le fonctionnement, les réparations, la surveillance et on place à chaque poste de coupure un garde-ligne chargé de l'entretien du tronçon (environ tous les 20 kilomètres).



FIG. 1349. — Joint isolant.

Tous les postes sont reliés téléphoniquement entre eux et à la station génératrice. Pour l'établissement de la ligne on prend une équipe de 15 à 20 hommes sous la conduite d'un ingénieur.

Parmi les installations bien étudiées nous citerons le réseau de la Compagnie Électrique du Nord construit par la Compagnie Thomson-Houston.

Les isolateurs à 45.000 volts à triple cloche, émaillés en brun, pesant 9 kilogrammes, ont été essayés à l'usine, avant l'expédition, sous 110.000 volts alternatifs pour l'ensemble et à 70.000 volts pour chacune des cloches séparément. Ils ont, en outre, été soumis à des variations brusques de température et à des efforts mécaniques de 800 kilogrammes appliqués sur leur tête, dans tous les sens. Ces isolateurs ont été scellés au moyen de ciment et par une mise en œuvre spéciale sur les ferrures-supports. Ils n'étaient mis en place, tout au moins dans les parcours en alignement droit, qu'une fois les conducteurs eux-mêmes tirés. Après quoi le réglage des fils à la tension convenable était facilement réalisé.

Les conducteurs ont été posés sous une tension mécanique de 150 kilogrammes, soit environ 3 kilogrammes par millimètre carré (tension de pose à la température 10°C., fil de 7 millimètres de diamètre). Ils ont été fixés à chaque isolateur au moyen de ligatures en fil de cuivre recuit et réunis à leurs extrémités par des joints-épissures dont la résistance mécanique n'était pas inférieure à 1.300 kilogrammes. Ils ont été tirés à l'aide d'un dévidoir fixe et d'un attelage de deux chevaux se déplaçant le long de la ligne des pylônes. Partout où le tracé présentait des angles appré-

ciables, les conducteurs ont été appuyés sur une double série d'isolateurs.

A toutes les traversées de routes ou de chemins classés il a été établi un filet constitué de câbles et de fers ronds, à la fois robuste et léger, n'offrant qu'un effort modéré sur les supports auxquels il était accroché. Ces filets, qui demandent un réglage assez délicat, ont été installés au moyen d'une échelle aérienne mobile de grand développement. Pour les traversées des voies ferrées, on a disposé des filets-cages dits « semi-rigides » constitués par de robustes câbles d'acier et par des entretoises en fers profilés. Les filets, exerçant un effort considérable de flexion sur les pylônes voisins, il y a été paré par une section d'encastrement de ces derniers en rapport avec la résistance à obtenir. Les montants des pylônes consistent en des cornières de $70 \times 50 \times 8$; leur tête est munie de traverses et de ceintures en fers à U de $120 \times 60 \times 7$ destinées à la fixation des isolateurs et à l'ancrage des filets.

La ligne de transmission électrique, qui part de la station d'énergie de Croton, établie sur les rapides de Muskegon Michigan, a 332 kilomètres de long. La station génératrice a une puissance de 30.000 HP et la tension est de 110.000 volts. Les conducteurs se composent de trois fils de cuivre de 7^{mm},2 de diamètre, tressés ensemble sur un noyau de chanvre ; ils sont supportés par des pylônes de 16^m,25 de hauteur et distants de 150 mètres portant des isolateurs du modèle en série, comprenant cinq disques de porcelaine de 25 centimètres de diamètre suspendus l'un au-dessous de l'autre aux bras des pylônes. Chacun des disques a été essayé à la tension de 100.000 volts.

Dans les nuits sombres toute la ligne devient lumineuse.

La ligne de Thiers traverse la Dore avec une portée de 130 mètres et une flèche de 6 mètres à l'aide de trois câbles de 40 millimètres carrés supportés par deux pylônes en fer.

Parfois la ligne a des portées de 240 mètres, avec flèches de 10 mètres.

Sur la ligne de Great Falls, à 100.000 volts, les pylônes ont été prévus pour porter deux circuits. Chacun d'eux a 9^{mm},26 de diamètre (7 torons) ; la hauteur du conducteur le plus bas au-dessus du sol est de 12^m,25 et la traverse est à 13^m,50 ; les hauteurs respectives des deux autres fils sont 14^m,75 et 17^m,25.

Les pylônes de suspension ont été calculés pour résister à la rupture de deux câbles et sous un effort normal du vent de 75 kilogrammes par mètre carré de la surface projetée du conducteur et de 150 kilogrammes par mètre carré de la surface du pylône, pour une longueur de 180 mètres. Les pylônes de traction peuvent supporter la rupture de tous les câbles, en plus de l'action du vent. On en a intercalé un par chaque dix portées et dans les courbes.

Les parties de la ligne avec des angles de moins de 15° sont établies sur

un pylône de traction et celles au delà de 15° sur deux ou plus ; enfin les pylônes très chargés, 12.000 kilogrammes dans chaque sens, ont été employés sur les longueurs dépassant 300 mètres et pour les très grands angles. L'effort maximum admis pour le cuivre, sans neige et à -15° , est de 7.500 kilogrammes, la plus grande distance entre deux supports ne dépassant pas 425 mètres.

L'encastrement dans le sol est de $1^{\text{m}},80$ ou $2^{\text{m}},50$ selon le genre de pylône, et les pieds des montants sont terminés par des fers d'empattement en \sqsubset ayant $0^{\text{m}},75$ de longueur ; il n'a été fait de bétonnage que pour les pylônes des angles très ouverts ou en terrain peu consistant. Les essais exécutés sur de tels ancrages, en terrains sablonneux, ont donné un arrachement sous un effort de 11.000 kilogrammes pour un enfoncement de $1^{\text{m}},30$, tandis qu'il n'y avait aucun mouvement à 14.000 kilogrammes pour celui de $2^{\text{m}},50$.

Les isolateurs, du type suspendu, sont au nombre de 4 pour les pylônes de suspension et pour chaque phase, et 5 sur les pylônes de traction

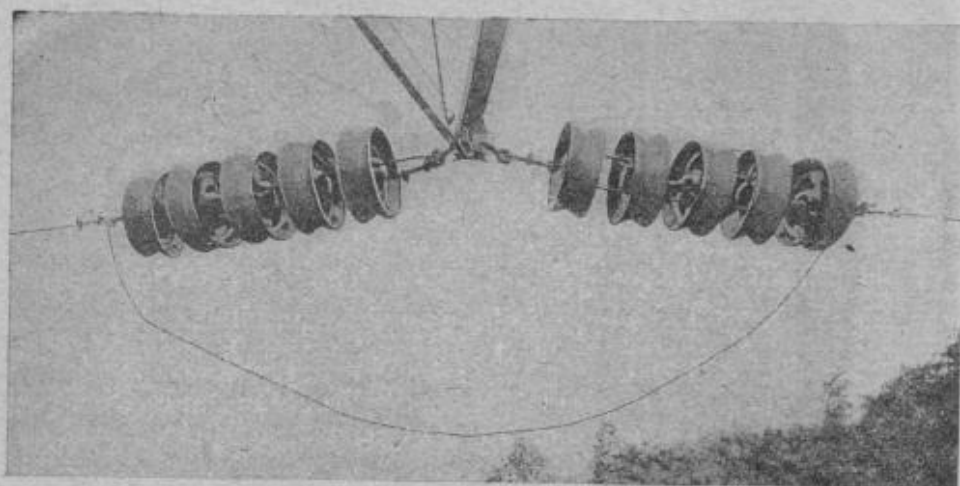


FIG. 1350.

(fig. 1350 et 1351). L'attache a été imaginée spécialement pour résister à un effort de 5.000 kilogrammes. La partie supérieure a un trou assez large pour le balancement du crochet de l'isolateur et la partie basse présente une cannelure dont le fond affecte la courbure du câble ; après que le conducteur a été mis en place, puis réglé quant à la tension et que le chapelet des isolateurs pend verticalement, une pièce de fixation est glissée sur le câble et on serre les deux boulons. Cette dernière action assujettit le conducteur aussi fortement qu'on le désire. Au cas de rupture sur une distance quelconque, les attaches ne peuvent pas donner un faux pli au câble.

La ligne de transmission de l'usine hydroélectrique de Tuilières comporte des artères principales à 50.000 volts et des dérivations à

13.500 volts. Les premières ont été établies sur des pylônes métalliques et les secondes sur des poteaux en sapin injectés au sulfate de cuivre.

Les pylônes normaux des artères principales ont une hauteur totale de 14^m,50 ; ils sont encastrés de 2 mètres dans un massif de béton ; leur poids est de 680 kilogrammes. Pour les angles et les courbes, leurs poids varient de 680 kilogrammes à 1.400 kilogrammes et, à l'exception de quelques traversées de routes, chemins de fer, canaux et rivières, la forme employée reste toujours la même. Leur section est pyramidale et l'écartement normal moyen entre pylônes est d'environ 90 mètres.

Les bras des pylônes qui soutiennent les isolateurs de la tranche inférieure de la ligne à 50.000 volts sont munis, à leurs extrémités, de deux cornières verticales de 0^m,50 de hauteur, qui sont destinées à protéger les lignes contre les coups de foudre qui peuvent se produire, en présentant à la foudre le chemin de l'armature pour prendre contact avec la terre. Chaque pylône supporte : une ligne triphasée à 50.000 volts, une ligne triphasée à 13.500 volts et un circuit téléphonique. Les conducteurs à 50.000 volts sont espacés de 1^m,75 l'un de l'autre et disposés suivant un triangle équilatéral.

Les conducteurs des lignes à 13.500 volts sont espacés de 0^m,95 l'un de l'autre. La distance qui, sur un même pylône, sépare les deux conducteurs les plus voisins à 50.000 et 13.500 volts est de 1^m,45. Tous les conducteurs et câbles des artères principales sont en cuivre nu à grande conductibilité ayant une résistance à la rupture de 35 kilogrammes par millimètre carré.

Lignes du transport de force de l'usine hydroélectrique de Ventavon à l'usine hydroélectrique de la Brillanne-Villeneuve. — L'installation de Ventavon, qui comporte essentiellement une prise d'eau en Durance, un canal d'amenée de 14 kilomètres, une usine génératrice de 24.000 chevaux, un poste de transformation à 60.000 volts et deux lignes à haute tension la reliant à l'usine de la Brillanne-Villeneuve, a été entièrement

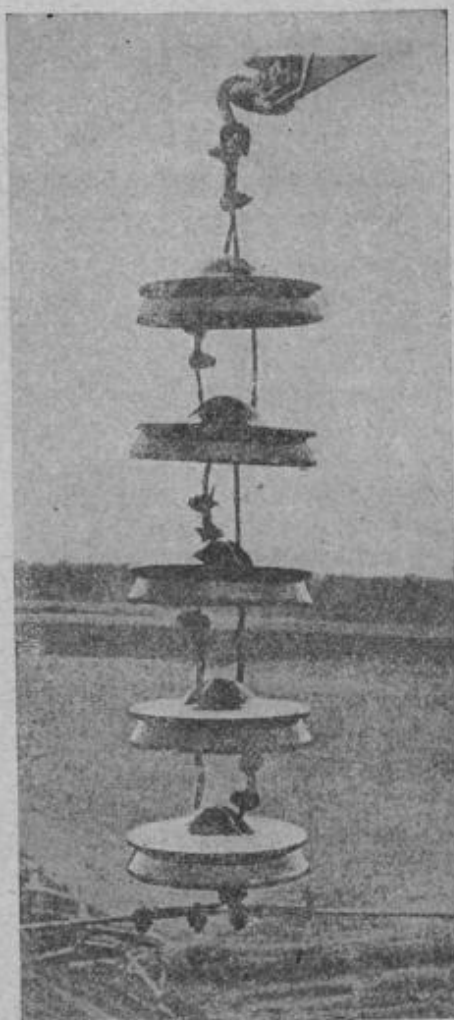


FIG. 1351.

aménagée par les soins de la Société des Forces Motrices de la Haute-Durance.

L'usine génératrice comprend six unités, constituées chacune par une turbine hydraulique double système Francis, à axe horizontal, développant à la vitesse de 300 tours par minute une puissance effective de 6.000 chevaux sous une chute nette de 50 mètres et actionnant directement, au moyen d'un accouplement élastique, un alternateur triphasé de 4.500 K. V. A. donnant entre phases une tension réglable entre 7.000 et 8.000 volts, à la fréquence de 25 périodes par seconde.

En face de chaque unité est installé un panneau en marbre portant tous les appareils de lecture et de mise en service individuellement nécessaires à l'alternateur correspondant.

Le but à atteindre était d'assurer, d'une manière indépendante, l'alimentation des deux lignes aériennes tout en permettant à l'exploitation de répartir à son gré, sur chacune d'elles, la puissance fournie par les quatre unités génératrices.

A cet effet, chaque alternateur peut envoyer le courant qu'il produit, soit directement dans un groupe de trois transformateurs monophasés élévateurs de tension, soit sur l'une ou l'autre de deux séries de barres-omnibus à 7.500 volts, permettant l'alimentation d'un groupe de transformateurs quelconque par un alternateur quelconque. D'autre part, chaque groupe de transformateurs peut être branché sur l'une ou l'autre de deux séries de barres-omnibus à 60.000 volts, chacun de ces jeux de barres étant lui-même affecté à un départ triphasé à 60.000 volts. Les trois transformateurs de chaque groupe sont connectés en triangle du côté basse tension et en étoile du côté haute tension, et bien qu'alimentés sous 8.000 volts, ils fournissent du courant triphasé à 58.000 volts.

Les barres-omnibus à 60.000 volts qui reçoivent le courant des transformateurs sont en tubes de cuivre nu supporté par des isolateurs haute tension à triple cloche; elles sont disposées horizontalement et séparées les unes des autres par des dalles en ciment armé.

Les connexions à haute tension en fil de cuivre nu sont d'ailleurs cloisonnées sur tout leur parcours et mises à l'abri de tout contact extérieur par l'apposition de grillages protecteurs devant chaque cellule.

Des mesures de protection nombreuses ont été prises au départ de chaque ligne de transport de force, pour soustraire l'installation aux surtensions causées par les décharges atmosphériques de toute nature qui se propagent le long des câbles conducteurs.

Un premier système de parafoudres, dits électrolytiques, est constitué pour chaque phase par une cuve en fer remplie d'huile isolante, où sont empilées verticalement une série de cuvettes coniques en aluminium, distantes d'un centimètre environ et contenant un électrolyte formant

« soupape électrique » ; à partir d'un voltage critique la résistance opposée au passage du courant devient très faible et l'appareil qui, sous le voltage normal, prend environ un ampère, décharge à la terre 1.000 ampères sous un voltage double. Chaque série d'éléments est reliée au fil de ligne correspondant par l'intermédiaire d'un intervalle d'air à cornes réglé de telle sorte que le parafoudre ne fonctionne que pour toute surtension supérieure à 125 ou 150 0/0 de la tension normale de l'installation. Ces parafoudres ont donné d'excellents résultats et, depuis leur adoption, les avaries causées par la foudre se sont trouvées réduites dans de grandes proportions.

Un second type de parafoudre bien connu a été installé dans le poste de Ventavon ; c'est le système à jet d'eau qui met à la terre, d'une manière continue, chaque phase de la ligne par l'intermédiaire d'une colonne d'eau sous pression de 8 millimètres de diamètre et 0^m,80 de hauteur, venant frapper contre une cloche en bronze reliée au fil de ligne. Ce parafoudre a pour but principal de faire écouler à la terre les décharges statiques qui se produisent à chaque instant sur les lignes de transport de force.

Enfin des parafoudres à boules, système Wirt, ont été adoptés comme surcroît de sécurité ; ils sont munis de leurs derniers perfectionnements qui assurent l'écoulement à la terre de toutes les décharges atmosphériques, quelles que soient leur nature et leur fréquence.

La commande des différentes machines électriques de l'usine et du poste et des divers circuits haute et basse tensions est concentrée sur un tableau central de distribution en forme de pupitre placé sur la passerelle de l'usine. A chaque groupe générateur-transformateur et à chaque départ correspond un panneau en marbre portant les appareils indicateurs et enregistreurs nécessaires.

Un point mérite d'être signalé dans l'installation de Ventavon : c'est celui de la régulation du voltage. Cette usine peut fonctionner en parallèle avec celle de la Brillanne-Villeneuve, et, dans ce cas, cette dernière est disposée pour régler le voltage en bout de ligne, soit à Marseille, soit à Arles. Mais les mesures ont été prises également pour que, l'usine de Ventavon alimentant seule une partie du réseau de l'*Energie Electrique du Littoral Méditerranéen*, la tension au poste récepteur d'Allauch, à quelques kilomètres de Marseille, soit maintenue sensiblement constante quelle que soit la charge demandée. C'est donc à 160 kilomètres de l'usine génératrice qu'automatiquement et uniquement par des appareils disposés dans cette usine, on peut assurer un voltage d'alimentation pratiquement invariable, bien que la chute de tension sur une ligne de cette longueur varie dans de très grandes limites avec l'intensité et le facteur de puissance du réseau. A cet effet, chaque départ de ligne de Ventavon comporte un régulateur système Tirrill ; cet appareil règle instantanément

le voltage de l'excitatrice, alimentant le champ des alternateurs en service sur la canalisation intéressée, de manière à ce que la tension aux bornes de ceux-ci soit à chaque instant la somme géométrique de la tension à maintenir constante à l'extrémité de la ligne et de la chute de voltage dans la ligne. L'objet du régulateur est donc d'asservir la tension d'excitation des génératrices à la charge variable demandée par le réseau

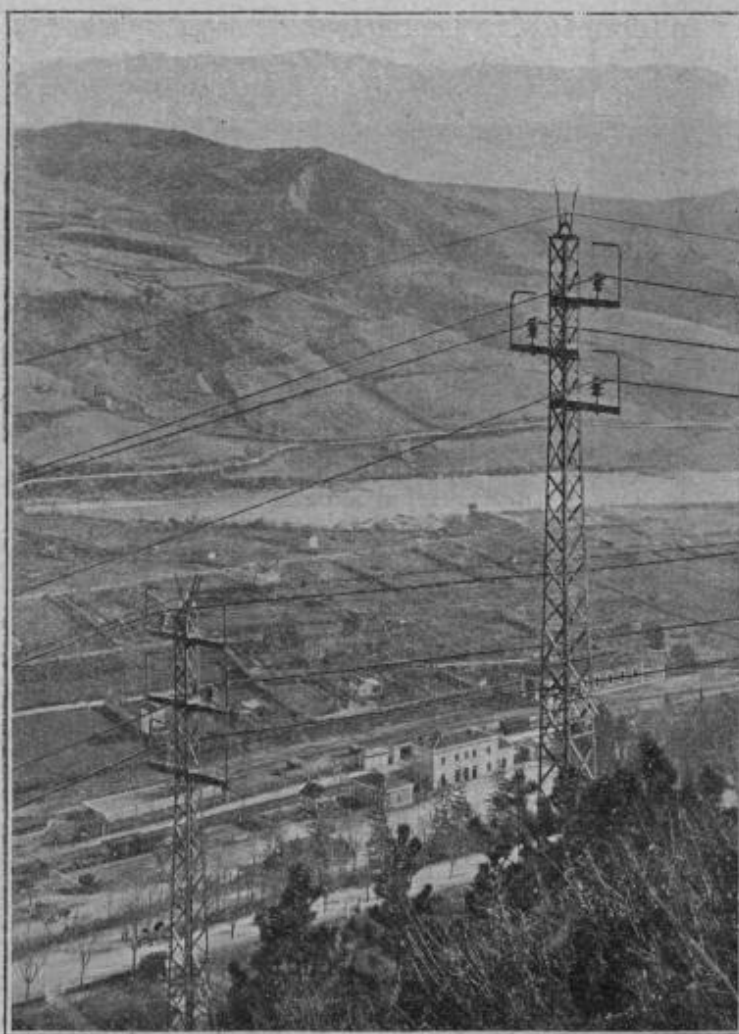


FIG. 1352. — Transport de Ventavon. — Pylônes sur les hauteurs de Sisteron.

et à l'impédance de la ligne de transport de force, pour compenser à la fois la réaction d'induit des machines génératrices et la perte en ligne.

En vue de la grosse puissance produite par l'usine de Ventavon (30.000 chevaux) et aussi de la sécurité de l'exploitation, on a établi deux lignes à haute tension pour transporter, à l'usine de la Brillanne-Ville-neuve, le courant fourni par Ventavon.

Ces deux canalisations sont à peu près parallèles sur tout leur parcours de 60 kilomètres et séparées par une distance minima de 15 mètres. Leur

établissement a présenté des difficultés assez sérieuses par suite de la nature escarpée et rocheuse de la région traversée ; les deux tiers des fouilles, profondes de deux mètres, destinées à recevoir les supports métalliques, ont dû être exécutées à l'aide d'explosifs et le bardage à pied-d'œuvre des pylônes eux-mêmes a été très pénible en certains points où leur implantation était prévue au flanc de la montagne abrupte.

Les pylônes, au nombre d'environ 1.700, sont établis en acier de première qualité. Leur hauteur totale est de 15 mètres dont deux mètres encastrés dans un massif de béton affleurant le sol. Trois types de dimensions différentes ont été adoptés pour répondre aux nécessités du tracé des lignes :

Les pylônes employés dans les alignements droits et pour les angles inférieurs à 5° , comportant quatre montants en fer cornière de $\frac{70 \times 70}{7}$ placés suivant un carré de 900 millimètres de côté à la base et de 400 millimètres au sommet, et pesant environ 1.000 kilogrammes chacun ;

Les pylônes pour les angles inférieurs à 22° , avec montants en cornières de $\frac{80 \times 80}{8}$ placés suivant un carré de 900 millimètres à la base, 400 millimètres au sommet, pesant environ 1.300 kilogrammes par unité ;

Les pylônes pour les angles inférieurs à 45° , dont les montants sont en cornières de $\frac{90 \times 90}{9}$ placés suivant un rectangle de 900 millimètres \times 1^m, 10 à la base et un carré de 400 millimètres au sommet, conduisant à un poids unitaire d'environ 1.800 kilogrammes.

La première canalisation comporte une ligne triphasée à 60.000 volts, une ligne téléphonique placée au-dessous de la première et un câble de terre établi à la partie supérieure des pylônes et reliant entre eux tous les supports.

La ligne haute tension est particulièrement intéressante en ce qu'elle est entièrement constituée par du câble d'aluminium de 130 millimètres carrés de section.

Les trois câbles de la ligne haute tension sont supportés à l'extrémité de trois traverses horizontales assemblées sur les pylônes, par des isolateurs en porcelaine étudiés spécialement en vue de cette installation. Ces isolateurs sont en 3 pièces, cuites au four séparément et assemblées au ciment Portland. La hauteur totale de l'isolateur s'élève à 350 millimètres et le diamètre de la cloche supérieure est également de 350 millimètres. Chaque cloche a été essayée séparément au laboratoire du fabricant à la tension alternative de 65.000 volts et l'isolateur tout monté à 130.000 volts pendant quinze minutes. Sous une douche de 5 millimètres par minute, inclinée à 45° , l'arc ne s'amorçait pas avant 110.000 volts.

Pour leur mise en place sur les pylônes, les isolateurs ont été scellés au ciment Portland sur une ferrure en acier forgé capable de travailler normalement à 15 kilogrammes par millimètre carré. Les câbles d'aluminium sont fixés sur la gorge de côté de ces isolateurs au moyen de ligatures d'arrêt en fil d'aluminium.

Un point particulier est la jonction de ces câbles avec les connexions intérieures en fil de cuivre des usines génératrices et réceptrices ; la liaison mécanique et électrique est réalisée à l'aide de tubes en aluminium complètement noyés dans une masse de paraffine et de chatterington coulés dans un tube cylindrique en ébonite ; cette précaution a pour but de prévenir les effets de détérioration du joint en question sous l'influence du couple électrolytique aluminium-cuivre auquel donnerait naissance l'humidité de l'air extérieur.

La ligne téléphonique est établie en fil de cuivre de 3 millimètres de diamètre et supportée par des isolateurs en porcelaine dont la ferrure est directement boulonnée sur les montants du pylône. Ces isolateurs sont prévus pour une tension normale de 1.500 volts ; en vue de permettre à la ligne téléphonique de supporter, sans amorçage d'arc à la terre, les surtensions induites par le courant haute tension du transport de force. La canalisation téléphonique est reliée aux appareils récepteurs placés dans les usines par l'intermédiaire de transformateurs spéciaux isolés pour 30.000 volts, qui donnent au personnel exploitant toute la sécurité désirable durant les communications.

Le fil de terre, longeant la canalisation sur tout son parcours, est constitué par câble d'acier de 50 millimètres carrés de section et posé sur des isolateurs en porcelaine placés au sommet des pylônes uniquement pour en faciliter la mise en place et la fixation par ligatures ordinaires. Ce câble est d'ailleurs réuni métalliquement à chaque pylône par un fil d'acier et tous les deux ou trois kilomètres il est relié directement à une plaque en tôle galvanisée enfouie dans un puits humide rempli de charbon de bois. Cette disposition jointe à la mise directe à la terre de chaque pylône par une plaque en zinc réunie à l'un des montants, assure à la ligne haute tension une protection très efficace contre les décharges atmosphériques qui, en tout point de la canalisation, sont sollicitées à s'écouler à la terre par un chemin de faible résistance plutôt que de s'attaquer aux câbles du transport de force.

La deuxième canalisation comporte une ligne triphasée à 60.000 volts établie dans les mêmes conditions que la première, et avec les mêmes caractéristiques, ainsi qu'un câble de terre constitué comme le précédent.

Un dernier point mérite d'être signalé dans cette installation. Il est, avant tout, indispensable que la sécurité du public fréquentant les voies traversées, et celle des populations qui ont accepté le passage, dans leurs

propriétés, des lignes de transport de force, soit assurée d'une manière absolue. Malgré tous les soins apportés dans l'exécution des travaux, malgré les coefficients de sécurité élevés adoptés pour tous les ouvrages, des circonstances anormales (coups de foudre, cyclone, malveillance) peuvent amener la rupture d'un câble ou sa mise en contact avec un pylône ; la présence du voltage sur ce câble avarié serait une source de danger inadmissible sur une voie fréquentée ou même au milieu d'un champ cultivé. Cette éventualité a été supprimée dans l'installation de Ventavon, grâce à la mise à la terre directe du centre de l'étoile des transformateurs-élévateurs de tension établis dans le poste ; cette précaution a permis l'adoption du dispositif de sécurité ci-après décrit. La connexion du point neutre à la terre est faite à travers un transformateur de courant isolé pour 30.000 volts, dont le secondaire alimente un relais établi pour assurer, en cas de fonctionnement, le déclenchement de l'interrupteur qui commande la canalisation en service. En temps normal, aucun courant ne traverse le fil de mise à la terre du point neutre, mais un câble de la ligne vient-il à se mettre en contact avec la terre, soit par défaut d'isolement, soit par l'intermédiaire d'un corps étranger, le courant débité par la phase intéressée se trouve dérivé à travers le défaut de ligne et rejoint le centre de l'étoile par le centre. Le transformateur de courant précité est alors traversé par ce courant, le relais entre en action et ouvre l'interrupteur, qui se trouve, par là même isolé de l'usine génératrice. Ce dispositif présente, en outre, de grands avantages pour l'exploitation d'un réseau, en prévenant le personnel d'une avarie même légère sur les lignes de transport, et en évitant les surtensions produites sur les différentes machines génératrices ou réceptrices au moment de la mise à la terre d'une phase de distribution.

L'installation à très haute tension de Sable-River à 140.000 volts a une longueur de 380 kilomètres. Les conducteurs sont suspendus par l'intermédiaire de 10 isolateurs de suspension de 25 centimètres de diamètre pouvant chacun supporter 80.000 volts d'une manière continue et 125.000 volts pendant un moment.

Actuellement, la portion de ligne de 200 kilomètres de longueur, allant à Bay-City et Suginaw, est terminée. L'usine, située à Cooke a une puissance de 9.000 kilowatts ; elle contient trois groupes de 3.000 kilowatts tournant à la vitesse de 120 tours-minute. La hauteur de chute est de 12 mètres. Le courant triphasé est produit à la tension de 2.500 volts, la fréquence est de 60. Chaque groupe a une excitatrice à pôles de commutation de 32 kilowatts montée sur son arbre.

Les interrupteurs à huile des générateurs peuvent être actionnés, au moyen de relais, du tableau de distribution et sont munis de coupe-circuits à action différée (5 sec. 1.200 A).

La régulation a lieu au moyen de régulateurs Tirill, qui sont munis de relais de surtension.

L'installation à haute tension de l'usine mérite un intérêt particulier. Elle comprend d'abord trois transformateurs de 3.000 kilowatts de la General Electric Co, à refroidissement par eau, reliés en triangle (primaire et secondaire), pesant chacun 39 tonnes. Les entrées à haute tension ont une hauteur de 1^m,2, un diamètre allant en diminuant de 50 à 25 centimètres et sont munies de bagues en presspahn de 75 centimètres de diamètre pour diminuer la dispersion entre le conducteur et le bâtiment. Les récipients contenant l'huile ont 4^m,5 de hauteur, 3^m,3 de longueur et 1^m,5 de largeur.

Les entrées sont à une distance de 1^m,5 les unes des autres et de la terre. Les barres à haute tension et les conducteurs de liaison sont des tuyaux de fer de 18 millimètres de diamètre, reliés par des isolateurs de suspension à leurs supports. Les interrupteurs à haute tension pour une intensité maximum de 100 A par phase (normalement 21,4 A) ont 3^m,6 de haut, 2^m,4 de longueur et 1^m,2 de largeur. L'huile des transformateurs et des interrupteurs peut être pompée dans un réservoir et être épurée dans un filtre. Des parafoudres à éléments d'aluminium sont installés sur les sorties.

La canalisation est en câble de cuivre de 10 millimètres de diamètre extérieur suspendus par l'intermédiaire des isolateurs de suspension mentionnés à des poteaux en fer de 12 à 18 mètres de hauteur, distants de 150 mètres. Les conducteurs sont disposés au sommet d'un triangle de 5 mètres de côté de manière à réduire l'effet corona qui est d'environ 2 kilowatts par kilomètre.

Actuellement, par suite de la capacité, la tension à l'extrémité de la ligne non chargée est de 164.000 volts. L'expérience a montré que les pertes par effet corona sont plus grandes avec un câble ayant une âme en chanvre qu'avec un câble en cuivre seul.

529. Conducteurs en aluminium. — En Amérique, les fils en aluminium sont couramment employés, en raison du moindre poids de ce métal, qui réduit les frais de transport, de montage et la dépense des supports. A égalité de résistance électrique, sa section doit être 1,56 fois celle du cuivre ; mais son poids n'est que les 0,47 de ce métal.

Le métal que l'on emploie pour les conducteurs aériens est presque pur. On a reconnu en Amérique qu'il n'y avait pas désintégration appréciable de l'aluminium dans les conditions atmosphériques ordinaires ; au bord de la mer, ce métal, protégé par une mince couche d'alumine imperméable, se comporte mieux que le cuivre ⁽¹⁾.

(1) Les principales lignes établies en Amérique avec des conducteurs d'aluminium sont celles de Schawnigan-Falls-Montréal (138 kilomètres), de Colgate-Oakland (234 kilomètres) et d'Electra-San-Francisco (280 kilomètres).

L'accroissement de diamètre et de section de l'aluminium par rapport au cuivre présente les avantages et les inconvénients suivants. Ces derniers sont d'ordre mécanique, par suite de la plus grande surface au vent et des efforts transversaux sur les supports, surtout pour les grandes portées avec emploi de poteaux métalliques. Quant aux dépôts de neige ou de verglas, ils sont insensiblement indépendants du diamètre des fils, parce que la cohésion du dépôt n'est plus suffisante au delà d'un diamètre déterminé. D'ailleurs, pour les lignes en fonctionnement constant, les dépôts de neige et de verglas sont à peu près insignifiants. Enfin, par grand vent, le verglas ne peut se former ni subsister sur des conducteurs soumis à des vibrations continues.

L'avantage du plus grand diamètre de l'aluminium, à égalité de distance entre fils, est qu'il diminue l'inductance de la ligne ($L\omega$), qui abaisse la self-induction L . Le gain sur la self est d'environ 5 0/0 et, si l'on veut conserver la même self en accroissant le diamètre, on y arrive en donnant aux fils d'aluminium un écartement supérieur de 30 à 35 0/0 à l'écartement des fils de cuivre. Les conducteurs en aluminium permettent de réduire notablement les pertes entre conducteurs à travers l'air par effet Corona qui deviennent très forts avec les hauts potentiels.

Les jonctions des fils aériens en aluminium sont assurées par les épissures ordinaires sans le secours de la soudure ou par des manchons en aluminium de 0^m,50 méplat et on soumet le tube à une torsion lors de la pose.

Pour les ligatures on emploie des attaches plates ou rondes, graissées à l'huile de vaseline neutre.

Nous signalons, à titre documentaire, les essais faits par M. Betts pour l'emploi du sodium dans les lignes aériennes. Au point de vue de la dépense à effectuer, un conducteur en aluminium est deux fois moins coûteux que celui en cuivre et le sodium serait trois fois moins coûteux ⁽¹⁾.

Pour deux portées, l'une de cuivre et l'autre d'aluminium, si on donne la même flèche et le même coefficient de sécurité au même instant, les longueurs des portées sont dans le rapport : $\frac{Al}{Cu} = 1,27$ et, à égalité de flèches et de longueurs de portées, les coefficients de sécurité sont dans le rapport : $\frac{m_a}{m_c} = 1,61$ ou bien à égalité de portées et de coefficient de sécurité, les flèches sont dans le rapport : $\frac{f_a}{f_c} = 0,62$. C'est-à-dire qu'à égalité de fatigue et de flèche, la portée de l'aluminium peut être de 27 0/0 supérieure à la portée du cuivre ou bien, à égalité de portée et de flèche, la fatigue de la ligne de cuivre est de 61 0/0 supérieure à celle de l'alumi-

(1) On a fait des essais sur des alliages d'aluminium et de métaux de la même famille, dans l'espoir d'arriver à un composé supérieur à l'aluminium pur.

nium, ou enfin à égalité de portée et de fatigue, la flèche de l'aluminium n'est que les 62 0/0 de celle du cuivre ; toutes ces constatations au cas où les lignes ne sont soumises qu'à leur propre poids.

Le tableau ci-après donne les flèches relevées sur des lignes établies avec des conducteurs en aluminium, supportées par des appuis distants de 40 à 120 mètres, pendant la période de montage, avec des variations de températures comprises entre -20° et $+30^{\circ}$ centigrades.

TEMPÉRATURES DE L'AIR en degrés centigrades	FLÈCHES EN CENTIMÈTRES DE CONDUCTEURS EN ALUMINIUM AVEC SUPPORTS DISTANTS DE				
	40 m	60 m	80 m	100 m	120 m
- 20	5	17	49	122	227
- 10	7	22	61	142	253
0	10	30	79	168	278
+ 10	15	40	100	194	302
+ 20	22	52	122	220	328
+ 30	40	67	145	246	352

Le tableau suivant fixe sur les flèches maxima des conducteurs en aluminium de 4 à 16 millimètres de diamètre avec les coefficients de sécurité usuels.

FLÈCHES MAXIMA DES CONDUCTEURS EN ALUMINIUM
Charge de rupture 22 kg par mm².

COEFFICIENT DE SÉCURITÉ = 3							
DIAMÈTRE DES FILS en millimètres	PORTÉE EN MÈTRES						
	40	60	80	100	120	140	160
4	0,68	1,65					
6	0,55	1,08	2,00	3,20			
8	0,54	0,88	1,48	2,35	3,45		
10	0,53	0,86	1,24	1,97	2,90	4,00	
12	0,53	0,86	1,23	1,70	2,45	3,40	4,45
14	0,52	0,85	1,22	1,61	2,15	2,95	3,90
16	0,52	0,85	1,22	1,60	2,05	2,60	3,50
COEFFICIENT DE SÉCURITÉ = 5							
DIAMÈTRE DES FILS en millimètres	PORTÉE EN MÈTRES						
	40	60	80	100	120	140	160
4	1,40						
6	0,95	2,05					
8	0,73	1,58	2,75	4,40			
10	0,72	1,36	2,35	3,60			
12	0,72	1,28	2,05	3,10	4,45		
14	0,72	1,14	1,85	2,75	3,90	5,25	
16	0,72	1,14	1,64	2,50	3,50	4,85	6,10

Les tableaux ci-après donnent les flèches que prennent des conducteurs en cuivre et en aluminium posés conformément aux prescriptions contenues dans l'arrêté du 21 mars 1910, lorsque la température ambiante atteint 50°.

FLÈCHES MAXIMA DES CONDUCTEURS EN CUIVRE

Charge de rupture 40 kg par mm².

COEFFICIENT DE SÉCURITÉ = 3												
DIAMÈTRE DES FILS en millim.	PORTÉE EN MÈTRES											
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,50	0,68	0,99	1,34	1,80	2,30						
4	0,50	0,66	0,88	1,08	1,41	1,80	2,24	2,72				
5	0,49	0,66	0,87	1,06	1,28	1,53	1,89	2,28	2,72	3,18		
6	0,49	0,65	0,86	1,05	1,27	1,49	1,75	2,04	2,42	2,82	3,25	3,70
7	0,49	0,65	0,85	1,05	1,26	1,48	1,74	2,00	2,28	2,60	3,00	3,40
8	0,49	0,65	0,85	1,04	1,25	1,47	1,73	1,99	2,27	2,56	2,86	3,27
9	0,49	0,65	0,85	1,04	1,25	1,46	1,72	1,98	2,26	2,55	2,85	3,25

COEFFICIENT DE SÉCURITÉ = 5												
DIAMÈTRE DES FILS en millim.	PORTÉE EN MÈTRES											
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,70	1,28	1,70	2,18	2,90							
4	0,69	1,00	1,43	1,90	2,50	3,05	3,83					
5	0,69	0,90	1,22	1,62	2,08	2,55	3,25	3,60	4,20			
6	0,68	0,90	1,14	1,43	1,90	2,30	2,80	3,30	3,80			
7		0,89	1,11	1,39	1,70	2,10	2,55	3,05	3,50			
8			1,13	1,38	1,66	2,00	2,45	2,94	3,40			
9			1,13	1,37	1,85	1,97	2,33	2,88	3,30			

Nous donnons ci-dessous les résultats comparatifs calculés pour des lignes tirées normalement et pour des portées de 40, 60 et 80 mètres.

PORTÉE DE 40 MÈTRES										
Température.....	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	
Tension par mm ² ..	7 ^k ,5	6 ^k	4 ^k ,8	4 ^k	3 ^k ,4	3 ^k	2 ^k ,7	2 ^k ,4	2 ^k ,2	
Flèche.....	0 ^m ,24	0 ^m ,295	0 ^m ,37	0 ^m ,44	0 ^m ,52	0 ^m ,59	0 ^m ,66	0 ^m ,73	0 ^m ,079	

	PORTÉE DE 60 MÈTRES								
	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
Température.....	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
Tension par mm ² ...	7 ^k	6 ^k	5 ^k ,2	4 ^k ,6	4 ^k ,1	3 ^k ,8	3 ^k ,5	3 ^k ,2	3 ^k
Flèche.....	0 ^m ,57	0 ^m ,66	0 ^m ,76	0 ^m ,86	0 ^m ,96	1 ^m ,05	1 ^m ,14	1 ^m ,22	1 ^m ,31

	PORTÉE DE 80 MÈTRES								
	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
Température.....	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
Tension par mm ² ...	6 ^k ,8	6 ^k ,02	5 ^k ,42	5 ^k	4 ^k ,6	4 ^k ,3	4 ^k ,1	3 ^k ,8	3 ^k ,64
Flèche.....	1 ^m ,05	1 ^m ,18	1 ^m ,32	1 ^m ,43	1 ^m ,56	1 ^m ,67	1 ^m ,78	1 ^m ,88	1 ^m ,93

On voit que, pour des portées de 40 mètres, une variation de température de + 20° à — 20° fait varier la tension sensiblement du *simple au double* et pour une variation de + 30° à — 30°, presque du *simple au triple*, tandis que, dans les mêmes limites de température, la variation de tension n'est plus que de :

1 à 2 pour 60 mètres
et 1 à 1,7 pour 80 mètres.

Il en ressort donc clairement que, pour un même écart de température, les tensions croissent d'autant plus vite que les portées sont plus courtes ; et que, par conséquent, il y a intérêt à prendre des supports robustes et à augmenter les portées.

III. — SUPPORTS DES LIGNES

POTEAUX EN BOIS

530. Procédés de conservation des bois. — Au début des transports de force, les poteaux en bois ont été adoptés presque exclusivement comme supports ainsi que pour leurs traverses et le contreventement de ces dernières. Les principaux bois injectés qu'on emploie sont : le sapin, le pin et le chêne pour les traverses. En Amérique, on utilise plus particulièrement le cèdre, dont la durée est très longue. Les bois échauffés ou ayant tendance à tourner doivent être refusés. Les poteaux doivent non seulement résister aux efforts qui proviennent de la traction propre des fils combinée avec le vent, la température ou la neige, mais encore supporter sans affaiblissement les effets des intempéries climatologiques.

Les procédés de conservation des poteaux consistent en principe à introduire dans les pores du bois une solution antiseptique qui a pour effet principal de diminuer considérablement la combustion lente de la subs-

tance ligneuse, cause de destruction absolument inévitable quand le bois est exposé à l'air libre. On admet que la plupart des procédés de conservation des bois dont il va être question permettent de doubler la durée normale d'un poteau.

Les poteaux en bois, encore très employés dans les installations à haut voltage, sont injectés soit à l'aide de la créosote, soit au sulfate de cuivre, soit au bichlorure de zinc ou au moyen d'un mélange de chlorure de zinc et de créosote, qui revient meilleur marché que la créosote pure.

On s'adresse aussi au chlorure de mercure (kyanisation), à la carbonisation et à l'immersion dans un bain de paraffine ; il y a encore les procédés par imprégnation au soufre, au sucre et par le courant électrique toutes opérations ayant pour objet de soustraire la matière ligneuse qui, sans cela, serait rapidement décomposée. L'imprégnation des solutions antiseptiques se fait soit par *infiltration et déplacement* de la sève sous l'action de l'agent antiseptique arrivant sous pression (procédés Boucherie et Lebioda), soit par *immersion*. Celle-ci comprend les systèmes d'immersion simple et à froid, simple et à chaud, simple et à ébullition suivie de refroidissement, mixte à la créosote et au chlorure de zinc. Dans les trois méthodes d'imprégnation simple, on peut faire précéder l'immersion d'une extraction par le vide et faire agir ensuite la pression mécanique pour favoriser la pénétration de la solution antiseptique. Dans ce dernier cas, on opère nécessairement en vase clos. C'est généralement par ce procédé que l'on opère pour l'imprégnation par la créosote et à chaud pour favoriser à la fois la raréfaction et la pénétration du liquide.

Le procédé Bethell qui fait appel à la créosote a lieu par vide et compression en vase clos.

Le procédé Bréant-Légé et Fleury-Pironnet consiste à faire l'injection au moyen du sulfate de cuivre au cylindre ; après injection on fait le vide.

Les procédés Rütgers et Guissani (imprégnation mixte à la créosote et au chlorure de zinc), Rüping (imprégnation à la créosote) ont en vue une moindre consommation de la créosote.

Ce dernier procédé a l'avantage sur le procédé par le vide et par pression en vase clos, d'abaisser à 60 kilogrammes de créosote par mètre cube de bois, au lieu de 325 kilogrammes avec le premier procédé. Mais injecter de la créosote sous pression pour qu'elle pénètre bien le bois et en limitant cette injection à une partie du poteau, présente des difficultés très réelles.

A cet égard l'injectol, produit nouveau venu, composé d'hydrocarbure et de produits antiseptiques, et qui est un liquide remarquablement limpide, se présente sous des conditions particulièrement intéressantes. On l'emploie à chaud ou à froid, par pression, immersion ou simple badigeon-

nage. Des poteaux injectés et plantés en 1907 ont parfaitement répondu aux résultats qu'on attendait de l'emploi de ce produit.

La kyanisation (proposée en 1838 par Kyan) donne d'excellents résultats. On utilise une dissolution de 2 à 3 0/0 de bichlorure de mercure, dans laquelle on plonge les bois à imprégner pendant dix à quinze jours. Cette méthode convient aux grands poteaux ayant plus de 6 mètres de longueur.

Dans le procédé Beaumartin (emploi du courant électrique) on a recours au courant alternatif pour hâter l'opération. Comme liquide d'injection, on prend du sulfate de zinc et du sulfate de cuivre.

La kyanisation, les traitements au soufre et au sucre offrent cet avantage spécial que les bois traités par ces procédés sont absolument inodores. Dans les meilleures conditions, l'éventualité du remplacement des poteaux se présente tous les douze ou quinze ans. La durée des poteaux kyanisés est de 16 à 18 ans.

Les poteaux soumis à l'action du sulfate de cuivre sont ceux qui entraînent les plus fortes dépenses au point de vue de l'entretien ; puis viennent, dans un ordre décroissant, ceux préparés au chlorure de zinc, au sublimé, et enfin à l'huile de goudron créosotée.

Le tableau ci-après renseigne sur les substances utilisées dans l'injection des poteaux, avec leur pouvoir antiseptique et leur mode d'application.

Il est de la plus haute importance de soustraire efficacement aux risques produits par les changements de sécheresse et d'humidité la partie du poteau se trouvant entre celle inférieure encastrée dans le sol et celle

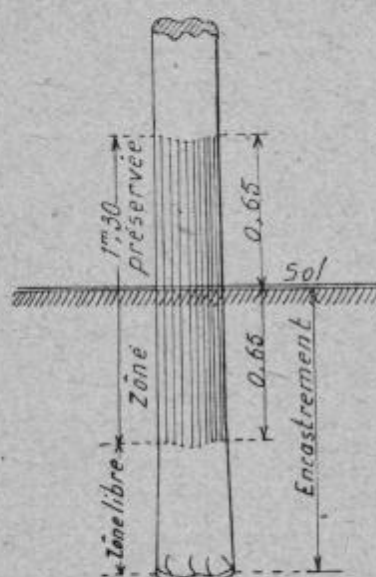


FIG. 1353

au-dessus du sol. L'humidité dissout peu à peu le sulfate de cuivre et favorise le développement des parasites, insectes ou champignons. Les terrains calcaires offrent aussi une action chimique sur le même sel. Les divers essais tentés dans le but de protéger par des badigeonnages de produits connus les parties exposées n'ont pas donné de résultats satisfaisants ; la raison en est que les produits employés pour le badigeonnage se trouvent soumis à l'évaporation ou au détrempeage par l'humidité et, par suite, les poteaux perdaient rapidement leur protection.

A cet effet, la maison Himmelsback de Fribourg emploie un dispositif éloignant complètement les influences néfastes que

nous venons de signaler ; la partie préservée, ainsi que le montre la (fig. 1353), est en partie située dans le sol et en partie au-dessus.

SUBSTANCES	INTOXICA- TION d'une culture gélatineuse par une addition en p. 100 (1)	TENEUR des solutions employées à l'injection en pour 100	QUANTITÉ d'anti- septique retenue dans les tissus par m ³ de bois en kg	POUVOIR anti- septique de la quantité ci-dessus (2) (celle de SO ₄ Cu étant prise pour unité)	PERTE d'anti- septique dans l'injection de 1 m ³ de bois en kg	PRIX d'achat approxi- matif de l'anti- septique nécessaire pour l'injection de 1 m ³ de bois	MÉTHODE D'INJECTION
1	2	3	4	5	6	7	8
Sulfate de cuivre SO ₄ Cu..	1-1,5	1,5-2	3,5-4,5	1	2,5-3,5	3,6-4,8	Élimination de la sève (Procédé Boucherie).
Chlorure de zinc (Zn Cl ₂)..	3,5	1,5-3	3,5-6	1-1,7	2,5-5	2,2-3,9	Élimination de la sève (Procédé Pfister).
Bichlorure de mercure (Hg Cl ₂)	0,15-0,25	0,75-1,80	0,0-1	4-6	0,05	4-6	Immersion (Procédé Kyan).
Créosote sans phénol.....	5-10 (3)	Non étendue	200-400	20-80	10-20	14-28	Imprégnation totale (Pro- cédé Bethell).
Créosote avec 10 pour 100 de phénol.....	2-4 (4)		100	25-50	5-10	11-13	Procédé économique Rüt- gers.
			60-70	15-20	2-3	6-7	Procédé économique Rü- ping.
Fluorure de zinc acide (Zn Fl ₂ , 2H Fl).....	1-1,1	2,5	5-7	5-7	1-2	6-9	Élimination de la sève (Procédé Boucherie) (7).
Fluorure de zinc neutre (Zn Fl ₂).....	0,75	3,5	1,5-3,5	1,5-3,5	0,5-1	2,4,5	Immersion (7).
Fluorure de zinc basique (Zn Fl ₂ O).....	0,75	2-2,5 (5)	4-6	5-7	3-5	6,5-10	Élimination de la sève (Procédé Malenkovié au fluorure de sodium chlo- rure de zinc).
Fluorure de sodium acide (Na Fl, H Fl).....	1,15		4-6	5-7	0,4-0,5	3,8-5,5	Injection au cylindre (Pro- cédé Molter au fluorure de sodium-chlorure de zinc).
Fluorure de sodium neutre Na Fl.....	0,75		5-7	6-9	4-6	5,5-7,8	Élimination de la sève (1).
Bellite fluorure double (6)...	0,38	2,25	1,5-3	4-7	0,5-1	2,5-4,8	Immersion (7).

(1) D'après les recherches de B. Malenkovié.

(2) Comme pouvoir antiseptique unité d'une substance, on prend la quantité exprimée en kg qu'il faut ajouter à 100 kg d'une culture gélatineuse pour tuer tous les ferments, c'est-à-dire que le pouvoir antiseptique unité de SO₄Cu correspond à 4-4,50 kg de cette substance; celui du Hg Cl₂ à 0,15-0,26 kg. Mais ces résultats de laboratoire ne doi-
vent pas être appliqués à la lettre comme représentant le pouvoir conservateur de ces mêmes substances en pratique.
Pour obtenir la quantité théorique de désinfectant nécessaire à la conservation d'un mètre cube de bois, l'auteur
admet que l'aubier, qui seul doit être injecté, y entre dans la proportion de 200 à 300 kg. Les nombres de la colonne 5
sont les quotients des colonnes 4 et 2.

(3) Pouvoir antiseptique variable avec la qualité; les constituants liquides sont plus efficaces que les solides; par
exemple, la naphthaline, l'anthracène.

(4) Le pouvoir antiseptique dépend des phénols qui, employés purs, intoxiquent une culture pour une addition de
0,2 à 0,4 pour 100.

(5) Pour former environ 2 à 2,5 kg du mélange Zn Fl₂ + Zn Fl₂ O + Na Fl, H Fl, il faut 1,75 kg de Zn Cl₂ + 1,75 kg
de Na Fl; ce mélange a un pouvoir antiseptique équivalent à celui de 2 kg Na Fl.

(6) Mélange de Na Fl, dinitrophénol, huile d'aniline; le dinitrophénol est le plus actif; il détruit tous les parasites
quand on l'ajoute à une culture dans la proportion de 0,05 pour 100.

(7) Essais d'imprégnation de l'Administration des Télégraphes autrichiens.

La maison Sprecher et Schuh, de Aarau (Suisse), pour atteindre le même but, enveloppe le pied des poteaux d'une chemise en tôle, d'une étoffe filamenteuse et de goudron.

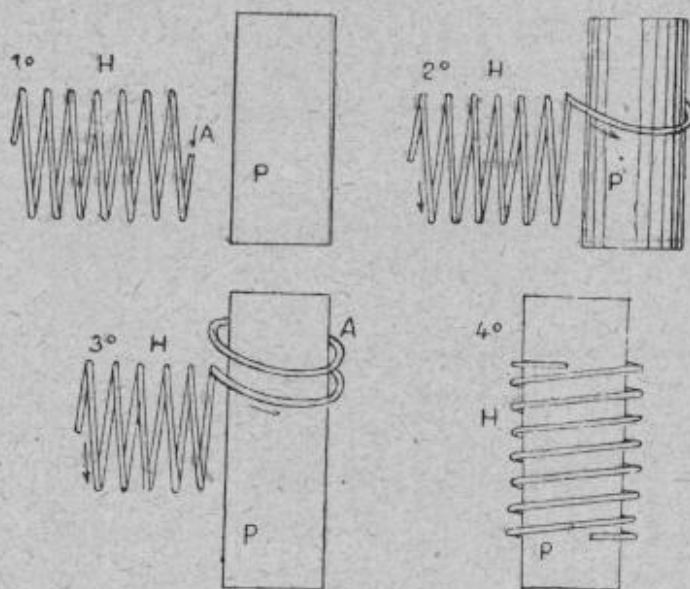


FIG. 1354.

La garniture pénètre de 15 centimètres dans le sol et dépasse ce dernier de 35 centimètres.

Une autre disposition due à M. Leclerc consiste à entourer la partie du poteau enfouie dans le sol d'une couche de ciment armé, constituée par des éléments transversaux croisant les éléments longitudinaux. A cet

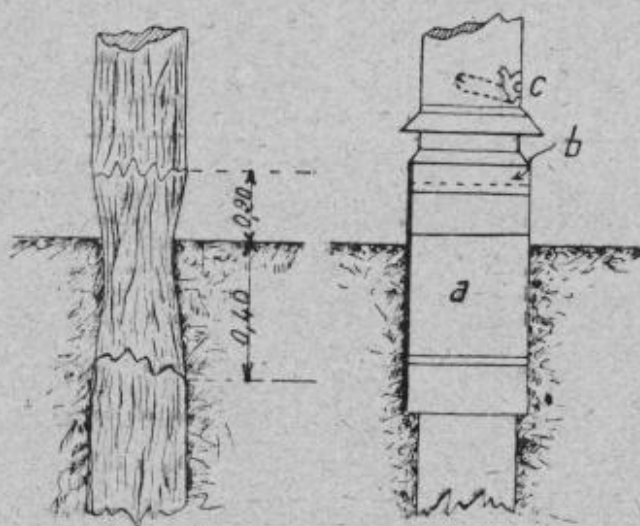


FIG. 1355.

effet une hélice en fils de fer entoure l'arbre, laquelle est rattachée à des barres ou des cadres longitudinaux; ces armatures disposées pour avoir une épaisseur suffisante de ciment entre le bois et l'armature (fig. 1354).

La (fig. 1355) représente le dispositif imaginé par Knapen qui se compose de trois parties distinctes :

1° Un manchon cylindrique en ciment armé *a* de 6 millimètres d'épaisseur et 60 centimètres de hauteur, laissant entre sa surface interne et la surface externe du

poteau un intervalle de 10 millimètres destiné à être rempli par une substance imputrescible, réfractaire à l'humidité et mauvaise conductrice de la chaleur (asbeste, coton minéral, etc.) ;

2° Un chapeau de recouvrement *b*, muni d'un rebord rejetant les eaux de pluie en dehors du manchon ;

3° Un drain *c* de 25 à 30 millimètres, pénétrant jusqu'au centre du poteau et placé un peu obliquement immédiatement au-dessus du rebord du chapeau *b*. Le trou est percé avec une tarière, puis agrandi au diamètre voulu au moyen d'un mandrin chauffé au rouge.

Avant de le fixer, il est bon d'enduire la partie correspondante du poteau avec du goudron épais pour empêcher le passage de l'eau entre le bois et le métal.

Comme les poteaux sont généralement mis hors de service par la pourriture du bois dans le voisinage du sol, ce dispositif permet d'obtenir une plus longue durée des poteaux.

531. Tracés des lignes. — Les longues portées ayant pour objet d'améliorer l'isolement électrique de la ligne, de rendre les expropriations moins coûteuses, d'éviter de poser, dans les parties accidentées, des supports en des points où il y aurait tendance au renversement, et enfin de permettre une meilleure répartition des chaînettes pour l'équilibrage des tensions des lignes, il découle de ces considérations qu'en principe les portées doivent être aussi grandes que possible. La portée ordinaire en ligne droite est de 35 à 40 mètres avec des poteaux ordinaires ; dans les mêmes conditions, elle atteint 45 à 50 mètres avec des conducteurs en aluminium.

Au delà de ces portées, il faut faire appel à des poteaux spéciaux en bois, en métal ou en ciment armé.

Nous rappellerons que les dimensions usuelles des poteaux en bois sont :

Hauteurs : 8, 10, 12 et 15 mètres ;

Diamètres respectifs à la base : 18, 22, 25 et 27 centimètres ;

Diamètre au sommet : 11 centimètres.

Pour les lignes à grandes hauteurs, à défaut de pylônes, on peut constituer un poteau résistant en l'armant de fils de haubans reliant la tête au sol. Ceux-ci peuvent être remplacés par des contrefiches auxquelles on fixe une tige centrale jouant le rôle de poteaux. Ces dispositions nécessitent, par contre, un assez grand emplacement pour leur plantation. Mais le plus souvent on fait appel aux tours en acier.

Le point de départ d'une ligne doit être assuré par un poteau de grande résistance, pouvant supporter, comme les poteaux d'arrêt, toute la tension des câbles. En terrain plat, on fait des ligatures sur les isolateurs tous les trois ou quatre poteaux, et, en terrain en pente, à tous les poteaux.

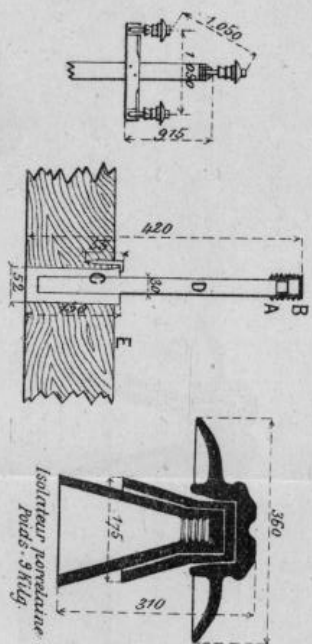
Lorsque les poteaux ne sont pas en ligne droite, si on appelle r le rayon de la courbe, T les tensions exercées des deux côtés, F la résultante de ces efforts, la distance limite l_m est donnée par l'expression : $l_m = r \frac{E}{T}$. Les angles brusques doivent être évités surtout pour les lignes à très haute tension. Sans trop allonger le parcours, les changements de direction doivent être arrondis et répartis sur plusieurs supports consécutifs.

Les considérations techniques et économiques sont à la base de l'étude de la ligne, lesquelles aboutissent à déterminer les frais de premier établissement, d'entretien et d'exploitation. On doit se préoccuper dans l'établissement des lignes aériennes d'éviter, autant que possible, les points faibles et coûteux (traversées de canaux, de chemins de fer, de tramways, fleuves, rivières, ainsi que les agglomérations habitées, les régions humides et celles d'accès difficiles pour la construction et la surveillance d'exploitation, etc.). De préférence on suivra les lignes de plus grande pente du terrain. On déterminera avec autant de précision que possible la valeur de la portée moyenne, qui dépend des conditions de voltage, de la résistance des supports employés, de leur coût et de leur frais d'installation. Avec les tensions élevées, on a intérêt à avoir recours aux grandes portées, ce qui a pour résultat de réduire au minimum le nombre des isolateurs de la ligne, entraînant une économie notable et diminuant les points faibles d'isolement. Une fois le tracé fixé et la longueur de la portée moyenne déterminée, on peut procéder au piquetage de la ligne, auquel il y a lieu d'apporter beaucoup de soin, de conscience et d'intelligence.

A l'aide du plan établi lors d'une première visite sur les lieux, en suivant un itinéraire tracé sur une carte de l'état-major, et sur lequel plan on a indiqué les côtes principales d'altitude appuyées de croquis, on note la hauteur, la force, le type de poteau à employer à chaque piquet désigné pour y installer un poteau. On note en même temps les longueurs des portées, les valeurs des angles, enfin toutes dispositions spéciales, points de bifurcation, points d'arrêt, poteaux pour transformateurs, parafoudres, sectionneurs, etc.

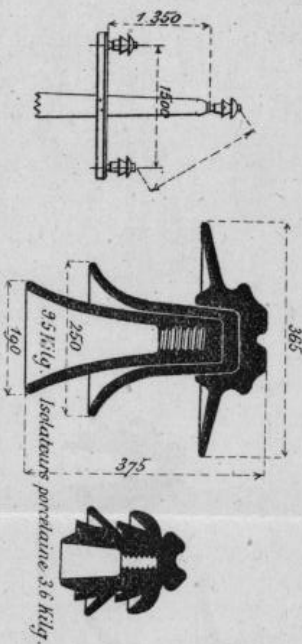
On doit considérer comme une règle absolue qu'aucune branche d'arbres ne doit être à une distance moindre de 5 mètres des fils de lignes ; mais il faut envisager sans crainte les cas de déracinement des poteaux par suite de grands vents, ce qui entraîne à des distances assez grandes entre les arbres et la ligne. Les accidents causés par les oiseaux ou les mammifères grimpeurs sont moins fréquents avec les supports peu conducteurs (bois). Ils peuvent d'ailleurs être évités dans le cas de transports à fils très écartés, en ne mettant pas le centre de la distribution à la terre. En Amérique, on dispose les fils sur un même plan horizontal et l'on admet que l'écart entre fils doit être au moins égal à la moitié de la flèche ; les contacts

I Canalisation de la Washington Power Co 160 Kilom. 40.000 volts



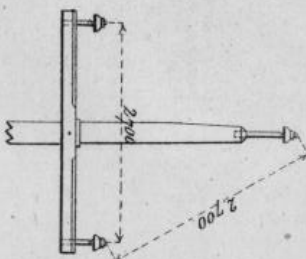
La ligne est formée de 3 fils de cuivre écorus de 6 mm supportés par des isolateurs en porcelaine recouverts d'un vernis isolateur. Les isolateurs sont fixés à l'aide d'une douille par un crampon. La cage D de l'isolateur porte en 8 une tige en plomb qui tombe sur la tige.

II Canalisation de la Schwinigan Water and Power & Co 132 Kilom. 53.000 volts



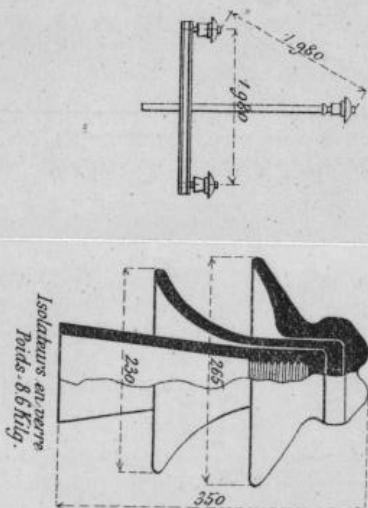
La ligne est formée de 3 câbles en aluminium composés chacun de 7 fils de 3,5 mm de diamètre. Les isolateurs sont fixés par des tiges en bois.

III Ligne de la Madison River 106 Kilom. 40.000 volts



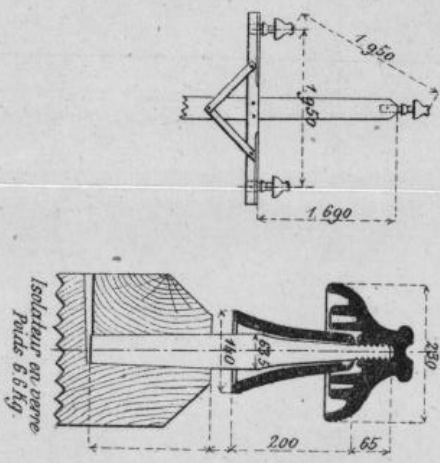
Les poteaux constituant cette ligne sont en bois. Le bois est systématiquement évité. On a employé pour la fixation des isolateurs et des traverses des tiges en bois.

IV Canalisation de la Guaragnato Power and Electric Co 60.000 volts

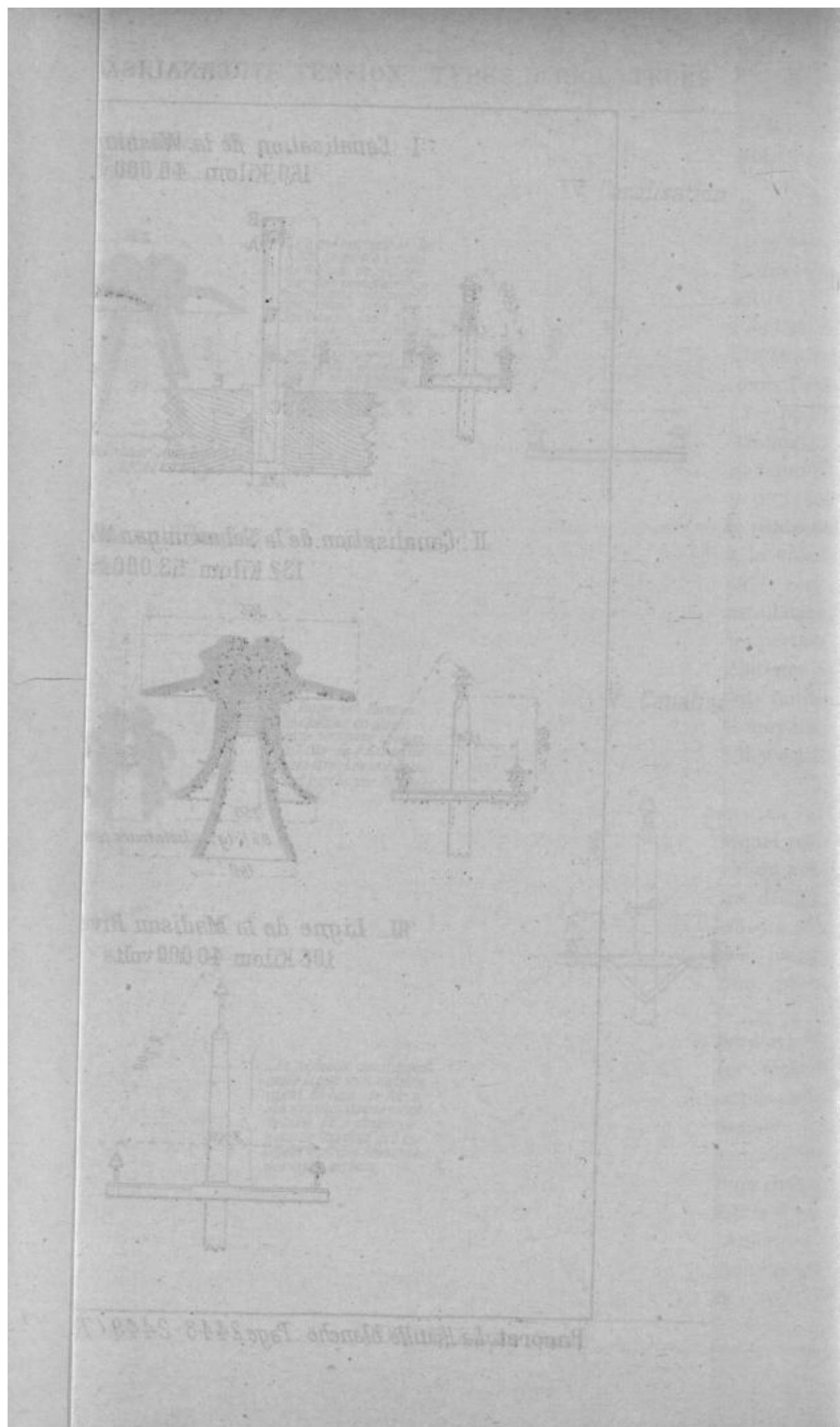


Dans cette ligne les conducteurs sont en cuivre écorus et les poteaux en bois. Les isolateurs sont fixés à l'aide d'une douille par un crampon. La cage D de l'isolateur porte en 8 une tige en plomb qui tombe sur la tige.

V Canalisation de la Missouri Power 57.000 volts



La ligne est double à l'aide de deux séries de câbles. Les isolateurs sont fixés à l'aide d'une douille par un crampon. La cage D de l'isolateur porte en 8 une tige en plomb qui tombe sur la tige.



directs entre fils de ligne se produisent alors quelquefois. Dans les cas de très grandes portées, il est préférable de placer les conducteurs à des niveaux différents.

Quand les lignes ont à traverser des forêts, pour diminuer le risque d'incendie des supports de lignes, on ménage une large tranchée, 12 à 15 mètres de largeur.

Dans le tracé des lignes, on doit, autant que possible, éviter les grandes traversées de bois, et de placer les poteaux en contre-bas d'éboulis ou de rochers peu stables. Lorsqu'on ne peut éviter de tels passages, les grandes portées permettent de sauter de contrefort en contrefort. Une étude attentive de la région donnera le moyen d'éviter les points particulièrement exposés aux effets de l'électricité atmosphérique, ainsi que les grandes variations d'altitude ; les visites des lignes télégraphiques sont d'un bon enseignement à cet égard. En général les lignes situées dans des vallées relativement étroites sont les moins exposées aux coups de foudre.

Les descentes trop brusques de la ligne peuvent donner lieu à un écoulement d'eau important sur les isolateurs et diminuer notablement sa valeur en temps d'orage.

L'importance et la fréquence des accidents dus à l'électricité atmosphérique sont entièrement variables suivant les régions traversées par des lignes de transport de force. Avec les supports peu conducteurs on constate souvent que plusieurs poteaux consécutifs ont été atteints ; les isolateurs sont plus ou moins brisés et les poteaux présentent des fentes, des éclats de bois, etc. Il est très rare avec des supports peu conducteurs que des isolateurs à trois cloches soient mis complètement hors de service, la cloche supérieure étant, en général, la seule atteinte.

Avec les supports très conducteurs, l'accident n'intéresse le plus souvent que les isolateurs d'un seul pylône, et ce dernier ne subit aucun dommage appréciable. Par contre, les isolateurs sont plus fortement avariés que dans le cas précédent. Il n'est pas très rare de voir les trois cloches complètement brisées, à moins qu'on ait étudié une disposition faisant éclater l'arc directement entre le fil et une ferrure voisine. Il semble, avec ces supports conducteurs, que les bris d'isolateurs, en temps d'orages, sont plus fréquents.

Les lignes traversant les rivières seront subordonnées au mode de navigation, à laquelle elles ne devront apporter aucune gêne ou entrave, que ce soit halage ou touage. Partout où il existe un chemin de halage, on ne peut planter ni clore, qu'à 9^m,75 du côté du halage et qu'à 3^m,25 sur le bord opposé. La hauteur minimum des fils au-dessus des plus hautes eaux navigables est de 8 mètres.

L'Administration ne tolère l'occupation de l'emprise des lignes de chemin de fer que dans des cas exceptionnels. Le mieux d'ailleurs est de

les éviter autant que possible, tant en traversée qu'en bordure. L'angle de traversée qui ne doit pas dépasser 30° est plus ou moins facile à réaliser et on sait que les conducteurs doivent être à deux mètres au moins des lignes télégraphiques ou téléphoniques existantes. En cas d'urgence la portion de ligne dans laquelle la traversée est insérée doit pouvoir être sectionnée dans un délai très court.

Le piquetage, ainsi que nous l'avons signalé, doit être confié à un ingénieur expérimenté, qui devra en outre avoir une connaissance approfondie de l'exploitation des lignes elles-mêmes.

Pour procéder au piquetage, le chef d'équipe tient le carnet et opère à la façon des agents chargés des levers de plans et des nivellements pour les tracés des lignes de chemins de fer. Il est suivi dans ses opérations par un ou deux agents ayant pour mission de faire délivrer les autorisations provisoires et définitives, de se renseigner sur les propriétaires et usufruitiers des terrains traversés, sur les contenances des parcelles cadastrales, les désignations des routes et chemins.

L'ingénieur chargé de la direction du piquetage doit se reporter constamment aux prescriptions administratives et techniques des décrets du 21 mars 1911 et du 5 septembre 1908.

Il faudra éviter d'implanter au milieu des jardins et parcs et même de les traverser, sur deux propriétés à cheval, ni sur la ligne de mitoyenneté. On placera les supports de préférence au voisinage des clôtures, séparations ou dans les alignements des plants. On ménagera des passages réservés aux piétons et aux bêtes. Le carnet de piquetage ou un carnet spécial doit noter toutes les indications relatives à l'élagage, au branchage, au récepape et à l'abatage des arbres ⁽¹⁾.

Les résultats des sondages seront consignés dans les carnets de piquetage de façon à être renseigné au point de vue des fondations des appuis.

Un piquetage mal ou insuffisamment étudié peut être la source de graves déboires au point de vue du coût de la construction et de l'exploitation de la ligne. On ne peut être trop minutieux et le carnet devra contenir toutes les observations, renseignements et notes que l'on a pu recueillir en cours d'opération.

On aura ainsi tous les éléments pour faire l'étude définitive au bureau. Au point de vue des indemnités à accorder aux propriétaires ou usu-

(1) Dans le cas de concessions d'utilité publique, l'ébranchage en propriétés privées est soumis aux prescriptions de l'art. 12 de la loi du 15 juin 1906 et à l'art. 36 du décret du 3 avril 1908. A l'aplomb de la voie publique, l'élagage est réglementé par l'arrêté du 21 mars 1910 et la circulaire ministérielle du 1^{er} septembre 1909; à la limite de deux propriétés contigües, les art. 671 à 673 du Code Civil, modifiés par la loi du 20 août 1881, régissent la question. Les servitudes d'études et d'occupation temporaire des travaux d'utilité publique sont consacrées par la loi du 29 décembre 1892.

fruitiers des parcelles traversées par la ligne de transport d'énergie, il convient d'établir au préalable une sorte de tarif uniforme, par exemple pour l'implantation d'un appui simple, pour un appui double, par mètre carré de terrain pouvant être pris pour les fondations de pylônes et pour les emplacements des postes, par mètre linéaire de traversée aérienne, de surplomb, par scellement, par console, par arbre, etc. L'allocation pour un poteau varie de 1 à 10 francs pour un pylône ordinaire, de 40 à 80 centimètres de côté, de 5 à 20 francs y compris la traversée aérienne dans toute la longueur. Le droit d'appui sur un immeuble est aussi de 1 à 10 francs.

Comme coût concernant les autorisations, on peut tabler sur les chiffres suivants, naturellement à titres indicatifs : pose d'appui et droit de surplomb, 0 fr. 25 à 1 franc par mètre de ligne ; élagage et abattage d'arbres, 3 à 4 francs par arbre.

D'après M. Octave Cahen ⁽¹⁾ une équipe bien dirigée peut tracer en moyenne une ligne de 60 à 80 kilomètres en un mois et le prix de revient se tient entre 40 et 50 francs par kilomètre.

En résumé on peut compter pour toutes les sujétions de passage, droits d'appui, d'élagage, d'abattage, de traversée aérienne, sur 150 francs environ par kilomètre de ligne.

Pour faciliter toutes ces opérations, il est bon d'avoir des modèles de contrats ou de conventions préparés à l'avance.

Il nous reste à examiner la question des autorisations selon la catégorie dans laquelle est classée l'entreprise, ainsi que des dossiers ou documents à fournir aux administrations intéressées, car il convient d'être bien fixé sur la nature de l'autorité à laquelle la demande doit être faite et celle du service administratif qui est chargé de l'instruire.

Pour les ouvrages uniquement en propriétés privées, à plus de 10 mètres des lignes de l'État, il n'y a pas d'autorisation à demander ; pour les ouvrages en partie en propriétés privées, à plus de 10 mètres et en propriétés privées, à moins de 10 mètres des lignes de l'État, et pour les ouvrages uniquement en propriétés privées à moins de 10 mètres des lignes de l'État, c'est le préfet qui autorise ; enfin, pour les ouvrages établis en partie en propriétés privées et sur les voies publiques ou totalement sur le domaine public, c'est le ministre ou le préfet, ou le maire, selon l'importance de l'autorisation sollicitée (permission de voirie ou concession) et la catégorie du sol emprunté.

D'autre part, l'Administration militaire impose certaines prescriptions quant à la distance à réserver entre les constructions et ses ouvrages de

⁽¹⁾ Introduction à l'établissement des lignes aériennes de transport d'énergie électrique, par Octave Cahen. Dunod et Pinat, éditeurs.

défense nationale ou de protection du territoire (loi du 10 juillet 1851 et décret du 10 août 1873).

Dans la première zone (0 à 250 mètres), il n'est toléré aucune construction ni plantation; dans la deuxième (250 à 487 mètres), les constructions provisoires sont seulement autorisées, et dans la troisième (487 à 580 mètres) pour les postes de guerre, et 974 mètres pour les places de guerre, défense d'établir des chemins, chaussées, etc.

Les *permissions de voirie* ⁽¹⁾ sont accordées par le préfet dans l'étendue de son département et pour la voirie placée sous son autorité; si la ligne traverse plusieurs départements, c'est le ministre des Travaux publics qui accorde l'autorisation pour la voirie préfectorale; et les maires pour la voirie municipale.

Les demandes doivent être adressées directement à l'ingénieur en chef du contrôle, même celles qui concernent les traversées de chemin de fer ou qui empruntent que des voies publiques de la compétence des maires. Le dossier des pièces à fournir comprend :

- a) Un extrait de carte à l'échelle de 1/80000^e;
- b) Un plan général et une nomenclature des voies publiques à emprunter;
- c) Un mémoire indiquant la destination, l'importance de la distribution, l'emplacement et la nature des ouvrages projetés;
- d) Des dessins donnant les types des installations à établir sur le domaine public. L'ingénieur en chef du contrôle instruit l'affaire, recueille l'avis des services intéressés (postes et télégraphes, travaux publics, chemins de fer, etc.), des maires, des concessionnaires antérieurs. Quatre jours avant de commencer les travaux les représentants de l'entreprise doivent en aviser le service du contrôle ainsi que les divers services intéressés.

Avant la mise en service, l'ingénieur en chef du contrôle fait procéder

(1) La grande voirie comporte les routes nationales et départementales; la petite voirie comprend les chemins vicinaux de grande communication, les chemins vicinaux d'intérêt commun, les chemins vicinaux ordinaires, les chemins ruraux reconnus et ceux non reconnus.

Les voies placées sous l'autorité préfectorale sont les routes nationales et départementales, les chemins vicinaux de grande communication et les chemins d'intérêt commun.

Les autres sont placées sous l'autorité municipale y compris les voies urbaines.

Pour les chemins d'exploitation, l'autorisation de poser des poteaux, par exemple, doit être donnée par le propriétaire riverain, sous réserve de l'approbation des autres riverains.

Les digues sont placées sous l'autorité préfectorale.

Les largeurs moyennes des routes sont les suivantes :

Routes nationales : 14 à 20 mètres; routes départementales : 8 à 10 mètres; chemins vicinaux de grande communication et d'intérêt commun : 8 à 10 mètres et les chemins vicinaux ordinaires : 7 à 8 mètres.

Légende de la (fig. 1356) accompagnant l'arrêté technique du 21 mars 1911.

a) Deux isolateurs placés à la même hauteur et à côté l'un de l'autre sur chaque support de la traversée. Le fil de ligne passe sur un des isolateurs. Un fil court est fixé à l'autre isolateur et relié au fil de ligne par deux ligatures soignées de part et d'autre de l'autre isolateur. De cette manière, le fil de ligne et son isolateur d'une part, le fil court et le deuxième isolateur d'autre part, travaillent en parallèle.

b) Même dispositif, mais avec l'isolateur n° 2 placé au-dessus et non à côté de l'isolateur n° 1. Ce deuxième isolateur devrait être d'un type plus résistant et éprouvé au double de la tension des isolateurs normaux de la ligne.

c) Avec trois isolateurs sur chaque support de la traversée. Les trois isolateurs sont placés à la même hauteur et à côté l'un de l'autre dans le sens perpendiculaire au fil de ligne. L'isolateur du milieu supporte le fil de ligne qui est ininterrompu.

A droite un fil court, fixé d'une part à l'isolateur de droite, d'autre part au fil de ligne par une ligature faite du côté de la traversée. A gauche un deuxième fil court fixé de même à l'isolateur de gauche et au fil de ligne.

d) Même dispositif, mais chaque fil court est fixé au fil de ligne par deux ligatures l'une du côté traversée, l'autre sur la portée contiguë, de façon à équilibrer la traction sur chaque isolateur.

e) Trois isolateurs en triangle horizontal, le sommet du côté opposé à la traversée.

Le câble de ligne est fixé sur chaque support à deux de ces isolateurs en série. Un deuxième câble, dit « câble porteur », de mêmes section et métal que le câble de ligne, le double dans la traversée. Ce câble porteur est ligaturé au câble de ligne juste avant le support de la traversée, s'attache à l'isolateur de ligne placé du côté opposé à la traversée, s'attache ensuite à un isolateur spécial à ce câble, puis rejoint le câble de ligne auquel il est jonctionné tous les mètres.

La tension de chacun des deux câbles qui constituent la traversée est moitié de la tension du câble opposé à la traversée de manière à équilibrer les efforts sur le support.

Sur toute la longueur de la traversée, les jonctions sont de simples ligatures en fil de bronze, mais aux deux extrémités avant d'arriver aux supports, les deux câbles sont réunis par un joint spécial.

Ils sont également réunis par un joint spécial en dehors du support du côté opposé à la traversée.

f) Chaque conducteur est remplacé par un système de deux conducteurs câblés, fixés chacun sur un isolateur. Les deux conducteurs sont dans un même plan horizontal, ils sont reliés par des fils transversaux et diagonaux torsadés.

S'il'un des deux conducteurs vient à se rompre, il tombe et pend dans un plan vertical, toujours retenu cependant par des fils transversaux et diagonaux. L'aspect de ceux-ci est modifié, le service de la voie s'en aperçoit et fait le nécessaire.

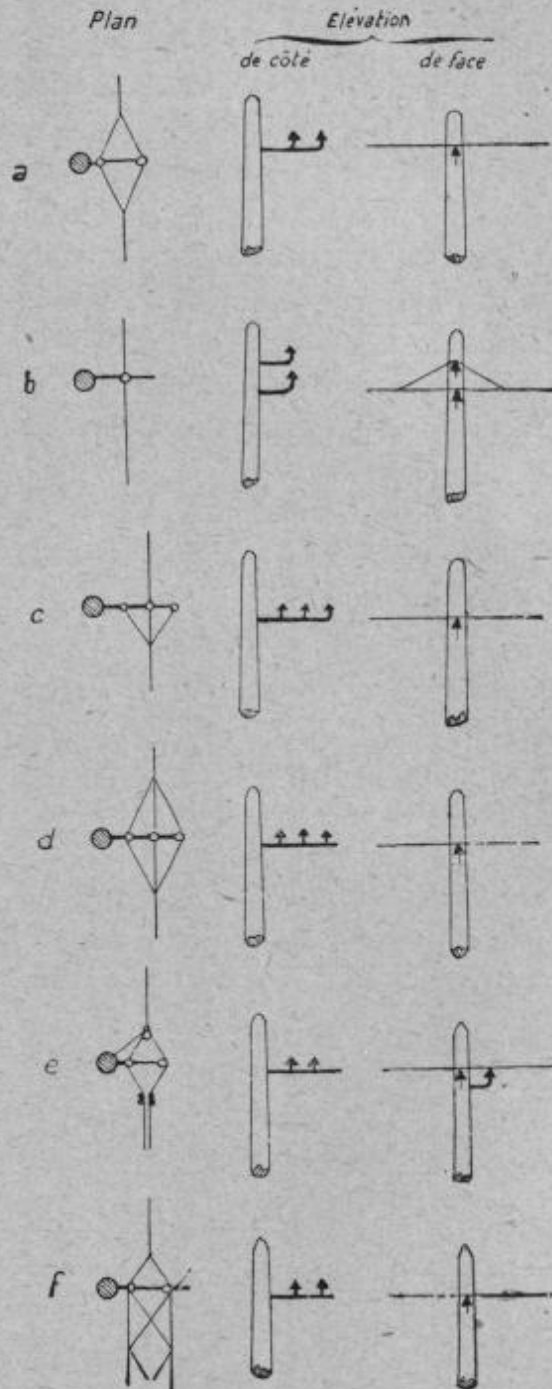


FIG. 1356.

aux essais et à la réception des travaux et le préfet délivre l'autorisation de circulation du courant.

Nous rappellerons que le régime de la permission de voirie ne donne droit à aucun monopole et que sa durée n'est que précaire et révocable.

Les *concessions simples, sans déclaration d'utilité publique* sont subordonnées à l'autorisation du préfet, pour un seul département ; du syndicat des communes pour plusieurs départements ; du maire pour une seule commune et du ministre des Travaux publics pour plusieurs départements.

Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de se pourvoir de demandes de voirie. La demande sera accompagnée : des pièces *a* et *c* désignées plus haut, et, en plus, d'un projet de tarif maximum pour la vente de l'énergie.

Il y aura enquête dont la durée est de huit jours et l'instruction est faite sous la direction de l'ingénieur en chef du contrôle.

La délivrance de la concession est faite par le préfet et l'exécution des travaux est autorisée par l'ingénieur en chef du contrôle, comme pour la permission de voirie.

La concession simple n'accorde pas de monopole, sauf pour l'éclairage public et privé. Le concessionnaire est soumis à se conformer aux clauses et conditions d'un cahier des charges.

Les *concessions avec déclaration d'utilité publique* sont attribuées par le ministre des Travaux publics.

La pétition devra être accompagnée des états de renseignements, du schéma de la distribution du réseau, du plan du réseau, de celui de chacune des lignes électriques, d'un mémoire descriptif, d'un mémoire justificatif, des calculs des canalisations et appuis avec plans et croquis nécessaires, le tout d'ailleurs conformément à la loi du 15 juin 1906, au décret du 3 avril 1908, aux circulaires ministérielles des 3 août et 25 octobre 1908 et l'arrêté du 21 mars 1910.

Pour les traversées des voies navigables et des voies de chemins de fer les documents à fournir à l'appui de la demande sont : 1° une carte des abords ; 2° un dessin des dispositifs adoptés en plan et élévation ; 3° une notice sur les calculs justificatifs des dimensions des supports et 4° un état des renseignements spécial dont le modèle est annexé à la circulaire du 5 septembre 1908.



FIG. 1357.

Les lignes montées sur poteaux en bois nécessitent un entretien assez coûteux et ont l'inconvénient d'être combustibles. Parfois, on remplace la partie inférieure de ces poteaux par deux masses en chêne ou par deux fers à double T scellés dans le béton. L'entretien des pylônes en fer se réduit à les repeindre tous les cinq ans.

Lorsqu'on est obligé de composer de plusieurs fils un des conducteurs de la ligne, on a recours à la disposition de la (fig. 1357). Les

poteaux, comportant des rangées de traverses, offrent le moyen de pouvoir faire les réparations sur l'une ou l'autre des lignes, en transmettant la totalité de la charge sur l'autre (*fig. 1358 et 1359*). Les dimensions des traverses dépendent naturellement de la distance entre fils. Cette distance, exprimée en mètres, est, autant que possible, égale à la tension entre fils divisée par 30.000, et elle ne doit pas être inférieure à 0^m,60. La disposition représentée par la (*fig. 1358*) a trait à une distribution triphasée où chaque fil de phase est dédoublé en deux conducteurs.

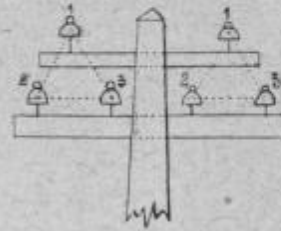


FIG. 1358.

La (*fig. 1359*) représente l'armement d'un poteau avec ferrure pincette au sommet et d'un poteau avec petite traverse au sommet (tension 50.000 volts).

Dans les pays exotiques, on emploie le bois d'acacia et l'eucalyptus.

Les poteaux en bois de palétuvier importé de la Guinée Française pré-

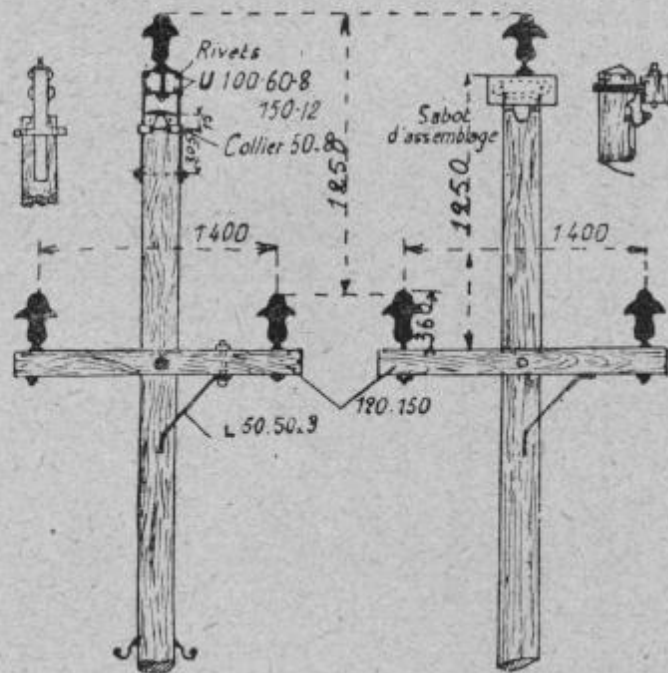


FIG. 1359.

sentent l'avantage d'être imputrescibles et d'assurer une longue durée. Ils offrent en outre une résistance à la flexion presque quadruple de celle du chêne. Pour les lignes de moyenne importance, il faut citer les supports formés d'un poteau en bois maintenu au-dessus du sol par des fers noyés dans un massif de béton.

A Cañon-Ferry (sur le fleuve Missouri), la River Power and Co a installé un transport de force de 50.000 volts à l'aide de poteaux en cèdre

d'Idaho espacés de 33 mètres, tels que celui de la (fig. 1339). Les tiges des isolateurs (qui sont en verre, à triple cloche, de 223 millimètres de diamètre et 130 millimètres de hauteur, supportant des câbles de 70 millimètres carrés de section) ont cela de particulier qu'elles sont faites avec du vieux chêne, bien séchées et bouillies dans la paraffine; elles peuvent ainsi résister à des tensions de 100.000 volts. A l'intérieur de l'isolateur est cimenté un tube de verre de 140 millimètres

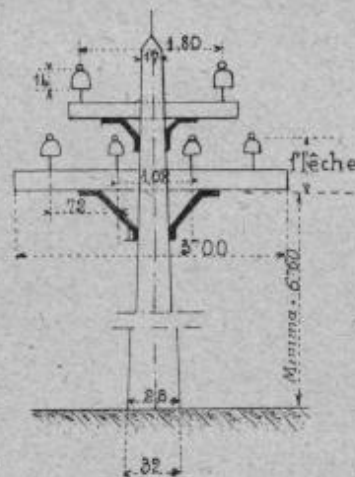


FIG. 1360.

de diamètre à sa partie inférieure et destiné à protéger la tige. Les lignes aériennes, au nombre de deux, identiques, se suivent parallèlement à 15 mètres de distance, et chacune d'elles a 113 kilomètres de longueur.

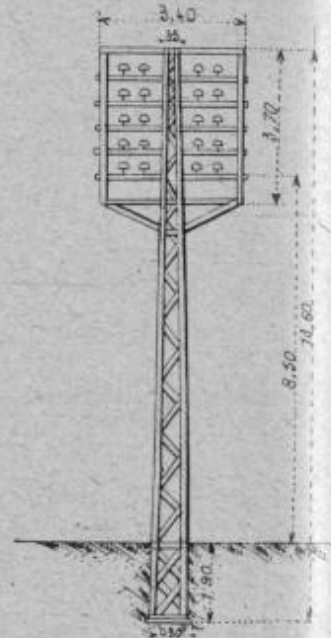


FIG. 1361.

En Amérique, la

tendance est de ne poser qu'un circuit sur chaque ligne de poteaux. Il serait encore préférable de placer chacun des fils d'un circuit triphasé sur trois poteaux distincts, car cette disposition permettrait de les planter à une distance suffisante pour réduire davantage la fuite d'un fil à l'autre à travers l'air.

Actuellement, en Amérique, les traverses sont en sapin massif et ne

portent aucun trou de chevilles ou de boulons de fixation. Les traverses bien séchées sont peintes par immersion avant usage; elles sont reliées au poteau par un boulon de soutien galvanisé pourvu sous la tête et sous l'écrou de deux plaquettes carrées de 5 centimètres de côté. Des tirants galvanisés sont fixés au poteau par une vis freinée et à la traverse par un crampon.

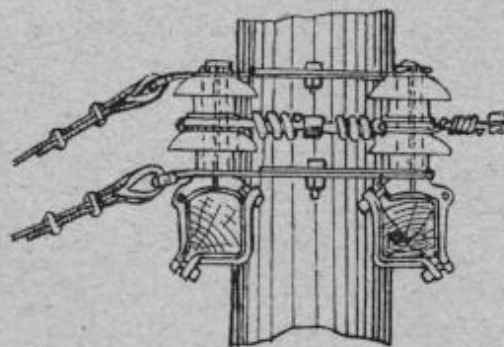


FIG. 1362.

Les broches et les supports sont attachés aux traverses au moyen de brides qui sont disposées de façon à serrer la traverse également sur toutes ses faces tout en n'ayant que deux points de serrage. Les broches

et les consoles à brides ont été employées utilement pour d'anciennes installations où l'on voulait remplacer les broches de bois, arrachées ou cassées, et les consoles dont les vis s'étaient rouillées ou arrachées. Les broches à brides ont été employées aux ponts de sectionnement des lignes, auquel cas la tension des lignes est transmise par des tirants à tiges réglables placés au-dessus et au-dessous des isolateurs (*fig. 1362*).

POTEAUX MÉTALLIQUES

532. Types de poteaux usuels. — C'est en Italie que l'emploi des supports métalliques avec grandes portées a pris naissance (lignes Paderno-Milan, Lanzo-Turin). La forme des poteaux fut étudiée en vue de l'économie maxima du métal, et les poteaux élastiques du Brembo donnèrent une solution élégante du problème. En 1903, la Société Guanajato Power and Electric Co construisit une ligne de transport à 60.000 volts en adoptant des supports entièrement métalliques, constitués par des sortes de tours en acier galvanisé. Aujourd'hui l'emploi des poteaux métalliques s'est généralisé un peu partout, et, en Europe, ils semblent être le support type des grandes lignes de transport de force. En effet, pour une ligne importante et des longues portées, les poteaux métalliques s'imposent en raison de leur solidité et de leur amortissement, lequel est près du double de celui des poteaux en bois. Ils présentent l'avantage d'une longue durée, si on a le soin de les préserver contre l'oxydation et si on ne considère que la partie exposée à l'air. Mais, malheureusement, l'oxydation envahit assez rapidement le pied du poteau, à la section d'encastrement, et en réduit, de ce fait, la durée d'une façon assez appréciable.

Nous devons signaler que les maisons Bouchayer et Viallet construisent des pylônes dont la tête est galvanisée, la partie inférieure pouvant être repeinte sans que l'on soit obligé d'arrêter le courant sur la ligne. La Société des forces motrices du Fier utilise ce genre de poteau sur ses lignes de distribution d'énergie électrique.

Les poteaux métalliques peuvent se ranger en trois classes principales : les poteaux assemblés ou à quatre arêtières, tels que les types Lemasson, Fives-Lille, André, Griveaud, etc. ; les poteaux tubulaires, qui conviennent très bien pour les efforts ordinaires et se prêtent facilement à la décoration, mais sont d'un prix élevé ; enfin, les poteaux-treillis, les plus rationnels lorsqu'il s'agit d'atteindre de grandes hauteurs et de résister à des efforts considérables (pylônes, poteaux d'arrêt ou de concentration de lignes).

Les poteaux tubulaires se composent de tubes de fer de diamètres décroissants, emmanchés l'un dans l'autre, ou simplement d'une feuille

métallique repliée sur elle-même, soudée par approche ou même non soudée. Ces derniers sont particulièrement élastiques, ainsi que nous avons pu nous en convaincre par les nombreux essais faits en notre présence à Louvroil, aux usines de la Société française pour la fabrication des tubes. Ces poteaux sont coniques et d'une seule pièce jusqu'à 13^m,50 de hauteur. Le diamètre maximum à la base est de 290 millimètres et l'épaisseur maximum de la tôle, de 20 millimètres environ. Ces poteaux résistent à des efforts de traction, dans le sens horizontal, variant depuis 50 kilogrammes jusqu'à 1.500 kilogrammes.

La même société a établi un type de poteau démontable qui offre un

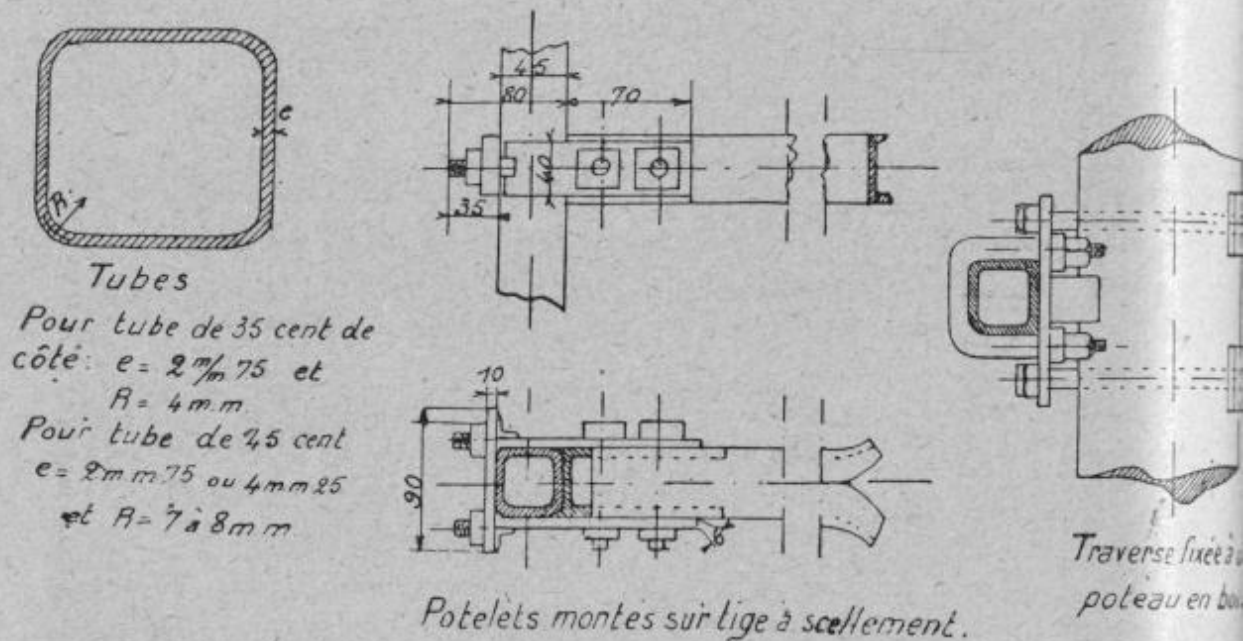


FIG. 1363.

moyen simple et pratique d'emmanchement par enfilage de tubes de forme carrée.

L'emploi de ces tubes carrés permet de réaliser le maximum de solidité sous un poids minimum, d'où économie dans le prix d'achat, facilité de transport et dans le montage. La résistance mécanique du tube à profil carré est théoriquement supérieure de 30 0/0 à celle du tube rond et dépasse celle des fers du commerce de profils divers de 100 à 200 0/0. Ces tubes conviennent très bien pour l'exécution des potelets et des traverses. Les consoles d'isolateurs d'un modèle approprié se fixent sur le tube à section carrée par serrage extérieur au moyen de brides et tous les assemblages se font d'ailleurs par brides ou plaques de serrage, sans le secours d'aucun percement. Les traverses sont constituées par des barres creuses de profil extérieur carré (fig. 1363).

La ligne de Caffaro a été équipée avec des poteaux creux à trois

montants entretoisés par des pièces en forme de triangles avec colliers de serrage au sommet. Les portées sont de 50 à 60 mètres.

On reproche aux poteaux-treillis leur encombrement, leur défaut d'esthétique, leur prix relativement élevé et l'accès trop facile qu'ils offrent aux entreprises des malveillants ou simplement des imprudents.

La résistance du métal employé, généralement l'acier doux, permet de faire les pylônes très légers ; les pièces qui les composent, qui peuvent être démontées à volonté, sont toujours faciles à transporter isolément et

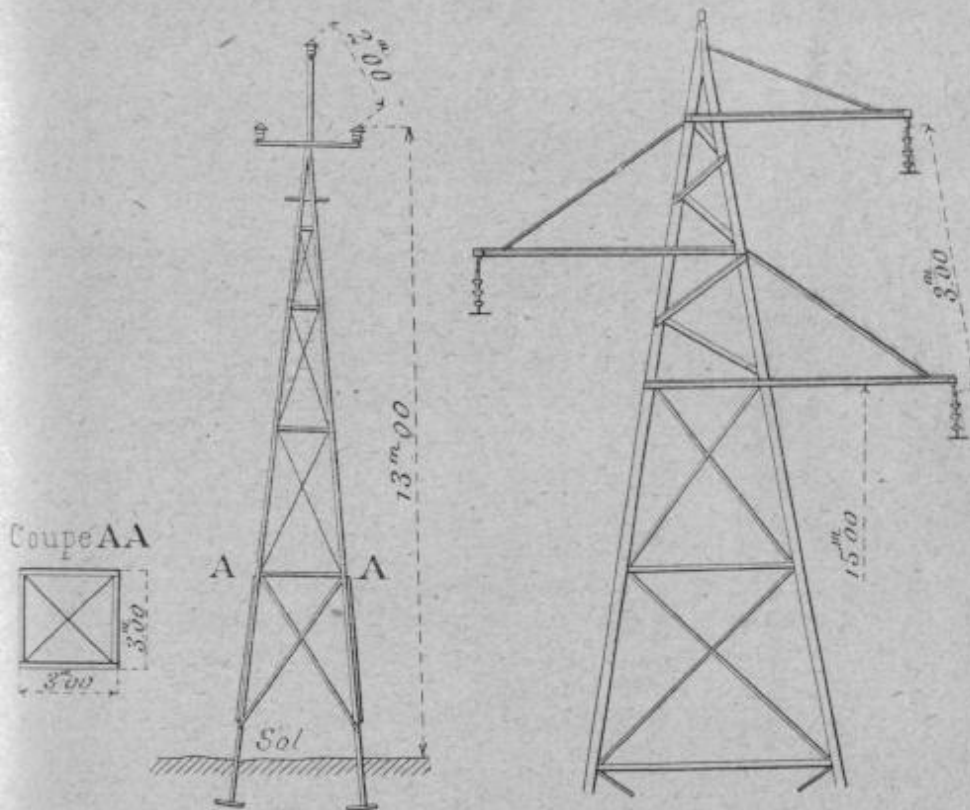


FIG. 1364. — Tours d'acier galvanisé. Ligne de Guanajato.

à remonter sur place, et, moyennant certaines précautions, leur entretien est peu important, lorsque les barres qui les composent ont été galvanisées au préalable.

La base des pylônes ordinaires a généralement $1^m \times 1^m$ et leur fondation exige $2^m,30$ à $2^m,35$ de béton de chaux hydraulique. Lorsque la propriété est très morcelée et que les expropriations deviennent onéreuses, on réduit la base autant que possible ; il en existe dont la base ne dépasse pas $0^m,60 \times 0^m,60$ (Ligne de la Sioule à Clermont-Ferrand). Sur une même longueur on adopte trois ou quatre types de pylônes différents provenant d'angles, de portées inégales, de grandes portées, etc.

Pour le calcul du massif de fondation on suppose que le massif de maçonnerie est simplement posé sur un plan horizontal, ce qui revient à

négliger le frottement et la poussée sur les faces latérales des terres où il se trouve logé. Dans ce cas le poids et les dimensions du massif doivent

être suffisants pour que son moment de stabilité soit supérieur au moment de renversement maximum. Pour ce dernier on lui donne une valeur égale à la somme des moments fléchissants à la base du pylône. Cette dernière reposant sur une maçonnerie doit avoir une valeur suffisante pour que la pression par centimètre carré ne dépasse pas les chiffres suivants : béton de ciment 6 à 12 kilogrammes

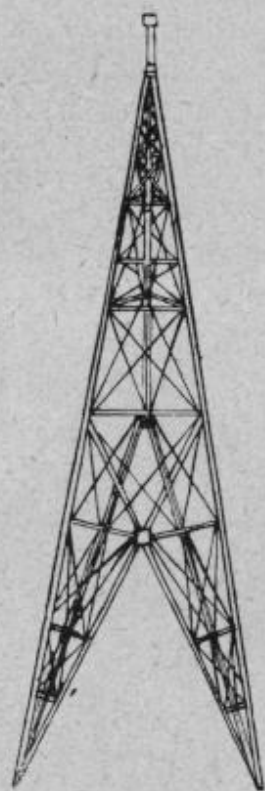


FIG. 1365. — Support jumelé de la Southern Power et C^{ie}.

par centimètre carré ; chaux, 4 à 5 et sable et gravier, 3 à 4.

Chaque pylône est soigneusement mis à la terre ou mieux encore relié à un fil de terre général, qui est lui-même mis à la terre en des points convenables, tous les quatre ou cinq pylônes.

Les tours en acier (pour les très grandes portées) sont construites avec des éléments transportables, et le montage en est fait sur place. Le dressage ou levage se fait comme pour les pylônes, soit avec un poteau auxiliaire, soit avec un chariot spécialement organisé à cet effet ou à l'aide

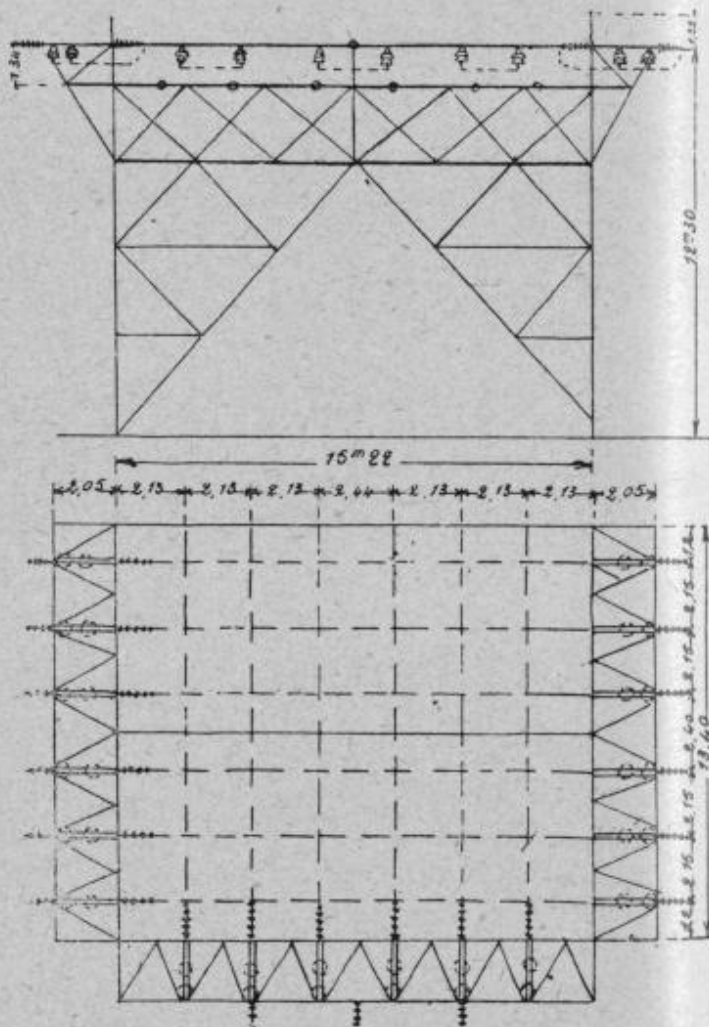


FIG. 1366. — Tourelle de couplage (Ligne à 166.000 volts de Monticello).

d'une chèvre fixe ou montée sur roues avec treuil à engrenages disposés au pied des engins. Ces tours sont de forme triangulaire ou quadrangulaire et ont en général 3 ou 4 mètres à la base. Les distances adoptées couramment pour ce genre de supports sont de 150 à 200 mètres. Ils semblent indiqués dans les endroits où il y a des terrains incultes et où la valeur du terrain n'empêche pas de les employer.

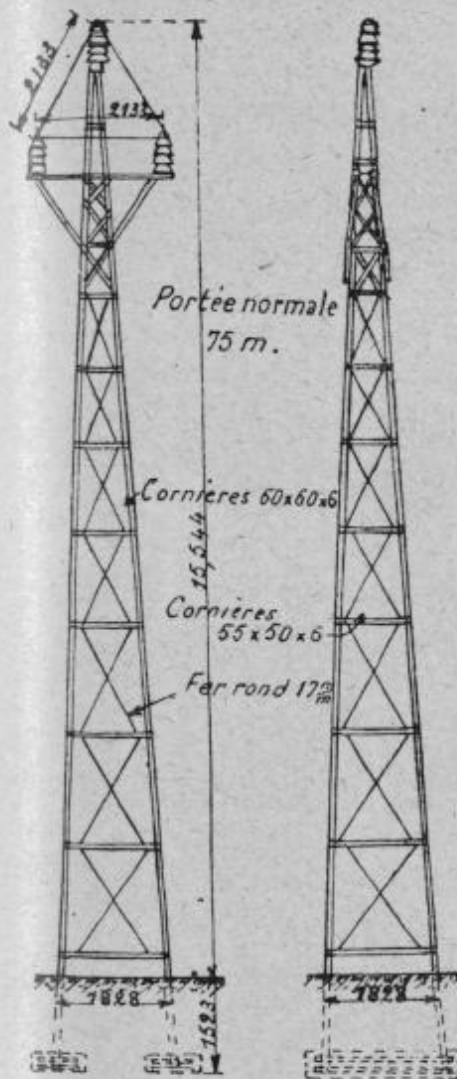


FIG. 1367. — Tour de section carrée de la ligne à 60.000 volts de Syracuse.

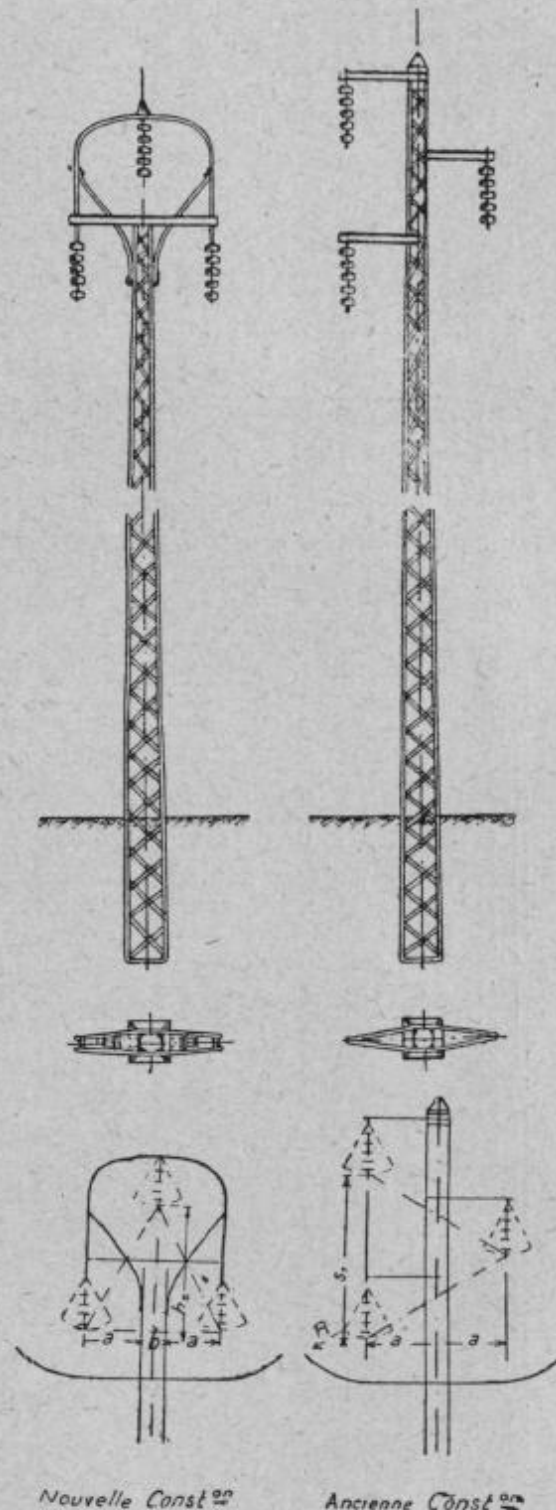


FIG. 1363.

Le poteau représenté (fig. 1368) pour dispositif à chaînes d'isolateurs permet de placer les trois chaînes symétriquement par rapport à l'axe

du pylône, aux trois sommets d'un triangle équilatéral et il donne le moyen de simplifier la construction de la tête du support. Toutes conditions égales, ce pylône permet de réduire la distance verticale des conducteurs de $1/7^e$ environ.

On peut aussi installer des étriers de sécurité efficace qui ne détruisent pas complètement l'esthétique du poteau, car avec un seul étrier on peut garantir les deux conducteurs inférieurs et l'archet protège celui du haut. Il est ainsi même possible de supprimer le fil de terre que l'on dispose d'habitude au sommet des supports.

Les poteaux métalliques dits « élastiques », de la ligne du Brembo, paraissent tout indiqués pour les lignes à tracé régulier et avec des portées uniformes, comme cela se présente dans les traversées de plaines. Le support en question se compose de deux fers à U parallèles, reliés par des croix de Saint-André ; il a à sa base 2 mètres environ, et il peut fléchir de 40 centimètres à son sommet sans dépasser la limite d'élasticité. On sait, à ce sujet, qu'en ligne droite, et pour des portées égales, les poteaux n'ont à résister qu'à des efforts transversaux et que, par suite, il n'est pas nécessaire de leur donner une grande résistance longitudinale.

Ces supports flexibles sont placés par série de cinq avec un pylône rigide intercalé entre chaque série. La courbure légère du pylône ou sa déviation dans la direction de la ligne a pour résultat le raccourcissement de l'écartement sur un côté, provoquant ainsi une différence dans l'effort exercé par les conducteurs. Ces appuis résistent aux efforts du vent sur les côtés et à la tension des conducteurs, dans la direction de la ligne, de façon que cette dernière concourt à la solidité de l'ensemble.

Pour tenir compte de l'effet du vent dans la direction de la ligne il y a lieu de disposer de distance en distance dans les grands alignements droits des poteaux d'arrêt qui limitent la flexion des supports les plus fatigués, de manière que leur élasticité ne soit pas altérée. Les lignes en fers laminés doivent être solidement établies et ancrées ; jusqu'à la prise du béton, les poteaux doivent rester haubannés.

Lorsque les lignes sont doubles, l'entretoisement de ces deux lignes séparées permet d'alléger le poids des poteaux, tout en leur donnant une plus grande assise favorable à leur stabilité.

Les poteaux de la transmission Paderno-Milan, portant 9 fils de 9 milli-



FIG. 1369.

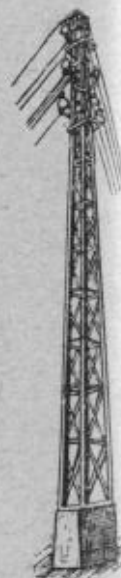


FIG. 1370.

mètres de diamètre et ayant 10 mètres de hauteur au-dessus du sol, pèsent 400 kilogrammes pour chaque ligne séparée. De tels poteaux, ne supportant que 3 fils de 4 à 5 millimètres de diamètre, permettent d'obtenir des portées de 100 mètres. Les (fig. 1369 et 1370) montrent les poteaux en treillis employés pour la ligne à haute tension du transport de force de Bellinzona (Italie).

Les pylônes normaux de transport de force de la Compagnie électrique du Nord (ligne triphasée à 50.000 volts) ont un poids de 750 kilogrammes pour les sections à 9 fils et de 500 kilogrammes pour les sections à 6 fils ou 3 fils. Les pylônes de 24 mètres de hauteur, pour les traversées de canaux, pèsent 3.800 kilogrammes ; leur section carrée, au niveau du sol, est de 2 mètres de côté.

Nous allons signaler certaines particularités d'un type de pylône construit pour une ligne triphasée à deux circuits installée aux États-Unis. Il se compose d'une pyramide inférieure constituée par quatre

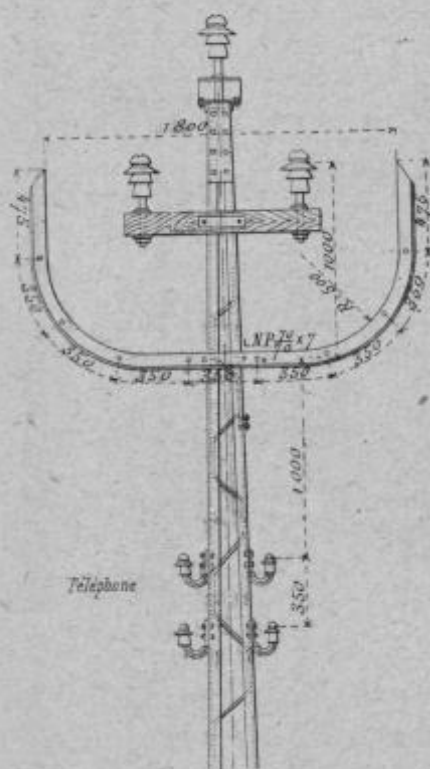


FIG. 1371.

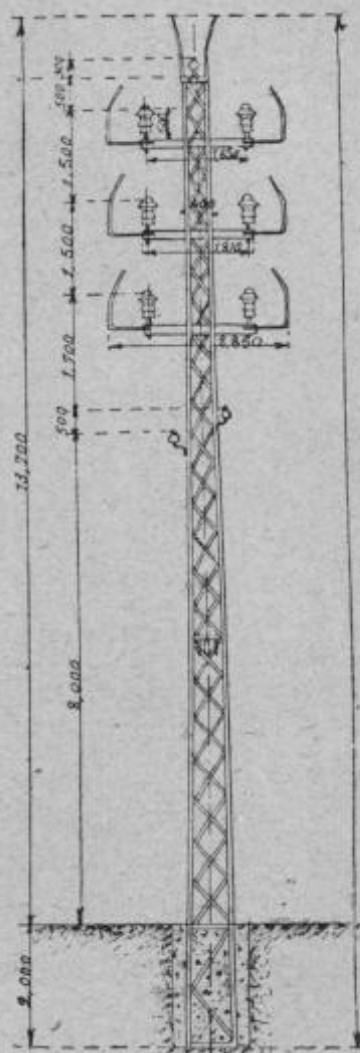


FIG. 1372. — Support de la ligne à 70.000 volts du val du Fier, à Lyon.

poutres tétraédriques symétriques très allongées et assemblées par leur plus petite arête, puis d'un prisme carré surmontant cette pyramide et auquel sont directement fixés les bras latéraux portant les isolateurs.

Nous avons retrouvé là une disposition analogue à celle que nous avons utilisée pour l'établissement de palées de grues à portiques.

La base de ces pylônes est un carré de 5^m,15 de côté formé par un cadre plan reliant rigidement entre elles les extrémités inférieures des quatre poutres d'angle ; ces dernières se fixent sur leur socle en maçonnerie par

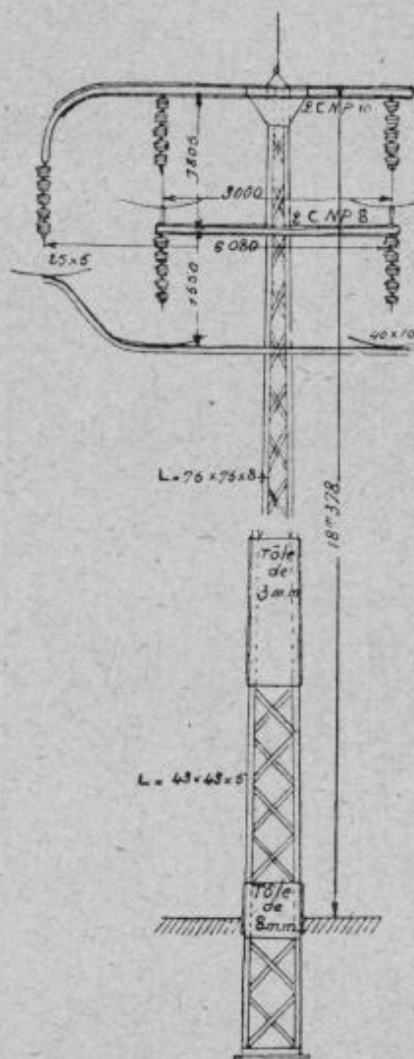


FIG. 1373. — Pylône normal avec isolateurs suspendus et étrier de mise à la terre (Ligne de Groba, à 110.000 volts).



FIG. 1374. — Support métallique avec fers à U (Ligne Tencin-Brignoud).

l'intermédiaire de quatre tiges d'ancrage scellées à une profondeur de 1^m,80 dans ce socle et assemblées, après achèvement du montage du pylône, avec le reste de la charpente métallique. Celle-ci a une hauteur de 23^m,25 ; son premier bras latéral est à 1^m,55 au-dessous de son sommet où se fixe un fil de protection, et ses deux autres bras à 3^m,05 au-dessous du premier et l'un de l'autre.

Le pylône est entièrement construit en profilés d'acier, assemblés au

moyen de boulons et disposés de façon à obtenir la résistance maxima avec la quantité minima de matière. Les pièces qui le composent, à l'exception des boulons et des écrous, sont galvanisées à chaud et elles sont expédiées démontées en colis peu encombrants. Le montage se fait sur place, le pylône reposant couché sur le sol, puis une fois monté il est

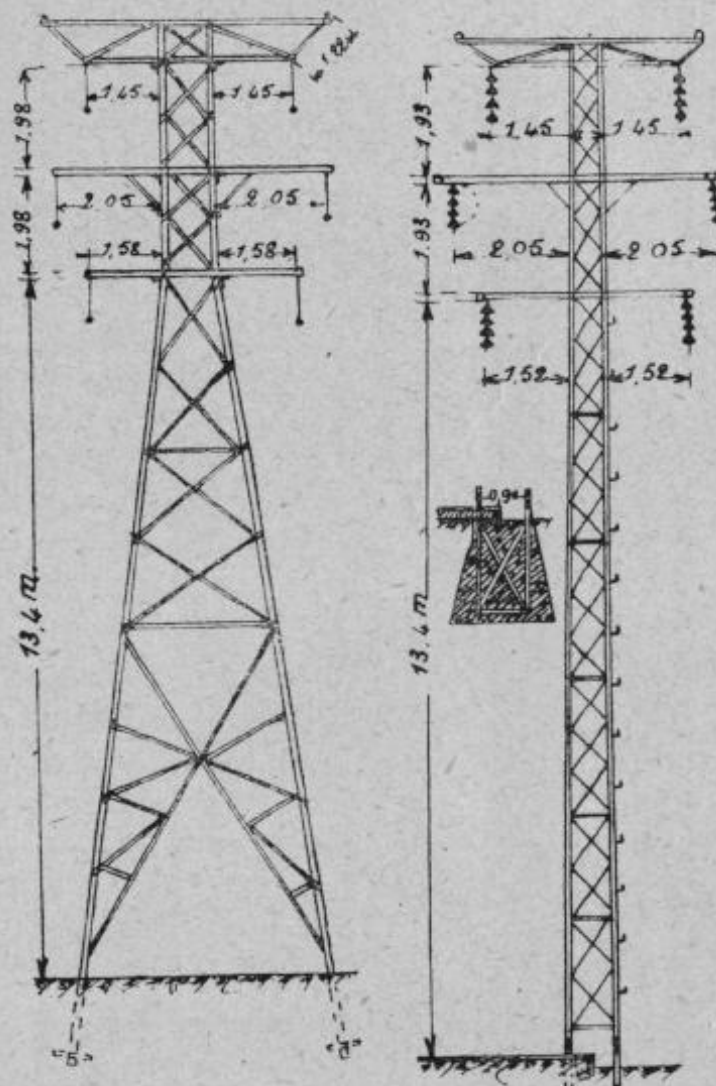


FIG. 1375. — Schéma des côtés des pylônes de la ligne à 60.000 volts de la Central Georgia Cie.

redressé par rotation autour de deux de ses pieds et finalement ancré sur ses fondations par boulonnage sur les tiges scellées, mentionnées plus haut. Les pièces de ces pylônes et leurs bras, qui sont des cadres horizontaux embrassant leur partie prismatique supérieure, sont dimensionnées pour résister, avec un coefficient de sécurité suffisant, aux efforts suivants, auxquels elles sont effectivement soumises pendant les essais : une tension horizontale de 450 kilogrammes appliquée au sommet du pylône et en même temps une tension horizontale de même sens de 1.120 kilo-

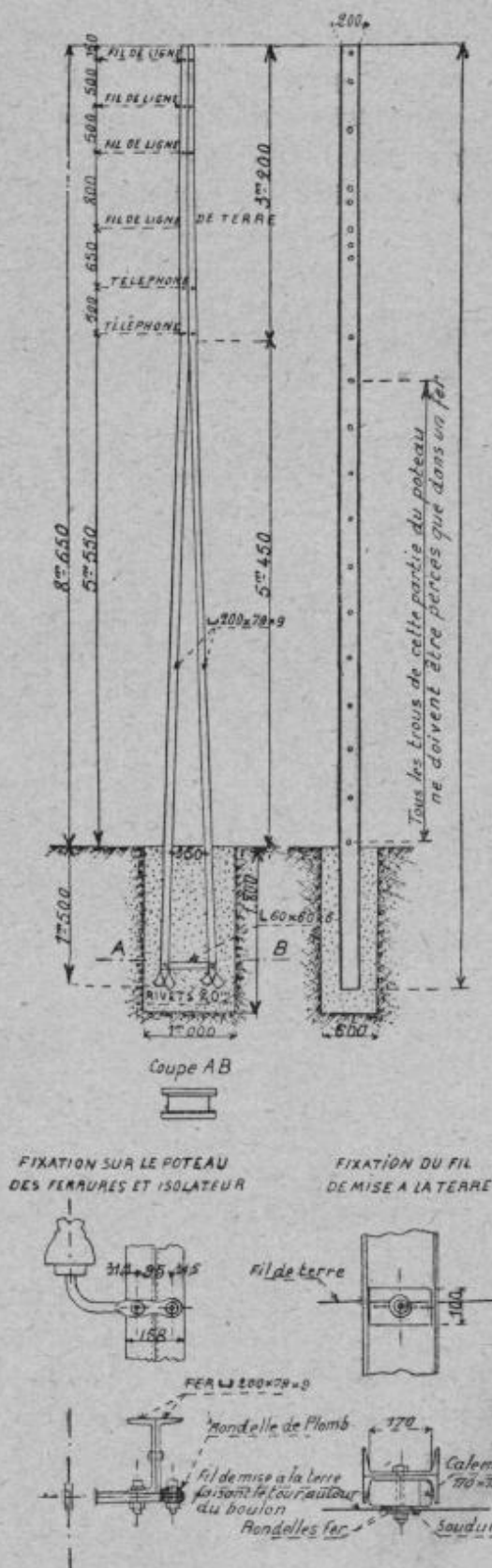


FIG. 1376.

de 11^m,65 avec un profil de 200^{mm} × 80^{mm} × 6^{mm},5. Les poteaux

grammes appliquée à chaque bras ; une charge verticale de 450 kilogrammes agissant à l'extrémité des bras horizontaux laquelle produit une traction horizontale de 1.350 kilogrammes s'exerçant sur l'une des extrémités de l'un de ses bras.

La (fig. 1371) représente un des poteaux simples utilisés pour les lignes de transmission de la vallée de l'Urft. Ils sont formés de fers en U et sont encastrés dans un massif de béton à l'écartement de 40 à 45 mètres. A la base sont soudés de forts boulons de cuivre qui traversent le bétonnage et s'enfoncent profondément dans le sol ; de plus, un fil de fer placé à 1 mètre au-dessous de la ligne à haute tension réunit tous les six poteaux entre eux ; un mètre plus bas encore se trouve le réseau téléphonique privé, constitué par deux ou quatre fils disposés en croix pour assurer l'antiinduction.

La console courbe adaptée sur les poteaux sert à fixer le filet protecteur dans les traversées des routes.

Les poteaux en fer pour lignes secondaires, du type nouveau de la Société du Sud Électrique, sont constitués, dans les alignements droits, par un simple fer en U ayant, pour les lignes à trois fils, une hauteur de 10 à 15 mètres avec un profil de 175^{mm} × 170^{mm} × 6^{mm} et, pour les lignes à six fils, une hauteur

d'angles sont constitués soit par des fers en U du type normal, renforcés sur une certaine longueur par un fer de mêmes dimensions, soit pour les angles de moins de 100° par des fers en U assemblés comme l'indique la (fig. 1376).

Ces supports sont très résistants contre les efforts transversaux que le vent fait subir aux lignes, car l'âme du fer est disposée perpendiculaire-

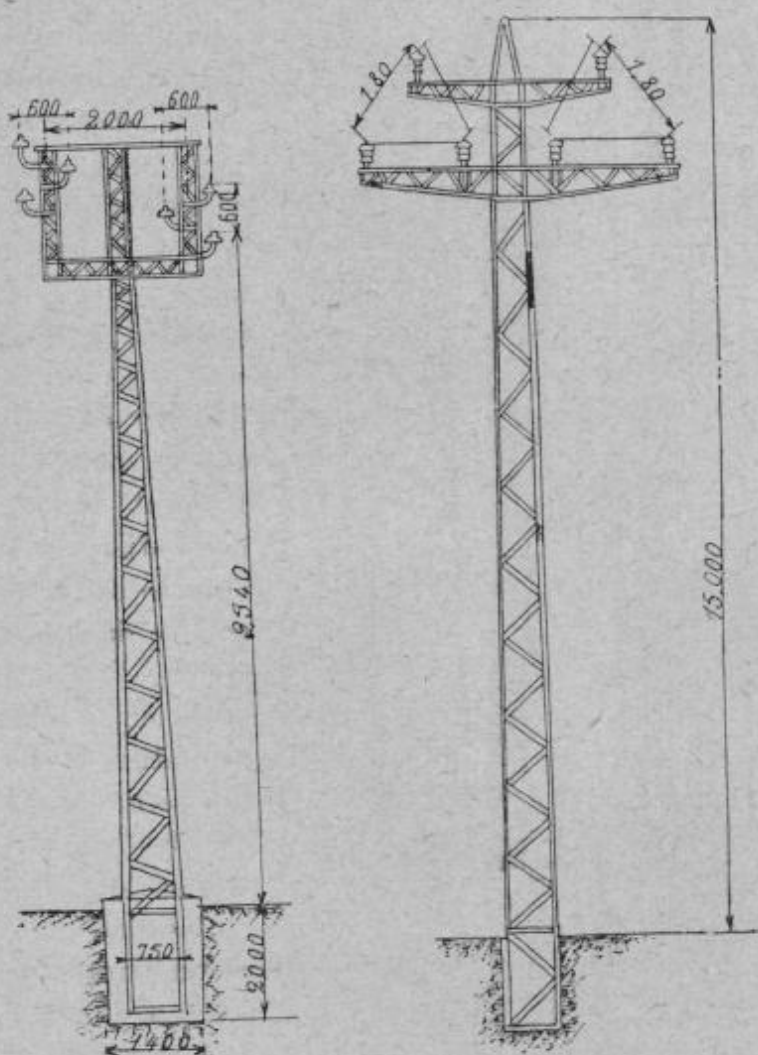


FIG. 1377. — Pylônes métalliques pour lignes triphasées doubles.

ment à la direction des conducteurs. Dans le sens longitudinal, le support présente une moindre résistance, suffisante cependant en temps normal, tant que l'équilibre initial subsiste de part et d'autre du support. Si l'équilibre vient à se rompre, soit par rupture d'une portée, soit en cas de vent violent dans le sens de la ligne, les supports fléchissent de proche en proche mais, par suite de la diminution correspondante des tensions, les flexions décroissent rapidement, et il s'établit un nouvel état d'équilibre. La limite d'élasticité ne serait atteinte qu'en cas de rupture totale d'une travée et

pour les deux ou trois premiers supports seulement, qui prendraient une déformation permanente sans que la rupture se produise. D'ailleurs, pour limiter les effets de ces efforts transversaux accidentels, on a placé, toutes les sept portées, un support renforcé, dit poteau d'arrêt, qui limite la flexion et évite une fatigue exagérée.

Ces divers poteaux arrivent à pied d'œuvre tout percés et prêts à recevoir leur équipement, qui

comprend trois ou six fils de haute tension, deux fils de téléphone et une connexion pour le fil de terre.

Les avantages de ce type de poteau sont nombreux : la facilité d'approvisionnement et de distribution à pied d'œuvre aussi grande que s'il s'agissait de poteaux en bois ; faible encombrement sur le sol ; pas d'entretien, pas d'usure à craindre du fait de la rouille comme dans les poteaux à treillis, enfin économie sensible par suite de l'augmentation des portées, etc. L'aspect des lignes ainsi construites est d'ailleurs très satisfaisant.

Ces poteaux sont peu encombrants, offrent une résistance maxima dans un sens perpendiculaire à la ligne et sont flexibles dans le sens de la ligne. Tous

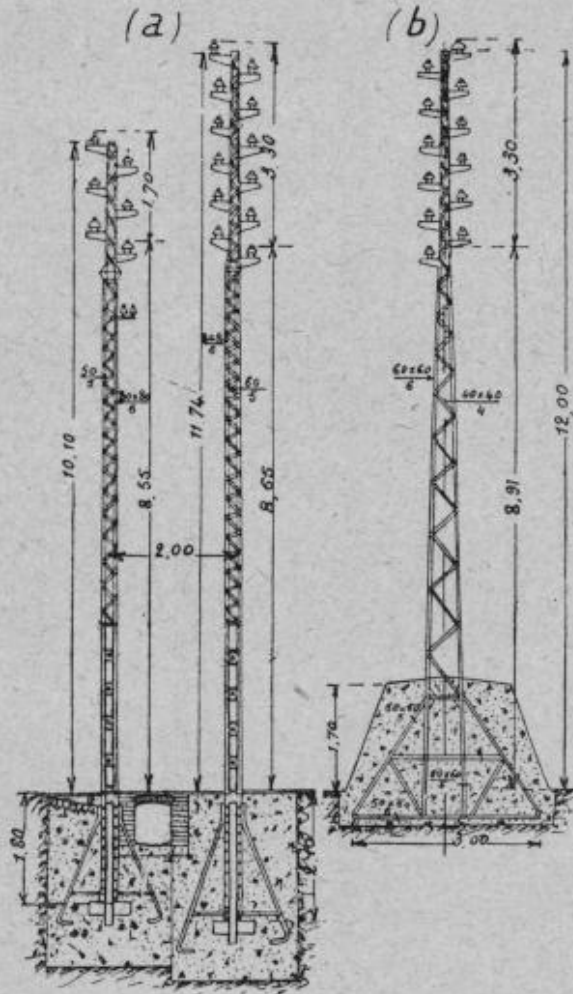


FIG. 1378. — Supports spéciaux Tivoli, sur terrain envahi par les eaux sulfureuses (Ligne de Tivoli).

les 400 mètres on dispose un poteau d'arrêt (deux fers profilés dos à dos). Les portées sont de 50 à 60 mètres. On les enterre dans un massif en béton de 0^m,50 diamètre et 1^m,80 profondeur ; l'encastrement est de 1^m,50.

Un pylône coûte environ 4 fois plus cher que le poteau en bois qu'il remplace, mais il convient de remarquer que les formes des mâts usités le plus souvent ne sont pas les plus économiques. Il semblerait que des poteaux constitués par des fers en I à profils normaux, dont les modules

de section dans deux plans perpendiculaires ont un rapport très voisin et inférieur à $1/8$, donneraient une solution avantageuse au point de vue du prix de revient. Pour obtenir une section décroissante et avoir un solide d'égale résistance, on accouple plusieurs poutrelles de différentes hauteurs. Cependant dans les alignements droits, il est possible de faire usage de poteaux à section constante, qui offrent l'avantage de présenter une flèche moitié de celle d'un solide d'égale résistance.

Les supports constitués par des poutrelles peuvent ainsi remplacer avantageusement les pylônes en treillis pour les efforts qui ne dépassent pas 1.000 kilogrammes au sommet dans une direction horizontale. Des poteaux de ce genre ont été employés avec succès dans des lignes de transmission d'énergie dans la Haute-

Savoie. Telle la ligne de Thonon à Annemasse (34 kilomètres) dont le caractère de simplicité nous a particulièrement frappé. Dans les alignements droits, les supports constitués par des fers à I de 310 kilogrammes de 11, 12 et 14 mètres; avec agrafes métalliques spéciales pour les isolateurs, selon la (fig. 1379), sont revenus à 99 francs, dont 68 francs pour le poteau pro-

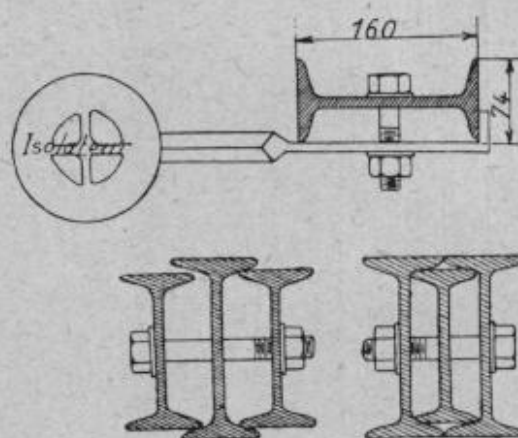


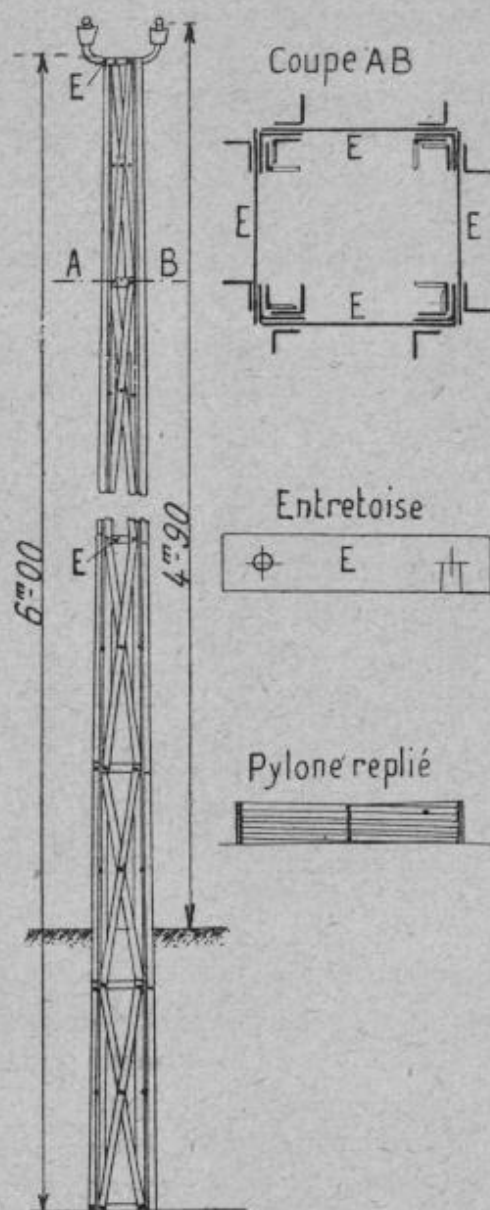
FIG. 1379.

prement dit mis en place, 7 fr. 30 pour le béton, 1 fr. 30 pour les boulons, 10 francs pour les isolateurs (3 à 15.000 volts et 2 de téléphone) et 12 fr. 40 pour les cadres de protection aux angles (frais répartis), la ronce, la peinture et frais généraux. Le kilomètre de ligne n'a pas atteint 2.000 francs, abstraction faite du cuivre, des filets et des interrupteurs aériens. Ces prix ne sont pas supérieurs au double du prix de revient d'une même ligne réalisée en poteaux de bois.

D'après M. G. Veil, qui a étudié cette ligne, constituée par 3 fils de 5 millimètres de diamètre, 2 fils de téléphone et 1 fil de terre, on pourrait prendre pour 6 fils de 7 millimètres et des portées de 50 mètres, un profil de 180×82 pesant au mètre 21,9 kilogrammes et, lorsque les portées de part et d'autre du support sont très inégales ou lorsque ce poteau a un filet à supporter, adopter un assemblage de deux ou trois fers à I différents, de façon que les ailes de l'un coïncident entre les ailes des autres, des boulons réunissant ces poutrelles (fig. 1379).

Le pylône métallique extensible, système Delagneaux, représenté par

la (fig. 1380) a l'avantage de pouvoir être plié et replié très rapidement, tout en conservant une grande rigidité ; il est en effet muni, au niveau de



[Fig. 1380.]

chaque articulation, d'entretoises métalliques E qui l'empêchent de s'affaisser, en maintenant les axes des articulations à un écartement invariable. Au contraire, en relevant les entretoises E, on peut, par une légère pression, le replier complètement pour le transporter, notamment par chemins de fer ou dans des régions d'accès difficile.

D'autre part, ce système permet de pouvoir régler un même poteau à des hauteurs différentes.

Sa légèreté, sa facilité de fabrication (tous les croisillons étant cisailés et poinçonnés au même gabarit, puis assemblés), rendent ce type de pylône économique et avantageux dans bien des cas.

533. Réception des poteaux métalliques. — (*Prescriptions de l'Administration des postes et télégraphes*). — L'Administration impose pour les fers de l'acier doux présentant une résistance de 42 kilogrammes par millimètre carré et un allongement à la rupture de 20 0/0 au moins. Les barres plates ou les bandes découpées dans les

cornières doivent pouvoir se replier sur elles-mêmes à bloc, à froid, sans déchirure.

Elle exige que tous les trous de rivets soient bien cylindriques, sans bavure et n'inclinant d'aucun côté, poinçonnés sous un diamètre inférieur de 3 millimètres au diamètre du rivet, puis alésés au diamètre voulu ; les bords en être chanfreinés à une profondeur égale à $1/8$ du diamètre du trou. A froid, le diamètre du corps du rivet ne pourra être inférieur de plus d'un demi-millimètre à celui du trou. Le chauffage uniforme des rivets, sur toute leur longueur, ne leur fera pas dépasser le rouge cerise.

Leurs têtes ne présenteront ni gerçures, ni fentes ; elles seront bien hémisphériques et concentriques à l'axe du corps.

Les cornières seront nettement profilées sans chanfrein. Leurs extrémités, ainsi que celles des plats, cisailées et rabotées bien carrément, présenteront des arêtes droites et vives.

Les barres et diagonales du treillis, bien à épaisseur, auront leurs extrémités rabotées, de manière à s'appliquer exactement les unes contre les autres et contre les cornières des montants.

A l'endroit des joints, les arêtes des cornières seront meulées, de telle manière que les pièces du joint s'emboîtent exactement l'une dans l'autre.

Pour les traverses porte-isolateurs, les joints devront en outre être étanches.

Les pièces doivent être bien dressées avant le traçage, afin que les longueurs et les distances des rivets soient bien exactes.

Les boulons seront munis d'écrous doubles ; les filets bien réguliers.

Toutes les pièces à fournir doivent être galvanisées.

La fonte sera de deuxième fusion. Elle présentera dans sa cassure un grain gris, serré et régulier avec arrachements ; elle devra être à la fois douce et tenace, facile à entamer à la lime et au burin et susceptible d'être refoulée au marteau ; elle prendra peu de retrait au refroidissement ; enfin, elle sera égale, sous tous rapports, aux meilleures fontes de moulage.

La résistance du métal sera constatée par des épreuves à froid, au choc : un barreau prismatique de $40 \times 40 \times 250$ millimètres, placé horizontalement sur deux couteaux d'acier, espacés de 160 millimètres, ne pourra se rompre sous le choc d'un mouton de 12 kilogrammes tombant librement sur le milieu du barreau, tant que la hauteur de chute ne dépassera pas 400 millimètres. L'enclume en fonte supportant les couteaux pèsera au moins 800 kilogrammes. Les barreaux d'essai seront coulés horizontalement, sans masselotte, en sable sec, en présence de l'agent réceptionnaire et il pourra être exigé deux de ces barreaux à chaque coulée, ou des barrettes d'essai tenant aux pièces.

Les pièces en fonte présenteront une surface bien nette et unie ; toutes les inégalités, coutures, bavures, etc., auront été soigneusement rabattues à la lime. Les contours seront bien moulurés, à angles vifs ou arrondis, suivant le cas, à la lime, s'il est jugé nécessaire.

Les trous de boulons seront bien alésés et sans bavure ; les boulons, exactement du diamètre des trous qui doivent les recevoir, porteront un écrou et un contre-écrou.

Les surfaces formant joint, rabotées au besoin, s'appliqueront exactement l'une sur l'autre.

Les poteaux seront présentés en réception, dépourvus de tout enduit, couleur, matière grasse, etc.

Aussitôt après l'agréation, on recouvre les parties métalliques, tant cachées que vues, de deux couches de peinture : la première au minium de plomb avec huile de lin, bouillie à la litharge (sans essence de térébenthine), la seconde au blanc de zinc.

Outre ces deux couches, les poteaux sont recouverts, après le montage, d'une couche de peinture gris fer, à base de zinc, puis d'une couche au blanc de zinc additionnée d'ocre, de manière à réaliser la teinte donnée par la plaque échantillon déposée.

La quantité minima de couleur à base de zinc à appliquer ressort à 0,114 kilogramme par mètre carré. La troisième couche comporte 80 d'oxyde gris de zinc, 12 d'huile de lin, 5 d'essence de térébenthine et 3 de siccatif fort. Les deuxième et quatrième couches sont formées de 80 de blanc de zinc, 9 d'huile de lin, 8 d'essence de térébenthine et 3 de siccatif fort. La quatrième couche contient en outre l'ocre nécessaire pour obtenir la teinte requise.

La peinture ne pourra s'appliquer que sur les surfaces débarrassées de toute trace de rouille jusqu'au métal vif. L'oxyde de zinc sera pur.

Après la première réception provisoire à l'usine, les pièces de fonte seront recouvertes d'une couche de peinture de minium de plomb avec huile de lin bouillie à la litharge (sans essence de térébenthine), puis d'une couche de peinture gris fer, à base de zinc.

Après le montage, celles de ces pièces qui font partie du socle recevront en outre une couche de peinture au blanc de zinc, puis une couche de peinture à base de terre de Sienne, de manière à obtenir la teinte brune indiquée par une plaque déposée à cet effet. La plaque de terre, le bâti et le couvercle du regard ne recevront aucune peinture. Les tôles entrant dans le socle seront peintes comme les fontes du socle.

Les poteaux, mis en place, ne devront présenter aucune déformation ; ils seront parfaitement verticaux et orientés conformément aux indications du délégué de l'administration.

Le béton de fondation aura la composition suivante : deux parties en volume de pierrailles ou de briquillons pour une partie en volume de mortier : celui-ci sera formé de 500 kilogrammes de ciment à prise lente pour 1 mètre cube de sable rude.

La pierraille à mettre en œuvre dans le béton proviendra du concassage de pierres saines, dures et compactes. Elle sera exempte de terre, vase, schiste et de toute matière gélive ou friable.

Les briquillons proviendront de briques dures bien cuites, propres, exemptes de toute trace de mortier.

Les dimensions des pierrailles et briquillons seront comprises entre 3 et 5 centimètres.

Les constituants du mortier seront d'abord mélangés à sec jusqu'à

coloration uniforme, puis arrosés et malaxés jusqu'à formation d'un mortier doux.

On incorpore ensuite des briquillons ou des pierrailles uniformément dans la masse et on pilonne fortement le béton par couches ne dépassant pas 15 centimètres d'épaisseur.

Le béton de base (suivant dimensions indiquées aux plans) est placé 24 heures au moins avant le levage du poteau ; on place le béton restant aussitôt après le montage ; il doit former un cube aux dimensions qu'indiquent les plans, à surface supérieure bien plane et bien horizontale, sur laquelle repose le socle en fonte. La partie supérieure du cube se confectionne en béton fin sur une épaisseur de 10 centimètres.

Dans le cas où, par suite de la nature du terrain, le délégué de l'administration juge nécessaire de faire exécuter des travaux de fondation non prévus au cahier des charges, ceux-ci font l'objet d'un décompte en faveur de l'adjudicataire.

On remplit de béton l'intérieur du socle jusqu'au niveau du sol et de manière que sa surface permette l'écoulement des eaux en dehors de celui-ci.

La plaque de terre est enfouie en dehors de la masse de béton à 3,20 mètres de profondeur au moins ; on l'entoure, sur 10 centimètres d'épaisseur, de charbon de bois tassé et humecté, fourni par l'entrepreneur et dont le coût a été compris dans le prix unitaire du métal.

La plaque est raccordée au poteau, au-dessus du niveau supérieur du béton, par un câble formé de 3 fils de fer galvanisé, ayant chacun 4 millimètres de diamètre, tordus en hélice. Les extrémités du câble sont soigneusement soudées à recouvrement d'une part au poteau, de l'autre à la plaque de terre.

POTEAUX EN CIMENT ARMÉ

534. Types de poteaux usuels. — Les poteaux en ciment armé bien étudiés pourraient peut-être conduire à la solution la plus approchée du poteau idéal, auquel on demanderait les qualités suivantes : une durée indéfinie, la suppression de tout entretien, l'incombustibilité, l'élégance réunie à la légèreté et à la résistance, la sécurité et, enfin, un prix réduit autant que possible. Ce genre de poteau se fait plein, tubulaire ou évidé. Il évite, dans une certaine mesure, les inconvénients des poteaux en bois et de ceux entièrement en métal ; en particulier, il est beaucoup moins conducteur de l'électricité que ces derniers, mais il a le défaut d'être très lourd et il est difficile de les utiliser en dehors des poteaux implantés le long des routes. Un poteau devant résister à un effort de 500 kilogrammes

à 8 mètres au-dessus du sol pèse plus de 1.000 kilogrammes, alors qu'un pylône métallique dans les mêmes conditions ne pèse que 300 kilogrammes.

Les premières lignes construites avec des supports en ciment armé ont eu à subir des avaries (poteaux brisés) provenant du manque d'homogénéité dans la construction. Mais celle-ci s'est beaucoup améliorée, et nombreuses sont de nos jours les installations établies à l'aide de supports de ce genre.

L'armature de ces poteaux est, en général, constituée par des barres droites en acier rond et par une spire en fil d'acier ligaturée sur ces barres longitudinales. Ils sont assez souvent construits sur place, à raison d'un atelier tous les 5 kilomètres de ligne environ.

La profondeur de la fouille pour la plantation est d'environ le sixième de la hauteur totale du poteau ; il convient d'assurer avec grand soin le drainage de l'eau qui pourrait s'accumuler au pied de ce dernier, car c'est au contact avec le sol que l'altération des poteaux a lieu le plus vite, précisément à l'endroit qui doit présenter la plus grande résistance. Cependant, les ruptures se produisent généralement sur les traverses secouées par le vent et fendillées par les intempéries. Comme les fuites de courant suivent ces fentes, il faut prendre la précaution de les boucher ainsi que toutes crevasses ou fissures du bois.

Pour rendre les poteaux en ciment armé maniables dès après leur démoulage, M. A. Bourgeat insère dans ses poteaux une âme en bois capable de résister, au début, à tous les efforts que doit supporter l'appareil, c'est-à-dire sans attendre que le ciment ait fait sa prise. Ils sont très élastiques et peuvent prendre une flèche considérable.

La raison principale de la non-introduction générale des poteaux du système Bourgeat provient de leur fabrication compliquée et désavantageuse, car même avec les plus grands soins, il est difficile de les obtenir réguliers. On peut craindre aussi, avec le temps, que le noyau intérieur en bois ne se pourrisse ou se rompe.

L'idée était toute naturelle de se passer du noyau intérieur, qui ne contribue guère à la stabilité, afin de diminuer le poids du poteau et par suite les frais de transport. De là la venue des *poteaux tubulaires*. Mais, de même que les poteaux massifs, ceux-ci ne purent dépasser une certaine période d'essai. On leur reprocha leur poids encore relativement élevé ; de plus leur moulage à la main, qui dépend uniquement de l'habileté et de la conscience de l'ouvrier, ne permettait pas d'avoir toujours l'homogénéité nécessaire à la solidité du béton. Le système de moulage à la main ne permet pas, d'autre part, d'avoir les poteaux en grande quantité.

Sous ce dernier rapport, M. Siegwart a apporté un progrès impor-

tant dans la fabrication des poteaux annulaires en béton armé, lesquels se présentent avec une régularité et une rapidité jusqu'alors non atteintes.

La (fig. 1381) montre un type de ces poteaux. Selon l'effort, la paroi a une épaisseur de 25 à 50 millimètres, et dans celle-ci on vient bétonner les barreaux longitudinaux (fer rond), reliés par de nombreux fils disposés en hélice. Ces poteaux sont construits à l'aide d'une machine spéciale et automatique.

Le béton, déposé par le distributeur de l'appareil de remplissage, sous forme d'une couche uniforme dont l'épaisseur est réglée à volonté par une valve, circule perpendiculairement à l'axe du poteau sur l'organe porteur qui a la forme d'un plateau sans fin articulé pouvant s'enrouler sur deux poulies de renvoi et aussi sur le poteau. Un galet tendeur, actionné par levier et contrepoids, assure la tension de ce plateau, qui presse fortement contre l'armature du poteau la bande de béton étendue sur sa face supérieure et l'y abandonne à mesure que chacun de ses points perd le contact avec ce poteau, dans le mouvement continu qu'il effectue entre les deux poulies de renvoi qui les supportent. Après l'achèvement de la confection du poteau, un déclenchement détend un ressort, ce qui permet au noyau de se refermer légèrement, et c'est alors qu'on le retire du poteau sans avoir à l'extraire de force.

Un poteau Siegwart calculé pour une traction horizontale de 750 kilogrammes, devant supporter 8 fils de 8 millimètres, ayant une longueur de 12 mètres dont 1^m,50 encastré dans le sol, a donné en essais les résultats suivants : charge 40 kilogrammes, flexion 0 millimètre ; charge 700 kilogrammes, flexion 70 millimètres. En le déchargeant rapidement le poteau est revenu à sa position primitive. A 1.000 kilogrammes la flexion n'a atteint que 120 millimètres de flèche et le poteau, ni pendant, ni après ces charges n'a présenté aucune déchirure ou détérioration. Le montage de ces poteaux n'occasionne pas plus de frais que celui des poteaux en bois ou en fer.

Les graphiques des (fig. 1382 et 1383) montrent les flexions pour différents genres de poteaux armés, Bourgeat et Siegwart. La valeur de la flexion observée renferme aussi l'affaissement éventuel des fondations.

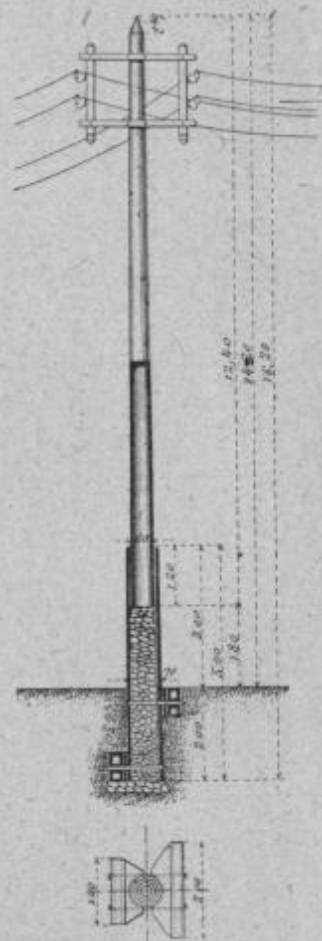


FIG. 1381.

On peut ainsi se rendre compte de la grande résistance et rigidité des poteaux Siegwart.

Avec les poteaux en ciment armé, le remplacement du poteau en bois

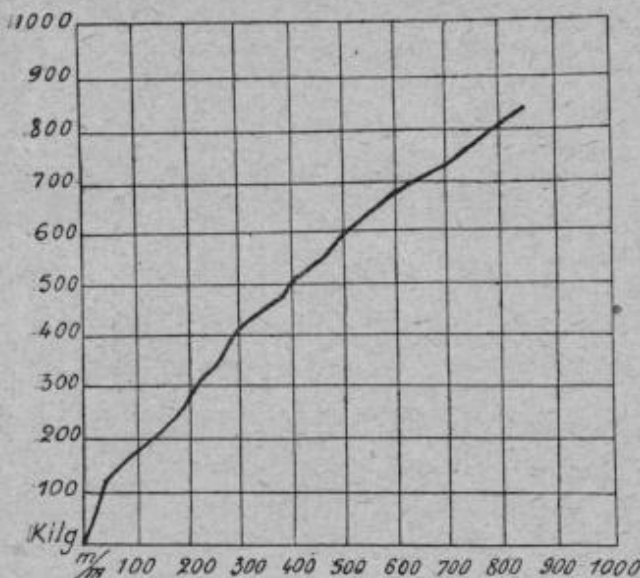


FIG. 1382.

ont une section horizontale carrée ou rectangulaire. Le même constructeur établit des supports à évidements latéraux qui sont des fers en I avec des entretoises de distance en distance entre les ailes. Les poteaux Ferrier, étudiés pour obtenir le maximum de résistance avec le minimum de poids, tout en présentant une fabrication relativement facile. Ces poteaux ont une section en U avec de nombreuses entretoises.

Les poteaux carrés en ciment armé ou rectangulaires permettent leur modification selon la forme particulière s'appliquant à la résistance de certains efforts supplémentaires. Ainsi, par exemple, dans les angles, on peut disposer une des faces du poteau servant de bissectrice de l'angle et augmenter l'épais-

seur du poteau du côté où l'angle de la canalisation s'ouvre, en faisant croître cette épaisseur de la tête au pied de façon à réaliser une forme approchée d'égale résistance; il suffit pour cela d'incliner davantage

et la peinture fréquente des poteaux en fer se trouvent supprimés et leurs frais d'acquisition sont moins élevés que pour ces derniers; ils ont un poids plus faible, un bel aspect. Les poteaux Siegwart, très répandus en Suisse, ont donné de bons résultats jusqu'ici.

MM. Rossignol et Delamarche ont préconisé les poteaux creux sans âme en bois.

Les poteaux creux système Grâa, de Grenoble,

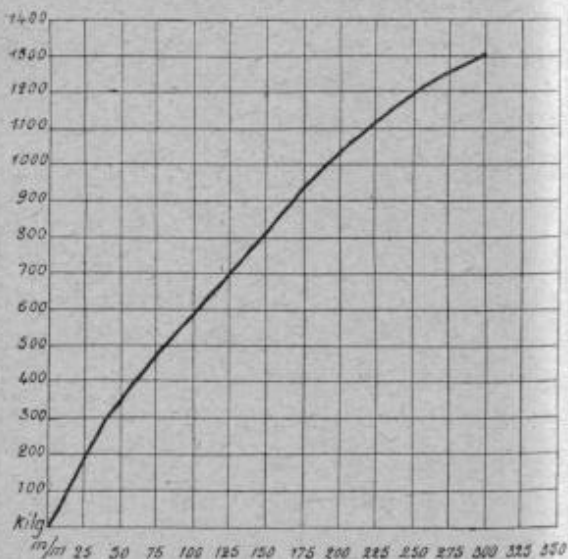


FIG. 1383.

une des faces du coffret ainsi que les fers ronds intérieurs correspondants.

Une façon très originale de couler en ciment des poteaux creux sans faire usage d'aucun moule-noyau central mais seulement d'un moule-enveloppe externe, consiste à appliquer la force centrifuge pour former le creux central, par suite d'une rotation rapide pouvant aller de 500 à 1.000 tours par minute. Le moule est entièrement rempli d'un béton très dilué d'eau et c'est cet excédent d'eau qui, par l'effet d'un véritable essorage, se trouve ramené au centre et remplace le moule-noyau.

Le moule externe, composé de deux pièces séparables suivant un plan diamétral, est en bois garni intérieurement de tôles. L'armature métallique du poteau, préparée par une machine spéciale, est centrée dans le moule par des masselotes de béton qu'on fait adhérer préalablement à l'armature de distance en distance.

Après deux ou trois jours on démoule, le noyau liquide intérieur s'écoule et on dépose le poteau sur du sable humide où la prise du béton s'achève au bout de trois semaines.

La maison Otto et Schlosser, de Meissen-sur-Elbe, a un procédé original pour la fabrication de poteaux creux en béton armé, dans lequel les poteaux sont façonnés dans des moules tournants, sous l'action de la force centrifuge. La masse de ciment est auparavant mélangée intimement avec des filaments fins d'amiante avec addition ample d'eau, puis amenée dans un moule rond en deux parties, dans lequel les morceaux de fer sont fixés dans le sens voulu. L'amiante contribue à augmenter notablement la résistance à la traction du ciment. Le poteau reste dans le moule pendant 12 à 24 heures ; après ce temps il est suffisamment pris et solidifié pour pouvoir être retiré. Il continue à durcir pendant trois à quatre semaines sous une couche de sable que l'on maintient humide suivant la charge qu'a à supporter le poteau ; l'épaisseur varie de 3 à 9 centimètres.

Le poteau Saxonia s'établit à l'aide de moules en bois ou en fer n'exigeant qu'un outillage peu coûteux ; des ouvertures ménagées dans le corps du poteau, à partir de 2 mètres du sol, permettent une visite et un accès faciles des isolateurs et câbles.

Les poteaux en béton armé ne semblent pas devoir être limités aux simples supports ordinaires de lignes, mais bien concurrencer les pylônes métalliques à treillis, eux-mêmes. Ainsi, pour la traversée du fleuve Monongahela, l'on a installé des poteaux gigantesques de 36 mètres de hauteur (*fig. 1384 et 1385*), avec une section de $2^m,50/2^m,50$ à la base. Avant de procéder à leur installation, on s'était rendu compte qu'ils offraient des avantages incontestables sur les pylônes métalliques, sous

le rapport des frais de premier établissement et sous celui de l'entretien.

Les poteaux que la Compagnie américaine « Light and Power and Co », de Lincoln, a édifiés pour établir sa canalisation électrique sont construits de béton de gravier (mélange, 1 : 5), et armés de quatre fers longitudinaux disposés dans les angles.

Ils ont une hauteur de 46 mètres (dont 2^m,50 enfouis dans le sol) ; leur section est de forme carrée avec 0^m,80 de côté à la base et 0^m,30 au sommet. Chaque poteau porte des traverses de 3 mètres de longueur au-dessous desquelles est établi un échafaudage permanent, large de 1^m,50. La plus grande distance entre chaque poteau est de 91^m,50, et les massifs de béton, recevant les pieds des mâts en forme de dé, ont 3 mètres de côté. Les poteaux, quand ils n'ont pas reçu leur charge normale, peuvent résister à une traction de 900 kilogrammes exercée à leur sommet.

Les constructeurs de poteaux en ciment armé font des prix qui donnent une économie de 20 à 25 0/0 sur les prix des pylônes en acier.

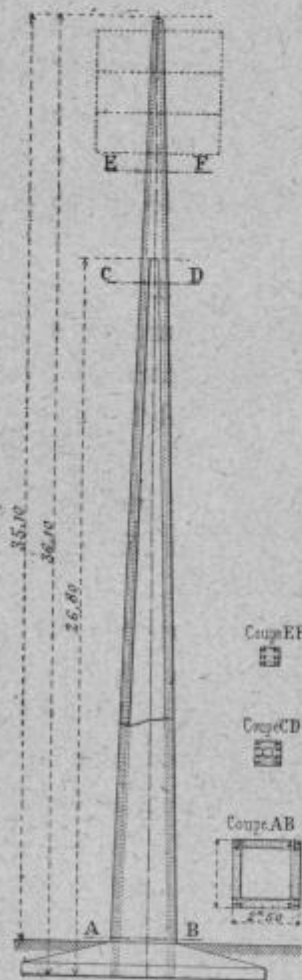


FIG. 1384.

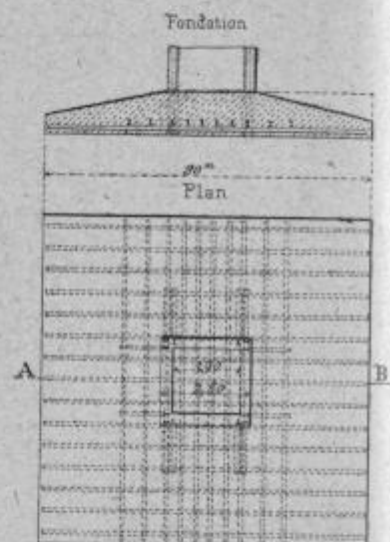


FIG. 1385.

Des poteaux tubulaires tronconiques du système Delamarche, (fig. 1386 et 1387) construits par la Société des ciments prompts et Portland artificiels de Grenoble, de 12 mètres hors de terre, soumis à un effort horizontal de 1.000 kilogrammes à leur sommet, 42 jours après leur fabrication, n'ont pris qu'une flèche de 60 millimètres sans se rompre.

Les sections de ces poteaux sont telles que le moment d'inertie soit maximum (octogone, formes en U et en I). Ce système comporte des barres rondes en acier disposées sur des cercles en acier de diamètre convenable. Une spire en fil de fer ligaturée avec les barres longitudinales, assure la rigidité.

On prépare à l'avance le treillis et on le place dans le moule au moment de la confection du poteau. Le moule se compose d'une pièce d'assise, de deux enveloppes extérieures, d'un mandrin extensible tronconique et de

dispositifs spéciaux de suspension et de centrage destinés à assurer au poteau une épaisseur de ciment parfaitement régulière et à permettre un démoulage facile de la pièce fabriquée. Les enveloppes ont une longueur plus grande que celle du mandrin, de telle sorte que l'on peut, avec le même moule, obtenir des poteaux de longueur, de diamètre et d'épaisseur variables selon les positions relatives du mandrin et des enveloppes.

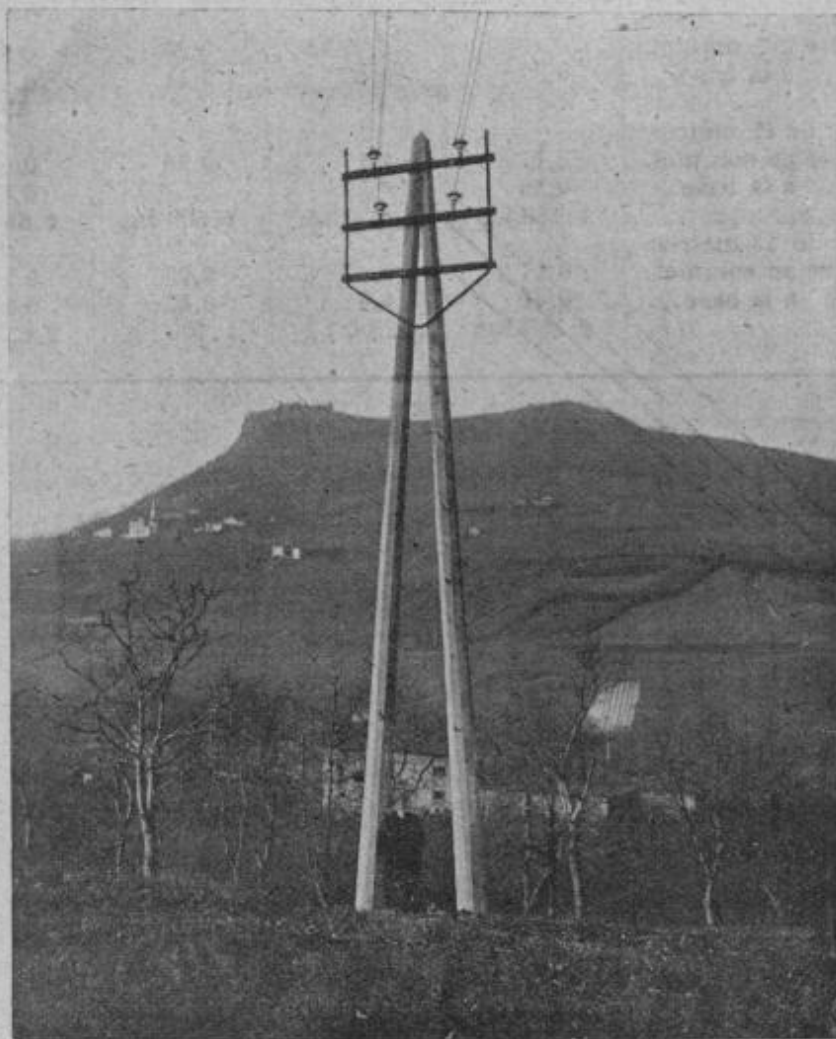


FIG. 1336. — Poteaux tubulaires tronconiques en ciment armé.
(Système Rossignol et Delamarche.)

Grâce à l'ingéniosité du système et des appareils accessoires et à la qualité spéciale du ciment employé, on peut démouler très rapidement et arriver à obtenir avec un seul moule de six à dix poteaux par jour suivant la longueur de ceux-ci.

Ces supports sont d'une bonne robustesse et offrent une égale résistance dans tous les sens.

Les types usuels de poteaux pour lignes courantes sont spécifiés dans le tableau ci-après :

	TYPE A Effort au sommet 200 kg	TYPE B Effort au sommet 300 kg	TYPE C Effort au sommet 400 kg	TYPE D Effort au sommet 500 kg
Poteau de 10 mètres				
Diamètre au sommet..	0,17	0,17	0,20	0,20
— à la base....	0,355	0,355	0,39	0,39
Poids.....	900 kg	930 kg	1.150 kg	1.200 kg
Poteau de 11 mètres				
Diamètre au sommet..	0,17	0,17	0,20	0,20
— à la base....	0,37	0,37	0,41	0,41
Poids.....	960 kg	1.000 kg	1.300 kg	1.550 kg
Poteau de 12 mètres				
Diamètre au sommet..	0,17	0,17	0,20	0,20
— à la base....	0,39	0,39	0,43	0,43
Poids.....	1.150 kg	1.200 kg	1.500 kg	1.650 kg
Poteau de 13 mètres				
Diamètre au sommet..	0,17	0,17	0,20	0,225
— à la base....	0,41	0,41	0,45	0,466
Poids.....	1.350 kg	1.400 kg	1.700 kg	2.000 kg

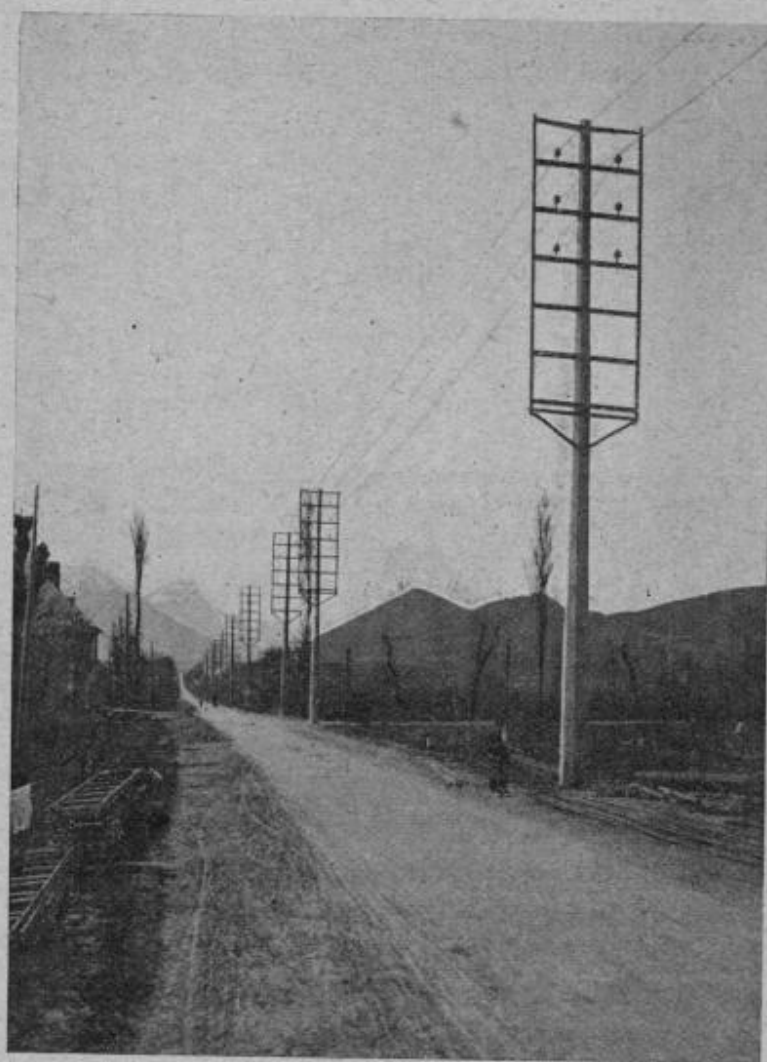


FIG. 1387. — Poteaux tubulaires tronconiques en ciment armé.
(Système-Rossignol et Delamarche.)

Des études faites par M. Considère et des essais de M. le professeur Mesnager au laboratoire des Ponts et Chaussées, conformément au programme tracé par la Commission du ciment armé, ont montré qu'en frettant ces poteaux on peut en doubler, tripler et quadrupler à volonté la résistance, ce qui permet de fabriquer des poteaux en ciment armé d'un volume approchant de ceux en fer et en fonte, et avec des résistances mêmes supérieures.

Les armatures du béton fretté consistent essentiellement en ceintures métalliques ou en spires hélicoïdales placées assez loin de la surface pour être à l'abri des causes extérieures d'altération. Elles ont pour but de combattre le gonflement transversal du béton, et, par là, d'empêcher son écrasement. Des

considérations pratiques conduisent généralement à compléter le réseau d'enveloppement par des barres métalliques longitudinales. Le béton fretté va permettre de fabriquer surtout des poteaux pleins dans des conditions très avantageuses.

Le calcul des poteaux armés se fait conformément aux prescriptions de l'arrêté ministériel du 20 octobre 1906, en tenant compte à la fois de la

résistance de l'armature métallique et de la partie du béton qui travaille à la compression, en négligeant la résistance de la portion de béton travaillant à l'extension.

La fatigue maxima R en kilogrammes par millimètre carré dans la section d'encastrement est donnée par la formule : $R = \frac{Mn}{I}$ (1) ; M , moment fléchissant des forces agissant sur le poteau en mètre-kilogramme ; I , moment d'inertie de la section fictive (fig. 1388 et 1389) en centimètre

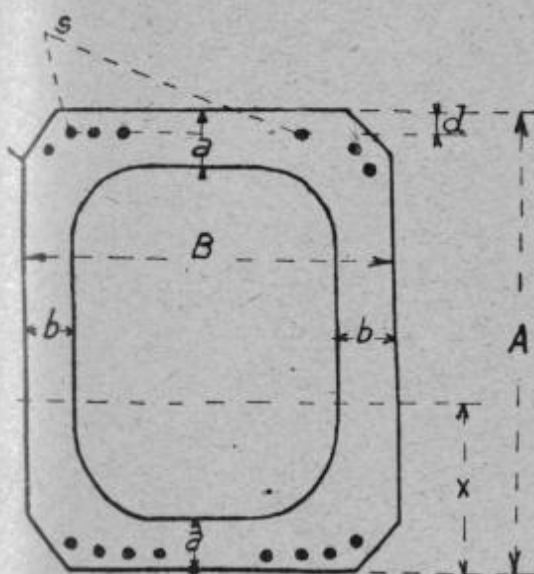


FIG. 1389.

carré ; n distance de la fibre la plus fatiguée à l'axe neutre de la section fictive en centimètres. La section fictive se déduit de la formule :

$$S = S_b + mS_a;$$

S_a section des armatures longitudinales ; S_b section du béton travaillant à la compression ; m coefficient pris généralement égal à 15.

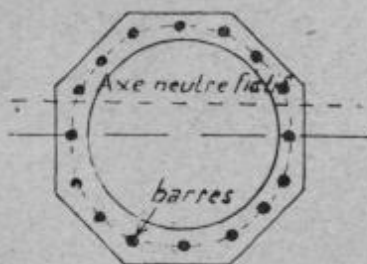


FIG. 1388.

La limite du travail du béton armé à la compression est :

$$0,28 R \left(1 + m' \frac{V'}{V} \right),$$

R est compris entre 250 et 300 kilogrammes par centimètre carré ; V' volume des armatures transversales ou obliques pour une longueur du poteau de 1 mètre de longueur ; V volume du béton pour la même longueur ; m' coefficient compris entre 15 et 32 selon que la distance entre les frettes est égale aux 2/3 ou au 1/5 de la largeur du poteau. La limite du travail des armatures à l'extension est fixée à la moitié de leur charge de rupture.

L'effort au sommet est égal à : $\frac{M}{l}$; M tiré de la formule (1) et l hauteur du poteau au-dessus du sol en mètres.

535. Poteaux mixtes.— Les poteaux mixtes en usage depuis quelques années ont déjà donné lieu à des applications importantes en Suisse et en

Allemagne. Les quelques essais faits en France jusqu'à ce jour par les administrations des chemins de fer, des postes, télégraphes et téléphones ont donné toute satisfaction.

Ce système comprend un support en ciment armé implanté dans le sol supportant à 20 ou 25 centimètres du sol un poteau en bois imprégné ou non. La partie placée dans le sol étant imputrescible, sa durée est indéfinie et la durée du poteau en bois est doublée et même triplée ; son remplacement se fait rapidement et sans interruption de service. Ces supports sont d'un prix relativement peu élevé et d'un transport facile. Les

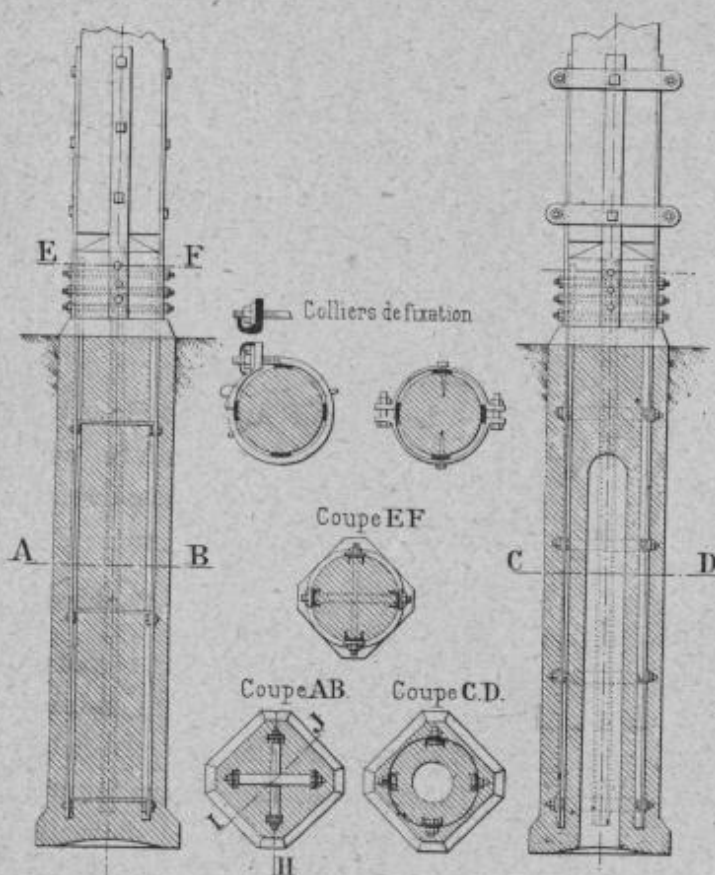


FIG. 1390. — Support en ciment armé pour poteau.

ment se fait rapidement et sans interruption de service. Ces supports sont d'un prix relativement peu élevé et d'un transport facile. Les

quelques systèmes qui existent diffèrent par des dispositifs plus ou moins ingénieux des armatures du support et des moyens de fixation du support au poteau.

Support Murray. — Il comprend un massif en béton avec armature longitudinale entretoisée à la partie supérieure. Le massif est implanté dans le sol. Les armatures, au nombre de quatre, se prolongent hors du massif et maintiennent le poteau entre elles au-dessus du sol, mais le laissent en contact avec le massif de maçonnerie.

Les inconvénients de ce système sont les difficultés pour le remplacement des poteaux et le séjournerement des eaux pluviales au pied du poteau.

Support Kastler. — Il est plus employé que le précédent, sur lequel il offre, entre autres avantages, celui du remplacement facile des poteaux. Il comprend un massif en ciment armé et quatre profilés longitudinaux entretoisés. Le poteau est maintenu à quelques centimètres au-dessus de la tête du support par quatre fers qui relient le support au poteau, ce qui permet aux eaux pluviales un écoulement facile. Par contre, il présente l'inconvénient que les boulons et tire-fonds de fixation des montants du support au poteau travaillent au cisaillement. De plus, on ne peut employer les colliers pour fixer les montants au poteau, car celui-ci viendrait en contact avec le support.

Support Buissel. — Ce système, le dernier en date, comprend un massif en béton ou ciment, armé de quatre ferrures (fer U) entretoisées. La partie supérieure ou tête, cylindrique, émerge du sol et se termine par un pointement destiné à servir d'appui au poteau suivant son axe. Le diamètre de cette tête peut être variable et être pris exactement égal au diamètre du poteau. La partie inférieure de la tête se termine par une couronne horizontale, raccordée avec le reste du support et formant plateforme pour constituer un appui aux ferrures d'assemblage entre le poteau et le support. On supprime ainsi l'effort de cisaillement qui se produit, dans le système précédent, sur les boulons et tire-fonds d'assemblage. La partie inférieure du support se termine par un empattement, afin de former ancrage dans le sol.

Support Hermann. — Ces poteaux sont moulés debout, à leur emplacement définitif, à l'aide de tronçons élémentaires d'une hauteur de 1 mètre et formés de quatre panneaux trapézoïdaux (*fig. 1391*) assemblés par des charnières et terminés en haut et en bas par des cornières. Ces tronçons sont assemblés les uns aux autres par des boulons articulés et forment un fût pyramidal. La fondation est à nervures verticales de façon à croître l'adhérence au sol ; elle est à double semelle avec gradins débordant d'une longueur au moins égale à leur épaisseur, ce qui satisfait pour la généralité des cas, aux conditions imposées par les Compagnies de che-

mins de fer pour la traversée aérienne des voies ferrées. L'encastrement de la fondation dans le sol est d'environ le sixième de la hauteur vue.

L'armature longitudinale est constituée par des barres d'acier disposées aux quatre coins et l'armature transversale, de fil de fer dont les spires

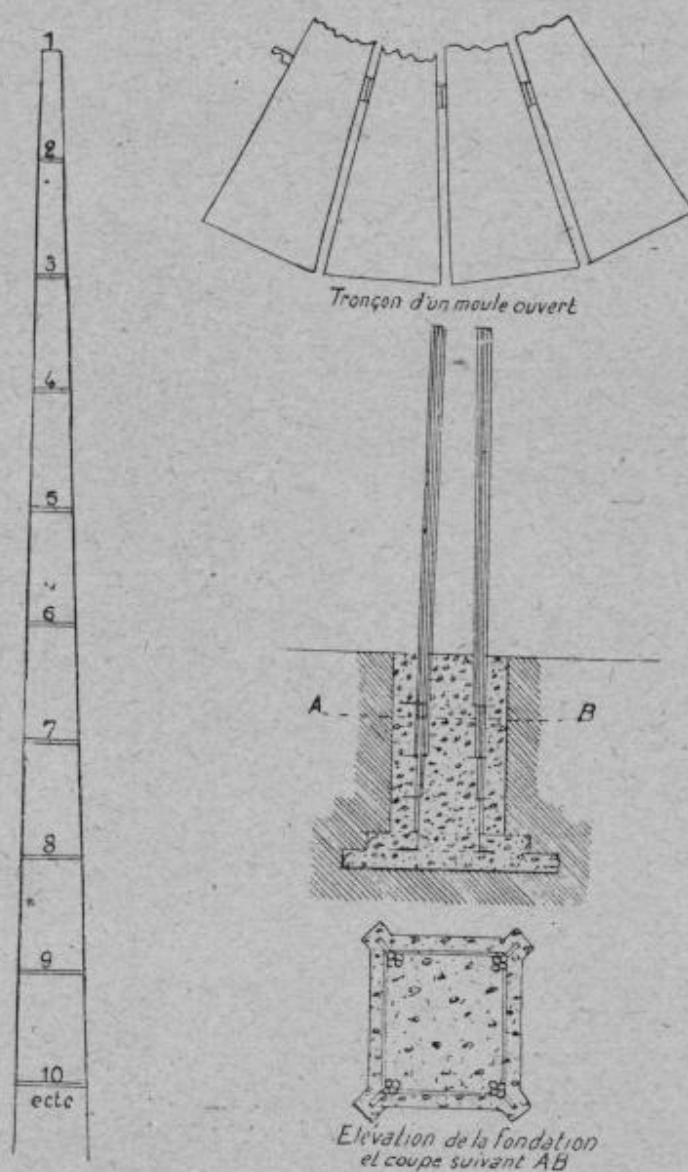


FIG. 1391.

sont espacées d'une distance moindre que la dimension de la plus petite face du poteau. Ces deux armatures sont entièrement noyées dans le béton.

Poteaux en verre. — Enfin l'Administration allemande a fait procéder à des essais de poteaux en verre armé. Il est incontestable que ce genre de poteaux présente sur tous les autres systèmes l'avantage très appr-

ciable d'être inattaquable aux insectes, à la pourriture et aux éléments atmosphériques.

Le tableau ci-après résume les différentes considérations relatives aux poteaux ⁽¹⁾.

TYPES	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
POTEAUX EN BOIS	Légèreté. Facilité de transport et de pose. Prix de revient faible. Approvisionnements faciles. Encombrement réduit. Facilité d'ascension.	Usure rapide. Amortissement élevé. Remplacement des poteaux onéreux et incommodes. Manque de solidité. Résistance incertaine. Peu de sécurité. Faibles portées.
POTEAUX EN FER PROFILÉ	Facilité de transport et de pose. Solidité et durée. Armement facile. Encombrement réduit.	Prix élevé. Poids de fer élevé par rapport à la résistance. Bétonnage indispensable. Résistance incertaine au vent. Entretien coûteux. Difficulté d'ascension.
PYLONES EN TREILLIS	Facilité de transport et de pose. Solidité et durée. Forme géométrique. Armement facile. Résistance calculée et certaine. Longues portées. Facilité d'ascension.	Prix élevé. Bétonnage obligatoire. Entretien coûteux. Encombrement trop grand.
POTEAUX EN CIMENT ARMÉ	Inaltérabilité absolue. Solidité et durée. Prix moins élevé que le treillis. Encombrement réduit. Bétonnage facultatif. Longues portées. Entretien nul.	Poids élevé. Difficulté de transport. Nécessité de fabriquer les poteaux sur la ligne même. Difficulté d'ascension.

CALCUL DES POTEAUX. — POSE DES POTEAUX

536. Résistance des poteaux. — En alignement droit et dans une direction normale à la ligne, un poteau supportant des fils aériens peut

⁽¹⁾ *Lignes électriques aériennes*, par Ph. Girardet, Gauthier-Villars, éditeurs.

être considéré comme un solide encastré à l'une de ses extrémités, devant résister à l'action du vent sur lui-même et sur les fils, ainsi qu'à l'action des fils eux-mêmes, c'est-à-dire à leur poids. Dans une direction parallèle à la ligne, on peut assimiler le poteau à un solide encastré à l'une de ses extrémités et appuyé à l'autre en un point pratiquement fixe, constitué par l'attache des fils.

Dans le cas, par exemple, de portées de 50 mètres et de plusieurs fils supportés par des poteaux de bois de 10 à 11 mètres, le rapport des moments fléchissants maxima, dans les deux plans perpendiculaires considérés plus haut sous l'action du vent, varie avec le diamètre des fils, mais **n'est pas supérieur à 1/8**.

Appelons P l'effort du vent, d le diamètre du conducteur, h la hauteur du point d'attache du conducteur au-dessus du sol, et m le moment dû à l'action du vent, sur les fils, on a :

$$m_v = 0,001 Pa \Sigma dh \text{ kgm./m.}$$

Soient en outre m_p le moment dû à l'effort du vent sur le poteau, D et D' les diamètres du poteau à la tête du support et à sa section d'encastrement, on a :

$$m_p = \frac{D + D'}{400} \times h^2 \times P.$$

Dans le cas d'une section circulaire, R représentant la tension par millimètre carré de la fibre la plus tendue, on obtient :

$$R = \frac{10}{D^3} (m_v + m_p).$$

Il convient de ne pas dépasser, pour R et pour des poteaux en bois, la valeur de $0^k,7$ à 1 kilogramme par millimètre carré.

On n'a pas tenu compte, dans les calculs ci-dessus, du moment dû au poids des fils et des isolateurs, qui est d'ordre négligeable.

Plus simplement, on peut appliquer la formule classique de résistance :

$$R = \frac{32 FL}{\pi d^3} (1),$$

pour un poteau de section circulaire.

R , charge pratique $= \frac{P}{c}$, c coefficient de sécurité.

Ce coefficient = 6 pour le bois, pour charge temporaire et 10 pour charge permanente ; fer et acier respectivement 6 et 4.

De la formule (1) on tire :

$$F = \frac{\pi d^3 R}{32 L}$$

F effort au sommet, exprimé en kilogrammes ; d , diamètre à la section de rupture en mètres, L distance au sol, en mètres.

Pour un poteau cylindrique on a donc :

$$F = \frac{\pi d^3 R}{32 L}$$

d étant égal à d_1 .

Pour un poteau tronconique (fig. 1392), on a :

$$F = \frac{\pi d_2^3 R}{32 L}$$

La valeur de d , à la section de rupture, est donnée par l'expression :

$$d = \frac{3}{2} d_1.$$

Si on fait pour le bois $R = 700.000$, on a :

$$F = 46,39 \frac{d_1^2 (d_2 - d_1)}{L}$$

et

$$F = 6,872 \frac{d_2^3}{L}$$

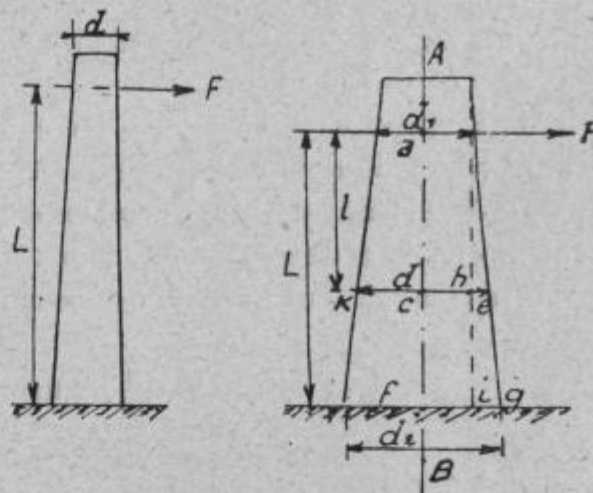


FIG. 1392.

Pour déterminer le diamètre du poteau à une hauteur quelconque, dans le cas d'un poteau tronconique, d_2 étant le diamètre à la base, d_1 le diamètre au sommet et x le diamètre cherché, H distance qui sépare d_2 de d_1 , h distance entre x et d_1 , on a :

$$x = \frac{h (d_2 - d_1)}{H} + d_1.$$

Pour les poteaux métalliques, la charge de flexion supportée par les différentes parties du poteau est proportionnelle à la traction qu'exercent les fils et leurs surcharges accidentelles, charge qui ne doit pas dépasser la valeur donnée par la formule :

$$\frac{1}{R} \pi^2 \frac{EJ}{h},$$

où J est le moment d'inertie de la partie considérée, E le module d'élasticité, R le degré de sécurité et h la longueur de la partie du poteau soumise à la flexion.

Pour déterminer la flèche que prend un poteau métallique de composition variable, sous l'effet d'un moment normal m , le plus simple est de recourir aux procédés de la graphostatique : on trace la courbe dérivée seconde de l'élastique, par points, au moyen de la formule :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{m}{EJ}$$

en donnant à m et J les valeurs calculées pour les points considérés et en faisant $E = 2.000.000$, quand tout est exprimé en centimètres. Une première intégration, obtenue en planimétrant la surface délimitée par cette courbe, l'axe des x et son ordonnée extrême, donne la dérivée première, et une seconde intégration fournit l'élastique, sur laquelle on mesure directement la flèche du poteau, en fonction de la force qui lui est appliquée. En variant l'écartement des cornières et leurs dimensions, on arrive à obtenir les valeurs cherchées.

L'on a souvent remarqué que les poteaux en bois de forme tronconique se rompaient en une région non située au voisinage immédiat du sol.

M. C.-B. Schmit, pour des poteaux de 12 mètres de longueur, ne portant ni nœuds ni autres défauts locaux, a reconnu que le point le plus faible se trouvait à une distance du sommet donné par la formule :

$$x = \frac{d}{2t} \text{ centimètres;}$$

d , diamètre du poteau au sommet ; t , accroissement progressif du diamètre par centimètre de longueur.

Ce point le plus faible est exactement là où l'effort imposé aux fibres est le plus grand, et pour une section transversale quelconque, sur toute la longueur du poteau, à la distance x du sommet, on a pour la valeur f de la tension dans la fibre extérieure.

$$f = \frac{F}{0,098 (d + tx)^3}$$

F , tension horizontale existant au sommet par suite de la présence des fils sur la traverse.

Par différenciation, on trouve que f atteint son maximum lorsque

$$x = \frac{d}{2t}$$

Si, par exemple, on a un poteau présentant au sommet un diamètre de

20 centimètres avec un accroissement progressif de diamètre de 0^m,01, on obtient :

$$x = \frac{20}{2 \times 0,01} = 1.000 \text{ centimètres.}$$

Ainsi le poteau, à supposer qu'il ait au moins cette longueur, se rompra à une distance de 10 mètres du sommet ; s'il est plus court il se brisera au ras du sol.

Lorsque les portées des deux côtés des poteaux sont inégales, il y a lieu de tenir compte du couple résultant de la différence de traction des deux côtés du point d'attache. Soient T_2 et T_3 ces tensions et h la hauteur du fil au-dessus du sol, on a pour la valeur du couple :

$$C = (T_2 - T_3) h.$$

L'effort maximum que peut supporter le poteau à la tête est, d' étant le diamètre du sommet :

$$F = \frac{R \times d'^3}{10h};$$

F en kilogrammes, d' et h en millimètres, et on prend R égal à 0^{kg},7 pour le bois.

Pour les poteaux d'arrêt, il y a lieu de les calculer en tenant compte de la traction exercée par les câbles ; de là l'usage des haubans, contrefiches, ou plus simplement de poteaux métalliques à treillis.

Les contrefiches se placent le plus souvent dans la direction de la bissectrice de l'angle formé par les câbles de la ligne et en dedans. Si α est l'angle que fait la contrefiche avec la direction verticale du poteau, l'effort de compression c qui agit sur cette pièce a pour valeur : $c = \frac{T}{\sin \alpha}$, T étant l'effort moyen appliqué au poteau. Quant à la charge pratique, elle ne devra pas dépasser 12 à 15 kilogrammes par centimètre carré.

On peut employer la formule suivante, où R est pris égal à 14^{kg},4 par centimètre carré :

$$S = \frac{h \sqrt{c}}{14};$$

S , section en millimètres carrés ; h , longueur de la contrefiche en millimètres, et c , effort de compression en kilogrammes.

Pour les poteaux tubulaires en acier, on admet comme limite pratique de sécurité 10 à 12 kilogrammes par millimètre carré. Pour ces derniers, la valeur de R est donnée par l'expression :

$$R = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{1}};$$

μ , moment fléchissant, et I , moment d'inertie ; on détermine la tension R pour chacune des sections du poteau aux points de changement de diamètre D ou de conicité.

La flèche que peut prendre un poteau est donnée par l'expression :

$$f = \frac{\mu L^3}{3EI} ;$$

L , longueur du poteau ; I , moment d'inertie de la section d'encastrement, et E , module d'élasticité.

Le moment d'inertie dépendant des rayons varie pour chacun des tubes constituant le poteau ; on peut établir le calcul par tubes ou bien chercher la valeur du moment d'inertie moyen par l'application de la formule :

$$I = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4) = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

R rayon extérieur, r rayon intérieur et D le plus grand diamètre. Le moment fléchissant est donné par :

$$R = \frac{I}{v}, \quad \text{où} \quad v = \frac{D}{2}$$

et, par suite, les charges résultant des moments fléchissants se trouvent en appliquant l'expression :

$$R = \frac{D}{2} \frac{\text{moment fléchissant}}{\text{moment d'inertie.}}$$

Poteaux d'angle. — Lorsque la ligne fait un angle, l'isolateur placé au sommet est soumis à un effort transversal dont la valeur est :

$$F = 2T \cos \frac{\alpha}{2} ;$$

α , angle des deux directions de la ligne. La résultante F est dirigée suivant la bissectrice de l'angle. La valeur du couple est :

$$c' = Fh = 2Th \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Pour les poteaux en courbe, si nous désignons par r le rayon de la courbe, h le bras de levier de l'effort de traction de la charge par rapport au sol de son point d'application, la portée limite e à adopter est :

$$e = \frac{rF}{T}$$

et l'effort auquel doit résister le poteau est :

$$Fh = \frac{RI}{d};$$

I , moment d'inertie de la section, et d , distance de la fibre la plus fatiguée à la ligne des fibres invariables.

Ferrures d'isolateurs. — Les ferrures d'alignement droit doivent résister normalement à la différence des tensions des conducteurs dans les travées adjacentes au support, à l'action du vent soufflant perpendiculairement à la ligne et s'exerçant sur les deux demi-travées ainsi que sur l'isolateur. Occasionnellement, la ferrure doit pouvoir résister à la tension totale du conducteur fixé à l'isolateur qu'elle supporte.

Pour les ferrures d'angle, l'effort principal auquel elles doivent résister est représenté par la résultante des tensions, même égales, qui agissent de chaque côté de l'isolateur. On peut négliger l'action du vent sur les conducteurs. Les ferrures d'arrêt ont à résister à la tension maxima de la ligne.

Les ferrures doivent avoir une hauteur suffisante pour éviter que des gouttes de pluie tombent de la cloche supérieure de l'isolateur n'exercent des arcs entre celui-ci et la traverse.

Pour le calcul du diamètre des ferrures, on applique la formule :

$$d = 2r = 2 \sqrt[3]{\frac{4Fl}{\pi R}}.$$

$R = 6$ kilogrammes par millimètre carré pour le fer de qualité ordinaire et 12 kilogrammes s'il est de très bonne qualité.

F représente l'effort que le conducteur transmet par l'isolateur à la ferrure.

Les ferrures d'angle et de bouts de ligne sont maintenues entre deux encastremets ou plus simplement entre deux appuis, pour augmenter leur résistance.

Pratiquement, dans les isolateurs d'arrêt, dont la tige est maintenue aux deux extrémités, il faut considérer qu'il y a seulement appui aux deux extrémités et prendre la formule :

$$d = 2r = 2 \sqrt[3]{\frac{Fl}{\pi R}}.$$

EXEMPLE. — Soit un isolateur d'arrêt dont la tige a une longueur de 300 millimètres entre appuis, sur lequel est fixé un câble de 50 millimètres carrés de section tendu à 3 kilogrammes par millimètre carré. On a :

$$F = 50 \times 3 = 150 \text{ k.}$$

Le moment fléchissant est :

$$\frac{150 \times 300}{4} = 45.000$$

et :

$$d = 2 \sqrt[3]{\frac{45.000}{3,14 \times 5}} = 16 \times 2 = 32 \text{ mm.}, \text{ en nombre rond.}$$

Les ferrures de forme droite sont les plus employées. Parmi les ferrures courbes on utilise le plus celles recourbées à angle droit, et que l'on fixe par scellement ou au moyen de tirefonds ou de boulons. On doit s'attacher à réduire le plus possible les moments fléchissants, et par suite espacer plutôt les isolateurs en hauteur verticale, c'est-à-dire suivant la hauteur d'appui plutôt que de les écarter du poteau.

Lorsque la hauteur est définie, il convient de recourir aux isolateurs à support droit, fixés sur les traverses, solidement attachés sur le corps du poteau.

Traverses. — Les traverses supportant les isolateurs se calculent comme ayant à supporter à la fois des efforts de torsion et de flexion.

Elles sont surtout utilisées pour les poteaux métalliques en treillis. Ce sont le plus souvent des barres creuses à section carrée ou en C.

Haubans. — En principe un hauban est un câble en fil d'acier que l'on fixe à la partie supérieure de l'appui au point présumé de la résultante des tensions exercées par les conducteurs et dont l'extrémité opposée est attachée à un point fixe, rendu autant que possible invariable. Sur ce câble on interpose un tendeur à lanterne.

Si le hauban ne peut pas être fixé à une distance du poteau telle que celui-ci ne puisse faire avec celui-ci un angle d'au moins 20°, l'effort de traction sur le hauban devient tellement élevé qu'il est impossible de l'attacher d'une manière convenable à l'arêtier. On a alors recours aux jambes de force.

Les haubans et jambes de force sont indiqués dès que la résultante des efforts exercés sur la ligne dépasse la charge de travail admise. On préfère souvent employer un hauban en forme de V, dont une branche est liée au sommet du poteau et l'autre à la traverse inférieure du support des conducteurs.

Si les conducteurs sont également tendus de chaque côté du poteau d'angle, on dirige le hauban dans le sens de la bissectrice de l'angle que fait la ligne sur le poteau. Si les tensions ne sont pas semblables des deux côtés du poteau d'angle, le hauban est plus rapproché de la ligne de la plus tendue, dans le rapport des tensions, en d'autres termes selon la résultante des efforts.

Le calcul direct ou la construction graphique permettent de déterminer l'effort maximum fourni par le hauban et il faut établir un ancrage en rapport.

En terrain meuble, on creuse une excavation en donnant à la face qui est du côté de l'appui une pente égale à celle du hauban, les autres faces étant verticales. Le fond de la fouille est normal à la direction du hauban. On y introduit une plaque d'ancrage en bois ou en fonte, la première en forme de croix dont les branches sont fortement assemblées et goudronnées et à laquelle on fixe le hauban. Dans ce système, la résistance provient du poids du remblai et de son frottement contre les parois de la fouille. On comprend donc qu'un bon damage est nécessaire.

La première opération de calcul à effectuer consiste à déterminer l'angle α que doit faire le hauban à son point d'attache sur le poteau avec la direction verticale du poteau, selon l'effort auquel il doit résister. On sait que cette force détermine une composante dans la direction du hauban (traction) et une autre dans celle de l'appui (compression). La composante d'action sur le sol comporte en outre le poids propre du poteau, le poids d'une portée d'une ligne, le poids de surcharge due à la neige, au givre, etc.

Si F est la force appliquée au sommet de poteau, on a pour la valeur de la composante de traction sur le hauban et pour celle qui agit par compression sur le hauban respectivement :

$$f = \frac{F}{\sin \alpha} \quad \text{et} \quad f' = \frac{F}{\tan \alpha}.$$

Plus le hauban se rapproche de la direction horizontale, plus la tension du hauban et la compression sont de faibles valeurs.

Si R est la charge pratique de sécurité à l'extension on a :

$$f = sR.$$

Appelons L la distance de l'ancrage au pied du poteau et h la hauteur du point d'appui au sol on a :

$$f = F \frac{\sqrt{L^2 + h^2}}{L}$$

d'où en remplaçant :

$$S = \frac{F}{R} \frac{\sqrt{L^2 + h^2}}{L};$$

F et R en kilogrammes et S en millimètres carrés. On peut prendre pour R 1/6 à 1/7 de la charge de rupture, soit 20 à 17 kilogrammes.

Lorsque le point d'attache du hauban sur l'appui se trouve au-dessous ou au-dessus du point d'application de la force F (fig. 1393).

On a alors trois forces F , f_1 et f_2 qui équivalent à une force f_1 et à un couple Ff_2 de bras de levier mn et

mn' . La force f_1 égale à F produit sur le hauban la force f_1 précédemment calculée, mais la hauteur h est diminuée de mn ou augmentée de mn' . Le couple tend à faire fléchir la portion mn ou mn' de l'appui, dont le moment fléchissant est $F \times mn$ ou $F \times mn'$.

Pour l'ancrage dans le cas d'un terrain mouillé, appelons h la profondeur de fouille, a le diamètre de la plaque d'ancrage, φ l'angle que fait la ligne de plus grande pente du talus naturel du terrain constituant le sol, on a pour la valeur du diamètre D à la surface, correspondant à celui du fond de la fosse :

$$D = a + \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Et le poids P de cette masse tronconique qui agit sur l'ancrage, δ étant la densité des terres à l'endroit de la fouille, a pour valeur :

$$P = \frac{\pi \delta h}{12} (D^2 + a^2 + Da).$$

On se rend ainsi compte si ce poids P excède suffisamment la tension du hauban.

Le tableau ci-après renseigne sur les valeurs des facteurs entrant dans la formule :

	φ	$\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi}$	δ
Terre très forte.....	55°	0,78	2,000
Terre humide.....	36°	1,37	1,600
Gros sable ou argile sèche.....	30°	1,73	1,500
Argile humide.....	22°	2,48	1,800
Sable très fin.....	16°	3,50	1,400

S'il n'est pas possible d'attacher les haubans à une distance du poteau,

telle que l'angle α soit au moins de 20° , il convient de recourir aux jambes de force, disposées dans le plan des forces agissantes pour équilibrer celles-ci.

Quand l'effort ne dépasse que légèrement la charge du travail admise pour un poteau, un simple hauban suffit. Mais si la force appliquée devient plus grande, on dispose plusieurs haubans. Les haubans ont pour le moins 6 à 7 millimètres de diamètre.

Si les poteaux d'arrêt et d'angle sont calculés pour résister aux plus grandes tensions des fils se produisant sous l'action du froid, de la glace et du vent, on aura un excès de tension, car le point d'attache des fils n'est pas fixe. Si l'effort de traction augmente, le support fléchit, ce qui tend à augmenter la flèche et, par conséquent, à réduire la traction. Cette flexibilité du poteau réduit d'autant plus la flèche et la traction des fils que l'angle formé par les deux côtés de la ligne est plus petit.

Lorsque le câble est suspendu à un fil porteur, on peut admettre que la force à laquelle est soumis ce fil par mètre est donnée par l'expression :

$$F = \sqrt{(p + p')^2 + (P_1 + P'_1)^2};$$

p et p' , poids par mètre courant du câble et du fil porteur ; P et P'_1 , pressions du vent par mètre courant sur ces fils. Dans l'évaluation du couple agissant sur le poteau, il faut tenir compte aussi bien de l'action des fils porteurs que de celle des câbles.

Pour les poteaux ordinaires assemblés, l'ensemble travaille comme une poutre encastree dans le sol. Si nous appelons M_t le moment fléchissant des forces agissant dans le sens de la ligne, en mètres-kilogrammes, M_p le moment fléchissant des forces agissant perpendiculairement à la ligne, le travail en kilogrammes par millimètre carré à l'encastrement est (*fig. 1394*) :

$$R = 0,5 \left(\frac{l_t M_t}{I_1} + \frac{l_p M_p}{I_2} \right);$$

l_t et l_p dimensions en centimètres à la base du poteau, I_1 et I_2 moments d'inertie.



FIG. 1394.

Poteaux-treillis. — Les poteaux-treillis sont le plus généralement établis à l'aide de fers à U ou à cornières, réunis par des plats en fer formant cadres ; le treillis proprement dit est aussi constitué très souvent par des fers plats diagonaux. Les cornières ou autres fers profilés travaillent à la flexion, et les pièces de treillis doivent résister aux efforts tranchants. On donne aux poteaux une certaine conicité, mais qui est très peu accusée dans les poteaux d'angle et d'arrêt. La section transversale de

ces poteaux est le plus souvent celle d'un carré, et la disposition rectangulaire n'est employée que lorsque les efforts dans les deux directions perpendiculaires sont notablement différents : tel est le cas des poteaux d'arrêt sur lesquels l'action du vent est inférieure à celle exercée par les câbles.

Le calcul des efforts sur les fers profilés qui composent le support s'établit en considérant séparément les faces parallèles et celles perpendiculaires à la direction de la ligne. On suppose l'action du vent distincte de la tension des fils. Si on envisage les deux actions combinées, elles s'ajoutent seulement pour le calcul des montants mais non pour le treillis ; en outre, pour l'action du vent soufflant perpendiculairement à la ligne, la tension des fils n'agit que sur les deux faces situées dans la direction de cette tension.

Le point d'application de la force du vent peut être pris à une hauteur au-dessus du sol correspondant aux $\frac{2}{5}$ de la longueur du poteau, et on évalue la surface des fers exposés au vent en prenant le chiffre de 20 kilogrammes par mètre carré pour l'effort du vent. La section la plus fatiguée est celle de l'encastrement au niveau du sol. Parfois, on est amené à construire de véritables ouvrages d'art qui ressortent du domaine de la technique du constructeur de charpentes, et on utilise à cet effet les procédés graphiques (polygones funiculaires, tracé de Crémona, etc.), qui permettent d'opérer plus rapidement.

Pour un même genre de construction, c'est-à-dire pour le même nombre de cornières et d'entretoises, la longueur de la partie du poteau soumise à la flexion est proportionnelle à la hauteur totale H du poteau. Pour une même résistance à la flexion, le moment d'inertie doit croître comme H^2 . Dans les cornières et les tubes, le moment d'inertie croît comme le carré de la section pour les dimensions dont il s'agit. Le poids du poteau est proportionnel à H^2 . Mais, comme on augmente généralement le nombre des entretoises quand la hauteur croît, le poids du poteau augmente moins vite que H^2 .

On franchit à l'aide des pylônes-treillis des distances de 400 à 600 mètres et plus. Les portées moyennes sont de 100 mètres.

Pratiquement, on ne peut songer à calculer méthodiquement tous les appuis d'une ligne pour les efforts qu'ils ont à supporter ; on détermine plus tôt de la manière usuelle les efforts que doivent supporter les appuis un peu chargés comportant même de faibles changements de direction et on choisit le poteau type que l'on doit utiliser tout le long de la ligne et on renforce spécialement ceux qui sont placés aux points les plus chargés, angles droits, points de départ, de bifurcation, d'arrêt, etc. Quand un appui supporte plusieurs conducteurs on détermine séparément pour chacun d'eux l'effort qu'il exerce et on en cherche la résultante par l'application des théorèmes sur les forces parallèles.

On détermine une fois pour toutes, pour les supports du commerce, les moments fléchissants correspondants et on choisit dans ce travail ainsi préparé les supports qui conviennent le mieux par excès aux calculs de base.

Les pylônes employés par la Franklin Rolling Mill and Foundry and Co ont donné d'excellents résultats dans des expériences complètes récemment effectuées. Ces pylônes consistent en trois fers en U laminés, assemblés au moyen de pièces fondues en acier. Chacune de ces pièces comprend deux parties triangulaires, dont l'une embrasse les surfaces antérieures des fers en U aux sommets d'un triangle et dont l'autre appuie contre les surfaces intérieures de ces fers ; ces deux parties sont assemblées, dans le voisinage des sommets, par des boulons de serrage. L'intervalle entre les entretoises va en augmentant de la base au sommet du poteau.

Les essais ont porté sur des poteaux de 18 mètres de hauteur, enfouis de 1^m,80 dans du béton et ayant 1^m,20 \times 1^m,20 de section ; deux bras transversaux, l'un de 5^m,50, l'autre de 3^m,75, étaient supportés par la partie supérieure du poteau. Le bras le plus bas (5^m,50) portait quatre isolateurs distants de 1^m,80 et le bras supérieur avait deux isolateurs. On exerça sur deux isolateurs du bras inférieur une traction déterminée, les deux autres portant alors des fils normalement tendus. La charge ainsi supportée fut augmentée jusqu'à 675 kilogrammes ; la flexion du poteau s'éleva à 18 millimètres et aucune déformation ne persista quand on enleva la charge. Pour une charge de 900 kilogrammes, la flexion atteignit 65 millimètres ; pour 1.350 kilogrammes, elle s'éleva à 94 millimètres, toujours sans déformation permanente.

Ce type de poteau est employé sur la ligne Los Angeles-Englewood, dont la section totale des lignes est de 573 millimètres carrés. La première partie de la ligne a des portées de 80 mètres ; les poteaux ont 22^m,50 de hauteur et la flèche maxima est de 1 mètre. La ligne de la Société Force et Lumière (Grenoble), établie à l'aide de poteaux en ciment armé, de section octogonale et de 12 mètres de hauteur, a permis de se rendre compte que les poteaux ordinaires pouvaient supporter en toute sécurité un effort au sommet de 300 kilogrammes et de 500 kilogrammes par des poteaux spéciaux.

ABAQUE POUR LA DÉTERMINATION DES ZONES D'UTILISATION DES PYLONES. — Lorsqu'une canalisation est calculée et que les types de supports ont été déterminés pour une portée normale et pour un angle maximum donné de la déviation de la ligne, il y a lieu de prévoir dans quelles conditions peuvent être employés les mêmes supports en modifiant les données du problème pour les cas suivants : la portée que l'on peut accepter en diminuant l'angle de déviation ; l'angle correspondant à la diminution des portées.

M. H. Magron a traduit de tels résultats par un abaque (fig. 1395) qui limite dans le plan diverses zones à l'intérieur desquelles les supports peuvent être utilisés.

Dans la détermination de ces zones, l'auteur considère deux cas différents : a) les portées sont plus petites que la portée normale et l'angle de

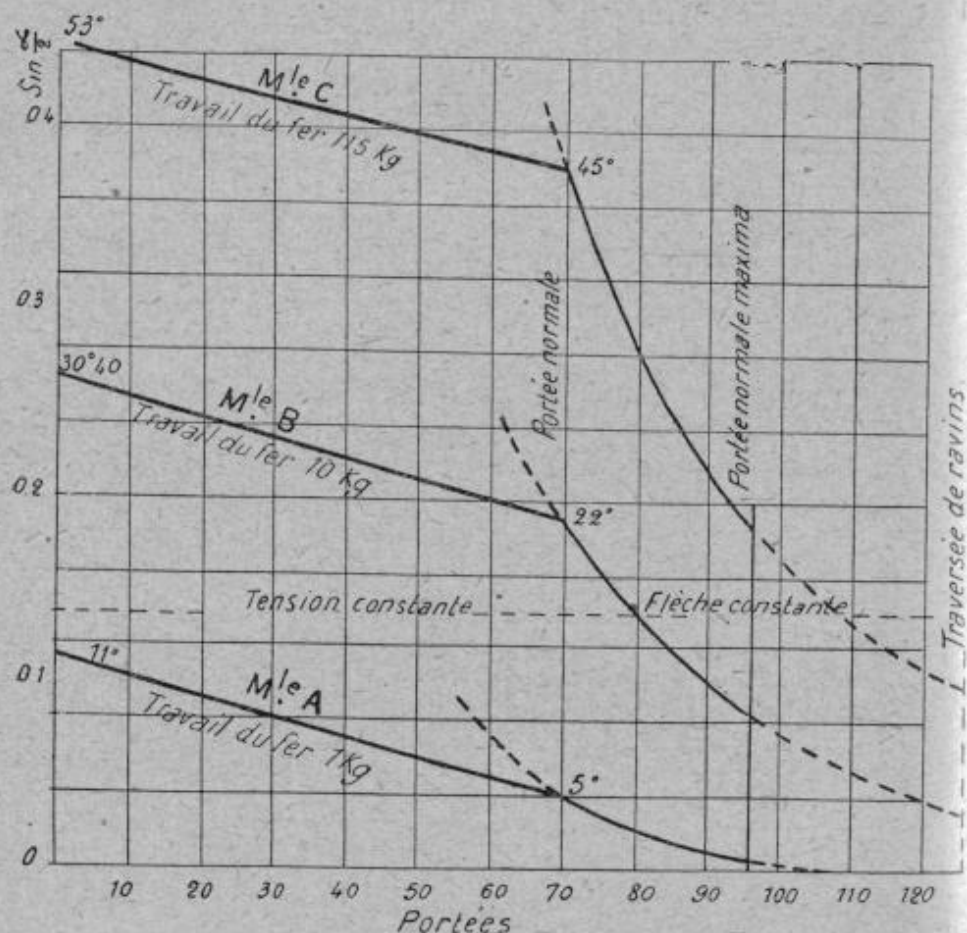


FIG. 1395.

déviât plus grand ; b) l'angle est plus petit et les portées plus grandes que la normale.

Ces deux cas se divisent eux-mêmes en deux autres, conformément à l'article 6 § 2, de l'arrêté ministériel du 31 mars 1908, paragraphe qui prévoit un coefficient de sécurité supérieur à 3 dans les parties des canalisations établies le long des voies publiques, et un coefficient de sécurité supérieur à 5 dans les travaux des voies publiques et des agglomérations.

Premier cas. — Portées inférieures à la portée normale. — On admet que la tension maxima des conducteurs est constante, quelle que soit la portée. Cette hypothèse permet d'avoir un coefficient de sécurité indépendant de la portée pour le conducteur.

Soient : P le poids du pylône en kilogrammes, p le poids par mètre du conducteur en kilogrammes, a la portée en mètres, l'effort dû à la compression est :

$$\frac{P + pa}{4}.$$

Appelons t la tension résultant de la traction des fils, h la hauteur du centre d'effort au-dessus du sol, α l'angle de déviation de la ligne, μ le moment de flexion dû à l'effort du vent sur le pylône, t' la force produite par le vent sur l'ensemble des conducteurs par mètre de portée, d la distance du centre de stabilité des deux poteaux, on a pour la valeur de l'effort total :

$$\frac{2 \sin \frac{\alpha}{2} th + \mu + t'hx}{2d}.$$

L'effort de compression qui est plus élevé que celui de traction et qui doit rester constant est donné par l'équation :

$$\frac{2 \sin \frac{\alpha}{2} th + \mu + t'hx}{2d} + \frac{P + pa}{4} = K;$$

K est l'effort de travail du métal dans les conditions normales.

Cette équation est celle de la courbe de la zone d'utilisation. En portant en ordonnées les valeurs de $\sin \frac{\alpha}{2}$, on voit que cette équation est celle d'une droite.

Deuxième cas. — Portées supérieures à la portée normale. — On admet que la flèche reste constante pour la tension maxima du conducteur, quelle que soit la portée. Le moment fléchissant dû à la résultante de l'effort de traction sera donc :

$$2 \sin \frac{\alpha}{2} h \frac{pa^2}{8f} n,$$

n étant le nombre de conducteurs.

Les autres efforts étant les mêmes que dans le cas précédent, l'équation de la limite de la zone devient :

$$\frac{2 \sin \frac{\alpha}{2} h \frac{pa^2}{8f} n + \mu + t'hx}{2d} + \frac{P + pa}{4} = K_1.$$

Cette courbe et la droite précédemment définie, se raccordant au point

dont les coordonnées sont la portée normale et l'angle maximum normal de déviation, définissent la limite de la zone d'utilisation.

Il convient de remarquer que cette zone d'utilisation, à portées supérieures à la portée normale, ne peut généralement pas se prolonger jusqu'au point $\alpha = 0$, car le seul travail du pylône ne suffit pas à définir la portée maxima possible; il faut, en outre, que le travail des conducteurs eux-mêmes ne dépasse pas la charge maxima admise. Cette considération limite donc les zones d'utilisation à une droite parallèle à l'axe des angles.

537. Abaques Bouchayer et Viallet. — La formule qu'il y a lieu d'appliquer pour se servir des abaques est selon la (fig. 1396) :

$$F = \frac{f_1 h_1 + f_2 h_2 + f_3 h_3}{H}$$

Soient à titres d'exemples :

1° Un pylône en alignement (portée 70 mètres).

L'effort total F reporté au sommet (il n'y a pas lieu de s'occuper de l'effort du vent dont il est tenu compte dans l'abaque des poids).

Dans le cas d'un poteau d'alignement, il n'y a pas lieu comme l'on sait, à tenir compte de l'effort dû à la tension.

Nous voyons que la distri-

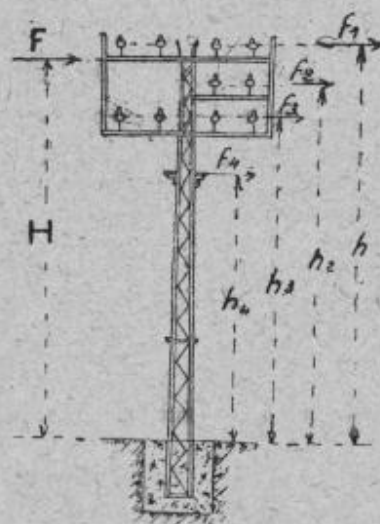


FIG. 1396.

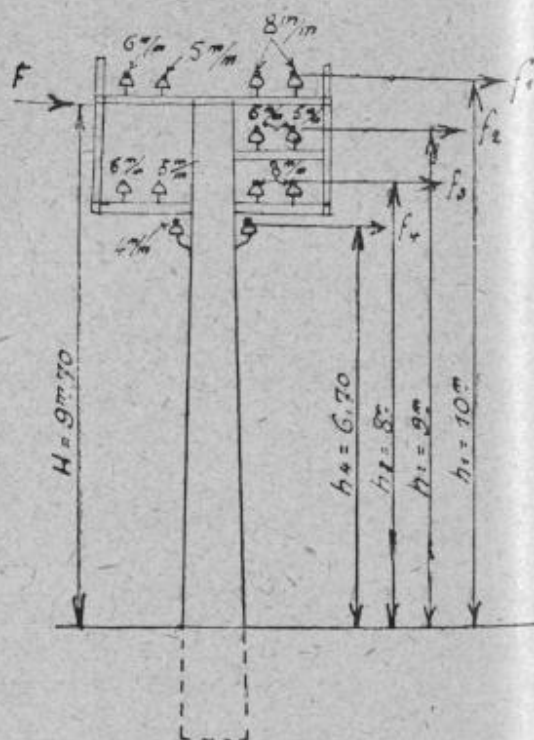


FIG. 1397.

bution comporte quatre fils de 8 mètres, trois fils de 6 millimètres et trois fils de 5 millimètres de diamètre (fig. 1397).

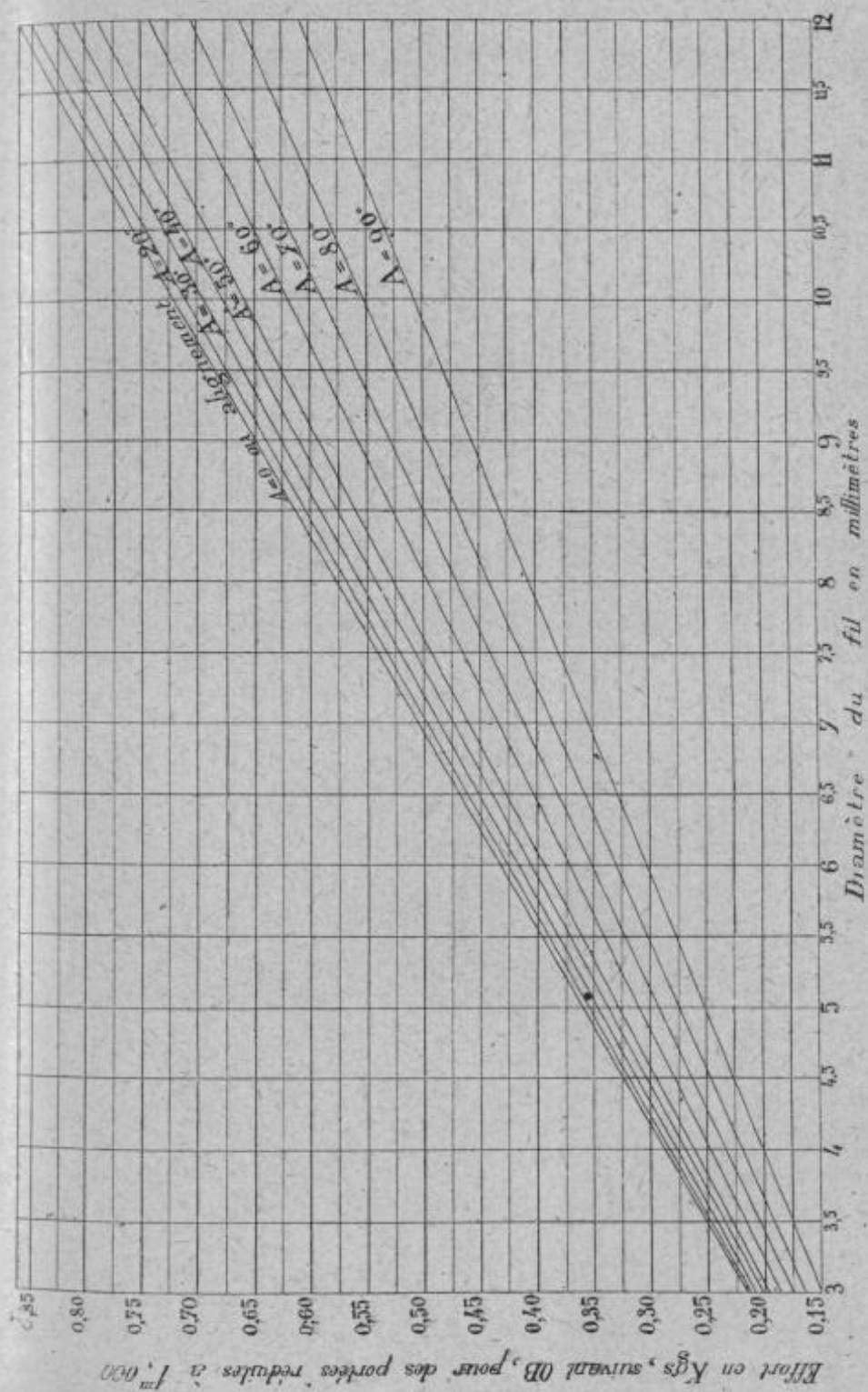


FIG. 1398. — Abaque n° 1. — Effort par mètre de portée produit sur le pylône au niveau d'un fil par l'action du vent de 120 kg sur ce fil.

Effort en Kgs, suivant OB (voir tableau I) pour une tension
égale à 1 Kg par millimètre carré

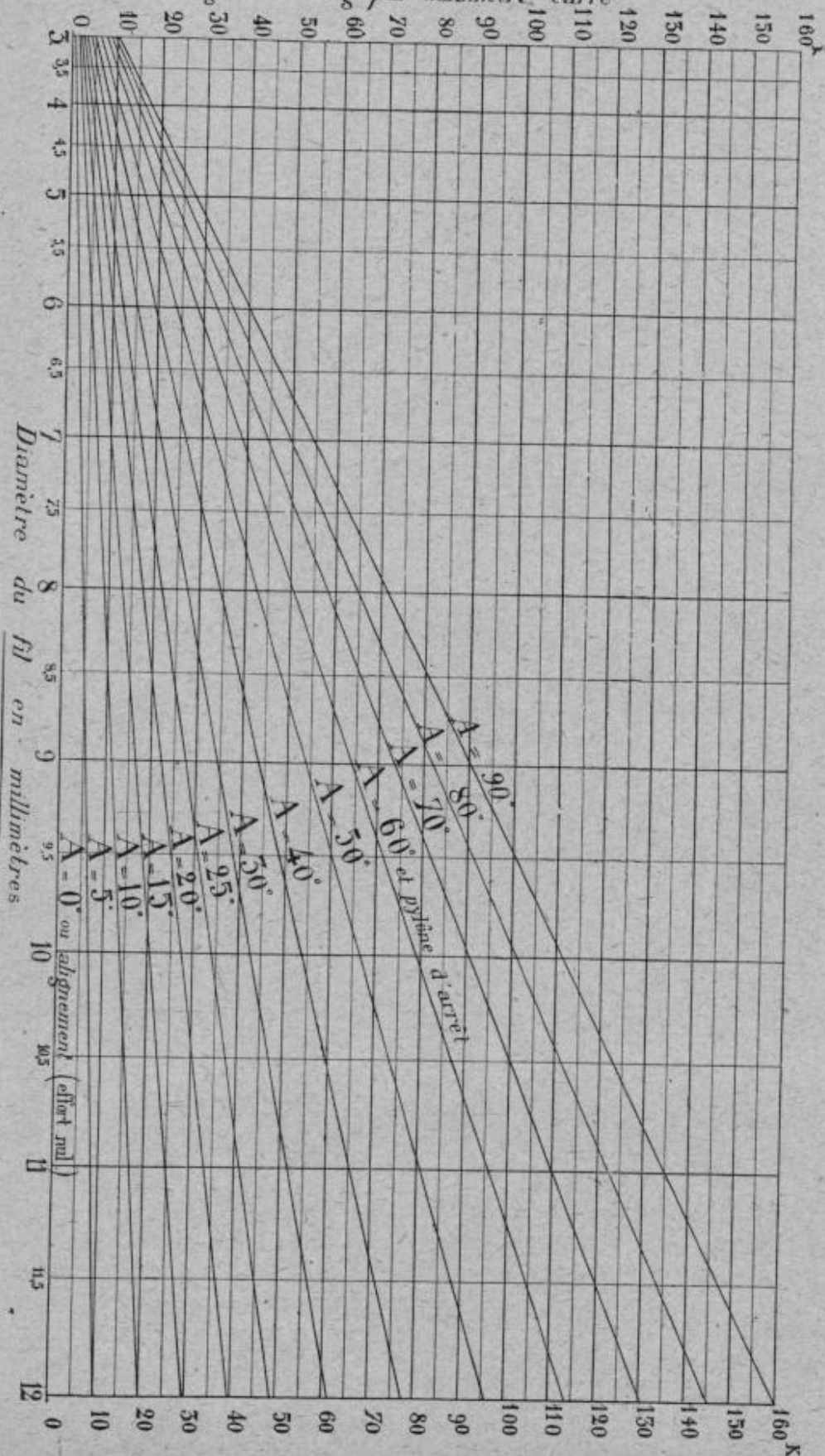


Fig. 1399. — Abaque n° 2. — Effort pour 1 kg de tension par mm² de section du fil sur le pylône au niveau d'un fil par deux brins de ce fil.
(Pylônes d'angle ou d'arrêt.)

En se reportant à l'abaque n° 1, on a pour les efforts dus au vent sur les fils :

Fil de 8 millimètres.....	$0^{\text{kg}},58 \times 70 = 40^{\text{kg}},6$
— 6 —	$0,43 \times 70 = 30,1$
— 5 —	$0,36 \times 70 = 25,2$
— 4 —	$0,29 \times 70 = 20,3$

Par suite :

A 10 mètres du sol.....	$2 \times 40,6 + 30,1 + 25,2 = 136^{\text{kg}},5$
A 9 — —	$30,1 + 25,2 = 55,3$
A 8 — —	$2 \times 40,6 + 30,1 + 25,2 = 136,5$
A 6 ^m ,70 du sol.....	$2 \times 20,3$

La hauteur du pylône étant de 9^m,70 on a :

$$F = \frac{136,5 \times 10 + 55,3 \times 9 + 136,5 \times 8 + 40,6 \times 6,7}{9,70} = 332 \text{ kg.}$$

L'abaque n° 4 fournit le poids du pylône correspondant à ces données, soit : 275 kilogrammes. Et l'abaque n° 5 donne : 220 kilogrammes (aciers spéciaux).

2° Un pylône d'angle.

L'angle de l'abaque n° 1 étant supposé de 30° on a pour l'effort dû au vent :

Fil de 8 millimètres.....	$0^{\text{kg}},56 \times 70 = 39^{\text{kg}},2$
— 6 —	$0,42 \times 70 = 29,4$
— 5 —	$0,34 \times 70 = 23,8$
— 4 —	$0,28 \times 70 = 19,6$

Et pour l'effort dû à la tension (effort de 8 kilogrammes par millimètre carré correspondant au coefficient de 1/5 pour le métal à 40 kilogrammes de rupture des conducteurs), on a, d'après l'abaque n° 2 :

Fil de 8 —	$27 \text{ kg} \times 8 = 216 \text{ kg}$
— 6 —	$15 \times 8 = 120 \text{ »}$
— 5 —	$11 \times 8 = 88 \text{ »}$
— 4 —	$7 \times 8 = 56 \text{ »}$

Soit ensemble :

Par fil de 8 millimètres.....	$225^{\text{kg}},2$
— 6 —	$149,4$
— 5 —	$111,8$
— 4 —	$75,6$

D'où les efforts partiels placés à une même hauteur du sol :

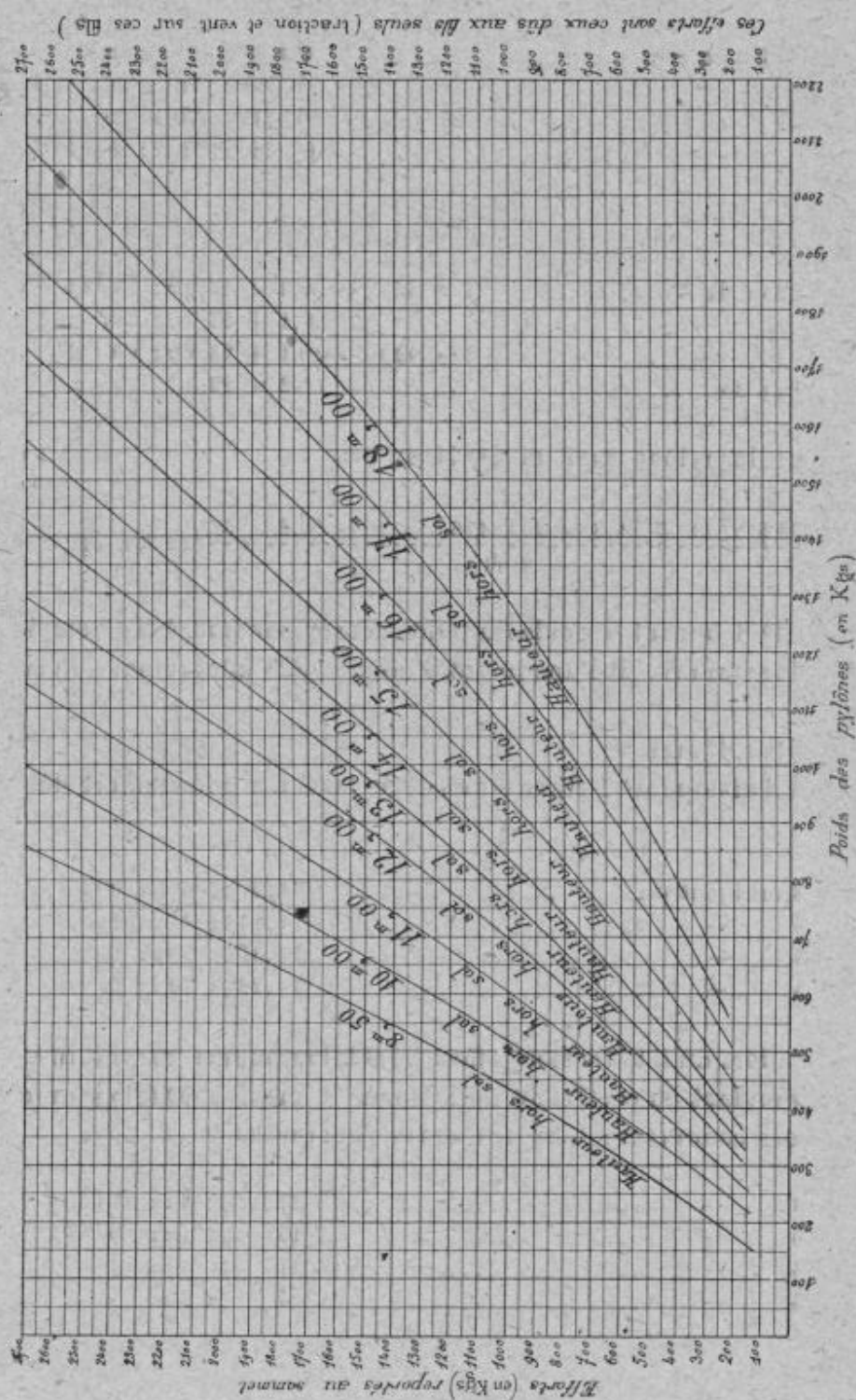


FIG. 140. — Abaque n° 3. — Poids des pylônes en acier ordinaire, avec coefficient de sécurité minimum de 1/5.
(Traversées des voies ferrées, routes, rivières.)

A 10 mètres du sol.....	$2 \times 255,2 + 149,4 + 111,8 = 771,6$
A 9 — — — — —	$149,4 + 111,8 = 261,2$
A 8 — — — — —	$2 \times 255,2 + 149,4 + 111,8 = 771,6$
A 6 ^m ,70 du sol.....	$2 \times 75,6 = 151,2$

Par suite :

$$F = \frac{771,6 \times 10 + 261,2 \times 9 + 771,6 \times 8 + 151,2 \times 6,7}{9,70} = 1.778 \text{ kg.}$$

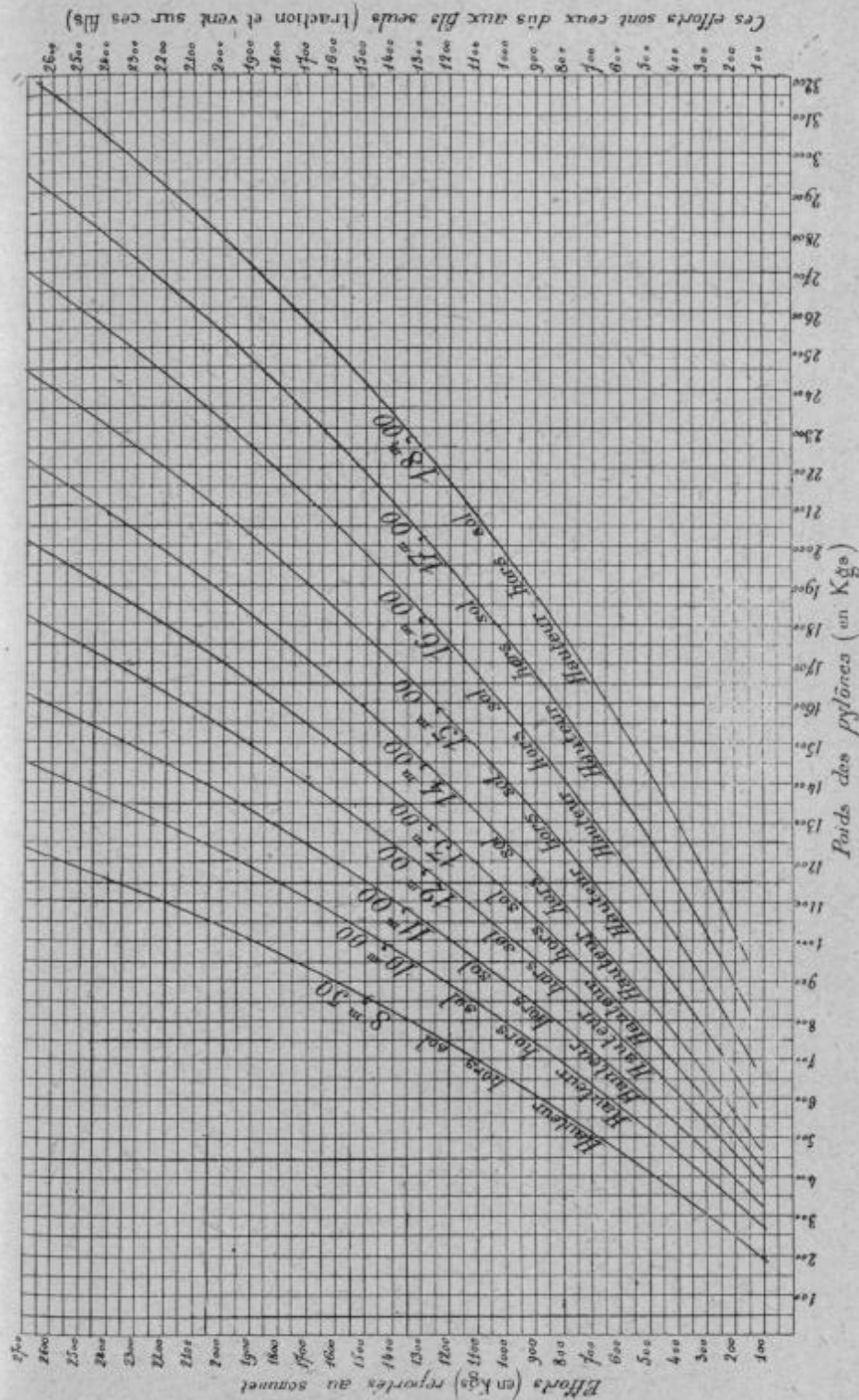


FIG. 1401. — Abaque n° 4. — Poids des pylônes en acier ordinaire, avec coefficient de sécurité minimum de 1/3.

L'abaque n° 4 fournit pour le poids : 730 kilogrammes.

Et l'abaque n° 5 fournit pour le poids : 570 kilogrammes.

538. Applications numériques. — 1^o Soit (fig. 1402) un poteau en bois supportant trois files de lignes avec fils de 8 millimètres de diamètre et de 50 mètres de portée.

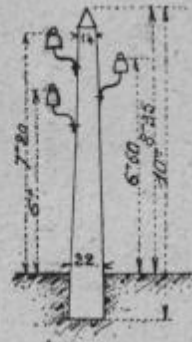


FIG. 1402.

En supposant une traction de 3 kilogrammes par millimètre carré de section du fil, chaque conducteur exerce un effort de $3 \times 51 \text{ mm}^2 = 153$ kilogrammes.

La pression verticale du vent s'ajoute au poids des conducteurs; mais sa pression sur le poteau est d'effet à peu près nul.

Le moment de rupture du support à sa base est :

$$153 \times 6^{\text{m}} + 153 \times 6^{\text{m}},50 + 153 \times 7^{\text{m}},20 = 3.014 \text{ kgm/m.}$$

Prenons 3.100 pour tenir compte du vent sur le poteau lui-même.

La pression du vent horizontale dans la direction des conducteurs a pour valeur :

$$0^{\text{m}},18 \times 10^{\text{m}} \times 72 \text{ kg,}$$

et le moment de rupture :

$$0^{\text{m}},18 \times 10 \times 72 \times 5 = 648 \text{ kgm/m.,}$$

0^m,18 représentant le diamètre moyen du poteau.

La pression sur les fils est nulle dans ce deuxième cas, et la traction sur les conducteurs est à recalculer.

En appliquant la formule :

$$T_1 = \frac{pa^2}{8f} + pf;$$

on a :

$$T_1 = \frac{0,447 \times 50^2}{8 \times 1^{\text{m}},25} + 0,447 \times 1^{\text{m}},25 = 113 \text{ kg.}$$

Le moment fléchissant est par suite :

$$648 + 113 \times 6^{\text{m}} + 113 \times 6^{\text{m}},50 + 113 \times 7^{\text{m}},20 = 2.874 \text{ kgm/m.}$$

Lorsque le vent a une direction horizontale, mais perpendiculaire au plan passant par les poteaux et les câbles, l'action du vent produit comme avant un moment fléchissant de 648 kilogrammètres. Les poids des fils n'interviennent plus, mais le vent donne une traction sur l'attache de chaque fil fournie par l'expression ci-après :

$$\text{Pression du vent par mètre de longueur : } \frac{8 \times 72}{1.000} = 0^{\text{kg}},576.$$

$$\text{Traction sur le fil : } \frac{0,576 \times 50^2}{8 \times 1^{\text{m}},25} = 144 \text{ kg.}$$

Par suite le moment d'inertie est, dans la direction du vent :

$$144 \times 6^m + 144 \times 6^m,50 + 144 \times 7^m,20 + 648 = 3.485 \text{ kgm/m.}$$

D'autre part, un moment fléchissant provenant exclusivement du poids des câbles agit dans un plan différent, soit :

$$113 \times 6^m + 113 \times 6^m,50 + 113 \times 7^m,20 = 2.225.$$

Le moment fléchissant réel a donc pour valeur :

$$m = \sqrt{3485^2 + 2225^2} = 4.155 \text{ kgm/m.},$$

soit sensiblement :

$$4.200 \text{ kgm/m.} = 420.000 \text{ kg./cm.}$$

Ce chiffre de 4.200 étant le plus élevé des divers cas examinés, c'est donc celui qui doit entrer dans le calcul pour la solidité du poteau.

Le moment d'inertie de la section à la base est :

$$m_1 = \frac{\pi}{32} d^3.$$

Le poteau étant en sapin, le module de rupture par centimètre carré est de 900 kilogrammes, et avec une sécurité de 5, on a :

$$m = \frac{\pi}{32} d^3 \frac{900}{5};$$

d'où :

$$d^3 = \frac{32 \times 5}{900 \times \pi} m;$$

soit :

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \times 5 \times 420000}{900 \times \pi}} = 29 \text{ centimètres.}$$

2° Soit un poteau en bois de 10 mètres de hauteur ayant 22 centimètres à la base et 12 centimètres au sommet, et enterré de 1^m,50.

On détermine la valeur du diamètre à la section de rupture par la formule :

$$x = \frac{850 (22 - 12)}{1000} + 12 = 20,50 \text{ centimètres.}$$

On suppose l'effort appliqué au sommet, c'est-à-dire à 8^m,50, alors :

$$F = 46,39 \frac{144 \times 8,50}{850} = 66^{\text{kg}},84.$$

Si on veut déterminer le plus grand effort à 0^m,50 du sommet, on cherche d'abord la valeur du diamètre au point d'application de l'effort :

$$x = \frac{50(22 - 12)}{1000} + 12 = 12,50 \text{ centimètres}$$

et

$$F = 46,39 \frac{156,25 \times 8}{800} = 72^{\text{kg}},36.$$

Si on veut déterminer le plus grand effort à la tête en fonction de la hauteur au-dessus du sol et de son diamètre au niveau du sol, on aura :

$$F = \frac{0,07 \times 22^3}{1000} = 70 \text{ kilog.}$$

avec $R = 0^{\text{kg}},7$ par millimètre carré.

3° Calcul d'un poteau en bois (pour une ligne transportant 1.000 kilowatts à 50 kilomètres).

L'expérience enseigne que, pour une ligne à six conducteurs, en bronze-siliceux de 5 millimètres de diamètre et établie pour une tension de 20.000 volts, la portée maximum entre supports ne peut excéder 40 mètres.

En cette occurrence, la charge maximum des lignes de bronze étant de 9 kilogrammes par millimètre carré de section, le coefficient de sécurité sera égal à :

$$\frac{40}{9} = 4,45.$$

Et le coefficient de surcharge est donné par la formule :

$$\frac{p'}{p} = \frac{\sqrt{p^2 + p^2 v}}{p}.$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs :

$$\frac{p'}{p} = \frac{\sqrt{0,0089^2 + 0,00457^2}}{0,0089}.$$

avec un vent de 30 kilogrammes par mètre courant de surface plane et une température minimum de -15° C.

La valeur de la flèche dans ces conditions est :

$$f = \frac{40 \times 1,125^2 \times 0,0089}{8 \times 9 \times 1,125} = 0,22$$

correspondant d'après l'abaque de M. Blondel à une flèche de 0,60 à la température de $+ 40^{\circ}$ sans surcharge.

Le poteau étant encastré de $1^{\text{m}},50$ dans le sol et les fils conducteurs disposés en trois nappes horizontales de deux, espacés verticalement de $0^{\text{m}},90$, la hauteur totale du support sera :

$$2 \times 0^{\text{m}},90 + 0,25 + 0,60 + 6 + 1,50 = 9^{\text{m}},65.$$

Soit pratiquement 10 mètres, avec pour diamètre $0^{\text{m}},17$ au petit bout et $0^{\text{m}},25$ au gros bout.

L'effort dû à l'action du vent sur les conducteurs sera :

$$40 \times 0,6 \times 120 \times 0,003 \times 6 = 86^{\text{kg}},5$$

pour un vent de 120 kilogrammes par mètre carré de surface plane.

L'effort du vent sur le poteau est :

$$\left(\frac{0,17 + 0,25}{2} \right) 8,5 \times 120 \times 0,6 = 125 \text{ kg.}$$

Le moment fléchissant dû à l'action du vent sur les conducteurs est représenté par :

$$86,5 \times 7,6 = 660 \text{ kilogrammètres.}$$

La hauteur moyenne des fils au-dessus du sol étant de $7^{\text{m}},60$.

Le moment fléchissant dû à l'action du vent sur le poteau est :

$$\frac{8,5 (0,25 + 2 \times 0,17)}{3 \times (0,25 + 0,17)} \times 125 = 500 \text{ kilogrammètres,}$$

le bras de levier étant représenté par la distance du centre de gravité de la partie non encastrée du poteau.

Le moment fléchissant total est donc de :

$$660 + 500 = 1.160 \text{ kilogrammètres.}$$

D'où la charge sur le poteau par centimètre carré est :

$$\frac{32 \times 1,160 \times 10^2}{3,1416 \times 253} = 85 \text{ kilog.}$$

qui est la valeur maximum à adopter pour les poteaux en bois.

4^e Calcul d'un poteau métallique. (Pour une ligne transportant 1.000 kilowatts à 20.000 volts).

On admet une portée maximum de 80 mètres en alignement droit.

L'hypothèse la plus défavorable pour obtenir la flèche maximum correspond à $+ 12^{\circ}$ C. avec vent de 120 kilogrammes.

L'action du vent par mètre courant de conducteurs (six conducteurs) de 5 millimètres de diamètre) et par millimètre carré de section est :

$$p_v = \frac{120 \times 0,6 \times 0,005}{19,64} = 0,018.$$

Le coefficient de surcharge a pour valeur :

$$\frac{p'}{p} = \frac{\sqrt{0,0089^2 + 0,018^2}}{0,0089} = 2,25.$$

Et la valeur de la flèche devient :

$$f = \frac{80 \times 2,25^2 \times 0,0089}{8 \times 9 \times 2,25} = 1^{\text{m}},178,$$

correspondant à une flèche de $1^{\text{m}},85$ à $+ 40^{\circ}$ C.

La hauteur du pylône est fournie par l'expression :

$$h = 0,90 \times 2 - 0,25 + 6 + 1^{\text{m}},85 = 10^{\text{m}},90,$$

le poteau encastré de $1^{\text{m}},50$ et les conducteurs disposés en trois nappes horizontales espacées verticalement de $0^{\text{m}},90$.

L'action du vent sur les conducteurs est :

$$80 \times 6 \times 120 \times 0,6 \times 0,005 = 173 \text{ kg.}$$

Le moment résultant de l'action du vent sur les conducteurs est :

$$173 \times 8,85 = 1.530 \text{ kg.}$$

Et l'effort au sommet a pour valeur :

$$\frac{1.530}{9,3} = 160 \text{ kg} + \text{l'effort dû au vent sur le pylône.}$$

Le poids d'un pylône de $9^{\text{m}},50$ de hauteur au-dessus du sol et de 450×450 de base pouvant résister à cet effort serait de 230 kilogrammes.

Dans le cas d'un poteau d'angle (angle de 15° et 65 mètres de portée), on obtient pour la valeur de la flèche, avec un coefficient de surcharge de 2,25 :

$$f = \frac{65 \times 2,25^2 \times 0,0089}{8 \times 9 \times 2,25} = 1^{\text{m}},20$$

correspondant à $+ 40^{\circ}$ sans surcharge à une flèche de $1^{\text{m}},25$.

En nous mettant dans les mêmes conditions que le cas précédent, on a pour la hauteur du pylône :

$$0,90 \times 2 - 0,23 + 1,5 + 6 + 1,25 = 10^m,30.$$

L'action résultant de la traction des conducteurs sur le pylône est de :

$$6 \times 19,64 \times 9 \times 2 \cos 82^\circ 30' = 280 \text{ kilog.}$$

Le moment fléchissant dû à cet effort agissant avec un bras de levier de 8^m,35 est de :

$$280 \times 8,35 = 2.340 \text{ kilogrammètres.}$$

Et l'effort au sommet de :

$$\frac{2.340}{9} = 260 \text{ kilog} + \text{le vent sur le pylône.}$$

Le poids du pylône capable de résister à ce moment est de 280 kilogrammes.

5° Soit un poteau tubulaire formé de 4 tubes dont les dimensions sont : 70/60, 80/70, 95/80 et 115/100. Les moments d'inertie correspondants sont : 555.000, 847.500, 2.025.000 et 3.748.000.

En admettant que les longueurs de chaque tube hors du sol sont de 2 mètres et que l'effort à la tête soit de 70 kilogrammes, les moments fléchissants en kilogrammètres sont, aux encastrement successifs, du sol vers le haut : 560.000, 420.000, 280.000 et 140.000.

Par suite, les charges résultant des moments fléchissants successifs sont :

$$R_1 = \frac{115}{2} \times \frac{560.000}{3.748.000} = 8^{\text{kg}},70.$$

Et successivement on trouvera de même :

$$R_2 = 9^{\text{kg}},83, R_3 = 13^{\text{kg}},2 \text{ et } R_4 = 8^{\text{kg}},75.$$

6° *Calcul d'un pylône treillis.* — Les calculs sont établis pour permettre à l'appareil de résister, avec un coefficient au moins égal à 10, à la tension des conducteurs et à un vent de 120 kilogrammes par mètre carré de surface plane agissant perpendiculairement à la ligne sur les conducteurs et sur le pylône (fig. 1403 et 1404).

Chaque montant est constitué, dans sa hauteur, par deux fers cornières placés bout à bout et réunis à l'aide de 6 boulons de 18 millimètres; les

cornières inférieures ont $90 \times 90 \times 10$ et les cornières supérieures $90 \times 70 \times 7$.

Le treillis est formé par des fers cornières $55 \times 35 \times 5$ fixés aux montants par des rivets de 14 millimètres.

La base du pylône est scellée dans un massif de béton mesurant 2 mètres de hauteur sur 1^m,90 de largeur.

Les cornières des montants inférieurs ont une section nette de $1700 - (16 \times 10) = 1540$ millimètres carrés; un moment d'inertie $I_{\min.} = 53_{\text{cent}}^4$; la longueur libre maxima de la barre est de 1^m,40 et m , coefficient dépendant du mode de fixation des barres, égale 4.

L'effort maximum dans un montant inférieur (voir tracé) est :

$$\frac{7620 + 4280}{2} = 5950 \text{ kg.}$$

Par suite le travail maximum à la tension est :

$$R_t = \frac{5950}{1540} = 3^{\text{kg}},86 \text{ par mm}^2.$$

Et celui à la compression :

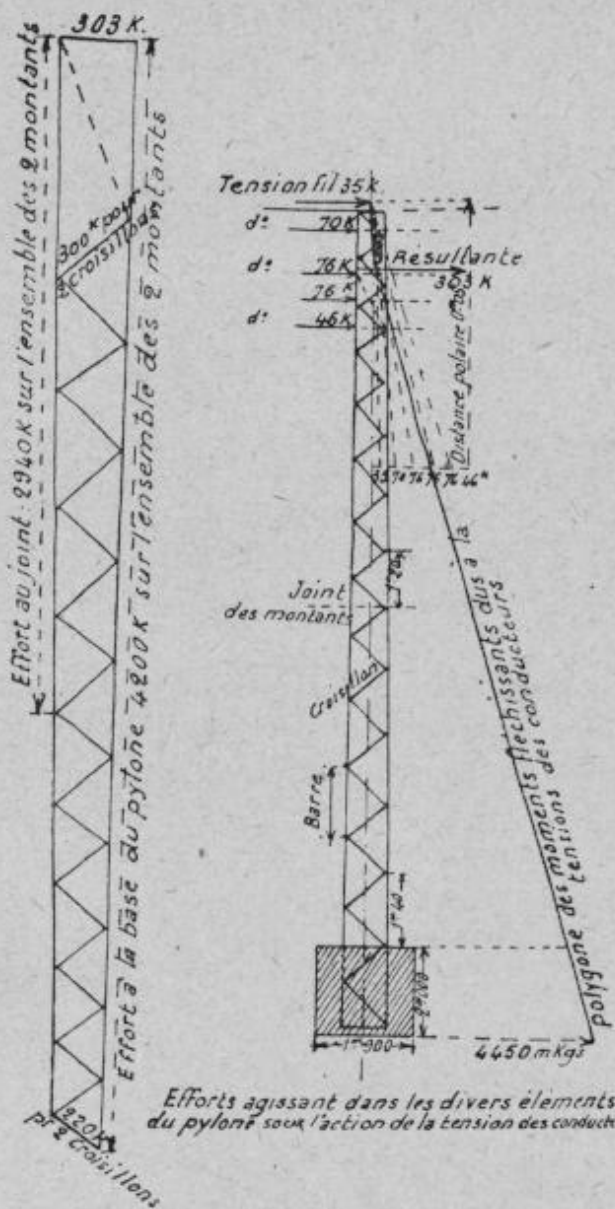


FIG. 1403.

$$R_c = \frac{5950}{1540} \left(1 + 0,011 \frac{1,4^2 \times 1700}{4 \times 53} \right) = 4^{\text{kg}},11 \text{ par mm}^2 \text{ (formule de Résal).}$$

$$\text{Coefficient de sécurité : } \frac{42,5}{4,11} = 10,3.$$

Les cornières des montants inférieurs ont une section nette de : $931 - (16 \times 7) = 819$ millimètres carrés; un moment d'inertie $I_{\min.} = 17,7_{\text{cent}}^4$; la longueur libre maxima de la barre est de 1^m,20 et $m = 4$.

L'effort maximum dans un montant supérieur devient :

$$\frac{3360 + 2940}{2} = 3150 \text{ kg.}$$

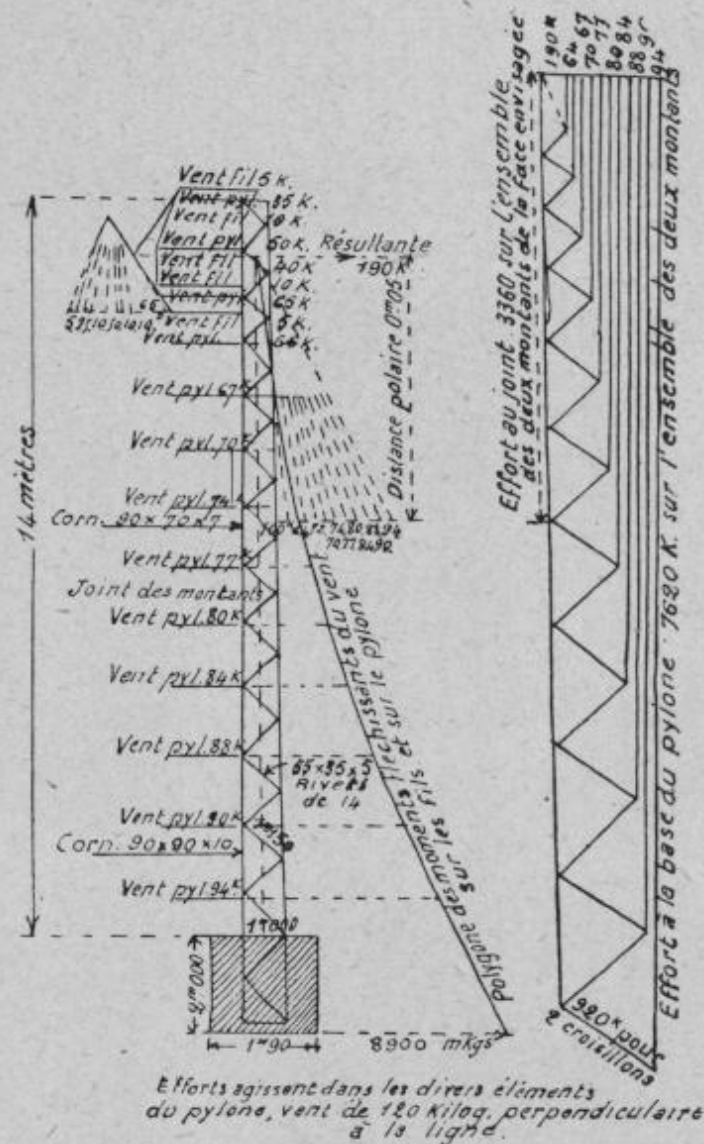


FIG. 1404.

Par suite le travail maximum à la tension est :

$$R_t = \frac{3150}{819} = 3^{\text{kg}},85 \text{ par mm}^2.$$

Et celui à la compression :

$$R_c = \frac{3150}{819} \left(1 + 0,11 \frac{1,2^2 \times 931}{4 \times 17,7} \right) = 4^{\text{kg}},080 \text{ par mm}^2.$$

Coefficient de sécurité : $\frac{42,5}{4,08} = 10,4.$

Les cornières constituant les montants supérieurs et inférieurs sont assemblés entre elles au moyen de 6 boulons de 18 millimètres pour chaque jonction.

La section nette des 6 boulons $= 170 \times 6 = 1.020$ millimètres carrés.

Effort dans un joint (tracé de Crémone) $= 3.150$ kilogrammes. Et le travail maximum au cisaillement est :

$$R_{ci} = \frac{3150}{1020} = 3^{kg,09}.$$

Le vent, perpendiculairement à la ligne, exerce sur un croisillon inférieur et sur les faces parallèles à la direction du vent un effort maximum de 460 kilogrammes, et la longueur libre de ce croisillon est de 1^m,150.

La tension des conducteurs exerce dans le treillis des faces parallèles à la direction de la ligne un effort de 110 kilogrammes sur chaque croisillon inférieur.

Sur cette face l'effort maximum s'exerce, ainsi que le montre le tracé correspondant, sur le 6^e croisillon à partir du sommet et il est égal à 180 kilogrammes. Longueur libre de la barre 0^m,700.

L'effort maximum supporté par le treillis est donc de 460 kilogrammes avec une longueur libre de 1^m,150.

La section brute des cornières des croisillons est de 465 et la section nette de 465 $-(16 \times 5,5) = 377$ millimètres carrés (cornières de 55 \times 35 \times 5,5).

Le moment d'inertie minimum : $I_{min.} = 2,57_{cm}^4$, avec $m = 1$.

Le travail maximum à la tension est :

$$R_t = \frac{460}{377} = 1^{kg,22} \text{ par mm}^2.$$

Le travail maximum à la compression :

$$R = \frac{460}{465} = \left(1 + 0,011 \frac{1,15^2 \times 465}{2,59} \right) = 3^{kg,570} \text{ par mm}^2.$$

Coefficient de sécurité : $\frac{42,5}{3,57} = 11,9$.

Le diamètre des rivets égale 14 millimètres ; leur section est de 154 millimètres carrés. L'effort de cisaillement maximum étant de 460 kilogrammes, le travail maximum au cisaillement égale :

$$R_{ci} = \frac{460}{154} = 2^{kg,99} \text{ par mm}^2.$$

Le poids du cube du béton s'opposant au renversement a pour valeur :

$$2.000 \times 1.900 \times 2^{kg,200} = 15.900 \text{ kg.}$$

Le bras du levier du massif de béton étant :

$$\frac{1.900}{2} = 0,950,$$

le moment s'opposant au renversement est :

$$15.900 \times 0,950 = 15.100 \text{ mètres kilog.}$$

Et le moment de renversement maximum :

$$8.900 \times 4.430 = 13.350 \text{ mètres kilog.}$$

La stabilité est ainsi largement assurée.

539. Plantation des poteaux. — La construction d'une ligne aérienne de transport d'énergie électrique comporte généralement une équipe de fouilles, une équipe de levage, une équipe de tirage et enfin une équipe de finissage qui se suivent successivement dans l'ordre indiqué.

De cette façon on peut estimer de 500 à 900 mètres l'avance journalière selon la configuration du terrain et les obstacles à surmonter.

L'équipe de levage est ordinairement composée de 20 à 25 hommes avec 2 chèvres de manutention; l'équipe de finissage comporte 3 ou 4 hommes, spécialement affectés au réglage des flèches des conducteurs, à la pose des ronces et des étiquettes. Cette dernière marche à 1 ou 2 kilomètres en arrière de l'équipe de tirage. On peut laisser entre l'équipe de levage et celle du tirage un intervalle de 5 à 6 kilomètres.

La construction rapide d'une ligne exige que le service des approvisionnements soit bien assuré. On peut indiquer que des dépôts seront installés tous les 15 à 20 kilomètres où on disposera en bon ordre les poteaux, pylônes, armements, isolateurs, tiges, mouffles, échelles, ciment, chaux, fils de fer, soudure, ronces, plaques indicatrices, essence, huile, chiffons, pétrole, pelles, pioches, barres à mines, pointerolles, dames, cordages, câbles d'acier, chaîne, planches, madriers.

L'équipe spéciale de transport peut être composée d'une quinzaine d'hommes avec chariots nécessaires.

Les poteaux en bois sont de préférence placés dans un drain de pierres sèches. La hauteur d'enfoncement est de 1^m,60 à 1^m,70 pour poteaux de 10 mètres; 1^m,80 à 1^m,90 pour poteaux de 12 mètres et 2^m,30 à 2^m,40 pour poteaux de 16 mètres. Dans le roc, l'enfoncement peut être réduit de 0^m,40 environ.

Dans les terrains ordinaires ou mous on dispose autour des poteaux en bois, à leur encastrement, une collerette de ciment pour éviter la pourriture.

Pour les poteaux en bois, il est préférable de ne bétonner le pied qu'au-

dessous de 30 à 50 centimètres, pour pouvoir chaque année goudronner la partie enterrée au-dessus du bétonnage. Pour procéder, quelques heures après le bétonnage, au tirage de la ligne, il faut employer un béton contenant 200 à 250 kilogrammes de ciment par mètre cube de béton.

Lorsque, dans un sol amolli par des pluies, les poteaux ont, sous l'effet du vent, agrandi le trou dans lequel ils sont plantés, ils peuvent, sous l'action d'un nouveau coup de vent, être violemment projetés, d'un bord à l'autre de l'orifice ainsi formé, sous le choc qui en résulte.

Pour les lignes de moyenne importance, la distance ou portée de 50 mètres ne peut guère être dépassée avec les diamètres de poteaux en bois courants. Deux poteaux accolés en forme d'A permettent d'augmenter sensiblement cette distance. Les lignes à moyenne tension sont généralement armées à l'aide de ferrures fixées directement sur le poteau. L'emploi des traverses paraît réservé aux lignes de 30.000 à 60.000 volts.

Les poteaux en ciment armé doivent être placés dans une fondation en béton de chaux hydraulique ou en béton de ciment. Leur hauteur varie de 12 mètres à 20 mètres. La distance admise entre ces supports est en général de 60 mètres, et les dimensions de la base ne dépassent pas sensiblement celles des poteaux en bois. On admet généralement que les points spéciaux des lignes en ciment armé (grandes portées) doivent être constitués par des supports métalliques. Toutefois, les constructeurs américains ont construit des poteaux en ciment armé de 50 mètres de hauteur ayant à la base (quadrangulaire) $75^{\text{cm}} \times 70^{\text{cm}}$ et au sommet $27^{\text{cm}} \times 27^{\text{cm}}$. De tels poteaux pèsent 30 tonnes.

La plantation des poteaux-treillis se fait soit en les logeant dans une fouille ayant généralement une profondeur égale au sixième de la longueur du poteau et remplie de béton, soit, si le sol est suffisamment résistant, en les posant à fleur de ce dernier. Dans ce cas, on munit le poteau à sa base de forts patins constitués par des cornières et de larges plaques de tôles réunies par des goussets et traversées par de forts boulons que l'on scelle dans des trous profonds et que l'on remplit de béton ou de ciment.

Le coût de plantation et d'assemblage des poteaux en bois simples est d'environ de 7 francs pour des poteaux de 12 mètres, de 8 francs pour des poteaux de 14 mètres, de 12 francs pour des poteaux de 17 mètres ; de 20 francs pour des poteaux doubles de 12 mètres, de 23 francs pour des poteaux doubles de 14 mètres et de 30 francs pour des poteaux doubles de 17 mètres, les ouvriers payés à raison de 4 francs par journée de dix heures.

La (fig. 1405) montre la disposition de la fouille à pratiquer pour l'implantation d'un poteau. Pour un support de 8 mètres, on prend $x = 0^{\text{m}},50$, $x' = 1$ mètre, $y = 1^{\text{m}},30$ et $y' = 0^{\text{m}},40$.

Lorsque les profondeurs sont de 2 mètres et plus, on fait $y = 1^{\text{m}},50$ et $x = 0^{\text{m}},80$, dans terrain ordinaire bien plat.

Le poteau étant amené auprès de la fouille, deux ou trois hommes le saisissent près de sa pointe, le soulèvent tout en poussant le gros bout resté en contact avec le sol jusqu'au-dessus de la cheminée, d'où un autre ouvrier, à l'aide d'un butoir, l'engage dès que le poteau est dressé verticalement. Une fois le poteau mis dans sa fosse, on le maintient verticalement au moyen de cales et de terre tassée avec un fouloir. Puis on pilonne le remplissage jusqu'à ce que le trou soit complètement rempli.

Dans les terrains peu consistants, on emploiera soit des caissons cintrés (terrain sablonneux), soit des chemises en maçonnerie (terrain marécageux) dans lesquels on disposera le poteau, préalablement goudronné.

Quand il s'agit de poteaux couplés, on dispose le pied droit et la jambe de force sur des traverses reposant sur le terrain plat, en ayant soin de mettre une traverse dans la partie médiane des appuis.

La fouille doit affecter une disposition avec double cheminée et le calage ainsi que le bourrage doivent être exécutés avec soin dans chacune d'elles.

Pour les poteaux ordinaires, on opère leur levage à l'aide d'une corde attachée à leur tête et on les soulève en tirant sur la corde d'une part et en les soutenant, d'autre part, au moyen d'une fourche en acier *ad hoc*. Le levage des poteaux plus importants a lieu avec l'aide de mouffles et d'une bigue. Le moufle Chevenier, qui permet d'immobiliser le garant dès que l'effort de traction disparaît, offre le précieux avantage de donner aux hommes le moyen de se reposer pendant la manœuvre de levage. Les très grands supports sont levés à l'aide de treuils, ou d'une voiture spéciale équipée à cet effet.

La mise à la terre des poteaux métalliques s'assure par les jambes d'acier qui les supportent, que l'on fait traverser le béton pour s'enfoncer dans la terre humide.

Il est d'un très grand intérêt de prendre les mesures les plus minutieuses pour la consolidation du terrain aux emplacements des fondations des poteaux, soit au point de vue de leur résistance, soit à celui de leur conservation ultérieure. On devra donc recourir à des sondages aussi répétés que possible. Cette sujétion s'explique du fait que, pour

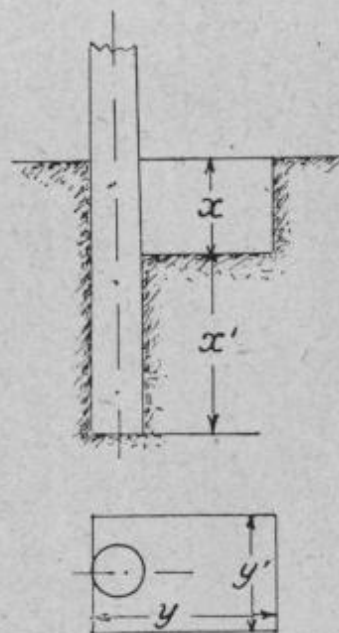


FIG. 1405.

les lignes importantes, le tiers des dépenses est absorbé par les fondations.

Les procédés usuels de construction des fondations consistent soit à noyer directement des boulons dans le bloc de maçonnerie et à laisser émerger les têtes des dits destinées à recevoir les écrous servant à fixer la plaque de base du pylône, soit à pratiquer des cheminées dans la maçonnerie, devant recevoir ultérieurement les boulons lors du montage de l'appui métallique.

Un procédé plus moderne imaginé par M. Congia, (fig. 1406) consiste à constituer la fondation par un bloc de maçonnerie armé intérieurement

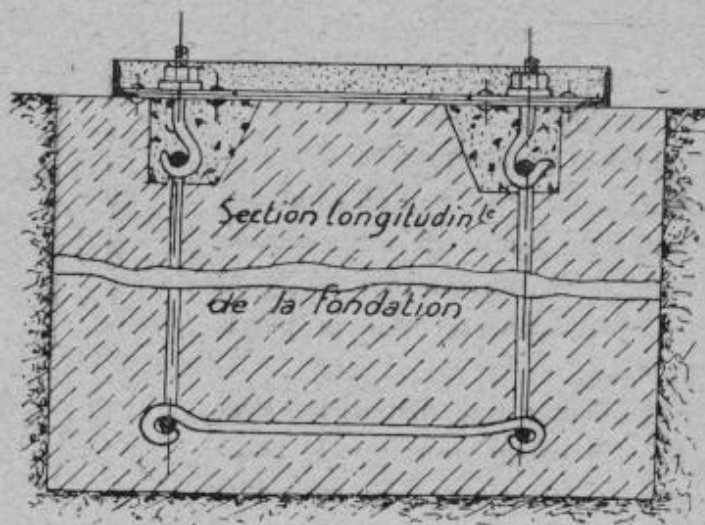


FIG. 1406.

de ferrures convenables qui aboutissent à des attaches logées dans des cavités ménagées à la surface de la maçonnerie et à l'aide desquelles on fixe le pylône au moyen de crochets à tiges filetées ou autres ferrures analogues ; les fondations peuvent être exécutées dès le tracé de la ligne et être ainsi rendues indépendantes de l'époque où l'on pourra effectuer le montage des poteaux. Après la mise en place de ces derniers, on remplit de ciment les cavités où se trouvent les attaches de manière à éviter que l'eau ne puisse s'infiltrer dans la maçonnerie.

Calcul des fondations des appuis des pylônes. — Selon les sondages que l'on effectue dans les emplacements où l'on doit établir des fondations en maçonnerie, on classe le sol en terrains très durs (roches), en terrains consistants (dans lesquels pénètre difficilement la sonde à main) et en terrains mous, marécageux, tourbeux, etc. Pour les premiers, la résistance spécifique est au moins égale à celle des maçonneries de fondation. Pour ceux de la deuxième catégorie, on peut admettre la résistance spécifique d'au moins 25.000 kilogrammètres carrés. Enfin, pour ceux de la troisième

catégorie, il faut les rendre efficacement consistants au moyen de clayonnages, de compressions ou d'autres dispositifs.

Un autre côté de la question à examiner est celui de la distribution des réactions unitaires déterminées dans le sous-sol de fondation par les maçonneries que supporte ce sous-sol. Quelle que soit la qualité du terrain il ne se produit pas d'affaissements sensibles, tant que sa résistance spécifique ne se trouve pas surmontée.

Les fondations ont à résister aux plus grands efforts pris normalement qui servent de base pour le calcul des poteaux ou bien ils correspondent aux actions qui se produisent dans les deux plans axiaux verticaux, parallèlement et normalement à la ligne électrique, relativement aux alignements droits, ou bien ils correspondent aux sollicitations qui se produisent dans les plans passant par les deux bissectrices en ce qui concerne les poteaux d'angles.

Nous exposerons à cet effet la méthode de calcul que l'ingénieur italien Cangia applique à la construction de son système de fondations.

Appelons F et l , respectivement la résultante horizontale des forces extérieures et le bras de levier de celle-ci par rapport à la base du poteau; P la composante du poids du poteau sur la fondation, p , le poids spécifique de la maçonnerie. Les indices 1 et 2 se rapportent le premier au plan vertical normal à la ligne et l'autre au plan formant un angle de 90° .

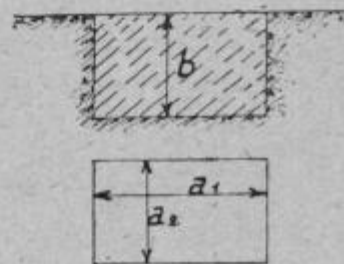


FIG. 1407.

Les dimensions du bloc de maçonnerie étant $a_1 a_2$ et b , pour obtenir l'équilibre on doit avoir :

$$\left. \begin{aligned} (P + p \cdot a_1 a_2 b) \frac{a_1}{2} &= F_1 (l_1 + b) \\ (P + p \cdot a_1 a_2 b) \frac{a_2}{2} &= F_2 (l_2 + b) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} b \text{ profondeur de la} \\ \text{maçonnerie (fig. 1407).} \end{array}$$

Dans la pratique on fixe *à priori* la dimension b suivant la qualité du terrain.

On peut, avec une approximation suffisante poser :

$$\begin{aligned} \frac{11}{10} p \cdot a_1 a_2 b \frac{a_1}{2} &= F_1 (l_1 + b) \\ \frac{11}{10} p \cdot a_1 a_2 b \frac{a_2}{2} &= F_2 (l_2 + b). \end{aligned}$$

D'où :

$$a_1 = \sqrt{\frac{20 \cdot 1 \cdot F_1^2 (l_1 + b)^2}{11 p b F_2 (l_2 + b)}}$$

et :

$$a_2 = \sqrt{\frac{20.4 F_2^2 (l_2 + b)^2}{11 p b F_1 (l_1 + b)}}.$$

Que l'on peut résoudre par l'emploi des logarithmes. On augmente convenablement les valeurs de a_1 et de a_2 correspondant à l'équilibre statique dans une mesure correspondant à la qualité et à la consistance du terrain et aux autres circonstances locales et éventuelles.

Le bloc de maçonnerie considéré ayant une section rectangulaire, le noyau central coïncide avec le quadrilatère qui a pour diagonales les deux tiers moyens des axes de la section rectangulaire.

L'effort unitaire de compression ou de réaction unitaire du sous-sol de fondation est donné par la formule connue de résistance des matériaux :

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{MV}{I};$$

A aire résistante à la compression ; I moment d'inertie relativement à son axe baricentrique ; K composante verticale de la résultante ; M moment d'inertie pour le transport de la composante au centre de gravité ; V la distance depuis l'axe baricentrique de la fibre considérée.

Si on appelle h la longueur de l'aire soumise à la compression et si on considère la fibre la plus sollicitée pour laquelle $V = \frac{h}{2}$, on a pour la direction d'indice 1 :

$$V = \frac{h_1}{2}, \quad A = a_2 h^2; \quad M = N \frac{h_1}{\sigma} \text{ et } I = \frac{1}{12} a_2 \sigma h_1^3$$

et par suite :

$$\sigma_1 = \frac{2N}{a_1 h_2}.$$

Par analogie, pour la direction 2, on obtient

$$\sigma_2 = \frac{2N}{a_2 h_1}.$$

Et, en introduisant N pour sa valeur : $\frac{11}{10} p a_1 a_2 b$, on a enfin :

$$\sigma_1 = \frac{11}{5} p \frac{a_1}{h_1} b \text{ et } \sigma_2 = \frac{11}{5} p \frac{a_2}{h_2} b.$$

Ainsi la valeur de la réaction maxima spécifique imposée au terrain par le bloc de fondation dépend du rapport entre l'aire sectionnée dans le

bloc par le plan vertical de sollicitation et la longueur de la base exposée à la compression.

Les valeurs de σ_1 et de σ_2 sont celles des réactions unitaires maximum développées par le terrain de fondation sous les arêtes du bloc de maçonnerie autour desquelles surviendrait le renversement du poteau, si les forces sollicitantes venaient à l'emporter sur les forces résistantes.

Si on indique par $\frac{h}{3}$ la distance entre le centre de pression et l'arête autour de laquelle tend à se produire la rotation et sous laquelle se produit la compression unitaire maxima, on trouve facilement que la formule de résistance des matériaux précitée se transforme en l'expression suivante pour $V = \frac{a}{2}$:

$$\sigma = \frac{11}{5} b.p. \left(2 - \frac{h}{a}\right).$$

Pour la détermination des quantités h_1 et h_2 sus indiquées on emploie les formules :

$$\frac{h_1}{3} = \frac{a_1}{2} = \frac{10}{11} \frac{F_1 (l_1 + b)}{p.a_1 a_2 b}$$

$$\frac{h_2}{3} = \frac{a_2}{2} = \frac{10}{11} \frac{F_2 (l_2 + b)}{p.a_1 a_2 b}.$$

Si h devenait supérieur à a , le centre de pression tomberait entre le tiers moyen de la base et cette dernière résisterait en tout point à la compression d'après la loi exprimée par l'expression générale :

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{MV}{I}.$$

Comme application numérique basée sur les données suivantes :

$b = 1^m,50$		$l_1 + b = 13^m,30$
$p = 2200$		$l_2 + b = 16^m,30$
$F_1 = 2500$		$l_1 = 12$ mètres
$F_2 = 1200$		$l_2 = 15$ "

On trouvera $a_1 = 3^m,18$ et $a_2 = 1^m,86$; $h'_1 = 1^m,26$, $h_2 = 0^m,66$, $\sigma_1 = 20.200$ kilogrammètres carrés et $\sigma_2 = 22.000$ kilogrammètres carrés.

Pour un terrain de consistance ordinaire on prend $a_1 = 3^m,50$, $a_2 = 2$ mètres et $b = 1^m,50$.

Lorsque le terrain est mou ou tourbeux, ou encore marécageux, on augmente convenablement les valeurs de a_1 et a_2 de la base de fondation en lui donnant autant que possible une forme pyramidale.

Pour les poteaux en ciment armé, leur transport et leur dressage sont assez difficiles à cause de leur poids et de leur flexibilité, et ces opérations ne peuvent se faire que six semaines après la fabrication des poteaux.

PRIX DES LIGNES A HAUTE TENSION (TRIPHASÉES)

Poteaux en bois

Poteau de 12 mètres.....	33 fr.	}	95 fr.
Traverses et ferrures.....	12		
Isolateurs.....	33		
Transport.....	3		
Plantation et montage.....	14		

Prix au kilomètre : $30 \times 95 = 2.850$ fr.

Pylônes métalliques

Pylône, 400 kilogrammes, à 35 fr. les 0/0....	140 fr.	}	252 fr.
Ferrures.....	7		
Isolateurs.....	45		
Transport.....	10		
Plantation et montage.....	50		

Prix au kilomètre : $13 \times 252 = 3.276$ fr.

Tours en aciers

Tour.....	350 fr.	}	485 fr.
Ferrures.....	15		
Isolateurs.....	45		
Transport.....	15		
Plantation et montage.....	60		

Prix au kilomètre : $7 \times 485 = 3.395$ fr.

Poteaux en ciment armé

Poteau.....	80 fr.	}	174 fr.
Traverses et ferrures.....	16		
Isolateurs.....	33		
Transport à 3 kilomètres.....	3		
Plantation et montage.....	40		

Prix au kilomètre : $17 \times 174 = 2.958$ fr.

Dépenses comparatives d'établissement des supports par kilomètre de ligne.

1° Poteaux en bois

Pour 1 kilomètre, on a :

15 poteaux simples pour portées de 40 mètres	
10 poteaux contrefichés — de 30 —	
4 poteaux de 12 m. pour — de 25 —	

soit :

15 poteaux à	89 ^r ,50.....	1.340 fr.
10 —	127,50.....	1.275
4 —	99,50.....	400
Total.....		3.015 fr.

Les poteaux simples ont 10 mètres de hauteur.

2° Poteaux métalliques (type Bèvé)

Les poteaux sont placés à la distance de 80 mètres en alignement droit ; ils ont 11 mètres de hauteur totale et répondent aux mêmes conditions de travail que les poteaux bois ci-avant.

Les poteaux métalliques simples ou pylônes ont une section à la base de 450 × 450 et pèsent 230 kilogrammes chaque.

On a :

8 pylônes de 11 mètres à	187 fr.....	1.495 fr.
4 — de 10 ^m ,50 à	207 fr.....	830
4 — de 12 mètres à	214 fr.....	855
Total.....		3.180 fr.

3° Poteaux flexibles en fers à U

15 poteaux : 200 kg ×	23 fr.....	690 fr.
2 poteaux d'arrêt : 550 kg ×	29 fr. × 2.....	319
Transport, levage, fouilles, béton, peinture.....		467
Total.....		1.476 fr.

Par kilomètre de lignes aériennes, on peut compter en moyenne et en plus de la dépense du cuivre et des poteaux : pour parafoudres et prises de terre, 200 francs ; appareils de court-circuit et prises de terre, 150 francs ; filets de protection avec traverses et prises de terre, 450 francs ; accessoires divers, 150 francs ; tirage des conducteurs et montage des appareils, 700 francs ; port et emballage, 100 francs ; dégâts commis et imprévus, 400 francs.

La proportion du prix de l'appareillage au total de la ligne est presque toujours supérieure à la moitié et atteint souvent 60 0/0. Le poids de cuivre par cheval nécessaire pour transporter l'énergie par courants triphasés est inversement proportionnel au carré des tensions utilisées. Ainsi, pour des tensions de 10.000, 20.000, 40.000, 50.000 et 60.000 volts et une ligne de 100 kilomètres, on peut compter respectivement sur des poids de cuivre de 320 kilogrammes, 80 kilogrammes, 20 kilogrammes, 12^{kg},800 et 8^{kg},800 par cheval et pour une puissance de 10.000 kilowatts aux turbines avec une perte de 10 0/0.

Pour le cas d'une transmission à 50.000 volts et une distance de 200 kilomètres entre l'usine génératrice et la sous-station réceptrice, cas qui est maintenant envisagé avec le plus grand sang-froid par les ingénieurs, en

se basant sur le prix de 2 fr. 40 le kilogramme de cuivre, la dépense par cheval, dans les conditions ci-dessus, est de 96 francs. En admettant 10 0/0 pour l'intérêt et l'amortissement, la dépense annuelle ressort à 10 francs par cheval.

Les lignes en câble souterrains les plus usitées sont celles qui desservent les canalisations de rues dans les villes où la tension qu'elles ont à supporter ne dépassent pas généralement 5.000 volts ; 1 kilomètre de ligne triphasée dans ce cas peut revenir au coût ci-après :

4.100 mètres câble armé, à 3×35 millimètres carrés...	6.300 fr.
Boîtes de jonction.....	150
1.000 mètres de tranchées de 0 ^m ,70 de profondeur, sable, remplissage, repavage.....	3.500
Pour traversées, mises en état, déplacements de tuyaux..	500
Emballage du câble et montage.....	250
Imprévus.....	300
TOTAL.....	14.000 fr.

Ce prix est à peu près le double de celui d'une ligne aérienne dans les mêmes conditions de voltage, et montée sur supports en bois.

Quant aux frais annuels, pour les lignes avec poteaux imprégnés, on prend 7 0/0 d'amortissement et d'intérêt sur prix du cuivre et des appareils, 15 0/0 d'amortissement et d'intérêt sur autres frais et environ 350 francs par kilomètre de ligne pour détériorations dues à la foudre et autres dommages.

Les frais annuels nécessités par les canalisations souterraines sont à très peu près équivalents à ceux d'une ligne aérienne comportant des poteaux en bois imprégnés, en comptant 7 0/0 d'amortissement et d'intérêt et 250 francs par kilomètre pour dépenses de vérification et de mesures. (Tous ces prix sont ceux d'avant-guerre) ⁽¹⁾.

540. Entretien et surveillance des lignes. — Dans les grands transports d'énergie électrique, le service de surveillance est généralement assuré par les brigades d'entretien, chargées également des réparations. Ces brigades sont sous les ordres d'un chef de poste, et chacun des agents a la surveillance d'une longueur de ligne variant de 10 à 20 kilomètres. Il est bon de faire, autant que possible, passer les fils le long des routes, ce qui permet de les visiter en-automobiles ou à bicyclettes.

Une ligne bien surveillée doit être visitée entièrement tous les jours, et les réparations signalées par les surveillants se faire au premier jour d'arrêt de l'usine (quand il y a impossibilité de les exécuter la ligne étant en charge). En cas de réparation urgente, on interrompt le courant de midi à une heure sur la partie endommagée.

⁽¹⁾ Il suffit de les majorer des taux ou coefficients appliqués en ce moment.

FORMULAIRES DE L'ENTREPRISE ÉLECTRIQUE THUSY-HAUTERIVE. — RAPPORT D'INSPECTION FAIT A LA SUITE DE L'ORAGE.
(A envoyer immédiatement au bureau *)

RECTO		VERSO	
* Température extérieure * Pluviomètre * Intensité maximum de l'orage : soit matin soit heure		Réseaux 500 volts. Transformateurs avariés 500 : Kw ; N° Fusibles brûlés phase I II III Câbles : Interrupteur : Parafoudres : Huile : Poteaux foudroyés : N°	
Cabine : Transformateur primaire 8000 / Bobines primaires endommagées : Bobines secondaires endommagées : Tubes isolants du transformateur : Fusibles H. T. brûlés phase I phase II phase III B. T. phase I phase II phase III basse tension 500 volts de 190 volts de 110 volts de Lignes : Parasurtension : Condensateurs : Batterie simple ou double : Parafoudre à cornes : Interrupteur primaire Parafoudre à rouleaux : 500 volts Lignes : } 190 * } 110 * Remarques :		Fusibles sur poteau : Fusibles entrée : Remarques : Le Monteur. le 19.....	

* Les observations indiquées par cette rubrique sont à noter pendant l'orage.

Dans certaines installations, en plus des rapports écrits journaliers des surveillants, chaque jour, à sept heures du soir, tous les chefs de poste disséminés le long de la ligne se mettent en communication téléphonique avec l'usine. Parfois des équipes spéciales d'entretien sont centralisées dans les points principaux du réseau, lesquelles reçoivent les ordres de l'usine d'après les communications faites par les surveillants.

Dans le cas d'arrêt pour réparations sur les lignes, les conducteurs doivent être mis en court-circuit à la terre, à l'usine génératrice même, et les fusibles ou les interrupteurs des sous-stations de transformation qui possèdent des moteurs synchrones doivent être hors circuit pour éviter les retours de courant engendrés par ces moteurs. De même, avant de toucher aux lignes à l'endroit même du travail, on reliera les fils à la terre au moyen d'appareils portatifs spéciaux.

La réparation terminée, on remet le réseau en service en chargeant lentement la ligne. On prend les mêmes précautions quand il s'agit d'un arrêt accidentel, en faisant supprimer le courant dans le tronçon avarié. Pour éviter tout accident pouvant résulter pour les tiers d'un fil tombé,

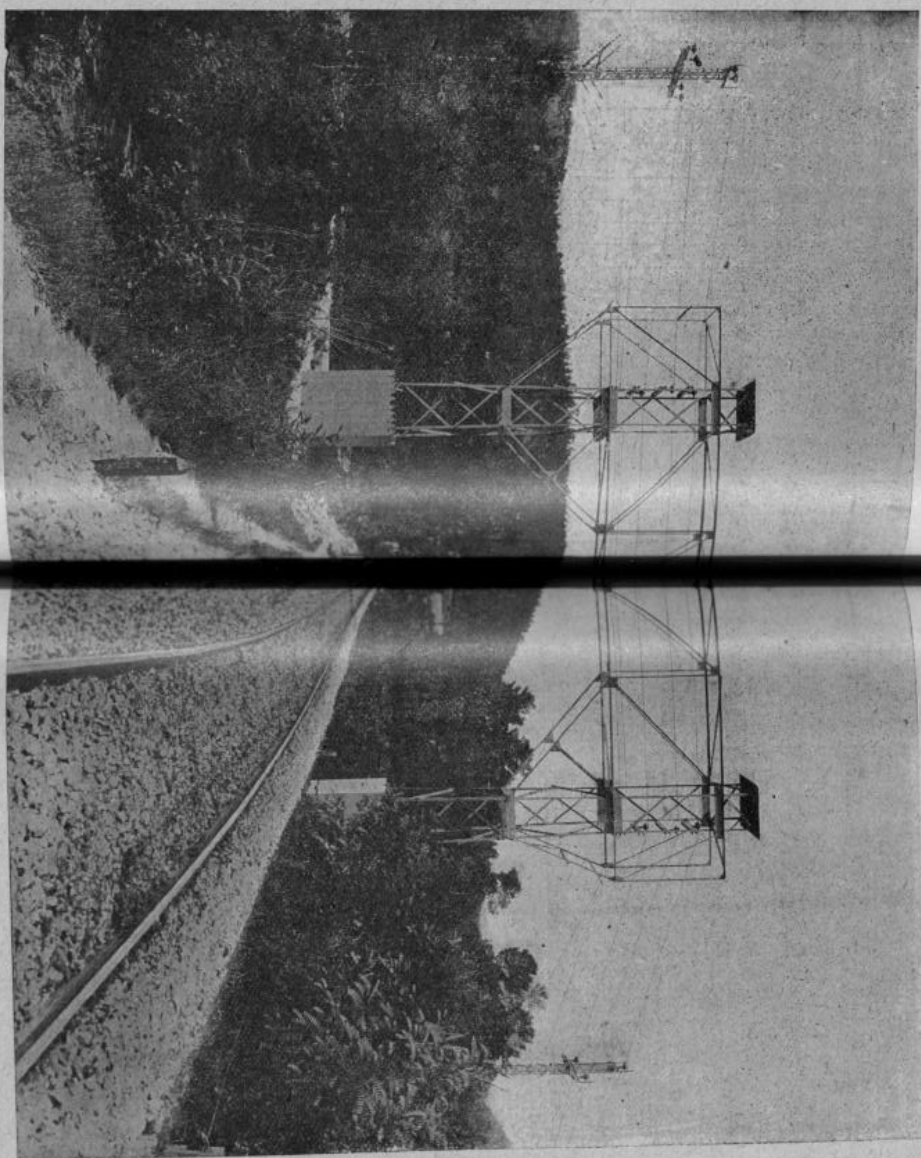


Fig. 140c. — Usine de la Sûreté d'une ligne de chemin de fer.

dès que l'indicateur de l'usine signale qu'une ligne présente une phase à la terre, le chef d'usine doit supprimer le courant sur cette ligne.

Lorsque des avaries se produisent sur les réseaux secondaires reliant les sous-stations aux installations des abonnés, les chefs de brigade recherchent et réparent eux-mêmes les avaries sans demander d'instructions spéciales à l'usine génératrice. Dans ce cas, on emploie des appareils à enclenchements spéciaux ne permettant aux chefs de brigade de remettre le courant sur le branchement secondaire que lorsque tous les ouvriers ayant travaillé sur ce branchement ont cessé leur travail.

Dans toutes les sociétés importantes, les chefs de brigade reçoivent un règlement imprimé indiquant toutes les précautions à prendre pour effectuer en toute sécurité les travaux de surveillance et d'entretien. En outre, des registres spéciaux mis à la disposition des brigades,

servent à inscrire tous les accidents et les réparations auxquelles ceux-ci donnent lieu.

Le formulaire ci-avant permet d'établir des statistiques intéressantes sur les accidents arrivés au matériel durant les orages. En compilant de

tels documents on peut progressivement supprimer les perturbations dans un réseau.

En ce qui concerne les tiers, des affiches relatant les précautions à prendre en cas de rupture de fils ou de chute des poteaux sont posées dans tous les villages, aux portes des mairies.

Dans les installations à haute tension, il faut obtenir un isolement presque parfait, car elles ne peuvent supporter même temporairement de courts-circuits entre deux phases; le moindre contact entre deux fils par l'intermédiaire de deux isolateurs perforés et de la terre, d'une branche d'arbre apportée par une tempête, ou par rupture de fils, détermine un débit tel que la marche du réseau devient impossible.

Par le jeu des disjoncteurs et des interrupteurs de sectionnement, on arrive, par éliminations successives, à reconnaître assez rapidement le point où s'est produit le court-circuit et, par suite, à retirer le branchement du réseau. L'usine génératrice, par l'intermédiaire de la ligne téléphonique, est d'ailleurs avisée des accidents. Il en est de même dans le cas où un conducteur est mis à la terre (isolateur brisé ou fil rompu). On peut ainsi arriver assez vite à remettre le réseau en état normal dans toute son étendue.

Un signal d'alarme, optique ou acoustique, ainsi qu'un enregistreur de décharges ont leur emploi assez indiqué dans les usines réceptrices et génératrices.

Les cas de fonctionnement anormal se présentent notamment quand, sur circuit à point neutre isolé, une des phases se met accidentellement à la terre par un arc oscillant. La décharge au parafoudre peut se prolonger au delà du temps, cependant très long, pendant lequel il peut en supporter l'intensité, mais qu'il convient d'abrégier par le signal d'alarme. Un tel appareil peut être constitué par un élément d'aluminium branché entre le parafoudre et la terre et d'une sonnerie en série avec une résistance shuntant l'élément à la terre. La décharge à la terre à travers l'élément d'aluminium détermine une différence de potentiel suffisante au circuit de sonnerie pour faire fonctionner cette dernière. Pour réaliser un signal optique, on substituerait à la sonnerie un relais dont le courant ferait fonctionner le signal.

L'enregistreur de décharges peut être placé concurremment avec le signal d'alarme permettant de recueillir la trace de toute surtension entre phases se déchargeant à travers le parafoudre ou encore de toute décharge entre phase et terre. L'image obtenue est l'expression fidèle de tous les phénomènes du réseau, de sorte qu'on peut tirer des indications analogues à celles que ferait connaître, par exemple, l'enregistrement oscillographique continu, qui est impraticable.

541. Moyens préventifs pour éviter les ruptures des conducteurs aériens. — Les ruptures des conducteurs et de leurs supports peuvent se produire soit par bris d'un fil de ligne au milieu de la portée, soit par rupture du support ou de la ligature du conducteur, soit enfin par le bris du conducteur au droit d'un isolateur.

Dans le premier cas, la rupture a lieu à la suite d'une surcharge accidentelle, ou par le relâchement d'un point défectueux, ou par la fusion ou le ramollissement du métal provenant d'un arc au voisinage d'un corps étranger, ou par suite d'un défaut caché, usure ou corrosion du métal. Dans le second cas, l'accident peut être causé par la rupture d'une ligature d'isolateur ou par le bris ou l'arrachement d'une ferrure. Le troisième cas donne lieu à un des points les plus délicats du système, ainsi que nous le verrons plus loin.

L'exploitant de lignes d'énergie électrique a un intérêt considérable à ne confier l'établissement de son réseau qu'à des spécialistes éprouvés et consciencieux car une ligne bien calculée et établie avec soin dans tous ses détails verra ses risques d'accidents réduits au minimum.

En implantant la ligne à une distance convenable des obstacles naturels, en déterminant d'une façon rigoureuse la flèche calculée des conducteurs où on tiendra compte de toutes les surcharges essentielles, en faisant des épissures telles qu'elles puissent supporter une grande résistance mécanique, ce qui ne demande que de l'habileté et du soin, en soumettant les supports des isolateurs à des essais de réception sérieux, enfin en s'inspirant au mieux de toutes les fatigues mécaniques et électriques d'une ligne à haute tension, on peut arriver à réduire les chances d'une rupture des conducteurs à une valeur pour ainsi dire insignifiante.

Nous allons maintenant envisager plus spécialement le cas de rupture à l'isolateur même, qui dépend de la nature même de l'isolateur, des dégâts qui peuvent lui être faits en cours de transport, de montage ou par l'effet destructeur des surtensions et des coups de foudre directs (nous admettons que les essais faits à leur réception ont éliminé tous les isolateurs douteux).

Quoi qu'il en soit, la rupture de l'isolateur, déterminant un arc entre le conducteur et la ferrure de l'isolateur ne peut avoir lieu, par suite de fêlure, que si la ligne est montée sur poteaux métalliques et si le point neutre des génératrices est isolé du sol. Tous les dispositifs de mise à la terre de la haute tension, en cas de rupture d'isolants de machine, d'isolateurs de ligne, de rupture aérienne de ligne et d'isolants de câbles ou de transformateurs, seront encore plus efficaces si la mise à la terre d'une phase ou d'un pôle à haute tension provoque immédiatement le déclenchement des disjoncteurs du feeder sur lequel l'avarie s'est produite. C'est pourquoi nous pensons qu'il est bon de réunir le point neutre à la

terre. Non seulement ce procédé empêche que les isolants de tout le système soient soumis à la tension-entre phases divisée par 1,732, mais, dès qu'un défaut se produit sur une phase, il se forme un court-circuit qui déclenche les disjoncteurs.

Quand le point neutre n'est pas réuni au sol, la mise à la terre d'une phase soumet les isolants des autres phases à la tension totale du réseau et ne provoque pas toujours le déclenchement des disjoncteurs.

D'après M. Dusaughey, la cause de la rupture qui nous occupe provient de l'échauffement du métal du conducteur sous l'influence de l'arc qui peut se maintenir assez longtemps et en consommant une énergie trop faible pour faire déclencher les appareils de protection ou pour fondre le métal, mais assez forte pour le porter au rouge sombre, faisant ainsi tom-

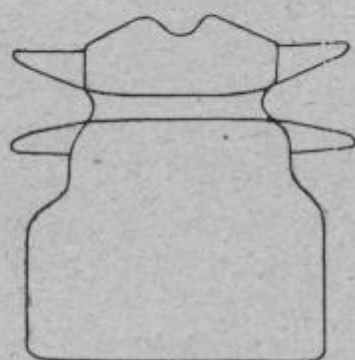


FIG. 1409.

ber la résistance du métal de 45 kilogrammes à 10 kilogrammes pour le cuivre et de 22 kilogrammes à 5 kilogrammes pour l'aluminium. M. Dusaughey, qui a réalisé des expériences très concluantes à cet égard, ne s'est pas contenté de signaler le fait. Il a voulu aussi apporter remède à ce grave inconvénient au moyen d'un dispositif simple, permettant de rayonner la chaleur au lieu de la laisser se localiser sur le point atteint. Il adapte, à cet effet, autour du col de l'isolateur, entre la porcelaine et le conduc-

teur, un collier en deux pièces, constitué par deux feuilles de cuivre ou d'aluminium estampé (suivant que le conducteur est en cuivre ou en aluminium) et maintenu par le fil de ligature (*fig. 1409*). Des essais répétés à plusieurs reprises ont montré que les conducteurs se sont toujours rompus en un temps variant de quinze minutes à quarante-cinq minutes, suivant l'intensité de l'arc, lorsqu'ils étaient en contact avec la porcelaine, tandis que leur température ne s'est jamais élevée au-dessus de 150° lorsqu'on interpose un collier métallique. La présence de ce collier n'empêche pas d'ailleurs les surveillants de ligne de reconnaître un isolateur défectueux, car les lueurs de l'arc ne cessent pas d'être visibles. Il donne aussi tout le temps nécessaire pour procéder à la réparation, sans que le fonctionnement de la distribution soit troublé et sans qu'on ait à craindre la rupture des conducteurs.

Pour pouvoir écarter rapidement dans une installation les isolateurs défectueux ou toute cause de dérangement et les écarter de la ligne à haute tension et, d'autre part, empêcher de fortes surtensions, qui sont particulièrement nuisibles aux transformateurs, la société l'A. E. G. utilise un appareil annonceur monté directement sur la ligne à haute tension, qui a pour effet d'indiquer le tronçon de ligne avarié. Le

déclenchement de cet appareil ne fonctionne que pour les courts-circuits et les circuits de terre. De plus, on peut reconnaître, à l'inspection de cet engin, l'état de revision des tronçons et savoir, par exemple, s'il est nécessaire de tendre des filets de protection ou des fils devenus trop lâches, d'élaguer des branches venues en contact avec les conducteurs, etc.

Quand un accident a été localisé sur un tronçon, on peut éviter ces frais de main-d'œuvre en employant une méthode signalée par M. C. Linke. Cet ingénieur utilise à cet effet un miroir creux adapté à une perche isolante en bambou : de cette façon un homme peut, du sol même, se rendre compte de l'état des isolateurs. Il est possible ainsi de se rendre compte s'il faut interrompre immédiatement le courant ou si on peut attendre l'arrêt normal. Pour les mâts, jusqu'à 14 mètres de hauteur, on a obtenu de bons résultats ; avec les mâts en treillis plus hauts, cette méthode nécessitant la présence de deux hommes pour tenir la perche, M. Linke, dans le but de supprimer le deuxième homme, a adapté une calotte d'isolateur en celluloïd, par conséquent très inflammable, tout en étant d'un grand pouvoir isolant et résistant d'une façon absolue aux intempéries. La calotte en question, fixée sur la tête des isolateurs, est faite d'une couleur qui tranche nettement sur celle de l'isolateur. Les flammes résultant d'un défaut d'isolateur produisent la volatilisation presque instantanée des calottes de celluloïd et on a ainsi une trace visible de l'accident.

Les calottes ont une forme telle qu'elles empêchent la formation de couches conductrices (eaux de pluie, rouille ou poussière à la surface des isolateurs, lesquelles occasionnent des décharges superficielles). Quand il s'agit d'isolateurs de grandes dimensions ou d'isolateurs suspendus, pour empêcher les courts-circuits occasionnés par une trop grande flamme ou par la combustion de la calotte, on renforce cette dernière par une tôle de fer recouverte d'une couche de plomb ou d'émail.

Le système Nicholson pour la protection des isolateurs consiste en un anneau métallique disposé extérieurement autour de la ferrure inférieure. L'arc saute alors sur cet anneau, de sorte que la ferrure au moins se trouve sûrement garantie contre la construction.

Pour protéger également le revêtement supérieur il y a lieu de disposer de même autour de celui-ci un autre anneau, mais plus grand que le revêtement de porcelaine supérieur lui-même.

On peut appliquer ce procédé aux isolateurs suspendus en disposant sur chaque isolateur individuel et, selon la forme de celui-ci, un ou deux anneaux de protection.

Mais l'emploi des isolateurs à suspension à écrans métalliques, à forme cintrée, est plus efficace.

Pour éviter les accidents de personne par suite de la rupture des conducteurs — ces ruptures se produisant généralement sur les isolateurs

défectueux, par suite de fusion ou de l'échauffement d'un fil de ligne — M. Linke préconise aussi l'emploi des calottes armées. Comme le montre la (fig. 1410), les calottes sont formées de deux pièces ; l'écran G est

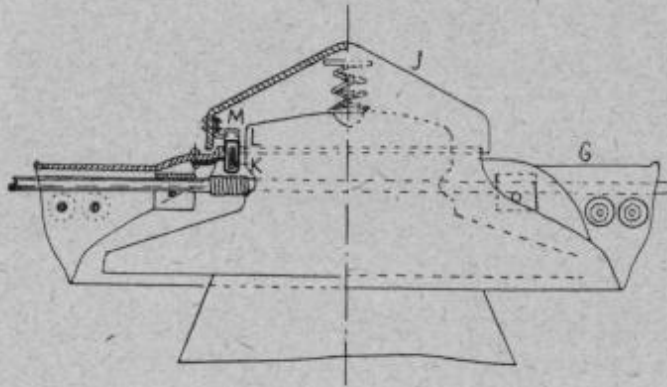


FIG. 1410.

recouvert et joint à la calotte J de même matière faisant ressort sur la tête de l'isolateur et les deux parties qui forment le casque sont reliées ensemble de façon à pouvoir se dissoudre spontanément par un anneau partiel K en celluloïd. L'arc électrique qui se forme au

moment où se produit un défaut d'isolateur met l'anneau en celluloïd en feu et dissout aussi le lien aux brides K et M. La partie supérieure se redresse alors et rend ainsi visible le défaut. Une articulation-bride en fil empêche la calotte J de tomber.

Le système Cronin utilisé pour la réparation des lignes à haute tension, en Amérique, consiste dans un mât auxiliaire sur lequel sont installés des isolateurs semblables en nombre et pareils à ceux de la ligne, lequel mât se fixe contre le poteau à réparer. On fait passer à l'aide de pinces les fils des isolateurs de la ligne sur ceux des mâts et on peut réparer les isolateurs et la traverse sans aucun danger pour le personnel. En fin de réparation on met les fils sur la ligne et on enlève le mât.

Cette question est traitée avec plus d'extension au paragraphe 571.

IV. — CANALISATIONS SOUTERRAINES

542. Considérations générales. — Les câbles armés employés pour la transmission de l'énergie à haute tension sont appelés, dans un avenir prochain, à jouer un rôle important. Les distributions effectuées à l'aide de câbles armés posés dans des tranchées pratiquées dans le sol ne sont pas rares pour les tensions de 3.000 à 5.000 volts, car elles constituent le réseau de deuxième transformation dans les villes alimentées par des transports d'énergie. On sait en effet que l'énergie fournie par l'usine génératrice est transportée par une ligne à très haute tension aérienne jusqu'en un point convenu où des transformateurs abaissent cette tension.

Le courant ainsi réduit alimente par une canalisation souterraine des

transformateurs installés dans les principaux quartiers de la ville, transformateurs qui réduisent à nouveau cette tension en celle exigée par les récepteurs intercalés dans les dérivations qui amènent le courant chez les abonnés, dérivations établies soit en câbles souterrains, soit en fils aériens.

On a fabriqué en France, avec succès, des câbles à 3 conducteurs pour tension de 60.000 volts et à un conducteur pour tension à 100.000 volts ne comportant pas d'armature en fer à cause des pertes provenant de l'armature dans les transmissions à courant alternatif.

Quelques stations centrales ont établi leur ligne de transport à l'aide de câbles souterrains, telle entre autres la Croix-Saint Power, qui emploie des courants de plus de 22.000 volts.

Lors de l'établissement du transport de force d'Entraygues à Toulon, on avait constitué, pour servir d'essai, une partie de la ligne à haute tension, à 28.000 volts, sur une longueur de 1.375 mètres, au moyen d'un câble armé triphasé possédant une section utile de cuivre de 25 millimètres carrés par conducteur.

Avant leur livraison, ces câbles avaient été soumis en usine à des tensions de 60.000 volts efficaces pendant une heure, et de 80.000 volts pendant une minute entre deux conducteurs ; de 36.000 volts pendant une heure, puis de 50.000 volts pendant une minute entre conducteurs et plomb ; soit, pendant une minute, 3 fois et plus la tension normale de service. Au point de vue du claquage, la plus haute tension obtenue fut de 97.000 volts. Ce câble a toujours bien fonctionné et n'a donné lieu à aucun accident.

Les résultats d'exploitation du transport d'énergie de 60.000 volts de la ligne du chemin de fer électrique Biterfeld-Desseau (4.500 kilomètres de longueur), câbles à un seul conducteur, ont été concluants au point de vue de la tenue des câbles.

Cette ligne comporte une ligne monophasée à 60.000 volts de l'usine génératrice située à Muldenstein à la sous-station de Bitterfeld. Le câble est formé d'un toron de 19 fils d'aluminium ayant un diamètre uniforme de 2mm,6, de sorte que l'ensemble constitue une section de 100 millimètres carrés. Le diélectrique est du papier imprégné ; il a 13 millimètres d'épaisseur. Directement sur la chemise de plomb on a placé une couche de jute tanné et sur celui-ci de l'asphalte qui a été lui-même enduit de chaux. L'intensité normale est de 240 ampères, elle ne doit pas élever la température du câble à plus de 25° C. au-dessus de l'ambiante.

Les mesures effectuées à l'atelier sur le câble terminé ont donné :

Résistance d'isolement.....	3.000 mégohms : km à 15° C
Résistance ohmique.....	0,275 ohm : km à 15° C
Capacité	0,169 microfarad : km

avec la terre, par le revêtement métallique en plomb ou en acier. Les pertes dans le cuivre en rapport avec l'intensité du courant pour les câbles à un seul et à trois conducteurs sont dues à l'effet Kelvin ; dans les gaines de plomb, aux courants de Foucault et dans l'armature, aux courants de Foucault et à l'hystérésis. Ces pertes additionnelles s'ajoutent aux pertes Joule du courant continu. Elles croissent simultanément avec l'accroissement de la section du conducteur et sont proportionnelles au carré de la fréquence.

On a reconnu que le meilleur emploi correspondait à la fréquence de 15 périodes par seconde pour des câbles à 3 conducteurs ; dans ce cas les pertes sont de 2 à 3 0/0. Pour des câbles à un conducteur, ces pertes sont plus élevées.

L'effet de la capacité électrostatique des câbles armés sur le courant consiste en une augmentation de tension aux bornes du circuit secondaire et en une modification du rapport de transformation des transformateurs.

Les câbles à deux ou trois conducteurs câblés autour d'une âme en matière isolante ne sont pas entièrement dépourvus d'inductance, mais ils réduisent en grande partie la capacité. Ces câbles sont aussi moins coûteux que les câbles concentriques, que l'on n'utilise d'ailleurs guère plus.

Dans le cas d'un conducteur unique recouvert seulement d'une couche de plomb, pour évaluer la réactance et la résistance réelles, il faut déterminer la résistance ohmique r du conducteur, la résistance ohmique r_1 de l'enveloppe de plomb, puis déterminer la réactance x_0 d'une ligne formée de deux conducteurs parallèles d'un diamètre égal au diamètre extérieur de l'enveloppe de plomb, et la résistance effective ρ est donnée par la relation :

$$\rho = r + \frac{x_0^2}{r_1}$$

Pour les câbles armés, le problème est compliqué à cause du flux dû au fer. D'après la courbe du magnétisme du fer, on peut évaluer l'induction et par suite le flux qui y prennent naissance pour un courant donné dans le conducteur.

La force électromotrice E correspondant à ce flux est : $E = \frac{4,44\Phi \omega}{10^8}$

volts, ω étant la fréquence du courant. La réactance correspondante est $\frac{E}{I}$

(I , intensité du courant en ampères qui parcourt le conducteur), qu'il faut ajouter à la résistance des câbles ordinaires sans enveloppe. La perte hystérétique correspondant à cette induction se trouve d'après les courbes

d'hystérésis du fer, et cette perte divisée par I^2 donne la résistance équivalente qu'il faut ajouter à la résistance calculée pour une enveloppe non magnétique.

En raison de l'impédance qui s'exerce entre conducteurs d'un même câble et pour des raisons de manutention des câbles, et pour les fréquences usuelles, la limite pratique des sections des conducteurs est de 150 à 175 millimètres carrés par conducteur pour câbles de 5.000 à 10.000 volts et 400 millimètres carrés pour câbles à basse tension.

La capacité des câbles isolés au papier imprégné est relativement faible. MM. Geoffroy et Delore donnent les chiffres ci-après, pour les câbles à trois conducteurs torsadés :

Câbles de 150 mm ² ,	3.000 volts,	0,38 microfarad par kilomètre.
— 90 —	— —	0,35 — —
— 75 —	5.000 —	0,235 — —
— 125 —	— —	0,275 — —
— 35 —	10.000 —	0,165 — —
— 50 —	— —	0,175 — —

Quand la partie souterraine se réduit à une très faible fraction de l'ensemble de l'installation, comme à Entraygues, par exemple, les limites de voltage maxima, en raison de la capacité, peuvent être assez reculées, en employant, au lieu de câbles à trois conducteurs, trois câbles séparés placés à une certaine distance.

Les câbles armés se construisent à 1, 2 ou 3 fils de travail disposés sous la même enveloppe, à l'aide de conducteurs en cuivre symétriquement placés, enroulés en hélice et composés de torons à section circulaire formés de 7, 19 ou 31 fils. L'étanchéité de ces câbles est assurée par une ou deux gaines de plomb continues, d'une épaisseur variant de 3 à 4 millimètres ; leur protection mécanique, par des rubans d'acier et leur isolement, par des couches de caoutchouc, de papier imprégné ou de batiste induite de gomme laquée.

A l'heure actuelle, l'enveloppe isolante est le plus souvent réalisée à l'aide du papier imprégné, qui paraît remplir au mieux possible les conditions de bon fonctionnement des câbles armés, telles que résistance diélectrique très élevée, homogénéité et stabilité de la matière, grande souplesse, grande résistance mécanique et enfin prix de revient aussi économique que possible. Les rigidités diélectriques obtenues pour le papier imprégné sont à peu près de même ordre que celles des meilleurs caoutchoucs. En Amérique, où l'on emploie de la batiste comme isolant, produit moins coûteux que le caoutchouc, mais plus cher que le papier, on a reconnu qu'elle donnait lieu à un câble résistant mieux à l'action de l'humidité que ce dernier.

On utilise aussi la paraffine, l'ozokérite, l'asphalte et des résidus de pétrole et de résine.

La résistance d'isolement n'a plus de nos jours l'importance qu'on y attachait autrefois. En France, l'Union des Syndicats d'Électricité n'exige lors de l'essai que 5.000 mégohms et après la pose 200 mégohms par kilomètre à 10°, soit 300 mégohms et 120 mégohms à 15°.

Pour des câbles soumis à de hauts voltages, au-dessus de 10.000 à 15.000 volts, où la répartition très inégale du potentiel conduit à l'adoption de très fortes épaisseurs d'isolant, avec des isolants ayant une capacité inductive d'autant plus élevée qu'ils sont plus près des conducteurs de cuivre, on a suggéré pour ces premières couches l'emploi du caoutchouc, à l'effet de diminuer l'épaisseur de l'isolant et par suite de diminuer le prix du plomb et de l'armature métallique.

Le plomb allié à l'étain est plus résistant et se détériore moins au contact des arêtes des conduites lorsqu'on procède à la pose ⁽¹⁾. Quant à la teneur en étain, elle doit être très faible, de 1 à 5 0/0 environ ; 3 0/0 est une bonne moyenne pour la fabrication de cet alliage. L'épaisseur du revêtement en plomb dépend du poids, du type et du service du câble, ainsi que du genre de l'isolant adopté ; il est plus élevé pour les câbles isolés au papier.

Le fait que les câbles sont constitués par un grand nombre de fils de petit diamètre n'amointrit guère l'effet Kelvin, car il n'y a pas enchevêtrement complet des conducteurs, chacun d'eux restant sur toute sa longueur à la même distance du centre. Aussi, en raison de l'effet Kelvin, il n'est pas à conseiller de dépasser 25 millimètres pour le diamètre du conducteur dans les distributions à 60 périodes et 35 millimètres dans celles à 25 périodes. Dans ce cas, la résistance réelle est de 10 0/0 supérieure à la résistance ohmique.

D'après M. de Marchéna, dans l'état actuel de la question, il n'y a pas de doute que l'on puisse franchement aborder les tensions de 30.000 et 35.000 volts pour les câbles armés, sans augmentation sensible des prix des câbles, en constituant les isolants en deux matières convenablement graduées, papier et caoutchouc (câbles composites), pour des câbles à trois conducteurs. Cette tension pourrait même être dépassée en employant des câbles à un seul conducteur, mais en constituant l'armature d'une matière en métal non magnétique et discontinue.

Pour les câbles à fort isolement, avec âme en aluminium, en raison même de leur plus grande section que ceux avec âme en cuivre, l'épaisseur de la couche isolante diminue pour un même coefficient de sécurité. A égalité de conductibilité, l'isolant qui entoure l'aluminium est soumis

⁽¹⁾ Les câbles sous plomb datent de 1838 et sont dus à W. T. Cook.

à un échauffement beaucoup moindre, et l'épaisseur de cet isolant peut être sensiblement inférieure à celle de l'isolant qui entourerait un câble de cuivre équivalent. L'emploi de l'aluminium se justifierait ainsi pour les câbles armés à très haut voltage.

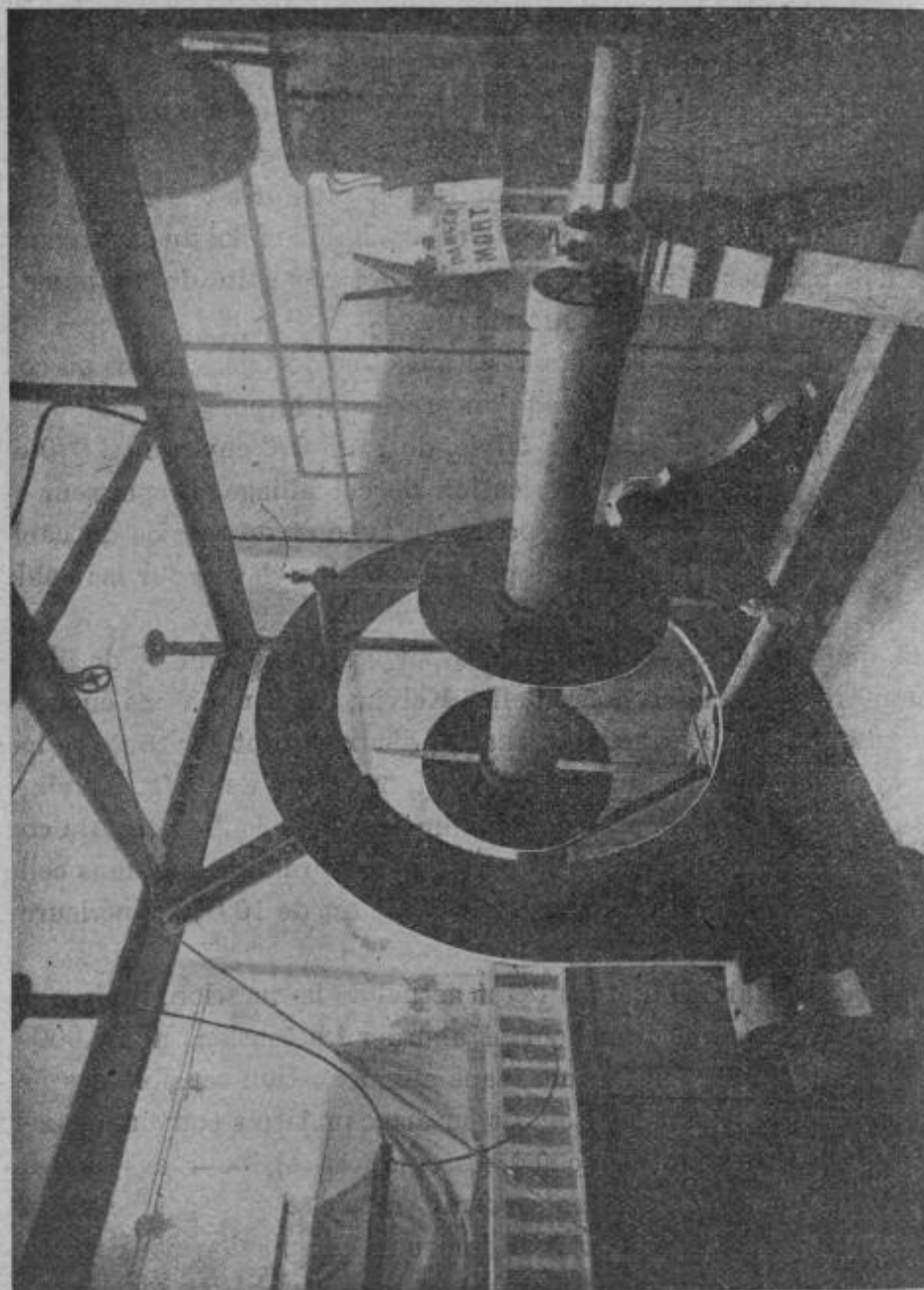


FIG. 1411. — Appareil Delon.

A l'Exposition internationale d'électricité de Marseille, la curiosité du grand public a été mise en éveil par un appareil excessivement simple (fig. 1411), destiné à l'essai des câbles à haute tension, avant leur pose. Cet appareil imaginé par M. Delon, ingénieur à la Société Berthoud-Borel, permet d'obtenir de très grandes différences de potentiel continues.

Le principe sur lequel il est basé repose sur cette considération qu'en mettant à la terre le pôle d'une force électromotrice alternative quelconque, de valeur efficace E , et que si la force électromotrice est sinusoïdale, le potentiel de l'autre pôle varie de $+E\sqrt{2}$ à $-E\sqrt{2}$; et si alors on charge l'une des armatures d'un condensateur au moyen d'un contact qui ne subsiste que chaque fois que la tension est égale à $+E\sqrt{2}$ et l'autre armature au moyen d'un autre contact qui ne subsiste que chaque fois que la tension est égale à $-E\sqrt{2}$, la différence de potentiel entre les deux armatures atteindra rapidement la valeur de $2E\sqrt{2}$ et se maintiendra si les déperditions d'électricité à travers le diélectrique sont négligeables devant la quantité d'électricité qui vient affluer sur chaque armature à chaque nouvelle charge.

L'appareil, utilisant ce principe, se compose d'un cylindre en ébonite qui tourne à la vitesse de pulsation du courant ou à un de ses sous-multiples et qui porte des bras métalliques permettant d'envoyer dans chaque armature du condensateur, représenté ici par chaque conducteur du câble, le courant au moment voulu. Ces bras viennent en contact avec des bornes fixées sur un cercle, également en ébonite; deux de ces bornes sont reliées à un fil venant d'un pôle d'un transformateur (qui fournit du courant à la tension désirée), l'autre pôle étant à la terre. Les deux autres bornes, diamétralement opposées aux premières, sont connectées chacune à un des conducteurs du câble à essayer. Les bras métalliques étant radiaux et en prolongement l'un de l'autre, établissent une fois par tour les contacts entre les bornes diamétrales. Le cylindre est mis en mouvement par un moteur asynchrone alimenté par la même source que le transformateur; le réglage, une fois fait, se maintient indéfiniment.

Pour une tension donnée du courant primaire du transformateur, le réglage est obtenu lorsque l'éclatement entre deux armatures se fait à une distance donnée. Pratiquement, on commence par obtenir la tension voulue sur la basse tension au moyen d'un rhéostat; puis la distance entre les éclateurs ayant été mesurée, on déplace le cercle en ébonite jusqu'à ce que la décharge se produise. A l'Exposition de Marseille, le courant à basse tension de 190 volts était élevé à 125.000 volts par un transformateur statique. On obtenait, par conséquent, à l'aide de l'appareil Delon, une différence de potentiel d'environ 300.000 volts entre les deux conducteurs du câble. Les deux conducteurs sont munis d'un éclateur qui décharge le câble à travers l'air.

L'emploi de l'oscillographe a marqué l'une des phases les plus importantes du développement des réseaux de câbles souterrains, par la facilité qu'il offre d'étudier et d'analyser un réseau et par suite de déterminer les causes d'instabilité et d'y porter remède. Dans le cas particulier de la

recherche de rapides et courtes augmentations de voltage, l'appareil offre cependant les regrettables défauts suivants : 1° la fréquence libre des vibrateurs est moindre que celles des ondes accidentelles de très courte longueur ; 2° le vibrateur ne peut être rendu absolument apériodique, mais on obtient d'assez bons résultats en mélangeant cinq parties d'huile de ricin avec une partie de térébenthine comme humectant ; 3° la self-induction du vibrateur n'est pas complètement nulle, mais suffisamment peu élevée pour être pratiquement négligeable ; 4° la sensibilité de l'appareil ne peut pas être rendue parfaite ; chaque millimètre de déviation des trois vibrateurs correspond à un nombre d'ampères de 0,00518 à 0,00578. A part ces quelques défauts, l'instrument n'en reste pas moins tout à fait satisfaisant pour les usages pratiques.

Les flux des canalisations souterraines s'accroissent très rapidement avec les voltages et sont plus élevés pour les installations à trois conducteurs avec point neutre isolé qu'avec le point neutre à la terre.

On peut se rendre compte des prix des canalisations, abstraction faite des tranchées et des accessoires de réfection des chaussées, en remarquant que, pour les câbles à très bas voltage et de très grosse section de cuivre, la proportion du prix total au prix du cuivre est, en général, de 2 et de 3,5 à 5 pour les câbles à 15.000 volts.

Si on compare les prix des canalisations souterraines à celles aériennes, l'écart entre ces deux prix est peu prononcé pour les faibles voltages, mais dès 10.000 volts l'écart devient plus accentué, les lignes aériennes ne coûtant, à conductibilité égale, que la moitié ou les deux tiers. Cette différence est d'autant plus forte qu'on s'élève dans les hautes tensions.

Certains avantages qu'offrent les canalisations souterraines compensent en partie les inconvénients de leur prix relativement élevé, tels sont le peu de surveillance qu'elles nécessitent, leur grande durée, la sécurité et la continuité de l'exploitation, enfin la sécurité des personnes et des propriétés des tiers.

544. Calcul des câbles armés. — La capacité des câbles armés est relativement considérable car elle dépasse de vingt fois celle d'une ligne aérienne équivalente. Lechtenstein a fourni les formules ci-après pour le calcul de la capacité des lignes souterraines :

1° Pour ligne monophasée (2 conducteurs) :

$$C = \frac{0,0242 \times 10^{-6} K}{\log \text{ vulg } \left[\frac{2a}{r} \frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2} \right]}$$

Et pour le courant de charge :

$$I = \pi C L \sim U.$$

2° Pour lignes triphasées (3 conducteurs) :

$$C = \frac{0,0242 \times 10^{-6} K}{1/2 \log \text{vulg} \left[\frac{3a^2}{r^2} \frac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 - a^6} \right]}$$

et :

$$J = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi C L \omega U.$$

Pour les formules de la capacité :

C = capacité kilométrique du câble, en farads ;

R = rayon intérieur de l'enveloppe, en centimètres ;

r = rayon du conducteur, en centimètres ;

a = distance entre les axes des conducteurs et axe du câble, en centimètres (monophasé) et a distance entre conducteurs (triphasé) ;

$K = 1$ pour l'air = 2,95 pour le caoutchouc = 2 pour le papier paraffiné.

Pour les formules du courant de charge :

C = capacité étoilée kilométrique du câble en farads ; L longueur du câble, en kilomètres ; ω fréquence en périodes-seconde et U tension entre fils, en volts.

A la suite de travaux publiés sur l'échauffement des câbles enfouis dans le sol, l'Union des Électrotechniciens allemands et le Syndicat des Usines allemandes ont adopté pour les câbles à plusieurs conducteurs la formule ci-après déterminant la charge à admettre dans les câbles :

$$J = \frac{C}{\sqrt{n\rho}} \sqrt{\frac{Q\tau}{\rho' \log D/D' + \rho'' \log (4l/D')}} ,$$

dans laquelle :

$$C = \sqrt{\frac{2\pi 10^{-2}}{2,3 \times 3 \times 10^{-4}}} = 16,52,$$

n , nombre de conducteurs du câble, ρ résistance spécifique en ohms du métal du conducteur à la température correspondant à un échauffement de τ° par mètre de longueur et millimètre carré de section, Q section de l'un des conducteurs en millimètres carrés, τ échauffement toléré en degrés centigrades, ρ' résistance spécifique de l'isolant et du guipage sur et sous l'armature en unités électriques, ρ'' résistance calorifique spécifique du sol en unités électriques, D diamètre extérieur réduit du câble en millimètres, D' diamètre du conducteur du câble unipolaire équivalent en millimètres, D'' diamètre extérieur du câble en millimètres, la profondeur d'enfouissement en millimètres.

Pour ρ' et ρ'' , la Commission a adopté, d'après des résultats d'expériences, les chiffres 550 et 40. Les tableaux suivants ont été calculés pour une élévation de température de 25°. Les chiffres indiqués ne doivent jamais être dépassés en service normal, mais ils peuvent l'être dans des installations où les variations des courants sont très fortes, car, dans ces cas, la grande capacité calorifique du sol empêche le câble d'atteindre une température trop élevée.

JUSQU'A 3.000 VOLTS

SECTION en millimètres carrés	CABLES à 2 conducteurs torsadés	CABLES à 3 conducteurs torsadés	CABLES à 4 conducteurs torsadés
4	42	37	34
6	53	47	43
10	70	63	57
16	95	83	"
25	125	110	75
35	150	135	100
50	190	165	120
70	200	200	150
95	275	240	185
120	345	280	220
150	360	315	250
185	405	360	290
240	470	420	330
310	545	490	380
400	635	570	445

DE 3.000 A 10.000 VOLTS

SECTION en millimètres carrés	CABLES à 2 conducteurs torsadés	CABLES à 3 conducteurs torsadés	CABLES à 4 conducteurs torsadés
10	65	60	55
16	90	80	70
25	115	105	95
35	140	125	115
50	175	155	140
70	215	190	170
95	255	225	205
110	290	260	240
150	335	300	275
185	380	340	310

M. Lebeau, directeur de la Société d'électricité du pays de Liège, a établi des graphiques pour le calcul des câbles souterrains (*fig.* 1413 et 1414) que nous faisons suivre de quelques exemples destinés à en montrer

la facilité d'application. Les résultats, chiffrés ainsi que les graphiques eux-mêmes se rapportent à l'installation d'un seul câble dans une tranchée, les expériences faites sur plusieurs câbles séparés, mais réunis dans la même tranchée ayant démontré que l'échauffement de chacun est plus élevé. Il est recommandé alors de ne faire travailler chaque câble qu'aux trois quarts de la charge maxima indiquée par les graphiques.

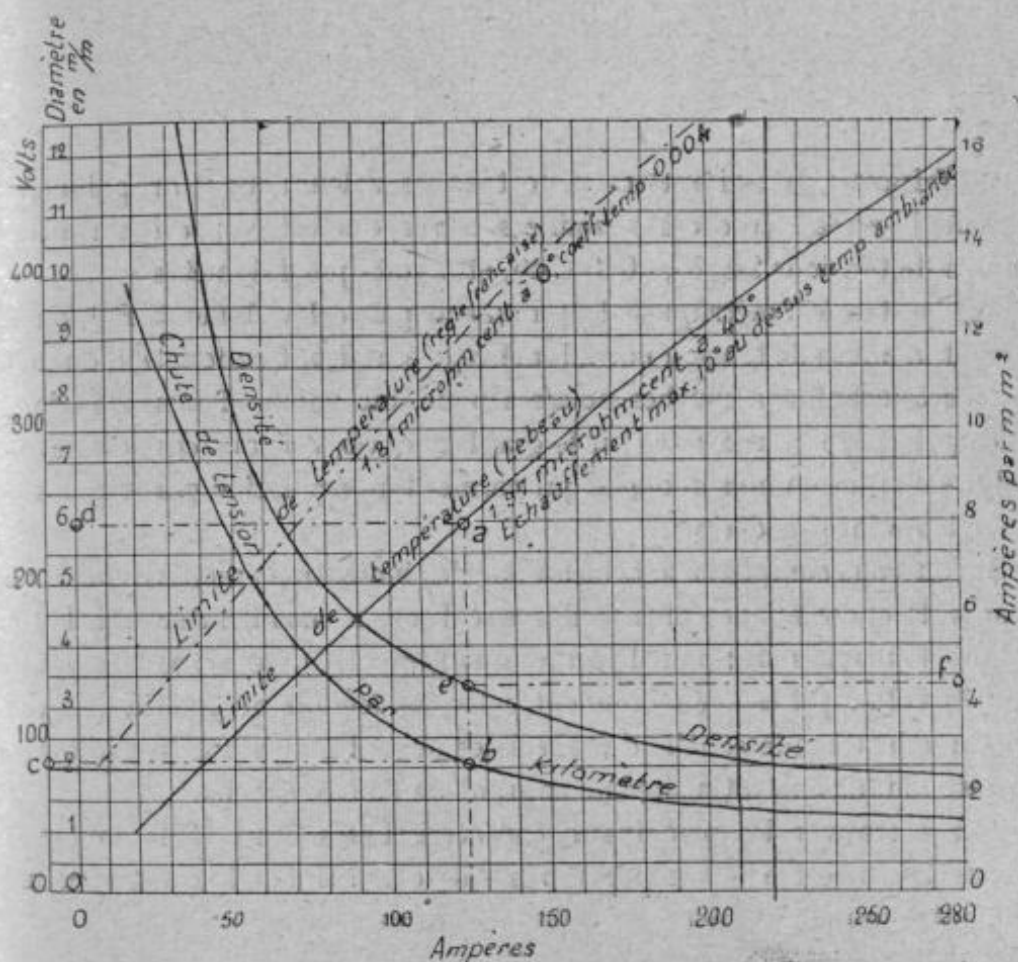


FIG. 1412. — Conducteurs souterrains.

a) *Câbles à courant continu.* — Le graphique (fig. 1412) porte en abscisses les intensités de courant et en ordonnées les sections de câble à adopter pour des conditions d'échauffement déterminés comme acceptables lors des essais, soit 25° pour un câble enfoui à 70 centimètres dans le sol et qui sont traduites sur le graphique par la *courbe limite*.

Une ligne horizontale quelconque permettra de déterminer la densité du courant, par le rapport des ampères aux millimètres carrés. Cette ligne est indiquée sur le graphique sous l'appellation *ampères par millimètre carré*. Un vecteur, tracé depuis le zéro et joignant le point repré-

sentatif de l'intensité de courant, coupera cette ligne en un point qui détermine évidemment la densité de courant correspondante.

La perte en volts, ou chute de tension par kilomètre, est calculée par l'expression classique :

$$e = RI = 1,75 \frac{l}{s} I,$$

si l'on prend pour résistivité du cuivre à 25° la valeur :

$$\rho = \frac{1,75}{10^6}.$$

En faisant $l = 1$ kilomètre et portant les valeurs sur le graphique, on obtient le réseau de droites inclinées correspondant respectivement aux chutes de tensions 20, 25, 30, 35, 40, etc. volts par kilomètre.

Les pertes kilométriques de puissance par échauffement RI^2 ou eI , e étant la chute de tension par kilomètre, s'établiront en fonction du débit en construisant des courbes polaires pour une valeur déterminée de eI , soit 5, 10, 15, etc. kilowatts sur le graphique. On voit que ces courbes ont l'allure de plus en plus allongée qui permet l'interpolation graphique pour les valeurs intermédiaires.

Si l'on veut compléter le tableau par des indications relatives aux puissances, la chose est des plus faciles à réaliser en faisant intervenir la tension de transmission : pour le graphique (*fig. 1413*), on a pris une tension de 575 volts, qui est généralement celle des feeders de traction, et c'est ainsi que la seconde échelle des abscisses porte les puissances en kilowatts correspondant aux intensités de courant de l'autre échelle.

Soit à trouver les principales caractéristiques d'un câble souterrain devant transmettre 940 ampères sous 575 volts, soit 540 kilowatts ; comme le montre immédiatement l'échelle des puissances, on a :

Section du câble. — La verticale élevée du point 940 ampères coupe la courbe limite en un point A dont l'ordonnée, lue sur l'échelle verticale à gauche, nous donne 420 millimètres carrés.

Densité de courant. — Nous suivons l'oblique qui joint le zéro au point A ; ce vecteur coupe la ligne ampères par millimètre carré en un point d qui, par interpolation, nous indique une densité de courant de 2,22 ampères par millimètre carré.

Perte en volts par kilomètre. — Le même vecteur, compris entre les vecteurs 25 et 40 volts, nous donne à l'échelle 39 volts comme chute de tension kilométrique, pour l'intensité prévue.

Perte en watts par kilomètre. — En joignant l'intersection p de la ligne des pertes en volts avec le point 940 ampères, on obtient une ligne inclinée qui serait tangente à une ellipse comprise entre 35 et 40 kilowatts.

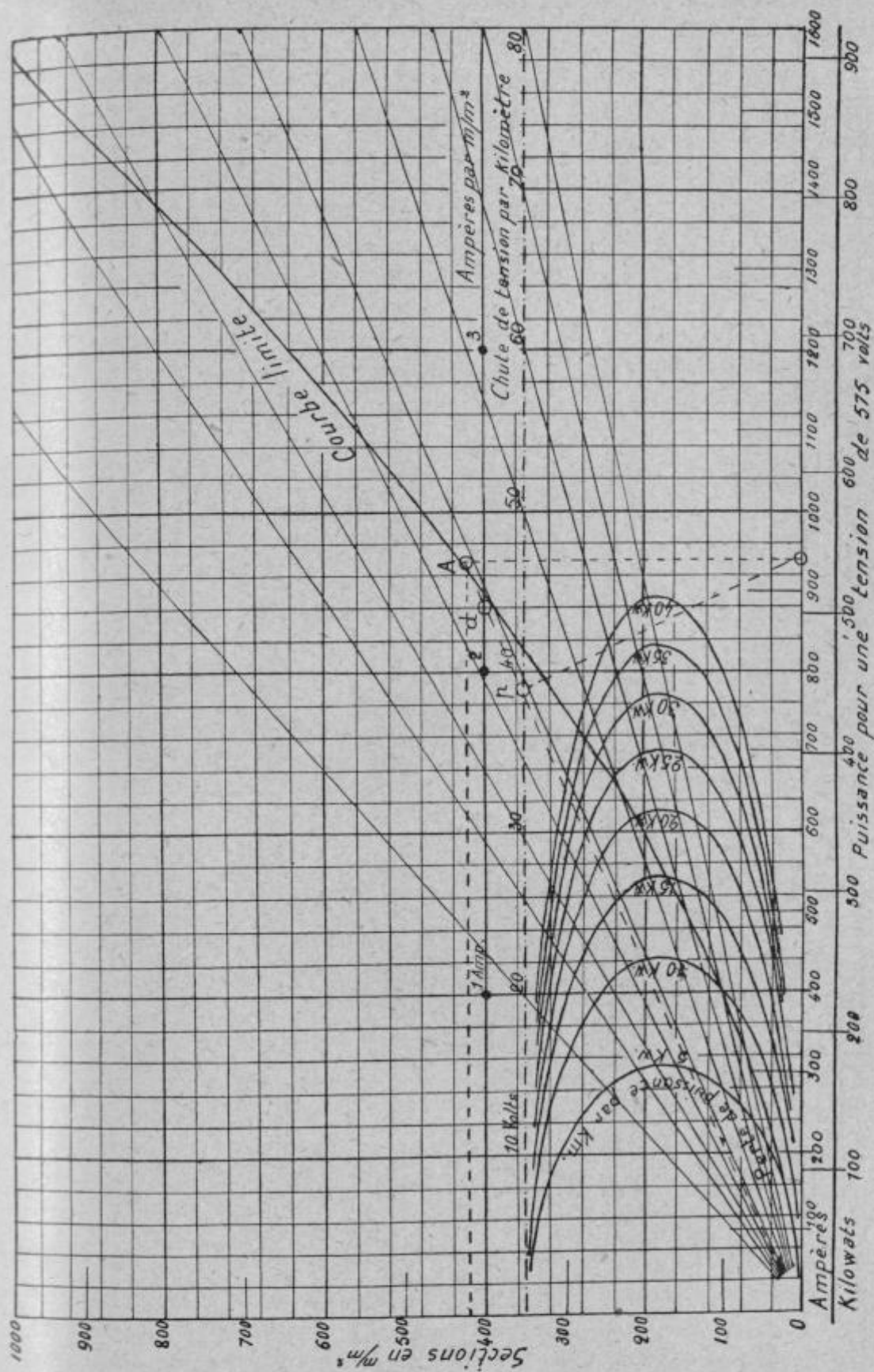
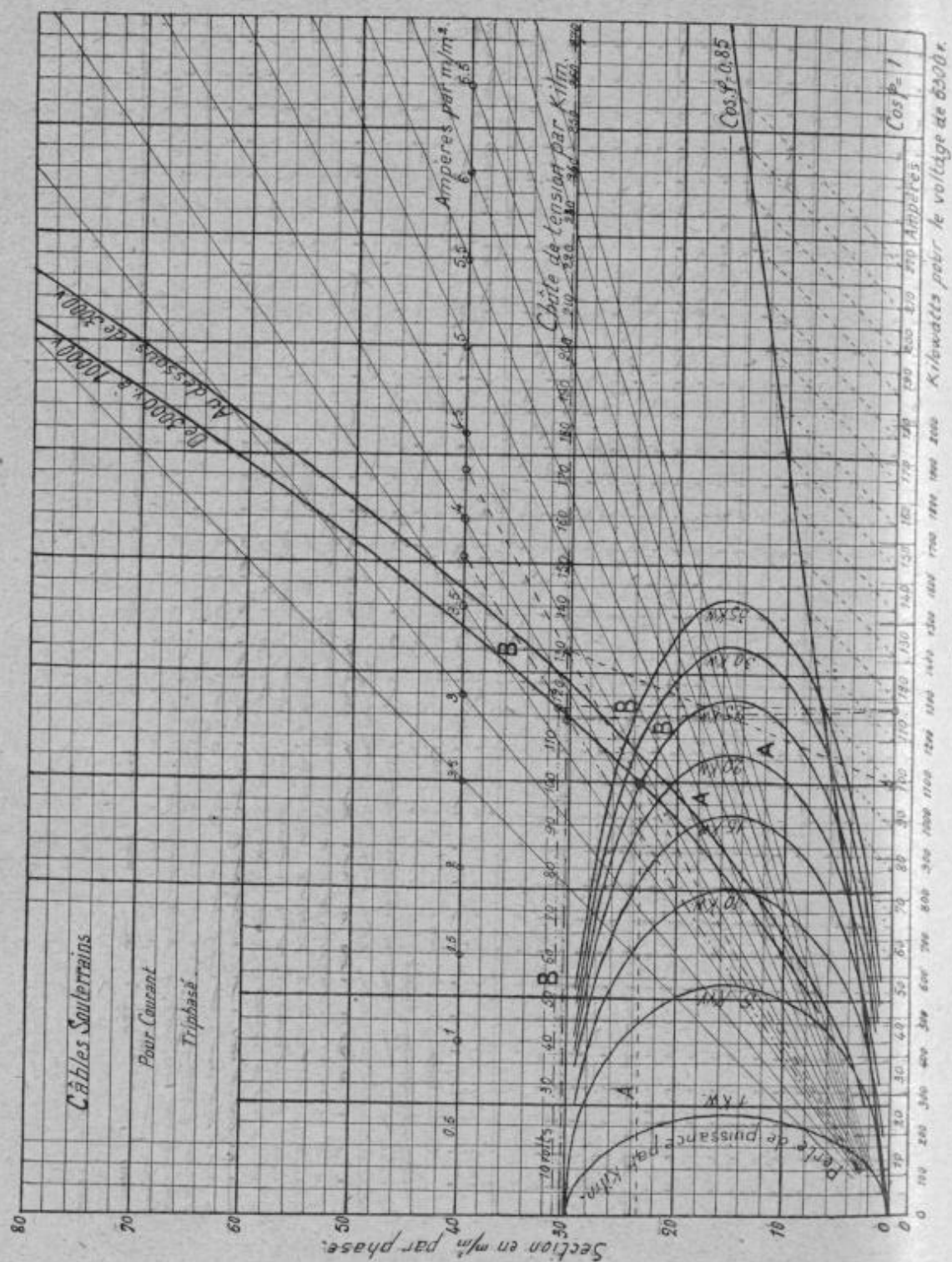


FIG. 1413.

L'interpolation nous donne approximativement 36 kilowatts par kilomètre pour valeur de la perte de puissance kilométrique.



b) Câbles à courant triphasé à trois conducteurs. — Les conditions de base pour ce second graphique (fig. 1414) sont les mêmes que pour le

précédent, c'est-à-dire enfouissement de 70 centimètres sous le sol et accroissement de température maximum de 25° centigrades.

Le mode d'établissement est exactement le même ; mais en plus on a dû y introduire quelques vecteurs supplémentaires pour tenir compte du facteur de puissance ; en outre, les intensités indiquées sont les courants par phase, et, par suite, les sections sont celles de chaque conducteur.

On a porté sur le graphique deux courbes limites : l'une, pour les tensions de 3.000 volts et au-dessous ; l'autre, pour les tensions de 3.000 à 10.000 volts. Comme l'on voit, dans ce dernier cas, les conditions d'échauffement admissibles sont plus sévèrement estimées.

Comme précédemment, on a porté en abscisses les ampères et en ordonnées les sections en millimètre carré ; la seconde échelle des abscisses, qui donne les puissances pour la tension usuelle de 6.300 volts, est établie au moyen de la formule classique de puissance :

$$P \propto \frac{EI \times \sqrt{3} \times \cos \varphi}{1.000} \text{ kw.}$$

en prenant $\cos \varphi = 1$.

Pour des valeurs différentes de $\cos \varphi$, on établira des vecteurs inclinés correspondants ; c'est ce qui a été fait sur le graphique pour $\cos \varphi = 0,85$; il est ainsi aisé, par le tracé d'une simple oblique à 45°, de passer d'une puissance à l'autre pour différentes valeurs de $\cos \varphi$.

Les pertes en volts et les pertes en watts sont construites d'après le même processus que pour le graphique précédent, mais, bien entendu, avec les valeurs adéquates aux courants triphasés, qui sont :

$$e = RI \sqrt{3} = 17,5 \frac{l}{s} I \sqrt{3}$$

pour la chute de tension, et :

$$p = 3RI^2 = 52,5 \frac{l}{s} I^2$$

pour la perte en watts.

Nous donnerons également un exemple d'application numérique.

Soit à trouver les caractéristiques d'un câble triphasé devant transmettre 100 ampères sous 6.300 volts, avec un facteur de puissance $\cos \varphi = 1$, soit d'après le graphique une puissance de 1.090 kilowatts.

1° *Section du câble.* — Le point de rencontre de la verticale élevée du point 100 ampères avec la courbe limite se rapportant aux tensions 3.000-10.000 volts nous indique comme valeur de la section, 23 millimètres carrés environ.

2° *Densité de courant.* — Le vecteur joignant le zéro au point précédemment déterminé coupe l'horizontale des « ampères par millimètre

carré » entre les points 4 et 4,5 ; une facile interpolation nous donne 4,3 ampères par millimètre carré comme densité de courant pour l'intensité prévue.

3° *Perte en volts kilométrique.* — Ce même vecteur est compris entre les points 130 et 140 sur l'horizontale des chutes de tension ; il passe même sensiblement par le point 130 volts, et l'on peut admettre que telle est la valeur de la chute de tension cherchée.

4° *Perte en watts kilométrique.* — Comme précédemment, nous joignons par une droite le point représentatif de l'intensité, 100 ampères, et le point représentatif de la chute de tension, 130 volts ; cette droite est tangente par définition à une ellipse représentative de la perte en watts.

Dans notre cas, la droite est entre les ellipses 20 et 25 kilowatts ; par interpolation on trouve 23 kilowatts.

Pour montrer la manière dont on tient compte du facteur de puissance, supposons maintenant que nous voulions transmettre la même puissance de 1.090 kilowatts avec $\cos \varphi = 0,85$ au lieu de $\cos \varphi = 1,00$.

Pour cela, du point représentatif de la puissance 1.090 kilowatts (ou 100 ampères) suivons l'oblique à 45° jusqu'à son point de rencontre avec le secteur correspondant à $\cos \varphi = 0,85$; l'ordonnée de ce point passe sur la nouvelle intensité de courant (soit 117 ampères), et l'on partira de cette base pour refaire, comme dans l'exemple ci-dessus, les différentes déterminations cherchées. La résolution graphique est indiquée par le diagramme (lignes B).

c) *Echauffement des câbles triphasés à trois conducteurs.* — Enfin, dans le troisième graphique (fig. 1415) sont données les conditions d'échauffement de câbles souterrains à trois conducteurs, pour courants triphasés, exprimées en fonction de l'intensité et de la section.

L'échelle des accroissements de température est ici plus grande que dans les précédents diagrammes, mais aussi une partie de la courbe — celle qui correspond aux échauffements compris entre 10 et 25° — est construite uniquement d'après les indications théoriques de la formule :

$$I = C \sqrt{\frac{st}{\log \frac{4r}{D}}},$$

dans laquelle :

C est une constante égale à 30 pour les tensions de 3.000 à 10.000 volts, et à 32 pour les tensions inférieures à 3.000 volts ;

s, la section du câble en millimètres carrés ;

I, l'intensité du courant en ampères ;

l, l'accroissement de température en degrés ;

r, la profondeur d'enfouissement du câble en centimètres ;

D, le diamètre commun des conducteurs en millimètres.

D'après cette formule, l'intensité I à admettre, dans un conducteur de

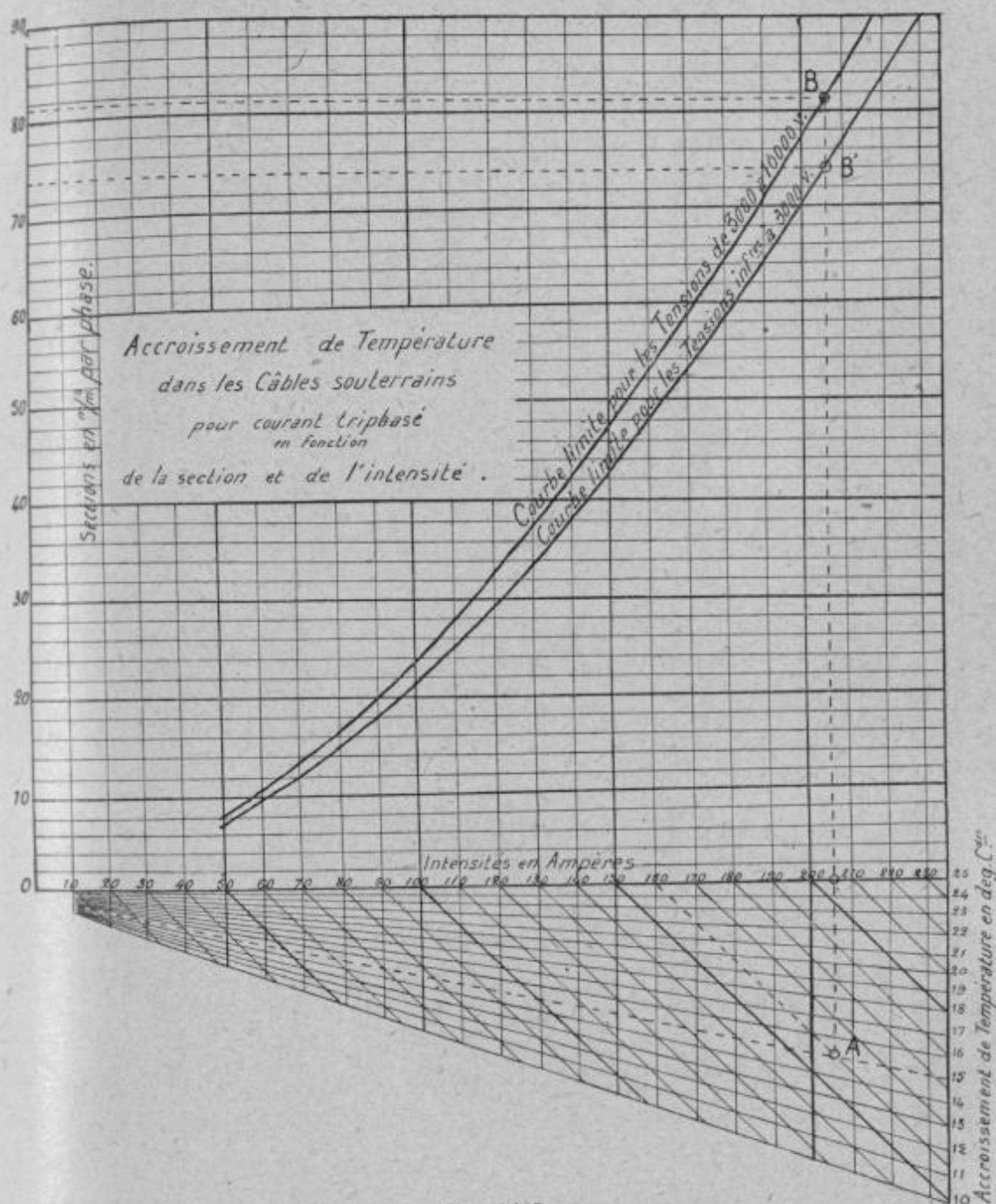


FIG. 1415.

section donnée, est proportionnelle à \sqrt{I} ; c'est cette liaison qui est exprimée par le diagramme.

EXEMPLE NUMÉRIQUE D'APPLICATION. — Quelle section faut-il donner à un câble triphasé devant transmettre 160 ampères sous 6.300 volts, pour que l'accroissement de température n'excède pas 15°?

Nous suivons l'oblique du point représentatif de l'intensité 160 ampères jusqu'à son point de rencontre avec le vecteur correspondant à l'accroissement de 15° . L'ordonnée passant par ce point rencontre la courbe limite pour les tensions supérieures à 3.000 volts en un point B, qui donne pour valeur de la section cherchée, 81,5 millimètres carrés environ.

545. Pose et essais des câbles armés. — La pose des câbles armés est des plus simples, mais elle doit être opérée avec de grandes précautions. On les enterre généralement à 75 centimètres dans le sol, entre deux couches de sable. On les jonctionne bout à bout à l'aide de boîtes en fonte dites boîtes de jonction pour mettre le joint à l'abri de l'humidité ; elles sont rendues étanches à l'aide de matières isolantes coulées autour du cuivre conducteur du courant, résine paraffinée ou bitume. Les boîtes de dérivation commandant les branchements sont identiques aux boîtes de jonction. Pour faciliter les recherches des défauts on emploie des « boîtes de coupure » et, en tête des feeders, des boîtes du même type de construction ; elles ne sont pas avec isolant, mais on garantit leur étanchéité à l'aide d'un double couvercle avec joints au plomb. On les dispose sur briquetages, entourés de sable. En Amérique, on tire les câbles simplement revêtus de leurs gaines de plomb dans des tuyaux englobés dans une maçonnerie de béton à alvéoles. Les jonctions et les dérivations se font au moyen de manchons en plomb soudés aux gaines du câble. Ce système rend les canalisations souterraines d'un prix assez élevé, quand il y a peu de câbles à tirer dans la même fouille et nécessite un plus grand nombre de joints ou de coupures de câbles.

Parfois, on dispose les câbles armés dans des conduits en bois encaissés dans de l'asphalte ; ce système est recommandable pour la protection des câbles contre les effets d'électrolyse, les actions chimiques et les accidents mécaniques.

Il est bon de faire le plus possible la pose des câbles à une température convenable pour la bonne conservation du papier imprégné : la plus convenable est de 15 à 20° C.

En Amérique, où il existe nombre d'installations dont les tensions varient de 6.000 à 20.000 volts, on apporte, pour se garantir contre la production des courts-circuits, le plus grand soin à éviter les coudes brusques, ainsi qu'à la confection des épissures. Dans ces conditions on a constaté que les circuits subissent parfois des surcharges de 100 0/0 sans en souffrir.

L'installation du câble armé, dont il a été question au ci-avant construit par la maison Geoffroy et Delore, a été mis en place de la façon suivante : le fond de la tranchée, de $0^m,90$ de profondeur et $1^m,15$ de largeur, a été recouvert d'une couche uniforme de sable de $0^m,10$ d'épaisseur ; puis, les câbles ont été déroulés et ensuite renfermés dans un cloisonnage en

briques, afin d'éviter les détériorations accidentelles. Le caniveau ainsi déterminé a été rempli de sable ; puis, on a fait une couverture avec des briques creuses, et l'on a procédé au remblaiement. Les plus faibles rayons

de courbure imposés aux câbles étaient au minimum de 2 mètres.

Les essais sous tension des câbles ont pour but de servir de contrôle normal de la fabrication et de fixer les conditions de réception. Les essais de vérification portent sur la résistance kilométrique et sur la résistance à la rupture ou rigidité diélectrique de l'isolant.

La première catégorie d'essais, qui ont pour objet de déterminer quelle est l'importance du courant qui, après une durée d'électrification donnée (1 à 2 minutes) sous une différence de potentiel constante et bien déterminée, passe dans l'isolant, ne sont plus guère employés — pour les câbles isolés au papier imprégné — que comme un indice de fabrication des câbles. Dans cet esprit, il est bon de n'y procéder qu'après l'essai sous haute tension, qui permet de constater que le câble en essai n'a donné lieu à aucune altération ni aucun échauffement anormal de la matière isolante.

Les essais sous haute tension à la rupture du diélectrique sont ceux qui intéressent surtout l'exploitant d'usine d'électricité.

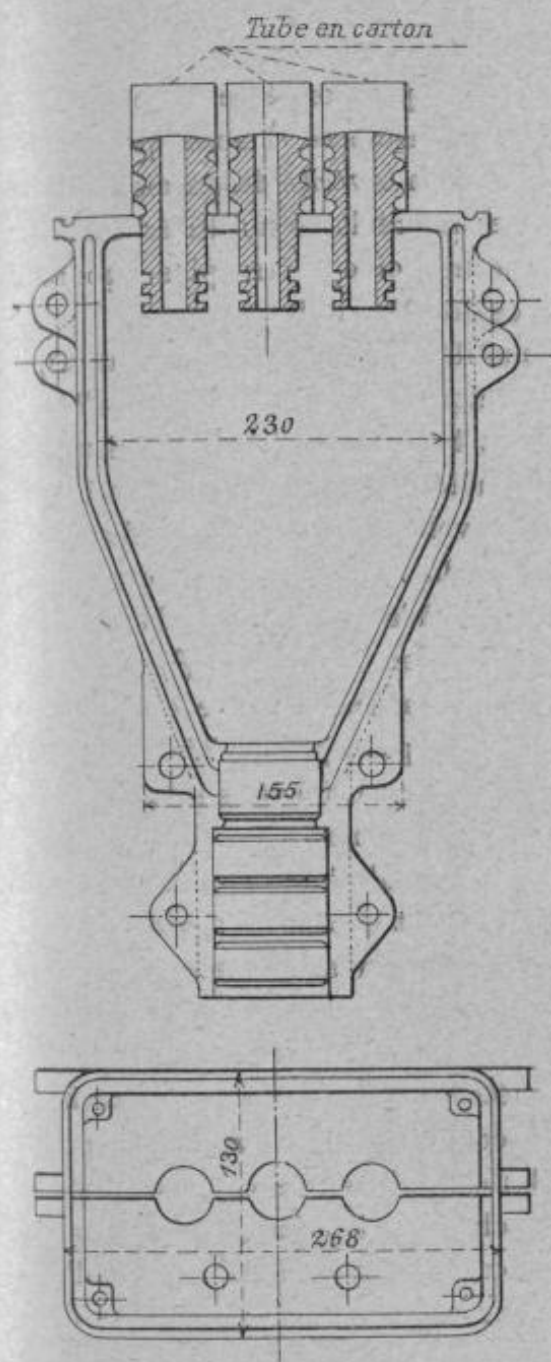


FIG. 1416. — Boîte d'extrémité.
(Usine hydroélectrique de la Brillanne.)

Tous les spécialistes sont aujourd'hui d'accord pour reconnaître que les câbles souterrains doivent présenter un coefficient de sécurité considérable, savoir 6 à 8 au moins pour les hautes tensions couramment usitées de 6.000 à 12.000 volts, et davantage pour les câbles fonctionnant au-dessus de ces tensions.

Cependant il y a lieu d'envisager que la rigidité diélectrique des isolants peut être affaiblie par l'élévation de température qui peut se produire dans les échauffements du câble aux très hautes tensions d'essai, du fait des pertes par conductibilité et des faits des pertes par hystérésis diélectrique et de certains phénomènes calorifiques spéciaux. Il faut donc que les tensions maxima d'essais ne soient pas trop prolongées et ne soumettent aucune partie de l'isolant à une fatigue dangereuse et aussi que l'épaisseur minima d'isolant soit en rapport avec la sévérité des essais prescrits et par conséquent l'opération doit porter au préalable sur des échantillons témoins. En tous cas les essais en usine doivent être plus rigoureux qu'après pose et plus sévères pour les câbles à bas voltage.

Pour les essais en usine, on peut conseiller une tension d'essai au triple de la tension alternative de service appliquée, pendant un quart d'heure au moins, pour des câbles fonctionnant à 25.000 volts et au-dessus, ou opérer d'après les indications de la formule : $V = 10.000 + 2E$; 10.000 représentant une tension fixe de 10.000 volts et E la tension efficace de service. Puis on augmente cette valeur de 33 0/0 maintenue pendant environ une minute, et enfin ramenée jusqu'à la fin de l'essai à la première valeur, cette dernière opération durant environ 10 minutes. ⁽¹⁾

Quant à l'épaisseur de l'isolant, M. de Marchéna estime qu'elle peut être indiquée telle que la matière ne travaille pas à plus de 7.500 volts par millimètre lors de l'essai de durée, ni à plus de 10.000 volts sous l'essai de tension maxima d'une durée inférieure à une minute.

Les essais en usines offrent un intérêt capital d'autant plus que l'emploi des hautes tensions tend à se généraliser et la sécurité devient un facteur important, sécurité liée à la résistance que présente l'isolant aux surtensions. D'ailleurs les essais faits lors de la pose ont pour but de s'assurer si les câbles ont leurs qualités qu'ils possédaient en construction.

Nous avons indiqué, ci-avant, la méthode de M. Delon. La méthode Léauté permet d'essayer les câbles avec du courant alternatif à la fréquence du réseau, c'est-à-dire dans les conditions mêmes où ils doivent être utilisés. A cet effet une bobine de self-induction, interposée entre une source d'énergie électrique à potentiel constant et le câble, permet d'utiliser les phénomènes de résonance pour porter deux conducteurs d'un câble (ou un conducteur et l'armature) à une différence de potentiel dont la valeur efficace soit un multiple convenu de la tension normale.

L'essai peut non seulement être fait après la pose mais encore répété à intervalles réguliers, ce qui est un avantage très sérieux pour l'exploitation.

⁽¹⁾ Pour câbles à courant continu, un coefficient de sécurité de 1,5 suffit après fabrication avec une durée d'essai de 15 minutes.

Ajoutons que la grande self-induction de la bobine empêche toute propagation des oscillations de grande fréquence et que si le câble présente un défaut et que si l'isolant vient à être percé, la résonance cesse par suite du changement de capacité; la différence de potentiel tombe donc, ce qui rend impossible une répercussion sur le réseau.

Appareil Geoffroy et Delore (fig. 1417 et 1418). — A la suite d'essais comparatifs on a reconnu que le claquage d'un défaut s'obtient aussi bien avec une tension continue qu'avec une tension alternative. Ces actions sont de même

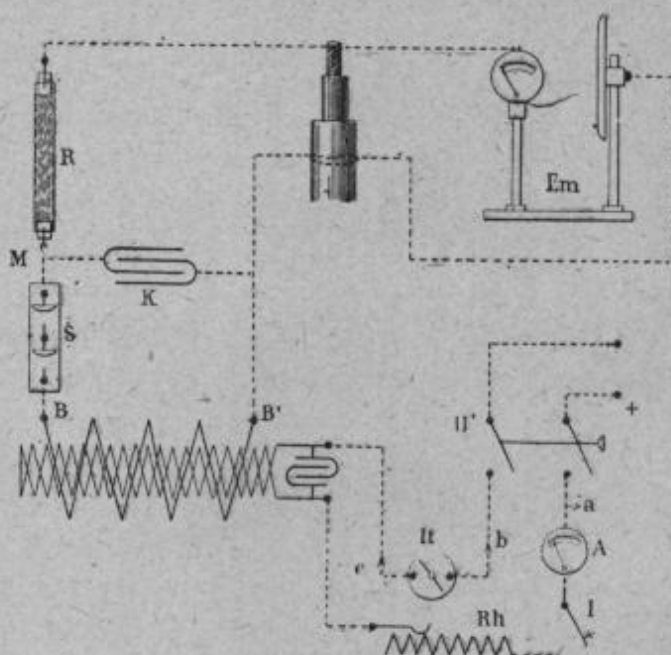


FIG. 1417. — Appareil Geoffroy et Delore pour les essais de câbles.

Rh, rhéostat de réglage; — BB', bornes HT; — S, soupapes à air; — It, interrupteur turbine; — K, capacité auxiliaire; — A, ampère-mètre; Em, électromètre; — R, résistance liquide; — C, conducteur à essayer.

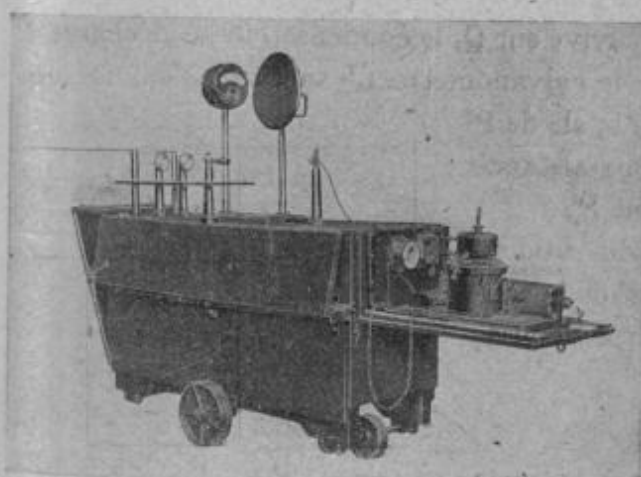


FIG. 1418. — Chariot de l'appareil Geoffroy et Delore.

ordre si la tension continue a une valeur égale à deux fois et demie la tension efficace alternative.

MM. Geoffroy et Delore ont cherché à produire de hautes tensions en utilisant la bobine d'induction dans sa forme classique, c'est-à-dire à la fermeture et à l'ouverture du circuit primaire.

Celle à l'ouverture est beaucoup plus forte qu'au moment de la fermeture et elle produit seule une étincelle si l'écartement des électrodes est suffisant. En intercalant dans le circuit une capacité (bouteille de Leyde ou câble) cette capacité se charge peu à peu jusqu'à ce qu'elle atteigne la tension provoquant l'étincelle. Une soupape électrique

s'oppose au passage en retour des charges progressivement accumulées.

L'interrupteur est constitué par une turbine à mercure shuntée par un

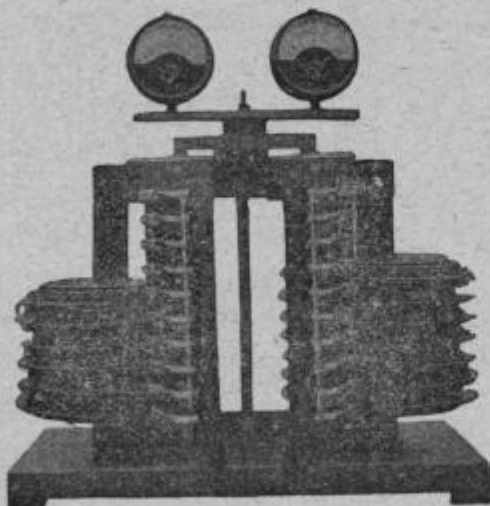


FIG. 1419. — Appareil A. Léauté.

condensateur convenable. On peut essayer jusqu'à 100.000 volts, par exemple un tambour de câble. Pour les capacités plus grandes, on intercale entre le câble et la soupape une résistance (tube à eau et glycérine) tout en utilisant une petite capacité auxiliaire. Un électromètre relié au câble donne la mesure de la tension appliquée.

Cet appareil répond parfaitement aux besoins pour lesquels il a été créé. Des défauts sont perforés et leur localisation est faci-

lité, s'il est nécessaire, en continuant d'appliquer la tension pour brûler le défaut.

3^o *Méthode de la capacité.* — Cette méthode s'emploie lorsqu'il s'agit de localiser la rupture d'un conducteur coupé. Si on opère par décharge, l'essai revient à l'étude de la décharge d'un condensateur shunté par une résistance (qui peut d'ailleurs être le siège d'une force électromotrice).

La clé de décharge étant sur P (fig. 1420), le condensateur se charge. Pendant que la charge passe de P en Q, il y a décharge partielle au travers de la résistance. Quand la clé arrive sur Q, le condensateur se décharge à la fois sur la résistance et dans le galvanomètre. L'exactitude de la mesure exige donc que le passage de la clé de P à Q soit très rapide et que la résistance d'ensemble r soit petite devant R .

Soient Q la charge initiale du condensateur, C la capacité, t la durée de la coupure, la charge restante q du condensateur au bout du temps r sera :

$$q = Qe - \frac{t}{Rc}$$

La méthode A. Combemale n'exige que deux ampèremètres et elle est suffisamment approchée.

Les essais de capacité ont lieu à l'aide d'un galvanomètre balistique et d'un condensateur étalonné par comparaison de la capacité du câble à celle du condensateur. A cet effet on charge le câble pendant quinze

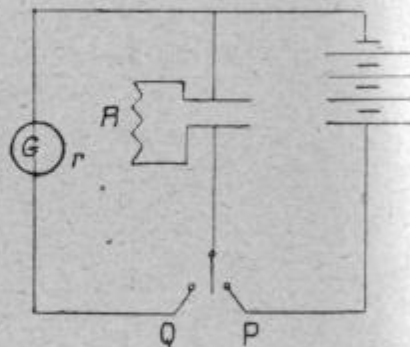


FIG. 1420.

secondes environ, en réunissant les conducteurs aux pôles d'une batterie. Si on appelle θ la déviation donnée par l'aiguille du galvanomètre lors de la décharge dans le balistique et θ' celle donnée par le condensateur dans les mêmes conditions, on a :

$$C' = \frac{C\theta'}{\theta};$$

C étant la capacité du condensateur étalon, en microfarads, et C' la capacité du câble ⁽¹⁾, exprimée avec la même unité.

Les essais après pose doivent durer une heure au moins et au double de la tension de service pour les câbles de 25.000 volts et au-dessus. Mais il est préférable de ne procéder à cette opération qu'après avoir fait fonctionner les câbles en court-circuit après deux à trois heures à un régime de courant égal au régime prévu maximum.

Dans les installations n'ayant pas le point neutre mis à la terre d'une façon permanente et fonctionnant sous tensions inférieures à 10.000, 12.000 volts, les mêmes essais aux mêmes tensions doivent être effectués entre conducteurs et enveloppe en plomb. Au delà de 20.000 volts, les valeurs des tensions ci-dessus peuvent être réduites de 20 0/0.

Nous terminons ce paragraphe par le cahier des charges ci-après relatif aux câbles sous plomb armé et à leurs accessoires, destinés à supporter des tensions supérieures à 2.000 volts (*élaboré par l'Union des Syndicats de l'électricité*). Il a pour but de réglementer les conditions de livraison, d'essais, de garantie, de pose, etc., ainsi que les spécifications de câbles armés.

1. *Spécification de la commande.* — Les câbles faisant l'objet de la présente commande seront livrés pour former des longueurs de... constituées par des pièces de ... mètres de longueur ⁽¹⁾.

La commande comprend également les accessoires nécessaires à la pose des câbles, tels que boîtes de jonction, de branchement, d'extrémité et de coupe-circuits.

Ces accessoires devront être construits de telle façon qu'ils puissent supporter après montage, sans aucune détérioration ni échauffement, les mêmes tensions et surcharges que les câbles faisant l'objet de la présente commande.

Ils devront être tout spécialement étudiés pour éviter l'introduction

⁽¹⁾ Dans les voies encombrées par branchement d'eau ou de gaz et par de nombreuses traversées, il y a intérêt à ne pas avoir des pièces trop grandes ; au contraire, lorsque le déroulage peut se faire facilement et sans boucle, il est préférable d'employer de grandes pièces afin de réduire le nombre des jonctions. La longueur des pièces est généralement limitée par le poids des bobines et la difficulté de leur manutentionnement. Ces longueurs peuvent varier de 80 mètres à 150 mètres pour les plus gros câbles et atteindre 500 mètres au maximum pour les plus petits.



de l'humidité, quelle que soit la nature du sol dans lequel ils seront placés.

II. *Spécification du câble.* — Le câble sera constitué par un ou plusieurs conducteurs de chacun ... millimètres carrés, ou ayant respectivement les sections de ... millimètres carrés ⁽¹⁾.

Chaque conducteur sera composé par un fil ou une corde en cuivre rouge recuit, de haute conductibilité. La résistivité en sera au maximum de 1,6 microhm-centimètre à 0° (étalon Matthiessen 1,593 à 0°), le coefficient de variation avec la température étant de 0,0042.

Chaque conducteur sera recouvert d'une gaine isolante, et les conducteurs ainsi constitués seront câblés entre eux avec interposition d'un bourrage isolant pour combler les vides et avoir ainsi une forme cylindrique aussi régulière que possible.

Ce cylindre pourra être recouvert d'une nouvelle gaine isolante et sera placé dans un ou deux tubes de plomb, sans soudures, le plomb entouré d'un matelas de filin goudronné, et le tout recouvert d'une armature constituée par deux feuillets d'acier d'une épaisseur de 0mm,7 à 1mm,2 protégés par un matelas de filin ou de toile goudronnés.

Les deux feuillets seront enroulés l'un sur l'autre dans le même sens, de manière à se recouvrir d'une quantité au moins égale au tiers de leur largeur, et ne devront, par conséquent, laisser en aucun point la gaine de plomb en vue.

Dans le cas où l'acheteur le demanderait, les deux feuillets pourraient être remplacés par une armature en fil d'acier.

On différenciera les conducteurs les uns des autres, par exemple par un certain nombre de fils étamés, par des rubans de couleur différente, etc.

III. *Densité du courant.* — Les câbles pourront supporter pendant un temps indéfini une intensité de courant, en ampères par millimètre carré, indiquée dans le tableau ci-après :

Section de chaque conducteur en mm ²	Jusqu'à 3.000 volts	De 3.000 à 10.000 volts	Au-dessus de 10.000 volts
5 à 20	2,5	3	2,5
20 50	2,5	2,5	2,5
50 100	2,0	2,0	2,0
100 200	1,5	1,5	1,4

Au-dessus de 200 millimètres carrés, les densités de courant feront l'objet de conventions spéciales.

Les densités de courant ci-dessus s'appliquent aux câbles torsadés et ne peuvent être adoptées pour les câbles concentriques.

(1) La section du câble est égale à la somme des sections des fils le composant.

IV. *Essais de réception des câbles à l'usine.* — Les essais des câbles auront lieu à l'usine du fournisseur à des dates fixées après entente avec l'acheteur. Les appareils nécessaires seront fournis par le constructeur.

a) *Tension.* — Les câbles seront soumis d'abord pendant quinze minutes (entre les conducteurs et l'armature) à une tension correspondant à trois fois la tension de fonctionnement normal, et ensuite pendant une heure à une tension double de la tension normale.

Toutefois, la tension entre les conducteurs et l'armature pourra être réduite à deux fois la tension normale pour l'essai de quinze minutes et à une fois pour l'essai d'une heure.

b) *Isolement.* — La résistance d'isolement des câbles sera d'au moins 500 mégohms à la température de 10° C. par kilomètre, sous une tension de 100 volts ⁽¹⁾. Ces essais devront être faits par la méthode de déviation comparée, et l'isolement minimum indiqué devra être obtenu soit entre les conducteurs, soit entre chaque conducteur et l'armature. La mesure sera faite après deux minutes d'électrification. Les essais seront faits par le personnel du constructeur.

V. *Emballage. Transport.* — Les bobines ou tourets servant à l'emballage seront facturés au moment de l'expédition et remboursés pour les 9/10 de leur valeur après leur retour fait franco à l'usine de construction dans un délai maximum de 6 mois.

Les câbles seront sous la surveillance et sous la responsabilité du constructeur jusqu'à l'arrivée au point de livraison.

VI. *Pose.* — Si l'acheteur le demande, la pose sera effectuée par les soins et sous le contrôle du constructeur.

A cet effet, celui-ci fournira les appareils nécessaires au déroulage des câbles dans les tranchées ⁽²⁾. Il surveillera le déroulage, il fournira et montera les boîtes de jonction, de dérivation et d'extrémité nécessaires.

L'acheteur fournira tous les manœuvres nécessaires au déchargement, à la manutention des tambours et du matériel de pose et de déroulage du câble ; il se chargera de l'exécution des tranchées, du remblayage, de la réfection du sol, de la fourniture des grillages et autres accessoires, du gardiennage, de l'éclairage, du magasinage des câbles et de l'outillage du constructeur. Les droits d'octroi, s'il y a lieu, seront à sa charge.

L'avancement des tranchées et les livraisons des câbles seront réglés, de manière qu'il n'y ait pas de temps perdu ni pour les constructeurs ni pour l'entrepreneur de terrassement.

⁽¹⁾ L'isolement des câbles sous cellulose imprégnée baisse très rapidement avec l'élévation de température, le coefficient de correction dépendant du mode de construction ; il y aura donc lieu de tenir compte de ce coefficient si la température d'essai n'est pas de 10°.

⁽²⁾ L'entrepreneur pourra faire payer une location pour ce matériel.

VII. *Essais après pose.* — Au plus tard quinze jours après la pose, il sera procédé aux essais de tension et d'isolement aux conditions ci-après :

a) *Tension.* — La canalisation posée par les soins du constructeur, y compris les boîtes de jonction et d'extrémité et de dérivation, sera soumise à une tension de deux fois la tension normale du réseau, soit entre conducteurs, soit entre chacun des conducteurs et la terre, pendant quinze minutes, le courant et les appareils nécessaires à l'essai étant fournis par l'acheteur et acceptés par le constructeur.

Toutefois, la tension entre les conducteurs et l'armature pourra être réduite de une fois et demie la tension normale.

b) *Essais d'isolement.* — La canalisation, constituée comme il est dit ci-dessus, devra avoir une résistance d'isolement d'au moins 200 mégohms par kilomètre à 10° C. ⁽¹⁾. Les appareils nécessaires à cet essai seront fournis par le constructeur.

La tension d'essai sera au moins de 100 volts.

VIII. *Garanties.* — Les câbles sont garantis contre tout vice de matière, de fabrication ou de pose pendant une durée d'un an à partir de la mise en service et au plus de 14 mois à partir de la livraison de ces câbles (*date de la facture*), à condition que la pose soit faite par les soins et sous le contrôle du constructeur, dans les conditions mentionnées ci-dessus.

Dans le cas où la pose serait faite par l'acheteur, les mêmes garanties sont maintenues, mais seulement contre tout vice de matière ou de fabrication.

A la fin de la période de garantie, la résistance d'isolement des canalisations sera de 50 mégohms par kilomètre à 10° C., les essais, s'il y a lieu d'en faire, étant toujours à la charge et aux frais de l'acheteur dans les conditions indiquées ci-dessus.

Il est entendu que cet isolement comprend les abonnés débranchés.

Lorsqu'il se produira un accident provenant, à l'exclusion de toute autre cause, d'un défaut de matière, de fabrication, ou de pose, si il a été fait par le constructeur, celui-ci devra réparer la canalisation dans le plus bref délai et à ses frais.

La responsabilité du constructeur est seulement limitée à la mise en état ou au remplacement de la partie défectueuse sans qu'il puisse résulter pour lui de dommages-intérêts.

Il aura également à sa charge tous les frais qui auront été occasionnés par cette réparation, tels que fouilles, réfections de trottoirs, etc., la valeur des travaux étant limitée à ce qu'aurait exigé la remise en état dans les conditions où se trouvait le sol au moment de la pose de la canalisation, sauf réserve faite par le constructeur au moment de la commande.

⁽¹⁾ Voir note ⁽¹⁾ à la page précédente.

IX. *Délai de livraison.* — Les câbles faisant l'objet de la présente commande et leurs accessoires devront être livrés à dans un délai de à partir de la date de la signature du présent marché.

X. *Prix de la fourniture.* — Les fournitures faisant l'objet du présent marché seront livrées aux prix suivants :

XI. *Paie ment.* — Les conditions généralement acceptées sont les suivantes :

30 0/0 à la commande ;

30 0/0 à la fin de chaque mois de pose, et au plus tard deux mois après notification que les câbles sont prêts à être reçus en usine ;

30 0/0 à fin de mois des essais après pose, qui devront avoir lieu comme il est dit ci-dessus, et au plus tard deux mois après le second paiement ;

10 0/0 à fin de garantie, au plus tard un an et deux mois après le deuxième paiement.

XII. *Contestations.* — Toutes les contestations auxquelles pourraient donner lieu l'interprétation et l'exécution des clauses du présent contrat seront tranchées par deux experts, chacun d'eux étant désigné par l'une des parties qui, si cela est nécessaire, désigneront un tiers expert pour les départager. En cas de désaccord sur la désignation du tiers expert, il sera choisi par le président du tribunal.

Si un accord était impossible, le cas serait soumis à la juridiction du tribunal de

Les droits, doubles droits et amendes éventuelles, perçus à l'occasion du présent contrat, seront à la charge de la partie qui aura donné lieu à la perception de ces droits.

546. Protection des lignes souterraines. — Ici le problème consiste à protéger le réseau contre les phénomènes engendrés par l'installation même, soit des phénomènes à moyenne et basse fréquence, de phénomènes stationnaires et de phénomènes oscillatoires. Comme pour les lignes aériennes, l'installation de protection doit comporter, pour être complète, des dispositions permettant d'étaler, avant leur pénétration dans les enroulements, les fronts d'onde dangereux. On utilisera donc les batteries de condensateurs combinées à des bobines de self-induction, des appareils à grand débit, genre soupape Giles, des résistances hydrauliques à colonne d'eau ou des appareils à jet d'eau branchés sur les barres collectrices. Les canalisations souterraines doivent être protégées par des parafoudres à leurs extrémités, car, quoique non directement exposées aux coups de foudre, elles peuvent être endommagées par les surélévations de tension considérables que l'on constate sur les réseaux alternatifs.

Pour que les câbles souterrains résistent à ces élévations fortuites de

tension, il faut que leur revêtement isolant possède à la fois une grande rigidité diélectrique et une forte résistivité d'isolement.

C'est surtout dans les installations à basse et moyenne tension que les limiteurs de tension ont une action efficace. Aux hautes tensions ces appareils de protection deviennent d'un fonctionnement beaucoup plus délicat et sont plus encombrants et plus coûteux.

Pour le transport de force d'Entraygues, déjà signalé, l'installation devait être faite de telle sorte que les bobines de self et les parafoudres pussent protéger les câbles armés contre les surtensions possibles sur la ligne aérienne.

En réalité, les bobines de self étaient mises hors circuit quand on mettait en service le câble armé ; d'autre part, l'interrupteur « à cornes » placé sur le circuit dudit câble n'a jamais servi. Les expériences n'en ont donc été que plus concluantes, d'autant plus que la ligne a eu seule à supporter de nombreux coups de foudre.

Dans un premier essai, le point neutre du transformateur étant à la terre et les trois conducteurs du câble branchés seuls sur les trois phases de l'installation, le système a été soumis à une tension de 30.000 volts pendant une demi-heure ; dans un second essai, le point neutre du transformateur étant isolé et une des phases de l'installation à la terre, le voltage a été poussé graduellement jusqu'à 28.000 volts et maintenu pendant une demi-heure. Enfin, lors d'une autre expérience, on a mis une des phases du transformateur à la terre (expérience singulièrement audacieuse), et le câble a résisté à la tension de 28.000 volts soutenue pendant une demi-heure.

La Société A. E. G. a mis en service, dans de vastes réseaux de câbles et de lignes aériennes à haute tension, un système de protection de câbles armés, de conducteurs aériens et de transformateurs, dénommé système différentiel.

La mise hors circuit de la partie de l'installation avariée a lieu si rapidement que l'à-coup de courant dans le réseau se ressent à peine. Le relais tripolaire pour courant triphasé utilisé dans ledit système de protection différentiel se compose d'un système magnétique tripolaire, sur les pôles duquel sont disposées les bobines inductrices destinées à chaque phase. Entre les pôles est suspendue une armature mobile, dont les trois noyaux peuvent être déplacés dans leur position de repos par rapport à l'axe des pôles, à l'aide d'un poids adapté à un levier à contrepoids. Dès que l'une des trois bobines inductrices est parcourue par le courant, un couple s'exerce sur l'armature, le levier à contrepoids tombe avec son tranchant dans un contact à ressort feuillard et le circuit de l'électro de déclenchement de l'interrupteur automatique se ferme.

Il est évidemment important que la direction du service soit avertie

automatiquement dès qu'un tronçon de câble est mis hors circuit par suite d'une défectuosité. Dans ce cas, le relais différentiel est complété par un appareil avertisseur représenté schématiquement par la (fig. 1421).

Un fil spécial du câble auxiliaire est fermé sur toutes les stations de couplage et la centrale, ou dans une station où il existe constamment un surveillant. Ce fil est alimenté par une source de courant (éléments) et parcourt un appareil d'alarme, d'où il se rend dans la terre. En outre, dans chaque station de couplage, s'établit une mise à la terre de ce fil avertisseur à travers un appareil avertisseur dès que, sous l'effet de la production d'une défectuosité dans le câble, le relais différentiel correspondant entre en fonctionnement. Suivant le numéro du tronçon de câble atteint, l'appareil avertisseur donne un certain nombre de contacts, et il

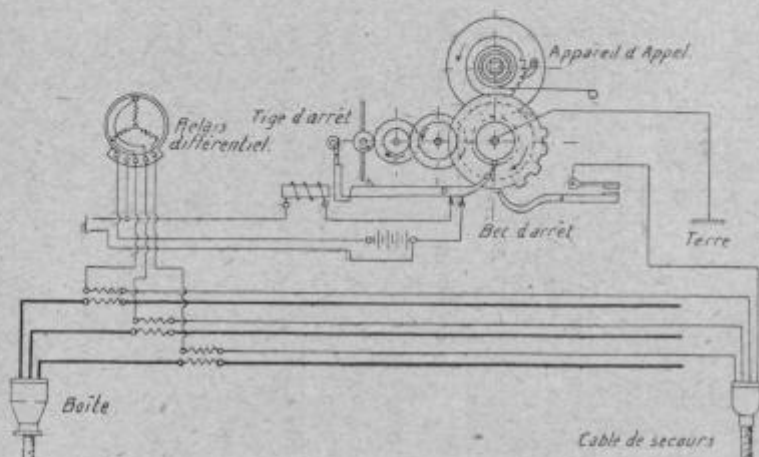


FIG. 1421.

est mû par un mécanisme spécial qui est électriquement solidaire du relais différentiel. Alors, dès qu'un tronçon de câble, par suite d'une défectuosité, est mis automatiquement hors circuit des deux côtés, les deux appareils avertisseurs sont déclenchés par les relais différentiels correspondants, les signes de contact sont enregistrés à la centrale par un appareil télégraphique, et un mécanisme d'alarme est mis aussitôt en activité. Comme les appareils avertisseurs sont déclenchés par les relais et non par les interrupteurs, l'avertissement a lieu, même dans le cas où les deux interrupteurs du même tronçon de câble ne devraient pas fonctionner simultanément, ce qui est pour ainsi dire chose impossible. D'ailleurs, on peut, à l'aide d'une disposition spéciale et avec les mêmes appareils avertisseurs, annoncer automatiquement le non-fonctionnement d'un interrupteur.

La mise à la terre des réseaux souterrains est une mesure excellente en soi pour la bonne stabilité de l'installation, à condition toutefois que la différence de potentiel entre point neutre et terre ne puisse prendre une

valeur trop grande. Elle offre pour les câbles, surtout dans les circuits à basse et moyenne tension, l'inconvénient qu'en cas de mise à la terre d'une phase par défaut d'isolement du câble, la dérivation de courant à la terre, qui peut être intense, peut occasionner de graves dégâts aux câbles, les appareils de sécurité, déclencheurs ou autres n'étant pas toujours susceptibles de fonctionner en cas d'accidents sur une phase.

Pour les hautes tensions, la mise à la terre est plutôt un avantage, d'autant plus qu'elle a pour corollaire de rendre les câbles plus économiques, par suite d'une réduction possible de l'épaisseur de l'isolant qui enveloppe l'ensemble des trois conducteurs.

Avec les limiteurs à jet d'eau on obtient un amortissement considérable des courants oscillatoires se fermant par la capacité des enroulements des machines et des câbles.

C'est aux bornes mêmes des machines et transformateurs qu'il est pré-

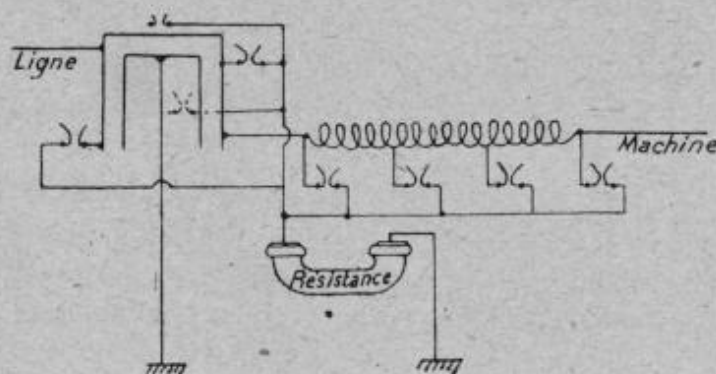


FIG. 1422.

férable de brancher les appareils de protection dans les réseaux de câbles (fig. 1422).

En Amérique on a songé à neutraliser par des forces électromotrices contraires des forces électromotrices perturbatrices. A cet effet, on a, dans certains cas, sectionné les lignes de traction en alimentant les différentes sections avec des courants alternatifs décalés de 180° . On a utilisé aussi un autre procédé du même genre consistant à placer sur les poteaux télégraphiques un conducteur parcouru par un courant décalé de 180° par rapport au courant de traction et d'une intensité telle que la f. e. m. induite soit égale et opposée à la f. e. m. perturbatrice.

M. l'ingénieur Girousse a proposé d'agir non pas sur les lignes, mais sur les appareils, de façon à les soustraire à l'action du courant alternatif perturbateur, en utilisant les propriétés des *circuits en résonance*, de façon à obtenir des circuits ayant une résistance aussi faible qu'on le veut pour le courant alternatif et une résistance infinie pour le courant continu.

L'application de ce principe consiste à monter une dérivation de self-

capacité entre l'arrivée du fil télégraphique et la terre. Mais on obtient une efficacité beaucoup plus grande en employant un récepteur à deux enroulements égaux (même résistance) connectés de telle façon que les actions d'un courant qui se partage également entre les deux circuits s'annule (montage différentiel). Un des enroulements est monté en série avec une capacité et une self en résonance pour la fréquence perturbatrice, l'autre avec une résistance égale à celle de la bobine de self ; le courant alternatif se partage en deux parties égales et de même phase, et par suite l'action sur le récepteur est nulle.

Les ateliers Oerlikon ont appliqué à la ligne de traction monophasée de Perpignan à Villefranche leur transformateur à bain d'huile dit transformateur succeur pour parer aux perturbations dues aux lignes à courant faible.

Dans les très grandes centrales alimentant par turbo-alternateurs des réseaux urbains importants, il y a intérêt à adopter pour les selfs-inductions des valeurs assez fortes pour obtenir une atténuation des phénomènes de surintensité au moment des courts-circuits. Les batteries de condensateurs, installées aux bornes des alternateurs, peuvent n'avoir qu'une capacité relativement faible (0,02 microfarad). Dans les réseaux triphasés, les appareils contre les surtensions doivent être branchés non seulement entre conducteurs et masse, mais encore entre les conducteurs.

V. — ISOLEMENT DES LIGNES

547. Défauts d'isolement des lignes aériennes. — Il est très difficile de donner une valeur définie pour l'isolement qu'on doit obtenir sur une ligne aérienne. Pour des lignes récemment installées et par un temps sec, il n'est pas rare de constater des valeurs égales ou supérieures à 20 mégohms par kilomètre. Avec le temps, l'isolement baisse avec l'état des supports et des isolateurs principalement. En service, la valeur de l'isolement peut s'abaisser jusqu'à 5 mégohms par kilomètre et même moins.

On peut apprécier l'importance des fuites par l'emploi de l'ohmètre ; en procédant à des essais sous haute tension (50 0/0 supérieure à la tension normale), on peut déceler les défauts ou les parties faibles de la ligne. Il y a certains défauts visibles qu'une surveillance avertie met facilement en évidence, tels que coups de foudre, claquement d'un isolateur, rupture d'un conducteur, courts-circuits par branche d'arbre tombée sur les fils, etc. Si l'interrupteur automatique déclenche on est averti. On détermine l'endroit par la manœuvre successive des sectionneurs. Quand le tronçon détérioré est reconnu on procède à la réparation et on a soin de

mettre à la terre les conducteurs pendant tout le temps que dure la réparation. Celle-ci terminée, on remet la ligne sous tension.

Pour procéder à la recherche des défauts d'isolement sur la *ligne principale*, il faut rendre celle-ci indépendante de l'usine et du réseau qu'elle dessert.

On a alors à examiner si le défaut provient d'un contact entre les conducteurs (défaut de câble à câble) ou s'il est dû à un contact de conducteurs avec la terre.

Pour le premier cas, appelons x la résistance de chaque conducteur (aller et retour) de l'usine au point défectueux, y la résistance de chaque conducteur de ce point à son extrémité (les conducteurs étant débranchés tant à l'usine qu'à leurs extrémités), enfin z la résistance de la dérivation qui donne lieu au défaut.

On mesure à l'usine la résistance r entre les deux conducteurs, lorsqu'ils sont isolés aux extrémités, et ensuite celle r_1 quand ils sont réunis entre eux à cette extrémité. Les valeurs de r et de r_1 sont données par les expressions :

$$r = 2x + z \quad \text{et} \quad r_1 = 2x + \frac{2yx}{z + 2y}.$$

Et comme la résistance de la longueur totale L est égale à $x + y$, on obtient :

$$r_1 = 2x + \frac{(r - 2x)(2L - 2x)}{(r - 2x) + (2L - 2x)},$$

d'où :

$$x = \frac{r_1}{2} - \sqrt{\frac{(r_1 - r)(r_1 - 2L)}{2}}.$$

Lorsque le conducteur est à la terre, si x est la résistance du tronçon entre l'usine et le défaut, y celle du tronçon entre l'extrémité du câble et l'emplacement du défaut, z la résistance de la dérivation formée avec la terre, on mesure la résistance à la terre r du câble, l'extrémité du câble étant isolée, puis la résistance r_1 , l'extrémité du conducteur étant mise directement à la terre, et enfin la résistance r_2 , l'extrémité étant mise directement à la terre par l'intermédiaire d'une résistance connue R .

On a alors :

$$x + z = r; \quad x + \frac{yz}{x + y} = r_1; \quad x + \frac{z(y + R)}{x + z + R} = r_2;$$

d'où :

$$x = r - \sqrt{\frac{R(r - r_1)(r - r_2)}{r_2 r_1}}.$$

Dans la pratique, on procède à la recherche du défaut en subdivisant progressivement la ligne, et, à cet effet, on prévoit, lors de la pose, des points accessibles que l'on appelle *stations d'essais*, et c'est à partir de ces points que l'on fait les mesures à l'aide d'un bon galvanomètre.

Les stations d'essais permettent d'isoler la ligne (ou le tronçon) de chaque côté ou de la mettre à la terre. Une console métallique, munie de deux isolateurs, reçoit les deux extrémités des tronçons, qui, à l'état normal, sont reliés par un fil attaché à des bornes soudées aux extrémités isolées des tronçons. De plus, un fil de terre est amené jusqu'à proximité de la console, et en enlevant le fil de réunion, on isole les extrémités ; de même, en reliant le fil de terre à l'une ou à l'autre extrémité libre, on met cette extrémité du tronçon à la terre, etc.

Lorsqu'une ligne n'est pas sous courant, on la coupe au milieu, en réunissant les deux extrémités à la terre, et l'on envoie du courant dans les deux extrémités de la ligne. La partie défectueuse de la ligne est vérifiée jusqu'à ce que l'on arrive à une connexion de terre, dans une des stations d'essais où le courant est observé. Par ce procédé, le défaut est localisé entre les deux dernières stations d'essais utilisées.

Quand se produit une dérivation, on isole la ligne d'une façon analogue ; on envoie du courant et on localise le défaut entre deux stations d'essais. S'il y a contact sans dérivation à la terre, on isole la ligne à une de ses extrémités ; tandis qu'on la met à la terre à l'autre extrémité ; de cette manière le contact devient une dérivation.

L'extension croissante prise, ces dernières années, par les transports d'énergie électrique et les tensions de plus en plus élevées auxquelles s'effectuent ces transmissions, ont obligé les ingénieurs à accorder une attention toute spéciale à l'établissement des lignes aériennes.

Cette nécessité inéluctable d'établir des lignes dans des conditions d'optimum irréprochables a conduit, entre autres, au perfectionnement des méthodes d'essais des câbles et lignes électriques, essais qui ont pris une importance capitale et qui ne se présentent pas sans certaines difficultés. Nous signalons les deux méthodes les plus usitées à cet effet ⁽¹⁾.

1° *Méthode de la chute de tension*. — A l'aide d'un voltmètre on mesure la chute de tension déterminée par le passage d'un courant électrique d'intensité appropriée et de tension constante d'une extrémité à l'autre

⁽¹⁾ On peut consulter les ouvrages techniques qui font autorité en cette matière savoir ceux de Monmerque, de Grawinkel et Strecker, de Razioli, etc.

du conducteur à vérifier et puis la chute de tension de l'une des extrémités du conducteur au point défectueux dont l'emplacement est à chercher.

Le point malade peut être déterminé parce que le défaut est dû presque toujours à un bon contact du conducteur avec la terre, par consé-

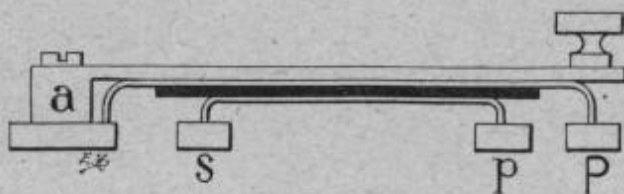


FIG. 1423. — Schéma de la disposition du commutateur. (Appareil Stephenson.)

quent la tension à cet endroit est la même que celle de la terre et la chute de tension y est égale à celle qui se produit entre l'une ou l'autre extrémité du conducteur à la terre.

Si on connaît exactement la longueur totale de la ligne à vérifier, si le conducteur a une section uniforme, des calculs très simples permettent de déterminer rapidement l'emplacement du défaut. La prise de terre doit avoir une résistance inférieure à 5.000 ohms.

L'appareil « Stephenson » permet d'obtenir directement en mètres et sans calcul la distance à laquelle se trouve le défaut. Cet instrument (fig. 1423 à 1425) comporte des résistances servant à régler le voltmètre qui en fait partie pour que sa déviation provoquée par la tension totale de la source d'énergie employée, indique sur l'échelle la longueur totale de la canalisation, longueur connue. En mesurant ensuite les chutes de tension partielles, on lit le nombre de mètres indiquant la distance à laquelle se trouve le défaut.

2^o Méthode de la boucle.

— L'opération consiste à boucler le conducteur mauvais avec un conducteur sain de résistance connue et on forme un pont de Wheastone avec les résistances de l'appareil, de façon que le galvanomètre ne dévie plus. L'ohmètre universel de Geoffroy-Delore convient tout spécialement pour obtenir la localisation des défauts par cette méthode.

Méthode de la perle de charge. — Elle consiste : 1^o à charger le câble à mesurer comme un condensateur, d'une quantité Q_0 , mesurée par l'élongation instantanée d'un galvanomètre balistique ; 2^o à laisser le câble isolé pendant un temps T ; et 3^o à mesurer la quantité d'électricité restante Q_r , en déchargeant le câble à travers le même galvanomètre.

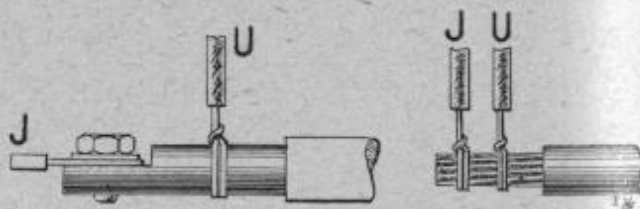


FIG. 1424. — Connexions des câbles. (Appareil Stephenson.)

On a alors :

$$R = \frac{1}{C \log_e \cdot Q_0 - \log_e Q_r} T$$

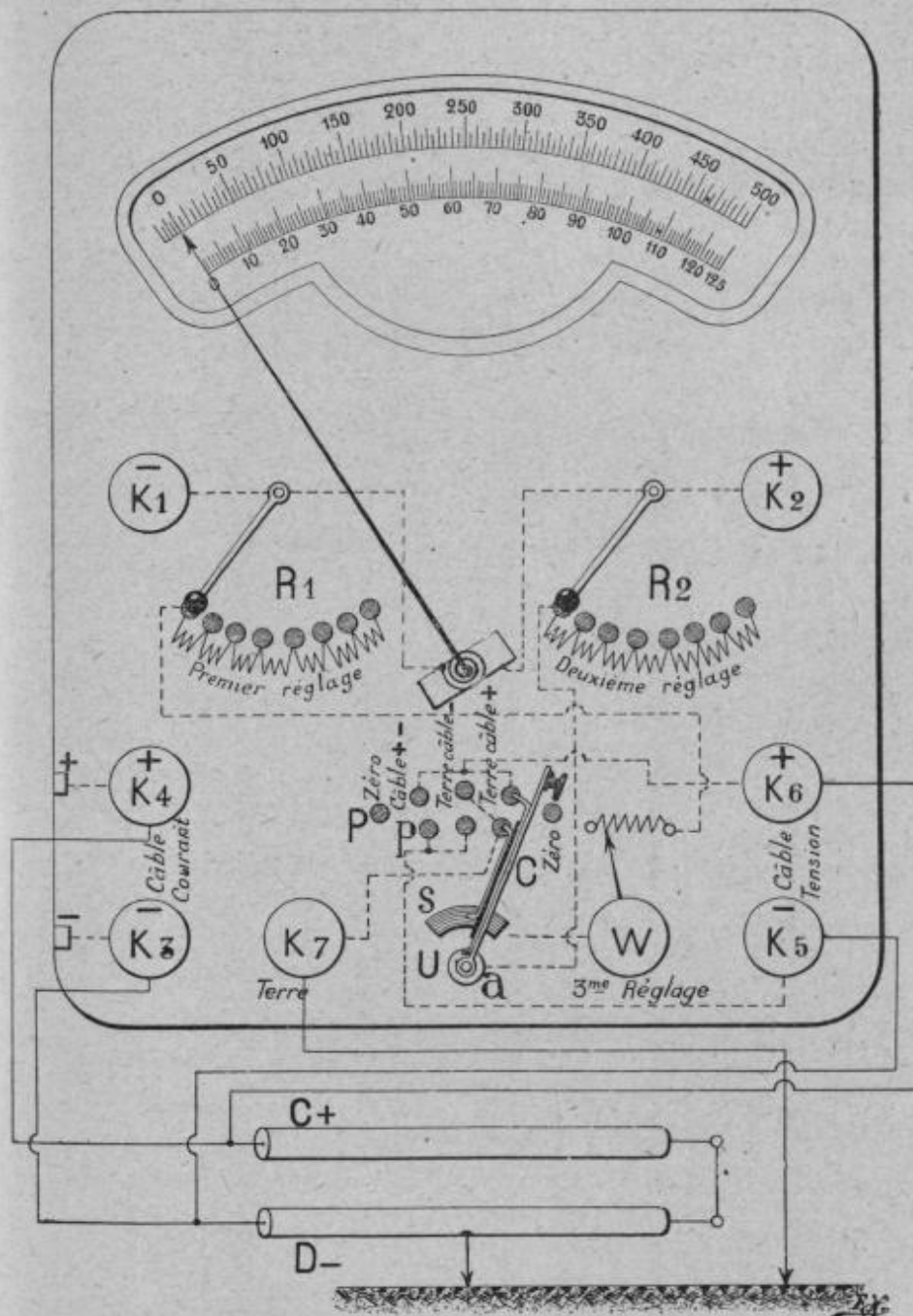


FIG. 1425. — Schéma de l'appareil Stephenson pour la recherche des défauts dans les canalisations électriques.

relation dans laquelle C est la capacité du câble et R la résistance d'isolement. Si C est exprimé en microfarads, on obtient R en mégohms.

Dans la pratique, on établit simplement le circuit suivant : terre-bat-

terie-galvanomètre-clef-âme du câble, les autres âmes et le plomb du câble étant à la terre. En fermant la clef, on observe une première élongation x proportionnelle à Q_0 ; on ouvre le circuit pendant une minute, par exemple et, en le refermant, on observe une seconde élongation plus faible x' proportionnelle à la recharge, c'est-à-dire à la quantité d'électricité perdue $Q_0 - Q_r$. Si l'on connaît la capacité C du câble, on en déduit facilement R .

La méthode de la perte de charge offre cet intérêt, que la perte de charge est constante pour tous les câbles de même fabrication, quels que soient leur diamètre et leur longueur.

VI. — LIGNES TÉLÉPHONIQUES INDUSTRIELLES

548. Conditions de fonctionnement. — Dans les distributions d'énergie à grande distance, on met en communication l'usine génératrice avec les principaux centres alimentés par la haute tension au moyen de lignes téléphoniques posées le plus souvent sur les mêmes poteaux que la ligne d'énergie. Pour différencier les deux sortes de canalisations, on a adopté les expressions de « ligne à courant fort » pour le transport de force et « ligne à courant faible » pour la ligne transmettrice de la parole.

Dès les premières expériences de transport à distance de l'énergie électrique, on s'est aperçu de l'influence perturbatrice exercée par les lignes de transmission sur les circuits téléphoniques ou télégraphiques situés à proximité. En effet, les premières induisent sur les secondes des charges électrostatiques et électromagnétiques ; dans le premier cas les lignes à faible courant jouent le rôle d'armature de condensateur par rapport à la ligne à haute tension et par rapport à la terre, et dans le second cas, de circuit secondaire d'un transformateur. Par rapport aux lignes téléphoniques l'induction magnétique produit des effets pratiquement négligeables tandis que l'induction électrostatique donne lieu à des courants parasites qui troublent les conversations téléphoniques. Quoi qu'il en soit, ces effets sont combattus par inversion ou rotation des fils, procédés sur lesquels nous reviendrons plus loin.

Dans une ligne triphasée, la charge électrostatique des fils téléphoniques est fonction de la différence de potentiel entre la ligne des points neutres et la terre, et par suite, si le point neutre s'élève (par exemple par la mise à la terre d'une phase), la tension électrostatique de la ligne à courant faible croît et peut devenir très élevée. Plus la capacité de cette dernière par rapport à la terre est grande plus est petite la tension électrostatique produite.

Si l'ensemble d'une canalisation d'énergie électrique offrait un isole-

ment très élevé et ne contenait aucun point faible, le contact d'un de ses conducteurs avec une ligne télégraphique unifilaire n'aurait pour conséquence que de fixer la valeur absolue du potentiel en un point de la canalisation ; un courant instantané de charge pourrait traverser la ligne télégraphique, mais aussitôt après, celle-ci ne serait plus le siège d'aucun débit notable. Cependant un tel contact serait dangereux pour le personnel télégraphique.

Si la canalisation était médiocrement isolée, ou si un défaut d'isolement se produisait en un point quelconque à la suite du contact, outre les phénomènes de charge et de décharge, il pourrait s'établir un courant entre les terres de la canalisation et les terres des appareils télégraphiques, et par conséquent ceux-ci pourraient être actionnés et incendiés.

Les lignes téléphoniques sont presque toujours bifilaires. Lorsqu'un fil téléphonique est mis en contact avec un condensateur d'énergie, si l'isolement de ce dernier est parfait, il peut y avoir simplement mise en charge du circuit téléphonique, sans dérivation dans ce dernier d'autre courant que celui de charge que comportent les capacités respectives des circuits en présence. Si l'isolement du circuit est mauvais, un ou plusieurs arcs s'amorcent aux points où le circuit téléphonique peut prendre terre, et des dérivations plus ou moins importantes peuvent circuler sur la ligne et traverser les installations.

Suivant la tension des canalisations et les circonstances dans lesquelles elles se produisent, ces dérivations peuvent mettre en danger le personnel des bureaux et des abonnés du téléphone ou provoquer des incendies dans les locaux où des appareils sont installés, ou simplement produire des appels intempestifs.

La mise en charge d'une prise de terre n'est susceptible d'aucune conséquence si la communication à la terre est de très facile résistance ; mais elle peut occasionner une dérivation dangereuse si cette résistance est un peu notable ; comme, dans une certaine mesure, cette dernière particularité n'empêche pas le fonctionnement des appareils, l'éventualité peut se produire.

549. Construction des lignes téléphoniques. — Les lignes à courant faible accompagnant les lignes de transport de force sont régies notamment par l'article 33 de l'arrêté ministériel du 21 mars 1908 et par l'article 39 du décret du 3 avril 1908.

Le métal employé pour les lignes téléphoniques doit être le bronze siliceux de préférence, avec un diamètre de 25/10 à 30/10 au moins. Au point de vue de la distance des fils à courant faible de la ligne à courant fort, il faut se tenir à 2 mètres au moins, et on observe que le point le plus bas doit être au moins à 6 mètres du sol.

Étant donné que les fils téléphoniques sont presque aussi dangereux que les fils d'une ligne à haute tension (on a constaté entre les fils téléphoniques et la terre des tensions dépassant 1.000 volts) on doit apporter à leur installation les mêmes soins qu'aux lignes à courant fort et faire

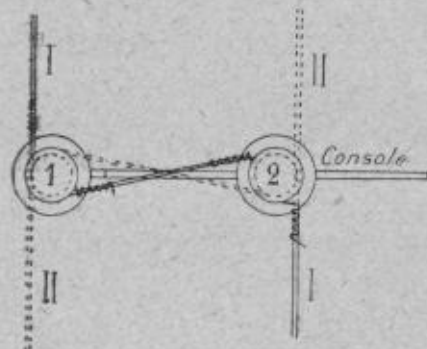


FIG. 1426.

prendre au personnel les mêmes précautions. On emploie aujourd'hui couramment pour les lignes à courant faible des isolateurs correspondant à des canalisations de 10.000 volts. Pour combattre l'action inductive des lignes, on torsade les fils téléphoniques, soit en faisant exécuter de temps en temps un demi-tour au plan formé par les deux fils à préserver des effets inductifs, soit en faisant exécuter une rotation d'un quart de tour aux fils, en passant d'un poteau à l'autre. Ces systèmes conduisent à un pas de l'hélice un peu élevé et présentent certains inconvénients au point de vue installation. M. E. Sartiaux emploie un dispositif perfectionné de croisement par retournement du plan des fils téléphoniques, autrefois couramment utilisé. Les lignes à double fil installées de cette manière n'occupent de place qu'en largeur et permettent d'utiliser les poteaux à leur maximum de capacité. Les deux isolateurs à double gorge (fig. 1426) sont placés sur la même console.

Les lignes téléphoniques, à leur arrivée dans les postes, doivent être isolées avec les mêmes précautions que les conducteurs à haute tension; elles aboutissent à des interrupteurs à couteau C (fig. 1427) manœuvrables à l'aide de perches en bois isolées; après ces interrupteurs sont placés les parafoudres (parafoudre Wirt ou parafoudre à cornes), du type employé couramment pour 2.000 et 3.000 volts. A la suite des parafoudres sont installés des fusibles *f* et enfin l'appareil téléphonique. Celui-ci peut être d'un type spécial ou du type courant adopté sur les lignes de l'État; dans ce dernier cas, l'appareil doit être branché sur le circuit secondaire d'un transformateur dont le primaire seul est accordé avec la ligne téléphonique. La Société industrielle des Téléphones construit des transfor-

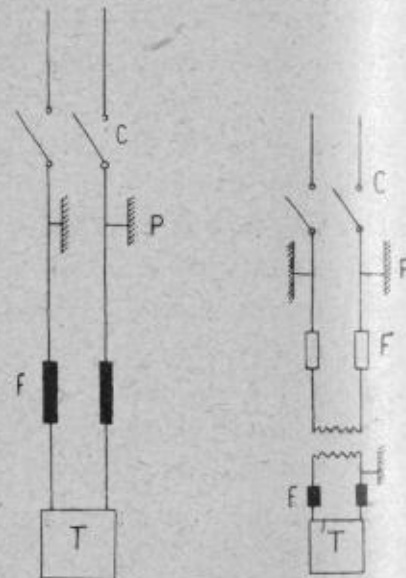


FIG. 1427.

mateurs à bain d'huile de rapport 10 : 1 pouvant être essayés avec des tensions de 25.000 ou 50.000 volts entre les deux enroulements.

Quand on a constaté un défaut sur une ligne téléphonique, la réparation peut en être exécutée sans arrêter le fonctionnement de la ligne d'énergie ; il faut, dans ce cas, mettre à la terre les deux fils de la ligne téléphonique de part et d'autre du point où l'on travaille, sans que l'opérateur touche à la ligne téléphonique elle-même bien entendu. Cela suppose aussi que les fils téléphoniques sont assez éloignés de la ligne d'énergie à haute tension pour qu'il n'y ait aucun danger.

Installation des postes. — Pour l'appel des postes on peut, soit faire transmettre successivement les appels de poste à poste, soit brancher tous les postes en dérivation ou faire une combinaison de ces deux systèmes. M. G. Laporte conseille la solution suivante pour les réseaux importants. Entre deux usines génératrices du réseau, ou entre deux postes de sectionnement principaux dont les distances varient en général de 30 à 50 kilomètres, on établit des lignes téléphoniques directes entre les terminus desquelles tous les téléphones intermédiaires sont en dérivation, avec consigne aux agents de mettre hors circuit leur téléphone lorsqu'ils ont à s'absenter et avec consigne de faire des appels téléphoniques toutes les deux heures, par exemple, et lorsqu'ils sont présents. De cette façon les gros centres sont toujours reliés rapidement ; dans l'espace de deux ou trois minutes, la communication entre deux personnes situées à 150 ou 200 kilomètres peut être réalisée. Quant au nombre de postes intermédiaires en dérivation qu'il est possible de créer, la question dépend des résistances des fils de ligne et des résistances des fils de sonneries. Les constructeurs acceptent de fournir des appareils permettant de faire fonctionner simultanément en dérivation dix postes sur 100 kilomètres.

Lorsque plusieurs lignes aboutissent à un même poste téléphonique, il est souvent nécessaire de pouvoir les relier entre elles pour communiquer simultanément avec plusieurs directions. On peut y parvenir en faisant aboutir toutes les lignes téléphoniques sur un jeu de barres omnibus placé entre les interrupteurs à couteaux désignés ci-avant et un appareil téléphonique relié à ces barres omnibus, avec ou sans transformateur.

On obtient plus de sécurité et de rapidité par l'un des procédés suivants : 1° en réalisant un poste central semblable au type ordinaire à leviers, particulièrement soigné au point de vue des enroulements des solénoïdes commandant les annonceurs ainsi que l'enroulement de tout l'ensemble par rapport à la terre, pour résister à des tensions élevées, ce poste placé immédiatement avant l'appareil téléphonique et les leviers ainsi que les volets des annonceurs reliés à des tiges isolées pour les commandes ; 2° en plaçant un transformateur de téléphone par ligne à haute tension et en utilisant un central du type courant employé sur les

lignes de l'État, branché sur les circuits secondaires des transformateurs et en connectant aussi un téléphone ordinaire. Mais, avec ce dernier système la communication d'une ligne avec une autre ligne ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire de deux transformateurs en série.

On peut améliorer le fonctionnement de certaines lignes mal établies en employant des bobines de self branchées sur ces lignes ou des condensateurs.

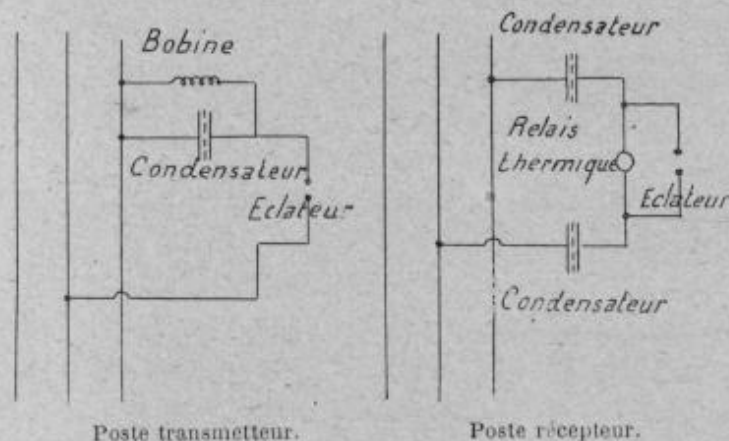


FIG. 1428.

Il est possible de transmettre des signaux par des lignes à haute tension en utilisant des générateurs à haute fréquence branchés entre la terre et le

point neutre et des récepteurs branchés de même. On peut aussi emprunter les fils mêmes de la ligne d'énergie à haute tension, et alors on n'a plus à redouter des contacts entre la ligne téléphonique. La (fig. 1428) montre l'application de ce système à une ligne triphasée. Le fonctionnement de ce dispositif peut être réalisé en remplaçant l'éclateur par un relais électrostatique ou un détecteur électrolytique. Enfin la solution est possible en envoyant le courant à haute fréquence dans la ligne ou le recevant de la ligne dans les récepteurs par induction avec ou sans emploi de condensateurs. En utilisant des transformateurs sans fer, on a aussi un accroissement de sécurité d'isolement pour la manipulation ou la réception.

Lorsqu'on désire être avisé rapidement d'accidents constatés par les surveillants envoyés pour visiter la ligne d'énergie, on munit ceux-ci d'appareils téléphoniques portatifs que l'on branche sur la ligne téléphonique. Ces appareils, montés sur perches isolantes, sont munis de parafoudres, de fusibles et d'une mise à la terre.

CHAPITRE XXVII

LIGNES DE TRANSPORT DE FORCE A HAUTE TENSION

APPAREILLAGE ET MATÉRIEL DES LIGNES

I. — INTERRUPTEURS ET COUPE-CIRCUIT

550. Interrupteurs directs. — C'est surtout l'emploi de tensions de plus en plus élevées, consécutif de l'augmentation des distances de transmission, qui a rendu de plus en plus sévères les conditions à exiger de

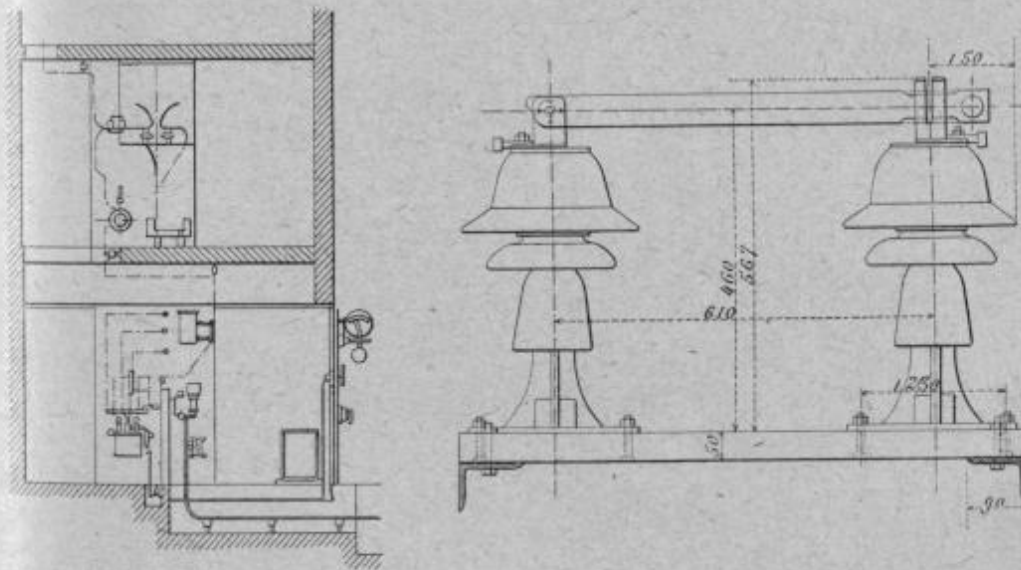


FIG. 1429. — Appareil à haute tension avec interrupteur triphasé actionné par tringle. (Oerlikon).

l'appareillage à haute tension et particulièrement des interrupteurs. On a, par suite, été amené à combiner les interrupteurs pour qu'ils soient capables de jouer également le rôle de coupe-circuit automatiques ou de disjoncteurs. Aujourd'hui le disjoncteur et l'interrupteur se complètent tout mutuellement ; quand deux appareils de ce genre sont adjoints, c'est le disjoncteur qui est fermé le premier, puis alors seulement l'interrupteur.

teur ; de sorte que le premier protège le circuit si, au moment où ce dernier est établi, un phénomène anormal se manifeste. Réciproquement, le disjoncteur ne pourrait être mis sans danger en ligne sur un circuit fermé, à moins d'être combiné de façon que l'opérateur ne pût le tenir fermé si le courant a une intensité excessive. Une fois fermé, le disjoncteur reste tel, aussi longtemps qu'aucune perturbation n'en provoque pas le déclenchement, et c'est avec

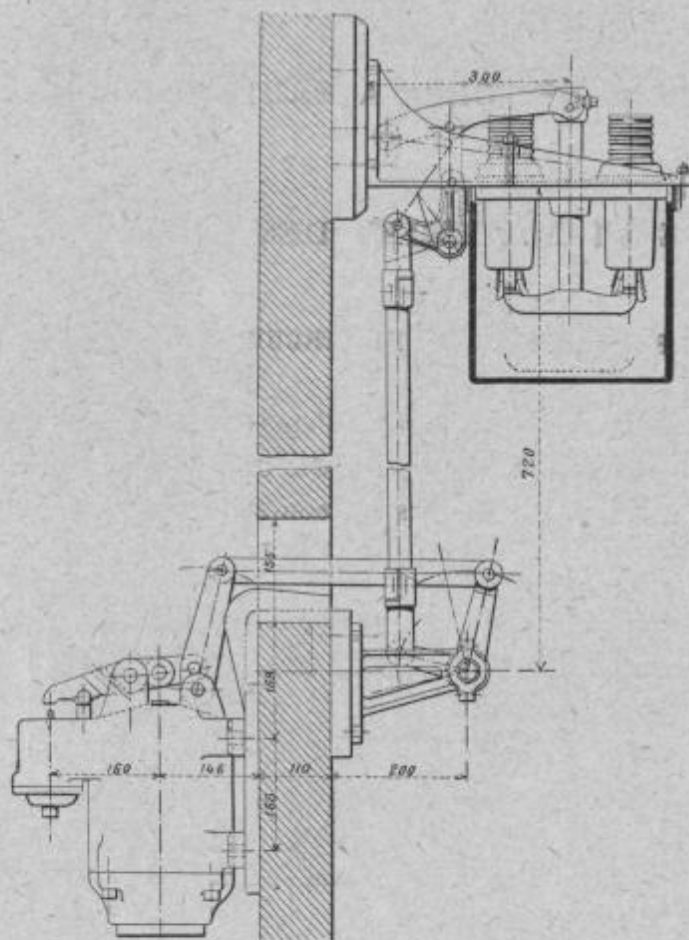


FIG. 1430. — Commande d'un interrupteur à 13.500 volts par solénoïde. (Usine hydroélectrique de la Brillanne.)

l'interrupteur qu'exécutent les manœuvres. Mais on a été amené à confondre ces deux appareils chaque fois que l'interrupteur ne devait fonctionner que peu fréquemment ; de là sa transformation en appareil automatique.

Les interrupteurs à haute tension peuvent se classer en trois catégories : les appareils à grande distance de rupture dans l'air, ceux à rupture sur cornes et ceux à rupture dans l'huile.

Les premiers s'emploient pour des tensions inférieures à 6.000 volts et pour

des puissances ne dépassant pas 250 à 300 kilowatts. Ils sont assez souvent munis de pare-étincelles en charbon. Cependant la Société industrielle des Téléphones construit un type à levier pour une tension de 10.000 volts et 1.000 kilowatts, constitué par des leviers en frêne verni portant à l'intérieur un câble souple et monté à serrage dans des pièces de bronze fixées sur un axe carré, avec interposition d'un fort isolement de mica et de presspahn.

Les appareils à rupture sur cornes s'utilisent pour des tensions jusqu'à 10.000 volts.

Les interrupteurs à rupture dans l'huile, selon leur mode de fabrication, conviennent pour les tensions moyennes, mais surtout pour les très hautes

tensions, 30.000 volts et plus, et des puissances de 2.000 kilovolts-am-pères. Ces appareils sont de beaucoup préférables, surtout pour l'alter-

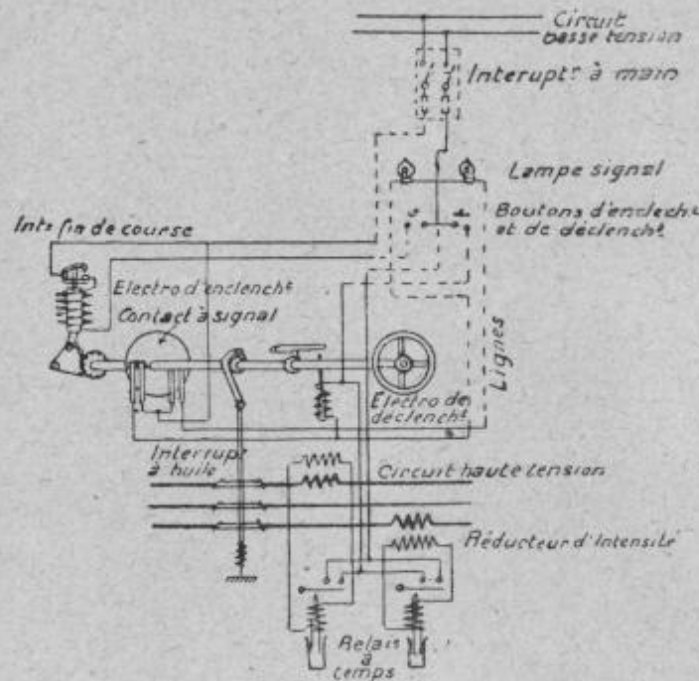


FIG. 1431. — Schéma de la commande d'un interrupteur par électro-aimant.

natif, à ceux « à air » ; l'échauffement des pièces de contact est négligeable,

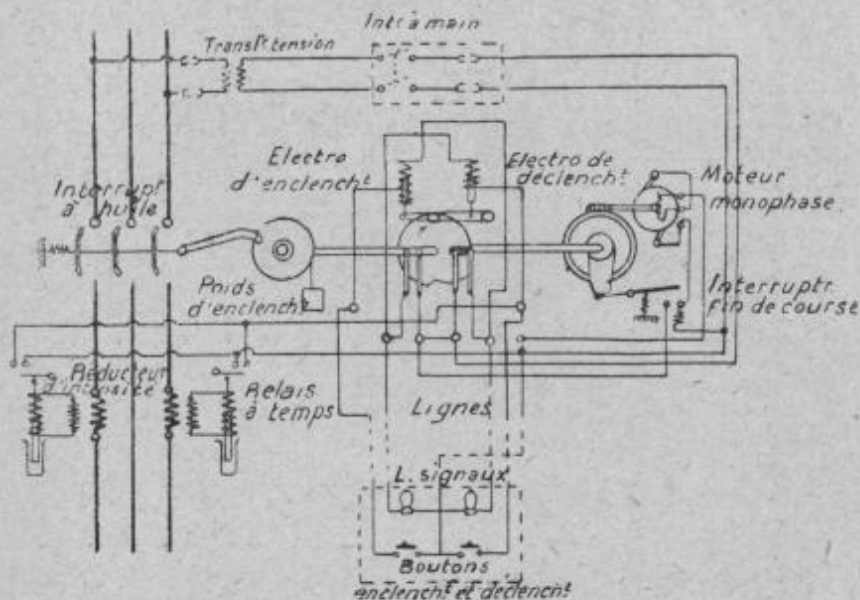


FIG. 1432. — Schéma de la commande d'un interrupteur par moteur.

les étincelles de rupture sont moins destructives, l'usure des pièces et des dépenses d'entretien fortement diminuée.

Les interrupteurs à rupture dans l'huile sont d'un bon fonctionnement jusqu'à 1.000 kilowatts. Au delà de cette puissance il se forme en effet, à la rupture, dans l'huile, une poche gazeuse dans laquelle l'arc se maintient. Pour l'éviter ou tout au moins en vue de diminuer ses dimensions, il conviendrait d'employer des interrupteurs à huile sous pression.

Les interrupteurs à haute tension à air sont munis d'un dispositif de

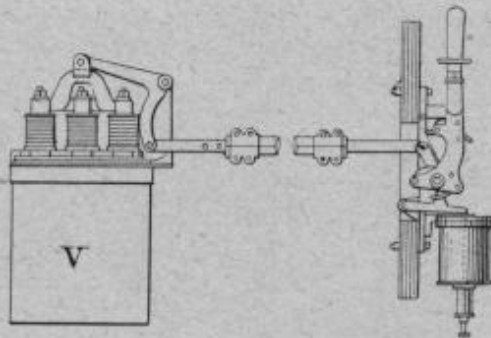


FIG. 1433. — Interrupteur Alioth à bain d'huile actionné par tringle.

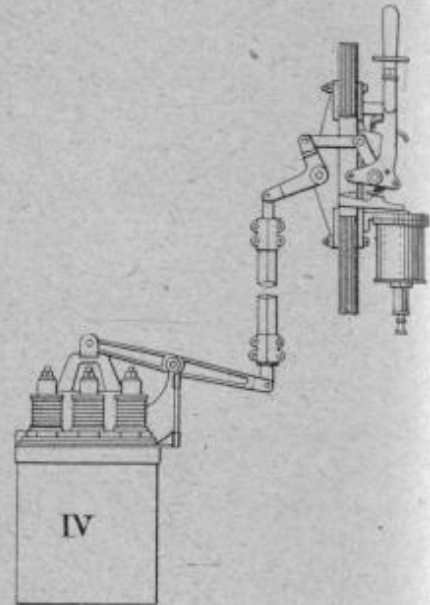


FIG. 1434. — Interrupteur Alioth à bain d'huile actionné par tringle.

rupture de l'arc sur des pièces accessoires interchangeables, en métal ou en charbon, et le plus souvent de forme conique ; dans certains cas, ces

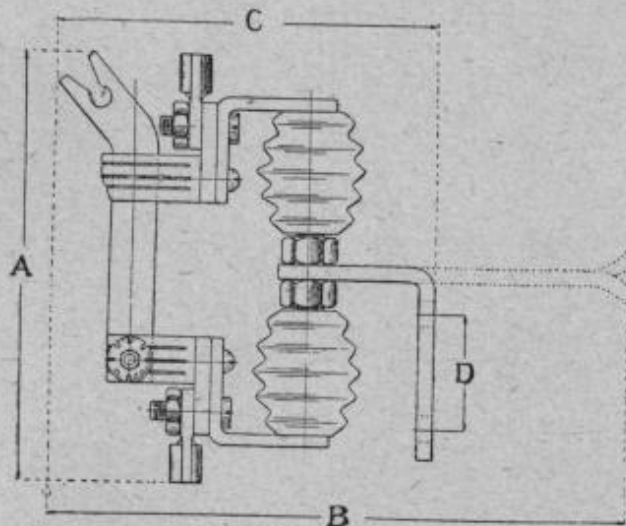


FIG. 1435. — Interrupteur à couteau pour intensités de 100 à 200 ampères.

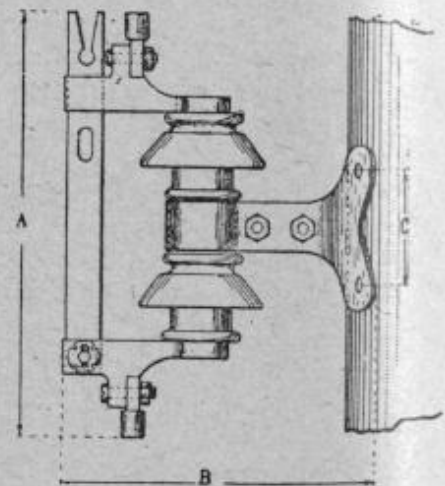


FIG. 1436. — Interrupteur à couteau pour lignes à basse tension.

pièces sont constituées par du zinc, les vapeurs de ce métal ayant la propriété d'étouffer l'arc.

Le soufflage magnétique est très avantageux, mais il faut préparer un

écart suffisant entre les pièces de rupture, si l'on veut éviter des succès. Le soufflage néanmoins donne lieu à des extra-courants nuisibles aux isolants : avec les interrupteurs à air, pendant la durée de l'arc, les génératrices restent reliées à la ligne à travers l'arc ; c'est pourquoi l'inductance de la ligne s'augmente de celle des génératrices.

La longueur de l'arc de rupture est fonction de la tension, de la self-induction, de la capacité, de l'intensité, de la fréquence du courant et de la nature des métaux entre lesquels il se produit, et aussi de la position de l'arc (un arc vertical se forme plus facilement qu'un arc horizontal). On a obtenu des arcs de plus de 2 mètres de longueur à 20.000 volts et de 1 mètre de longueur à 3.500 volts.

Les appareils doivent donc être disposés pour rompre l'arc horizontalement et interrompre chaque conducteur en plusieurs points, ou déter-

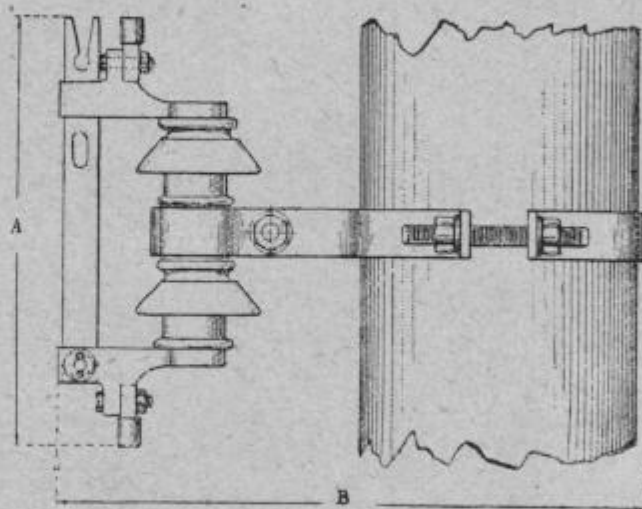


FIG. 1437. — Interrupteur à couteau avec collier, pour lignes à basse tension.

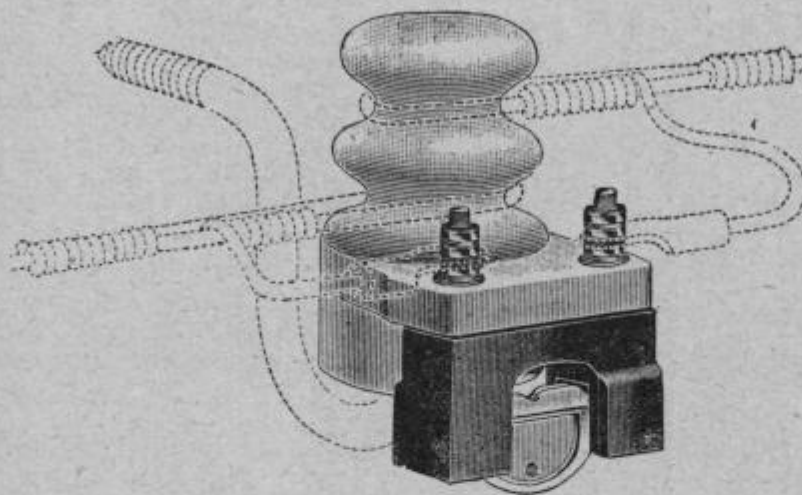


FIG. 1438. — Interrupteur-séparateur pour lignes à haute tension.

miner la rupture dans un récipient contenant de l'huile. Lorsque la commande de l'interrupteur n'est pas rigide, les positions de fermeture et d'ouverture du courant demandent à être repérées par un signe visible, tel que des lampes de couleur.

Avec les interrupteurs à huile on peut sans danger couper un circuit en

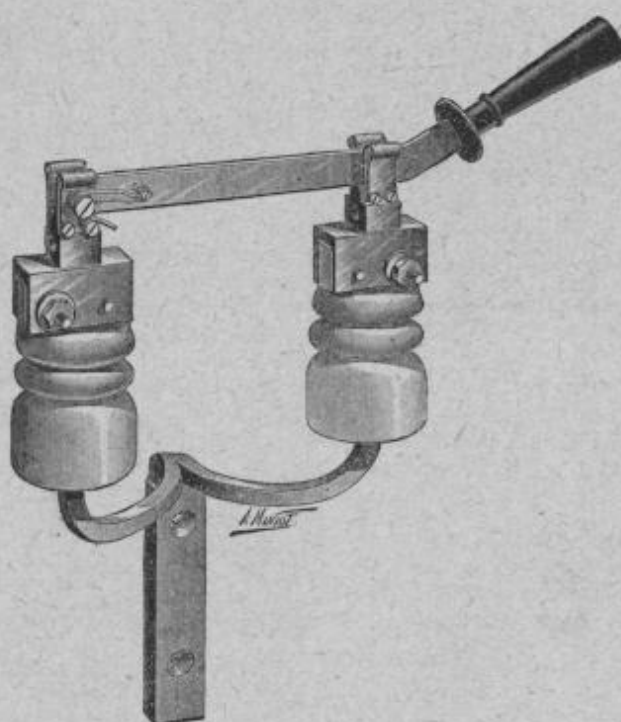


FIG. 1439. — Interrupteur aérien (30 ampères sous 500 volts).

charge. L'huile a en outre pour effet de réduire l'importance des surtensions qui peuvent se produire lorsqu'on emploie des appareils à interruption dans l'air, fait qui s'explique par la plus grande durée de l'arc. Les interrupteurs à huile s'imposent dans les installations à tension élevée et quand la puissance transmise est considérable. La qualité de l'huile a une haute importance pour avoir toutes les garanties de sécurité désirables ; on lui demande de répondre aux mêmes conditions que celles que nous avons indiquées pour l'isolement des transformateurs.

Nous ajouterons qu'il est très important que l'huile soit exempte de

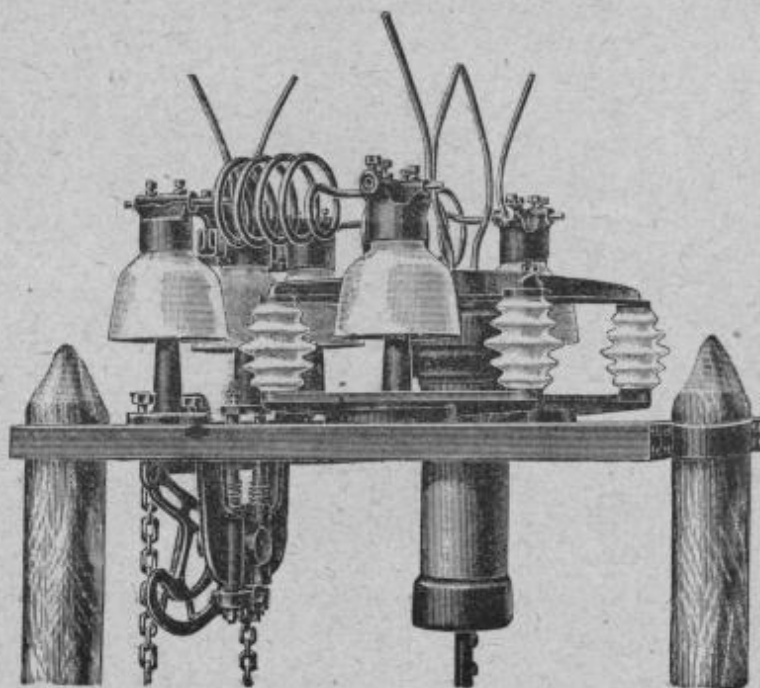


FIG. 1440. — Interrupteur aérien à haute tension (30.000 à 50.000 volts).

toute humidité. On reconnaît que l'huile est sèche ou humide à sa couleur :

vue dans les tubes d'essai, l'huile exempte d'eau est parfaitement limpide et de couleur brun clair ; celle qui contient de l'eau est trouble et foncée. On peut aussi procéder, pour reconnaître l'état du liquide, à un essai chimique élémentaire ; on chauffe dans une capsule de porcelaine ou de platine, jusqu'au blanc, un peu de sulfate de cuivre pulvérisé. On mélange cette poudre à l'huile à essayer ; si le liquide prend une coloration bleue, c'est qu'il s'y trouve de l'eau. On peut aussi obtenir la déshydratation par l'emploi de sodium.

Les interrupteurs à huile qu'on emploie dans les parties à haute tension peuvent se diviser en quatre catégories : les interrupteurs à cuves et à fermeture et ouverture à main par un jeu de câbles en acier ou un jeu de tringles et de leviers (1.000 à 5.000 volts, 100 à 1.000 kilowatts) ; les interrupteurs à cuves et à fermeture à main, mais à ouverture mixte, pouvant se faire à vo-

lonté, à main par une tringlerie ou automatiquement à l'aide d'un solénoïde alimenté soit par du courant alternatif, soit par du courant continu (1.000 à 10.000 volts, 100 à 2.000 kilowatts) ; les interrupteurs à cuves et à fermeture et ouverture automatiques à l'aide de deux solénoïdes distincts avec manœuvre éventuelle à la main (5.000 à 20.000 volts, 1.000 à 6.000 kilowatts) ; enfin les interrupteurs à plongeurs et cuves multiples (une pour chaque pôle) pour les grandes puissances, avec manœuvres d'ouverture et de fermeture par un moteur unique pour les deux mouvements (10.000 à 50.000 volts, 2.000 à 6.000 kilowatts).

Il y a une certaine tendance, pour les interrupteurs de la deuxième catégorie, à les remplacer par une commande directe du circuit à haute tension, celui-ci agissant dans des spires grosses et courtes qui entourent

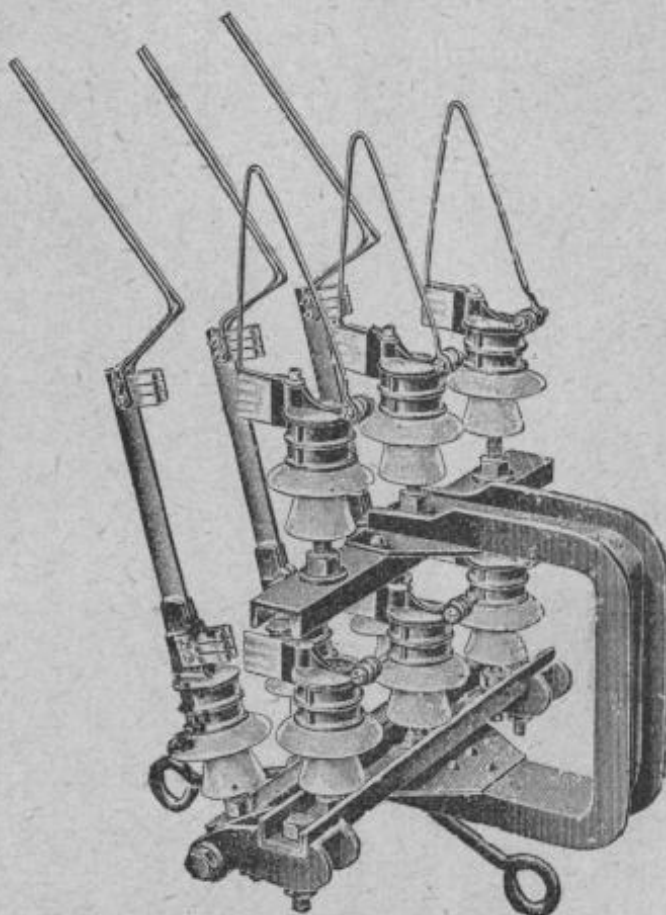


FIG. 1441. — Interrupteur aérien sans commande.

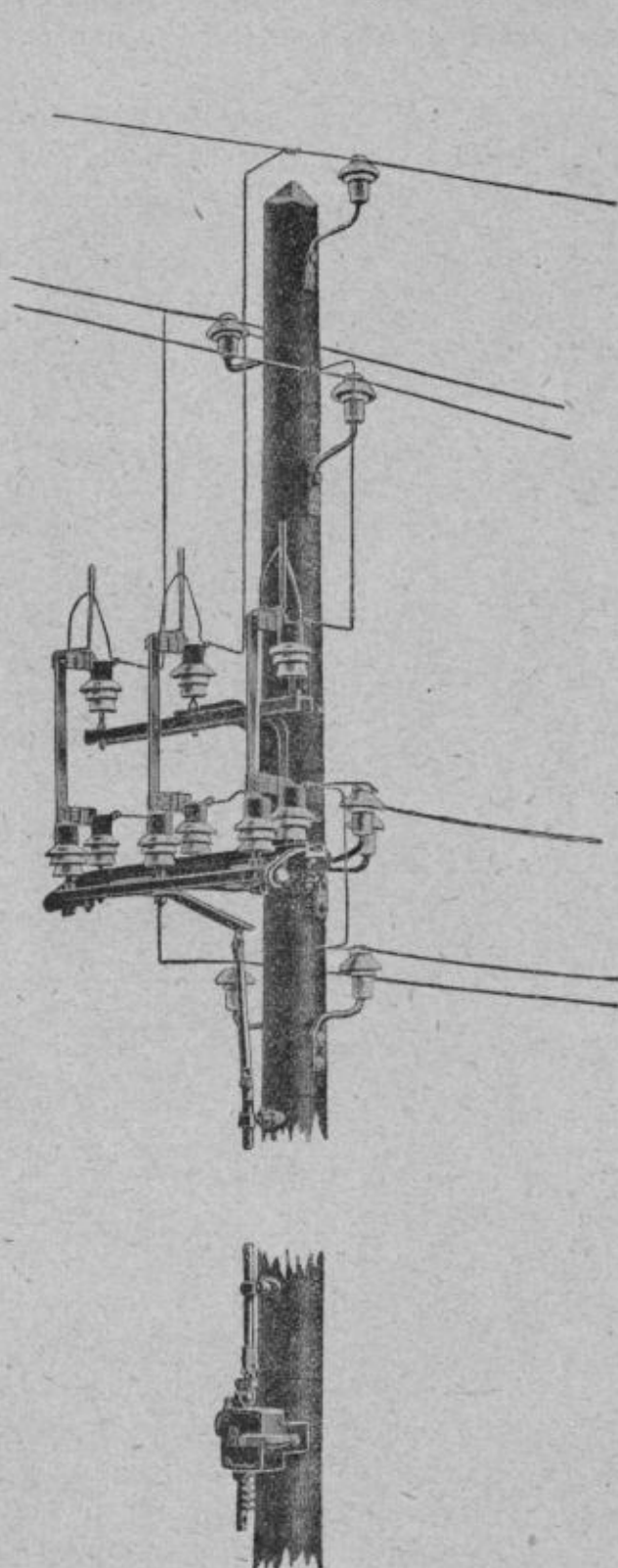


FIG. 1442. — Interrupteur aérien avec commande pour dérivations.

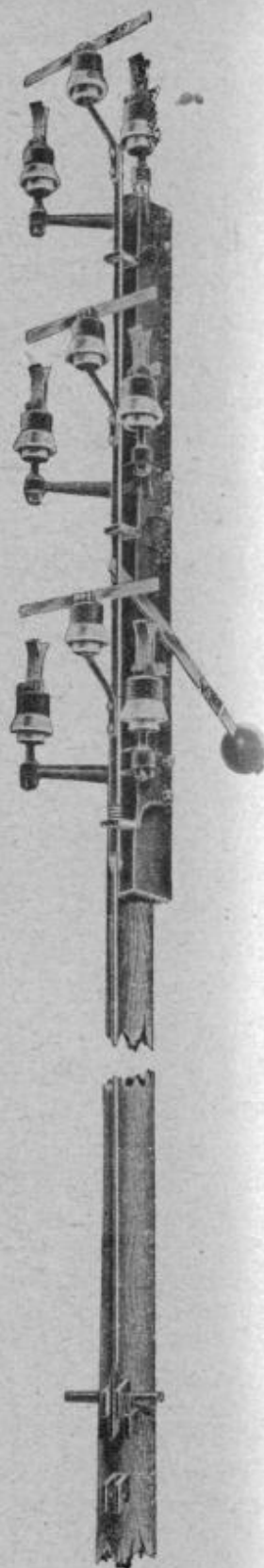


FIG. 1443. — Interrupteur aérien (modèle de la Société du Sud Électrique).

des noyaux magnétiques, composés de deux parties venant en contact pour une valeur donnée de la charge, d'où mouvement, c'est-à-dire rupture. Si on ajoute à ce système un solénoïde pour la fermeture, on voit qu'on peut supprimer les relais et une partie des transformations de courant.

Après les interrupteurs à l'huile, ceux à cornes sont les plus employés.

M. A. Blondel a établi : que la vitesse d'écartement des contacts d'un interrupteur doit être d'autant plus réduite que la tension est plus basse, pour ne pas brusquer l'extinction de l'arc ; que le rapport des extra-tensions aux tensions normales est plus faible avec les hautes tensions qu'avec les basses pour une même nature d'électrode, ce qui rend recommandable l'emploi de pare-étincelles en charbon ; que les métaux anti-arcs (qui ne sont pas autre chose que des métaux à points de rallumage élevés) donnent de plus fortes extra-tensions que le cuivre et ne sont pas à recommander pour les limiteurs ; qu'il vaut beaucoup mieux empêcher l'arc de se prolonger par l'addition de résistances qui amortissent les oscillations ; qu'une faible fréquence d'oscillations propres du réseau est nuisible en ce qu'elle prolonge la durée de l'arc et rend le rallumage plus difficile, et enfin que, d'autre part, cette faible fréquence peut réduire l'amplitude totale résultante dans le cas de court-circuit.

Les lignes principales d'un réseau peuvent être elles-mêmes sectionnées par des interrupteurs aériens à haute tension ; mais, à l'entrée de chaque agglomération, un de ces appareils est de toute rigueur. On les place généralement sur les poteaux et manœuvrables d'en bas. Dans les installations récentes, les relais à maximum qui effectuent le déclenchement des interrupteurs sont en même temps des appareils à temps, c'est-à-dire que l'interruption ne se produit, dans le cas de surcharges faibles, que si celles-ci durent un assez long temps.

Les déclencheurs automatiques se font à maxima, à minima, à tension nulle et à courant de retour. Le déclencheur à maxima sert à protéger les

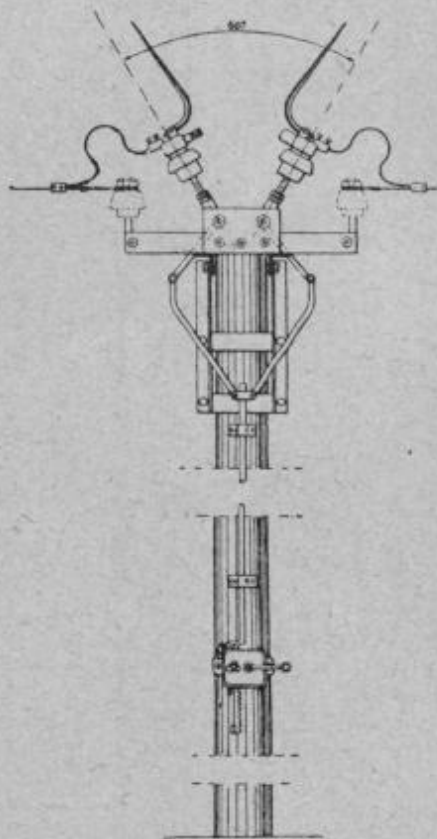


FIG. 1414. — Détail de construction de l'interrupteur aérien à haute tension.

installations de tous genres contre les surcharges ; ceux à tension nulle

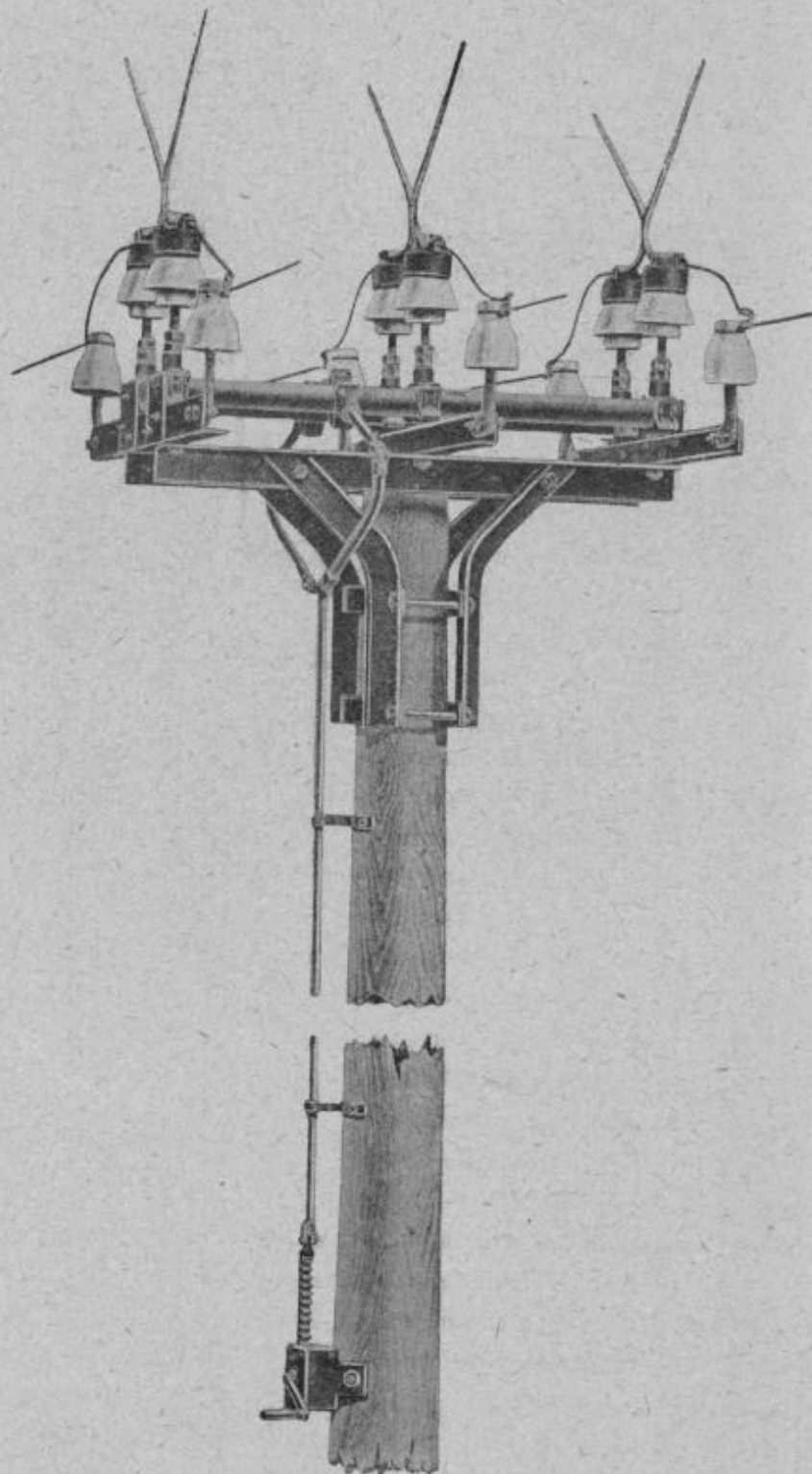


FIG. 1445. — Interrupteur aérien pour haute tension.

sont employés pour les gros moteurs, ordinairement en concurrence avec

les déclencheurs à maxima ; enfin les déclencheurs à courant de retour fonctionnent lorsque la transmission d'énergie s'inverse (courant continu) ou pour protéger une installation de moteurs synchrones travaillant en parallèle avec des moteurs mécaniques, soit directement, soit par l'intermédiaire de transmissions électriques. Dans ce dernier cas, le déclencheur ne peut être qu'un wattmètre déterminant le déclenchement quand l'effort exercé sur son équipement mobile se renverse. On peut aussi employer, comme déclencheur à courant de retour ou à puissance inversée, un système différentiel compoundé.

Le contrôle de l'électro-aimant de déclenchement peut être direct ou indirect ; dans le premier cas, la bobine du déclenchement est parcourue par le courant principal, ou par un courant proportionnel à celui-ci et fourni par un transformateur en série sur la ligne ou transformateur d'intensité. Dans le second cas, il est fait usage d'un relais, ou appareil intermédiaire, inséré sur le circuit principal, conductivement ou inductivement, et qui ferme le circuit de la bobine de déclenchement, laquelle est alimentée alors, au choix, soit en courant continu, soit en courant alternatif à basse tension. La première méthode est la plus simple et elle suffit pour les appareils automatiques à maxima. Le déclenchement comporte une bobine pour les appareils

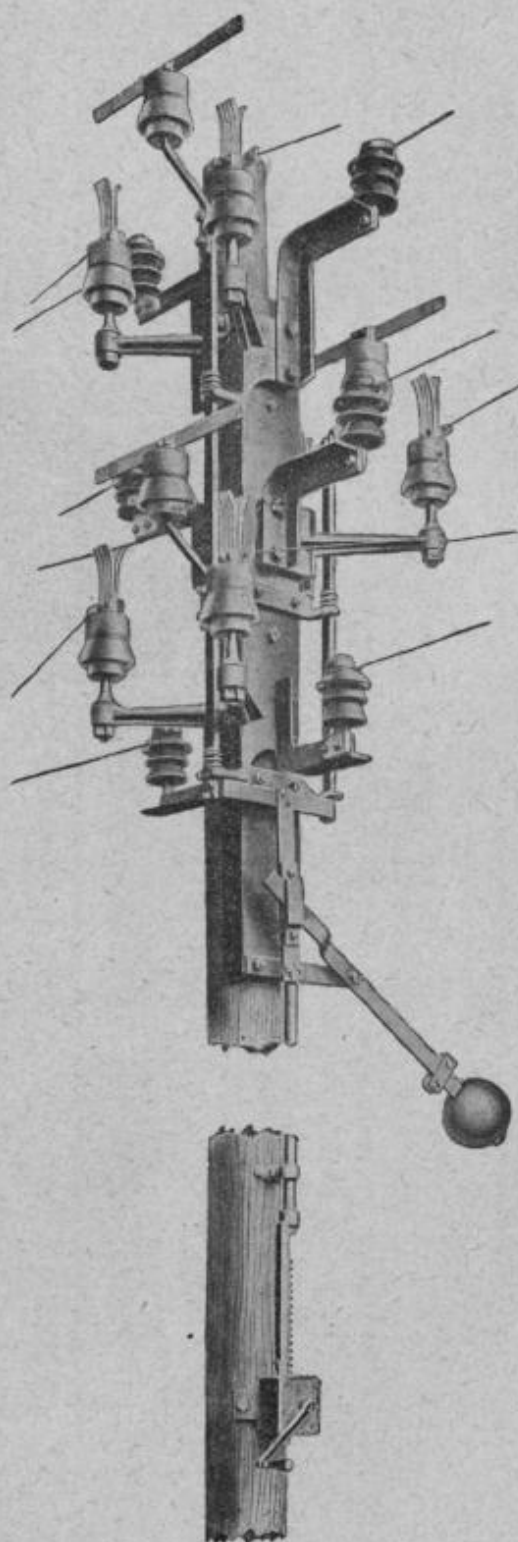


FIG. 1446. — Interrupteur aérien tripolaire, à pôles étagés et commande par crémaillère. (Maljournal et Bourron).

unipolaires et bipolaires ; une, deux ou trois pour les tripolaires ; une seule suffit pour les réseaux dont les phases sont également chargées ;

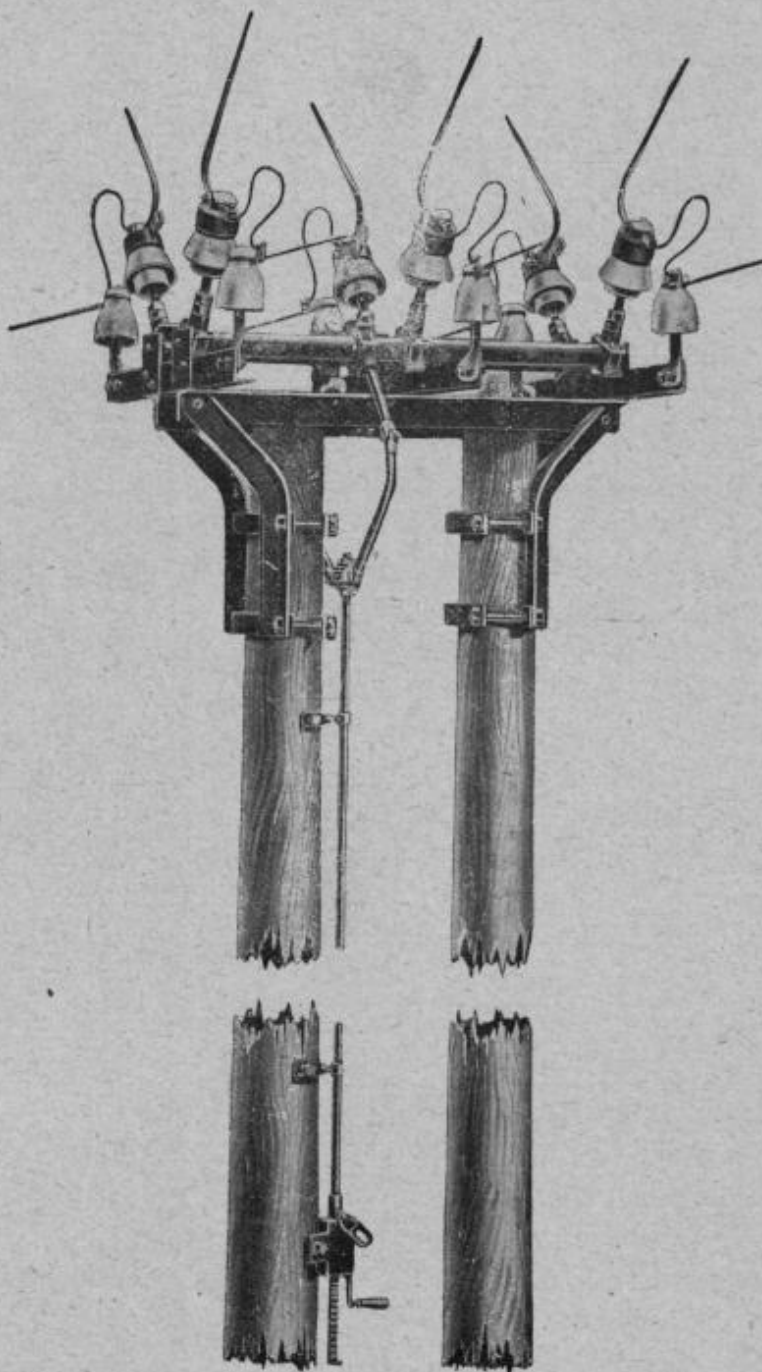


FIG. 1447. — Interrupteur tripolaire ouvert, commande par tube rigide et crémaillère. (Maljournal et Bourron).

deux valent mieux s'il y a inégalité entre les phases ; trois sont nécessaires dans le cas d'un fil neutre à la terre.

Concernant l'installation des interrupteurs, il convient de prendre certaines précautions, telle que l'intercalation de résistances en shunt ou

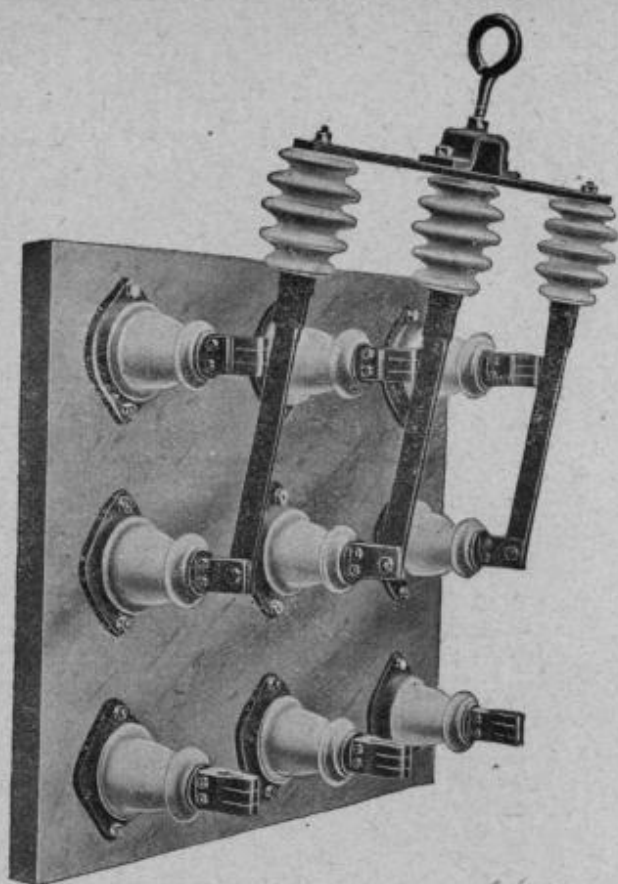


FIG. 1448. — Commutateur inverseur tripolaire pour tension jusqu'à 35.000 volts.
(Maljournal et Bourron).

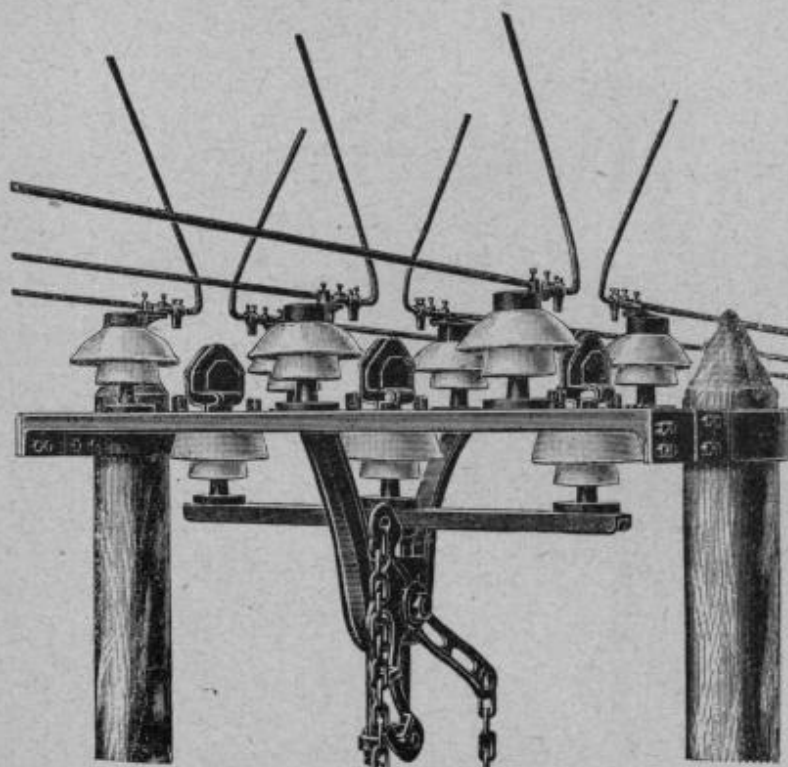


FIG. 1449. — Interrupteur pour ligne aérienne à haute tension.
(C^{ie} Védovéli et Priestley).

en série quand on ouvre ou ferme le circuit (il est bon d'éviter autant qu'on le peut les coupe-circuit fusibles) ou de limiteurs munis d'une forte résistance en série.

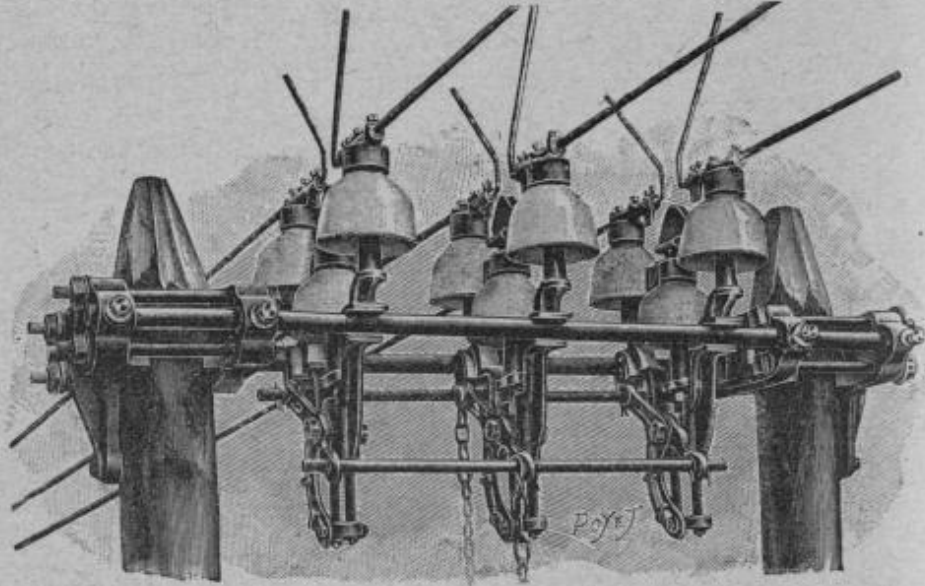


FIG. 1450. — Interrupteur pour ligne aérienne à haute tension.
(Coe Védovéli et Priestley).

Les interrupteurs doivent être étudiés non seulement pour qu'ils ne chauffent pas, mais aussi pour qu'ils absorbent le moins de watts possible

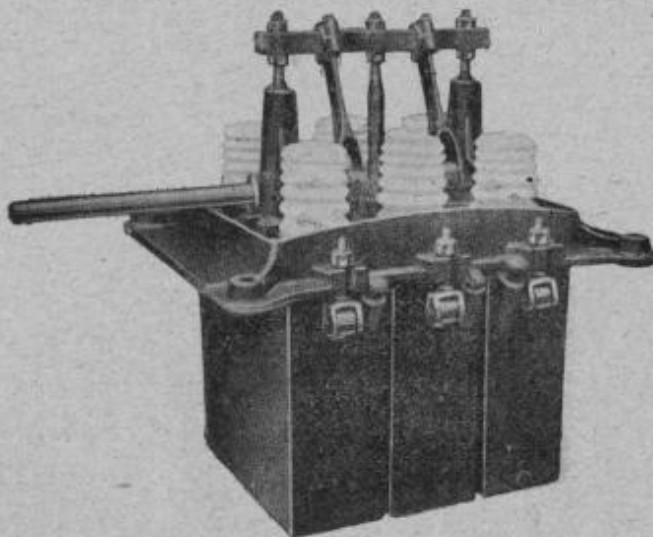


FIG. 1451. — Interrupteur à huile, à haute tension.
(Société Industrielle des Téléphones).

comme résistance intercalée dans le circuit. Un échauffement de 40° par exemple au-dessus de la température ambiante est d'ordre anormal. Pour le dimensionnement de ces appareils il faut surtout considérer l'intensité maxima de rupture, c'est-à-dire l'intensité qu'ils sont susceptibles de rompre même exceptionnellement.

Pour éviter les effets d'extra-courant à la fermeture ou à la rupture

brusque, la maison Védovelli et Priestley construit un type d'appareil qui coupe d'une manière relativement lente. Une cuve remplie d'eau d'abord, puis d'huile par-dessus, se déplace verticalement offrant au courant

une résistance qui va en diminuant au fur et à mesure de son ascension et le contact se produit au moment où la résistance est la plus faible ; à la rupture le phénomène se passe en sens inverse et la rupture est achevée par l'huile.

Les interrupteurs à haute tension sont actionnés à distance soit par l'intermédiaire de leviers isolés, soit au moyen de commandes électriques, hydrauliques ou pneumatiques.

Au point de vue de la commande mécanique des interrupteurs, on a été promptement conduit, pour les appareils destinés aux installations de

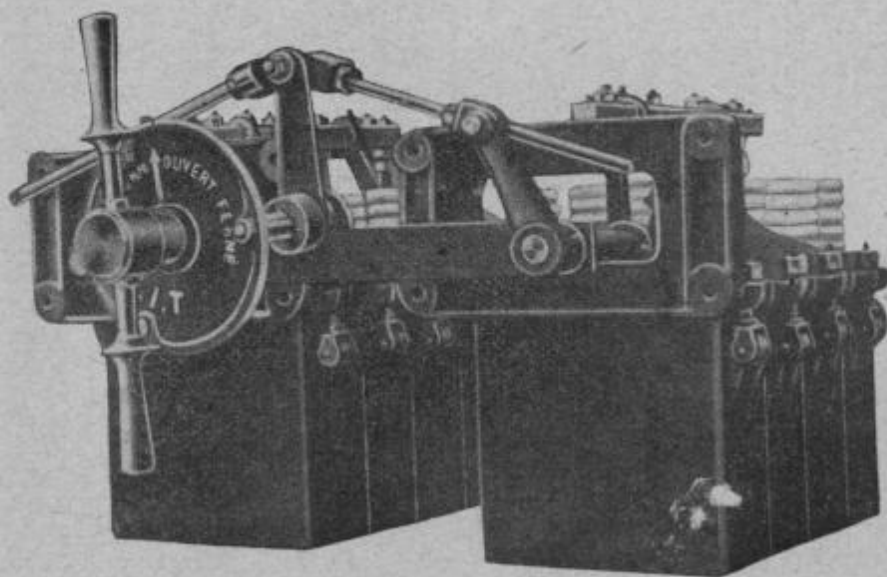


FIG. 1452. — Inverseur à haute tension. (Société Industrielle des Téléphones.)

transmission d'énergie, à des dimensions telles que l'actionnement à la main par levier simple est devenue difficile.

On fait usage de leviers spéciaux ou de commandes à manivelle ou à volant ; de plus, on a été obligé de placer le mécanisme derrière le tableau de distribution ou même à une certaine distance de celui-ci et le levier ou le volant de commande ne pouvant y être directement accouplé on intercale une transmission par chaîne, par câble ou plus fréquemment par tringles, cette dernière pouvant être employée pour des distances de 4 à 5 mètres.

Il existe une grande différence de prix entre les interrupteurs à commande à main et les interrupteurs automatiques. L'attaque à distance par solénoïde ou moteur se justifie par l'importance du poste et la puissance des divers circuits à commander.

Le principe général de la disposition automatique est le suivant : des transformateurs de courant sont placés sur des circuits qui pénètrent dans l'interrupteur, et les enroulements secondaires de ces transformateurs

est dégagée quand le noyau se soulève, ce qui a lieu quand l'on fait passer le courant continu dans l'enroulement de l'électro intéressé en déprimant le bouton de déclenchement. Enfin sur l'arbre est fixé un distributeur qui provoque l'allumage de l'une ou l'autre des deux lampes suivant la position de l'interrupteur.

La maison Siemens-Schuckert a réalisé les deux modes de commande

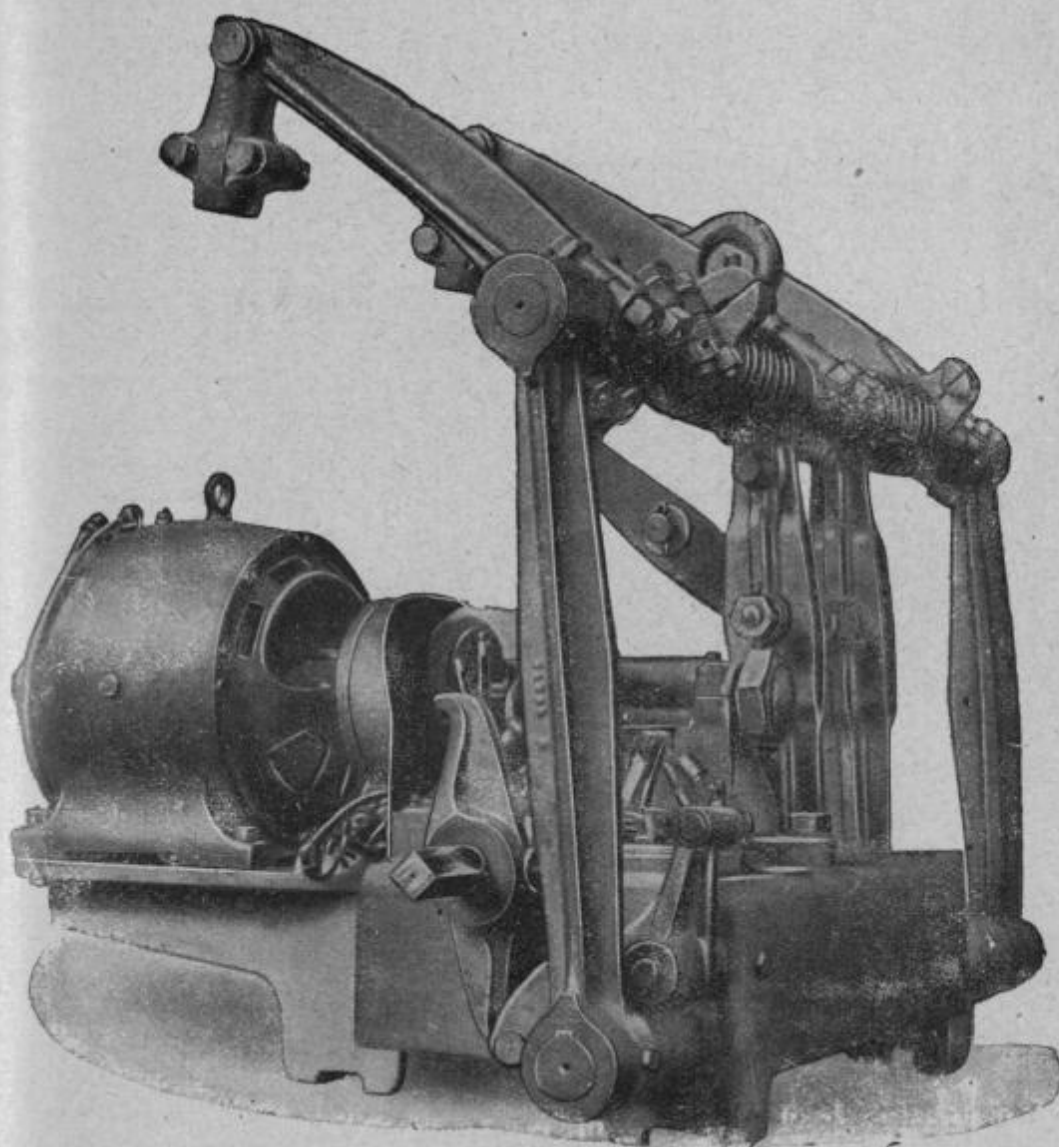


FIG. 1455.

électrique par électro-aimant et par électro-moteur, ce dernier susceptible de fonctionner en courant continu ou en courant alternatif. Le mouvement est transmis du moteur à l'interrupteur par une tige à glissière, et tout mouvement commencé doit s'achever complètement.

L'actionnement par moteur est aussi employé par la Société Thomson-Houston pour ses interrupteurs à 50.000-60.000 volts et pour plusieurs

milliers de kilowatts. Le moteur utilisé à cet effet est du type série à 110 volts, avec embrayage magnétique, agissant sur le mécanisme au moyen d'engrenages de réduction et d'un système de leviers articulés (fig. 1455).

Dans ce genre d'appareil on trouve : une séparation complète des trois phases ; une fermeture du circuit en quelques secondes, assurant une mise en parallèle parfaite ; une ouverture du circuit par rupture brusque dans l'huile en deux points par phase, sans amorçage d'arc nuisible ; une coupure automatique du courant en cas de surcharge et enfin une indication constante au tableau de l'état d'ouverture ou de fermeture de l'interrupteur. La commande à distance de l'engin se fait à l'aide d'un petit commutateur à double direction actionnant un relais magnétique dont le noyau fait fermer le circuit du moteur.

Pour obtenir plus de précision dans la commande à distance des moteurs électriques, la maison Siemens-Schuckert utilise, comme appareil émetteur, une génératrice dont l'induit, dit induit de commande, est tourné à la main et dont le champ est excité séparément ou par un aimant permanent. Le courant engendré par ledit induit est employé à gouverner le moteur électrique destiné à régler ou à commander les machines ou appareils.

La (fig. 1456) représente schématiquement cette disposition : *a* est l'induit de la génératrice et *b* le moteur électrique alimenté par lui, auquel

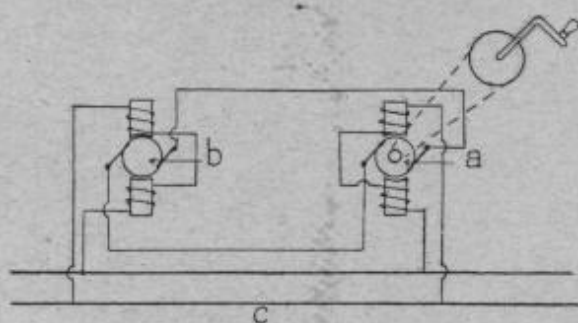


FIG. 1456.

sont reliés les machines et appareils à gouverner. Le courant employé à la commande se règle d'une manière très précise, grâce aux variations dans la vitesse de rotation de l'induit de commande ; en outre, l'arrivée du courant et par suite le mouvement du moteur s'arrêtent dès que l'in-

duit précité est au repos. Le sens de rotation de l'induit du moteur est simplement renversé en changeant celui de l'induit de commande.

Le dispositif de démarrage à distance de moteurs représenté par la (fig. 1457) est dû au D^r Lange, de Fribourg. En appuyant brièvement sur l'un des boutons *a*, ..., *a*³ on ouvre une soupape *b* commandée électromagnétiquement ou électromécaniquement par du courant à basse tension, et il passe de l'eau ou un autre liquide à travers le tube *c* et l'axe creux *d* du réservoir *e* dans ce dernier, le remplissant peu à peu et le rendant lourd. On déplace aussi lentement par l'intermédiaire du galet *f* et de la tige de traction *g* le levier *h* du démarreur *i* sur ses contacts

et en même temps on bande le ressort k , de sorte que le moteur démarre.

Avant que le réservoir e atteigne sa position la plus basse, le prolongement l qu'il porte vient buter sur l'arrêt o et soulève aussi le marteau m du levier coudé n . En continuant à descendre, l'arrêt o glisse le long du nez l , le marteau m retombe et donne un choc bref sur le ressort supérieur de contact p du contact q .

On ferme ainsi à nouveau le courant et la soupape b est déplacée de telle sorte que l'arrivée du liquide s'arrête.

Si l'on veut arrêter le moteur, on appuie à nouveau sur l'un des boutons a ,, a^3 . A ce moment le liquide s'écoule à nouveau dans le réservoir e et le fait passer, comme il peut tourner autour de l'axe d et possède à gauche une partie permettant le passage du liquide, de l'équilibre stable à la position d'équilibre instable. Enfin, sous la répartition inégale de la charge, il bascule et tout le contenu du réservoir se déverse brusquement dans un échappement et le ressort k ramène vivement le levier h ainsi que le réservoir vide e à sa position primitive.

Lorsque le récipient e est ramené, on ferme à nouveau, pour arrêter l'arrivée du liquide, par le marteau onm , qui est à son tour actionné par la butée qui remonte le circuit pour le dispositif électromagnétique d'arrêt b sur les contacts q .

Des précautions dans le genre de celles prises à l'usine hydroélectrique d'Entraygues aident beaucoup à assurer la bonne marche d'une usine.

La mise en mouvement du moteur électrique commandant les interrupteurs tripolaires à haute tension (28.000 volts) est faite du tableau même par un commutateur à deux directions qui détermine simultanément l'allumage d'une lampe — indiquant si l'interrupteur est à position d'ouverture — et le fonctionnement d'un électro-aimant qui lance en même temps le courant dans le moteur, déclenche l'arbre de transmission actionnant l'interrupteur et le laisse libre d'obéir à l'action du ressort d'ouverture ou de fermeture. Dès que le mouvement de cet arbre est commencé, le circuit du moteur se trouve fermé par des contacts à cornes

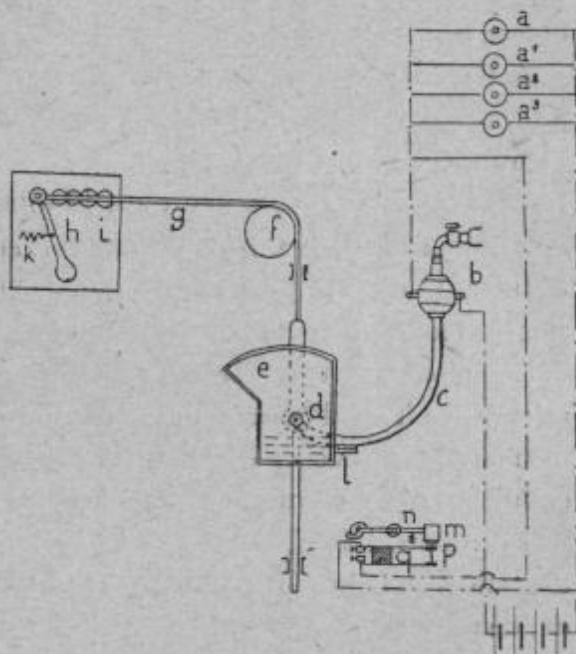


FIG. 1457.

dépendant de celui-là, puis ouvert à nouveau quand l'interrupteur est arrivé à fond de course. Enfin, pour rendre l'arrêt plus rapide, on fait usage d'un embrayage magnétique dans lequel le courant est lancé ou coupé en même temps que dans l'induit.

Les interrupteurs tripolaires dont nous venons de parler sont, en outre, munis d'un relais à action différée pour le déclenchement automatique en cas de surcharge.

A Gromo, les interrupteurs à 14.000 volts sont manœuvrés à distance en fonctionnement normal, et le courant est coupé six fois pour chaque conducteur, donnant une longueur totale d'interruption de 35 centimètres qui a d'ailleurs lieu dans l'huile. Un arbre de manœuvre, qui est commun aux trois interrupteurs (un sur chaque phase), commande ces derniers par l'interposition de roues dentées et de chaînes. Cet arbre est mis en mouvement du tableau par un volant de manœuvre.

Les interrupteurs à très haute tension construits par la Société industrielle des Téléphones comportent autant de bacs que de pôles, et ces derniers sont revêtus intérieurement de garnitures isolantes. La rupture se fait en deux points sur chaque pôle. Les pièces de contact, supportées par des porcelaines, sont scellées au plomb et, par suite, ne peuvent être descellées par l'huile chaude. Ces appareils sont disposés pour être munis de dispositifs de déclenchement, avec ou sans retardateurs.

Le déclenchement est produit par une ou plusieurs bobines branchées sur deux transformateurs d'intensité, et le noyau de ces bobines agit directement par choc sur les organes de déclenchement. Les retardateurs réglables se composent essentiellement d'un dash-pot à huile dont le mouvement est transmis, par un système de bielles et de leviers démultiplicateurs, à un crochet qui retient le noyau de la bobine de déclenchement et ne le lâche qu'au bout d'un certain temps à peu près indépendant de l'intensité de la surcharge. On peut régler la durée de l'accrochage, c'est-à-dire le retard, de 0 à 15 secondes.

La Société Westinghouse établit des interrupteurs à huile pour tensions de 60.000 à 80.000 volts avec intensités de 50 à 200 ampères. La distance verticale entre les contacts fixes et ceux mobiles, dans la position d'ouverture est de 45 centimètres environ pour les appareils de 60.000 volts et de 50 pour ceux à 80.000 volts ; la distance de rupture est donc de 90 et de 100 centimètres.

Les interrupteurs à huile à haute tension sont du type à couteaux, d'une construction très robuste. Les couteaux qui forment les contacts fixes sont entièrement plongés dans l'huile ; des pièces de bois spécialement traité transmettent aux contacts mobiles les manœuvres de fermeture ou d'ouverture de circuit, exécutées sur la manette isolante placée en avant du tableau de distribution. Les ruptures se font, pour

chacun des pôles, dans l'huile et dans des espaces séparés par des cloisons isolantes.

Les capacités maxima de rupture pour ces appareils sont : type monophasé, 5.000 k. v. a. ; type diphasé, 10.000 k. v. a. ; type triphasé, 8.500 k. v. a.

Les boîtes à huile sont en tôle garnie de bois dur et chaque boîte est divisée en deux compartiments, antérieur et postérieur, par une cloison mobile. Les isolateurs sont à même de supporter des tensions doubles des tensions normales. Le solénoïde agissant sur le mécanisme est fixé à la partie supérieure de l'appareil et son fonctionnement est contrôlé par un commutateur spécial.

Dans les appareils construits par la maison Siemens-Schuckert, à partir de 15.000 volts, il y a quatre points de rupture par pôle et par suite la dimension des interrupteurs, en hauteur, est relativement réduite.

L'A. E. G., contrairement à ce qui a lieu dans les appareils Westinghouse et Siemens-Schuckert, établit les éléments des interrupteurs multipolaires, non séparés les uns des autres ; les barres portant les contacts mobiles sont en conséquence montées toutes sur une même traverse, laquelle peut recevoir un mouvement ascensionnel par l'intermédiaire d'une vis sans fin ; selon le cas, celle-ci est actionnée à la main, au moyen d'un volant, ou par l'intermédiaire d'une transmission par chaîne ou par câble, au moyen d'une poignée double amovible. Parfois les ruptures sont enfermées dans un manchon isolant destiné à assurer un mélange plus parfait de l'huile par le mouvement des pièces de contact même.

La Cie Oerlikon, pour ses appareils à haute tension, loge chaque coupure dans une boîte métallique remplie d'huile et isolée des châssis par un cylindre en porcelaine dimensionné également suivant la tension.

Dans les appareils Kelman, le déplacement des contacts s'effectue horizontalement, et comme les trois quarts environ de l'huile sont au-dessus de ces ruptures, l'extinction de l'arc est assurée de la façon la plus sûre et la plus rapide. De plus, il n'y a pas de projections d'huile et pas de danger de rupture avec son explosion. Les cuves sont en tôle galvanisée ; elles sont reliées à la terre et on ne leur donne un revêtement isolant qu'à partir de 75.000 volts. Ainsi avec ce système, on voit que l'inventeur a préféré employer une plus grande quantité d'huile plutôt que de recourir à l'usage d'un revêtement protecteur. A titre indicatif, il est bon de retenir que la fermeture est généralement produite par un électro-aimant absorbant 2.000 watts approximativement ; l'ouverture se fait automa-

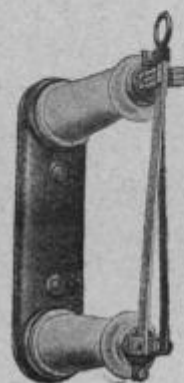


FIG. 1458. — Interrupteur sectionneur. (Société l'Éclairage Électrique).

tiquement, sous l'effet de ressorts agissant sur les tiges des parallé-

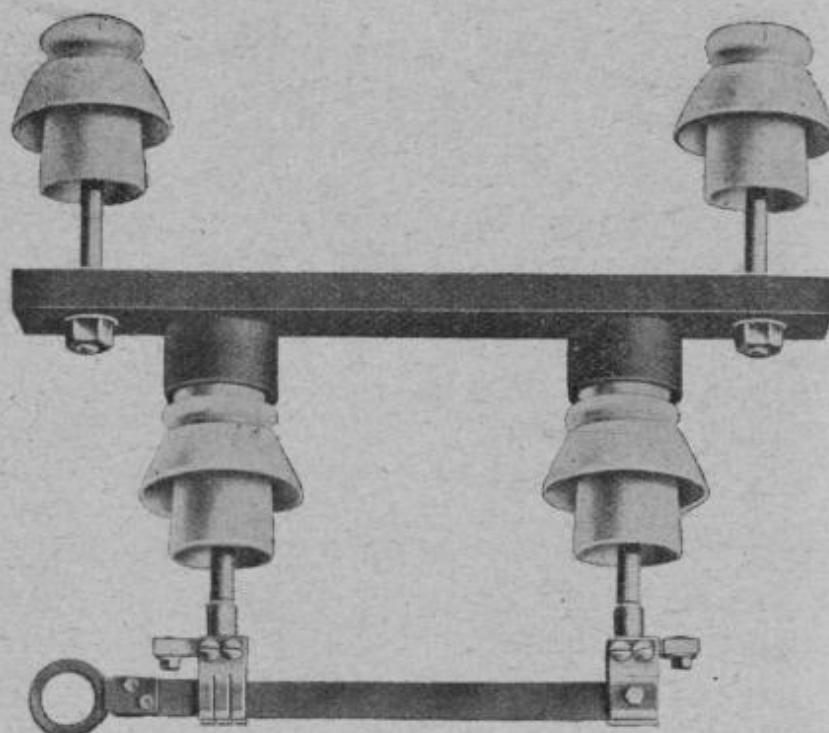


FIG. 1459. — Interrupteur sectionneur aérien à haute tension avec isolateur d'arrêt.

grammes, quand le déclenchement a fonctionné; cet électro absorbe 300 watts.

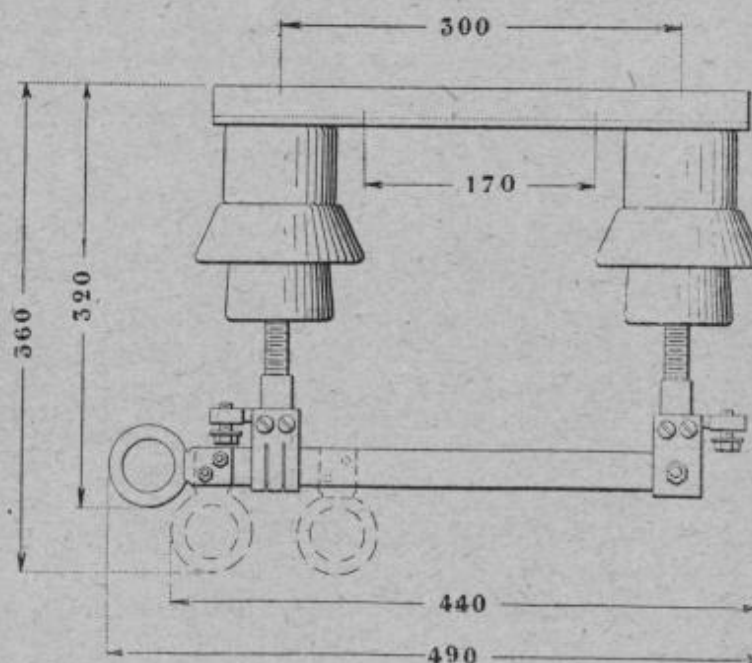


FIG. 1460. — Interrupteur sectionneur aérien à haute tension avec isolateur d'arrêt.

Les interrupteurs à chariot construits par Felten et Guillaume peuvent

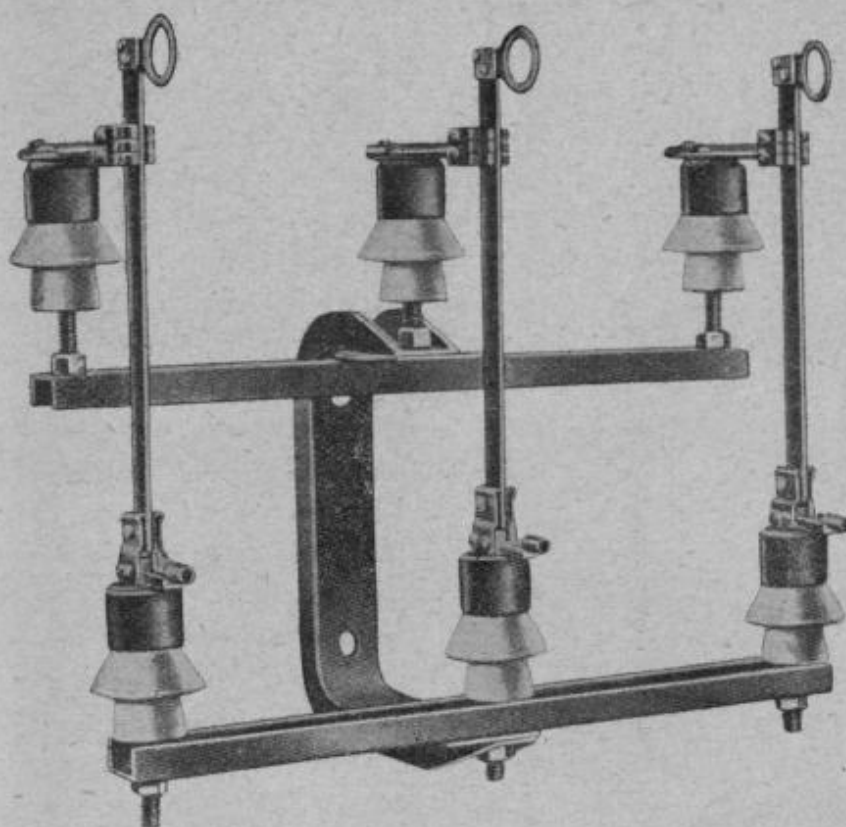


FIG. 1461. — Interrupteur sectionneur tripolaire pour extérieur, 6.000 volts.
(Maljournal et Bourron).

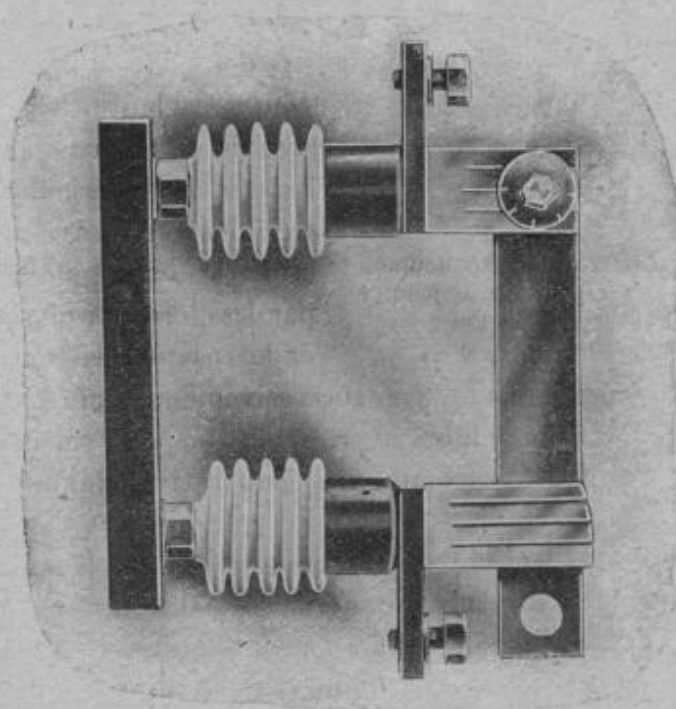


FIG. 1462. — Interrupteur sectionneur pour 500 ampères, 6.000 volts.
(Maljournal et Bourron).

être utilisés dans les installations où on ne dispose pas de la place suffisante pour réaliser le montage en cellules. Dans ce système, chaque groupe d'appareils est installé sur un bâti en fer mobile, qui peut, par

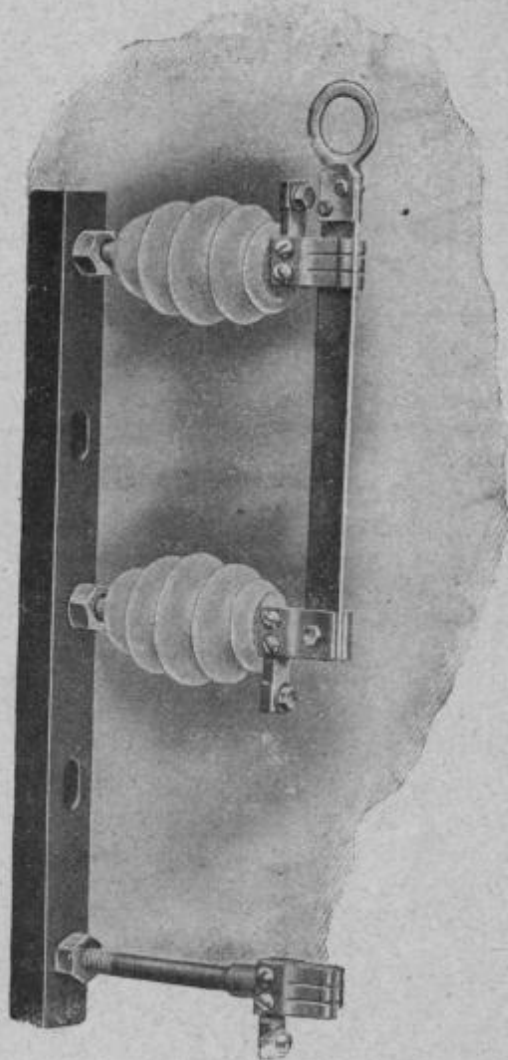


FIG. 1463. — Interrupteur sectionneur avec chape de mise à la terre jusqu'à 26.000 volts. (Maljournal et Bourron.)

simple roulement, être retiré du tableau. Au point de vue de la sécurité du personnel, le système donne toute garantie, puisque l'on retire des canalisations l'ensemble des appareils formant le groupe, auquel on veut travailler. En cas d'avarie, on n'a qu'à procéder à un remplacement par chariotement. Il dispense de l'interrupteur séparateur aux barres omnibus. La façade du tableau est formée extérieurement d'un revêtement en tôle robuste, qui porte les appareils usuels de mesure, ainsi que les poignées des interrupteurs. Le coffre est divisé en trois parties : la supérieure, fixe ; la moyenne, mobile avec le chariot ; l'inférieure donne accès à la partie basse du chariot. Celui-ci forme une chambre qui est partagée en deux compartiments par une plaque isolante. Le compartiment supérieur contient les barres collectrices ; l'inférieur constitue la case des appareils proprement dite et il est séparé des cases voisines par des cloisons isolantes. Les portes de la case ne peuvent être ouvertes

que si les interrupteurs ont été successivement manœuvrés. Réciproquement, les portes une fois ouvertes, on ne peut refermer les interrupteurs. Ce système de commande impérative donne une sécurité complète.

Sectionneurs. — L'emploi de ces appareils, dont la construction est identique à celle des interrupteurs aériens à haute tension est particulièrement indiqué aux passages d'aérien en souterrain, aux traverses de voies ferrées ou routes de grande communication, aux abords des postes et des stations centrales. Ils sont exigés à l'entrée et à la sortie de chaque agglomération, à l'origine de toute dérivation.

Ils ne sont appelés à rompre en charge qu'exceptionnellement, mais doivent néanmoins être toujours prêts à fonctionner en pleine sécurité.

Ces appareils ont principalement pour but de pouvoir visiter ou de retirer du circuit, souvent sans interrompre le service normal, toutes les unités ou appareils susceptibles de se détériorer sous l'effet des décharges atmosphériques, de surtensions ou toute autre cause. Ces interrupteurs doivent pouvoir supporter l'intensité normale de la ligne ou de la dérivation sur laquelle ils sont branchés ; mais il est bon de ne s'en servir que pour couper à vide et sous la tension pour laquelle les appareils ont été construits.

Parmi les types de sectionneurs les plus couramment employés, la préférence doit être donnée à ceux qui sont montés sur une base métallique rigide supportant les isolateurs. Grâce à cette base, qui maintient l'exactitude du montage, on peut n'effectuer la fixation de l'appareil qu'après achèvement des maçonneries, ce qui facilite les démontages et écarte tout danger de ruptures.

Une disposition simple permettant d'éviter les avaries de montage est figurée (fig. 1464). Les cellules destinées à recevoir ces sectionneurs ont des dimensions telles que leur hauteur soit légèrement supérieure à celle des bases qu'elles sont destinées à recevoir ; leur largeur est inférieure de 50 millimètres environ à celle des bases qui, par conséquent, les recouvre de 25 millimètres de chaque côté.

Dans ces conditions, les sectionneurs sont montés après achèvement des cloisonnements et fixés par des cales en bois ultérieurement enduites de ciment.

Les sectionneurs pour barres omnibus sont généralement disposés dans le sens des barres qu'ils servent à jonctionner. Lorsque la section de ces barres le permet, on simplifie la construction en utilisant leurs extrémités libres comme parties constitutives de l'interrupteur. Dans ce cas, on prend soin de renforcer les supports de barres, afin que les efforts résultant de la manœuvre des appareils ne puissent les fausser ni les dérégler. Si la section des barres ne permet pas d'adopter cette disposition, on choisit des interrupteurs

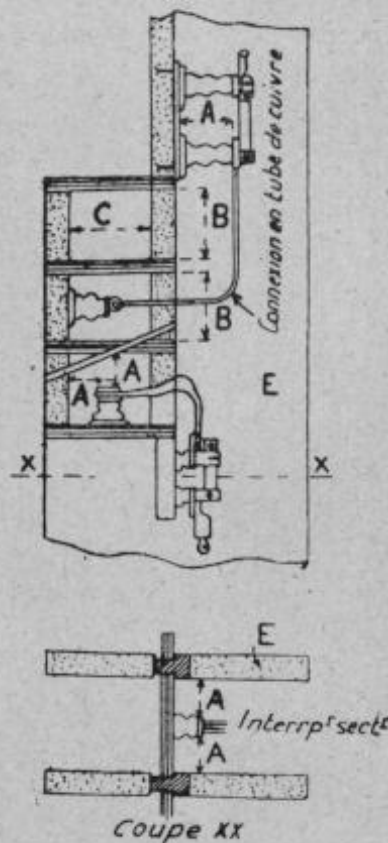


FIG. 1464. — Section d'une cellule pour barres omnibus :

LTS	COTE A	COTE B	COTE C
15.000	90mm	320mm	350mm
22.000	150	480	480
35.000	250	625	625
45.000	350	850	850
70.000	430	1.140	1.140
90.000	690	1.425	1.425
110.000	840	1.800	1.800

d'un type analogue aux sectionneurs de circuit, leur base prenant appui sur le mur arrière, à l'intérieur du compartiment. Quel que soit le type d'appareil et de montage employés, il convient de tenir compte des distances entre les sectionneurs et la masse dans leurs positions d'ouverture et de fermeture.

Les interrupteurs à huile, employés en conjugaison avec les couteaux

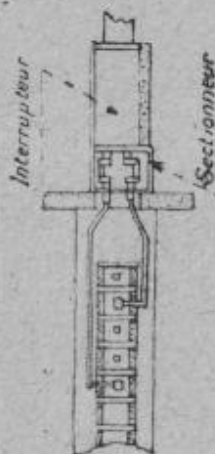


FIG. 1465. — Disposition de sectionneurs montés entre cloisons au-dessous des interrupteurs à huile.

destinés à isoler des barres ou des circuits d'utilisation, font l'objet d'un grand nombre de combinaisons. On se préoccupera dans tous les cas, de donner aux sectionneurs un emplacement permettant de reconnaître, avant la manœuvre, la position d'ouverture de l'interrupteur à huile auquel ils sont conjugués. C'est pourquoi, dans le cas où les barres omnibus occupent l'étage immédiatement inférieur à celui sur lequel reposent les interrupteurs à huile, les maçonneries supports sont, de préférence, disposées de façon à ménager, au-dessous de ces derniers, une cellule qui sera réservée aux couteaux d'isolement. La (fig. 1465) montre l'application de cette disposition dans l'hypothèse d'un sectionnement de barres par interrupteur à huile.

On notera enfin que si le local affecté à l'aménagement des barres omnibus est également utilisé pour l'installation d'un matériel nécessitant de fréquentes visites, il sera judicieux de prévoir, entre les cloisons, des panneaux de fermeture protégeant le matériel à haute tension contre tout contact accidentel.

551. Relais automatiques. — Il est rare que les dispositifs de déclenchement agissent directement sur les interrupteurs ; d'autre part, l'introduction de courants à haute tension dans un système d'électro-aimants montés sur l'interrupteur n'est pas sans danger ; enfin, il est désirable que le dispositif automatique soit placé visible à l'avant du tableau dont les appareils à haute tension sont écartés. Dans ces conditions, il est nécessaire de recourir à l'intermédiaire de relais et à l'interrupteur n'est plus adaptée qu'une bobine de déclenchement actionnée par une source de courant spéciale contrôlée par le relais.

Dans ces appareils auxiliaires des interrupteurs, le fonctionnement du dispositif provoquant le déclenchement peut se produire aussitôt que l'état dangereux auquel on veut remédier est atteint ou après un certain temps, l'action étant alors différée. Ces derniers appareils, qui sont les plus importants, n'ouvrent le circuit qu'au bout d'un temps déterminé,

lorsque la surcharge est nettement caractérisée et de nature à devenir dangereuse pour le matériel. En cas de court-circuit en particulier la rupture est immédiate. On établit ces appareils suivant les divers phénomènes accidentels : surcharges, courants de retour, tension nulle des courants alternatifs.

Ils se divisent de la façon suivante : relais instantanés à maxima et à retour de courant ; relais temporisés à retard variable avec la charge ; relais à maxima ou ampèremétriques ; relais à retour d'énergie ou wattmétriques ; relais temporisés ou à retard constant et relais de blocage. Ces derniers qui sont destinés à empêcher le déclenchement du disjoncteur auquel il est appliqué lorsqu'il se produit une surcharge accidentelle supérieure à celle que le disjoncteur peut couper sans danger, exige l'emploi d'un autre disjoncteur de dimensions plus considérables interposé entre la source et le disjoncteur que l'on bloque.

Le principe de l'action différée est résolu de différentes façons : fil chaud, mouvement d'horlogerie, piston de graphite se déplaçant dans un tube fermé contenant une huile spéciale, solénoïde dont le noyau presse une boîte à air, solénoïde soumis à l'effet amortisseur d'un dash-pot à deux liquides, dispositif électro-magnétique sans dash-pot, dispositif basé sur le phénomène de la tension superficielle.

Règles pour la construction et les essais des interrupteurs à haute tension.

— On peut avancer que la construction des interrupteurs n'a pas été améliorée parallèlement au reste du matériel des installations génératrices, où en peu de temps les groupes électrogènes ont passé de 5.000 à 20.000 kilowatts, et avec des générateurs actionnés par turbines à vapeur les intensités de court-circuit sont considérables.

Les interrupteurs pour grandes puissances employés dans les réseaux à haut voltage ont communément exigé jusqu'ici une surveillance suivie, des soins au mécanisme, des essais périodiques, un entretien fréquent ; il n'y a guère d'interrupteur qui puisse couper sans dommage un courant de court-circuit dans les grandes installations actuelles, avec la puissance en récepteurs considérable qu'elles comportent. Les contacts sont presque toujours fortement détériorés, une partie de l'huile est chassée des cylindres, le bain est carbonisé, etc. ; souvent la remise en état de l'appareil demande une ou deux heures.

Les principaux perfectionnements récemment introduits pour remédier à ces inconvénients ont consisté à remplacer les récipients de laiton par des récipients en acier, à améliorer le mécanisme et les contacts, à faciliter l'arrivée de l'huile, etc.

Il apparaît donc que cette branche de l'industrie électrique doive, pour les perfectionnements souhaités, recevoir une impulsion qui, pour être efficace, devrait être basée sur des règles que constructeurs et exploitants

pourraient établir dans des accords communs à la suite de discussions techniques résultant des enseignements de l'expérience.

A ce sujet nous sommes heureux de signaler la magistrale étude de M. Charpentier parue dans la *Revue électrique*, tome XXI, que nous résumons aussi brièvement que possible.

Conditions de sécurité statique. — Pour les interrupteurs et disjoncteurs à huile on doit prévoir un isolement convenable des bornes extérieures, des conducteurs qui traversent le bâti, des contacts fixes et mobiles qui se trouvent dans l'huile. Pour les parties conductrices dans l'air, par suite des mises à la terre possibles, on doit prévoir le même isolement, par phases différentes, entre parties d'une même phase pouvant être séparées par l'interruption entre les phases et la masse à la terre.

Si E est la tension maxima de service et E_1 la tension de rupture dans l'air entre deux parties conductrices, le coefficient de sécurité correspondant sera :

$$m = \frac{E_1}{E}.$$

On peut prendre E_1 comme tension pour les essais à faire aux lieux d'utilisation. Cette tension pourra être prise un peu supérieure aux plus fortes tensions prévues sur le réseau avec une durée de une minute.

Pour les essais en ateliers, les coefficients de sécurité pour les ruptures d'isolement qui peuvent se produire en d'autres points qu'à la surface des isolateurs doivent être logiquement plus élevés que le coefficient m .

On doit plutôt prendre, comme tension de rupture dans l'air, celle qui correspond à l'apparition de toute décharge, par effluve, par auréole, par aigrettes, qui, par l'échauffement qu'elles produisent à la surface des isolants, peuvent en compromettre les qualités diélectriques. Si des essais conduits dans ce sens conduisent à un coefficient m_1 , l'écart entre m et m_1 définira la bonne tenue des isolants lors d'un essai de vérification du coefficient m ou de surtensions du même ordre.

La règle, de compter, à partir de 24.000 volts, les tensions d'essais au double des tensions nominales peut être employée pour les disjoncteurs à huile.

Conditions de sécurité à l'interruption. — Les conditions les plus sévères du fonctionnement d'un interrupteur à huile sont celles des courts-circuits qu'ils doivent couper à la centrale ou sur le réseau. Par suite, il importe d'être renseigné, dans chaque cas, sur l'allure des courts-circuits qu'un appareil devra couper et sur l'intervalle de temps qui s'écoule entre la naissance du court-circuit et la séparation des contacts.

En général un disjoncteur fonctionne d'une manière satisfaisante s'il est capable d'effectuer l'interruption sous la plus forte intensité qui puisse se présenter au moment de la séparation des contacts, sans être

mis hors de service ; le minimum que l'on puisse exiger est qu'on puisse refermer le disjoncteur aussitôt, afin que si le court-circuit persiste, le déclenchement et l'interruption s'effectuent à nouveau sans accident dans l'appareil lui-même. Une durée exagérée des arcs est un critérium d'une construction défectueuse à laquelle il y a lieu de porter remède par l'examen des facteurs dont dépendent l'importance et la durée de ces arcs. Pour l'interruption des courts-circuits on a tout intérêt à réaliser la rupture de l'arc aussitôt que possible, c'est-à-dire au passage du courant par le zéro qui suit la séparation des contacts. L'arc, dans ce cas, se réamorçera assez facilement et il suffit pour cela d'une faible différence de potentiel entre les contacts. D'ailleurs il semble qu'il n'y a pas grand intérêt à accroître la vitesse des contacts à la séparation, ce qui allonge inutilement un arc très conducteur et tend à renforcer l'action calorifique.

Au contraire dès le passage au premier zéro, la vitesse de séparation doit être la plus grande possible.

La rupture de l'arc au bout de la demi-période qui suit la séparation des contacts doit rester un critérium d'une bonne construction, et un court-circuit d'intensité quelconque n'occasionnera pas de dégâts s'il est coupé dans ces conditions.

Pour obtenir une rupture rapide des arcs, on cherche à refroidir énergiquement les contacts et à allonger le plus possible l'arc après la rupture, ce qui conduit à adopter de bons métaux conducteurs et des surfaces de refroidissement aussi grandes que possible pour les contacts, ainsi que des vitesses croissant avec l'intensité du courant à interrompre. Les ruptures multiples sont une bonne adaptation de ces principes. Il conviendrait de déterminer par l'expérience la relation existant entre la longueur des arcs et l'intensité du courant pour obtenir la rupture au plus tard au deuxième zéro qui suit la séparation des contacts. On en déduirait la valeur de cette dernière en fonction de l'intensité du court-circuit et de la fréquence.

La tension de service et l'intensité de l'interruption sont des données de construction essentielles ; elles définissent chacune des conditions particulières. En résumé, la spécification des interrupteurs et disjoncteurs à huile peut être considérée comme suffisamment complète si l'on y comprend :

- 1° La tension d'exploitation au lieu d'utilisation ;
- 2° Les coefficients de sécurité m et m_1 , c'est-à-dire les rapports des tensions des décharges extérieures et des tensions disruptives des matériaux, à la tension d'exploitation ;
- 3° L'intensité maxima d'interruption, c'est-à-dire celle du courant le plus fort qui puisse se présenter dans l'appareil au moment de son fonctionnement ;

4° La fréquence qui intervient nécessairement si l'on fixe la durée d'interruption à une période maximum ;

5° L'intensité normale de régime.

L'intensité maxima d'interruption est une donnée à fournir par l'exploitant du réseau. Si l'on admet que l'interruption ait lieu en régime permanent du court-circuit, c'est cette intensité de régime qui définira l'intensité d'interruption maxima.

Pour des interrupteurs de station, elle sera déterminée par la totalité du courant de court-circuit fourni par les génératrices susceptibles de fonctionner à la fois.

Si l'on ne dispose d'aucune indication sur la valeur de ces courts-circuits, on pourra admettre que le courant de court-circuit est de 3 à 5 fois le courant normal, suivant qu'on a affaire à des génératrices à forte ou faible réaction d'induit.

S'il s'agit d'appareils de postes ou de lignes, il faudra, pour évaluer le court-circuit, faire intervenir la chute de tension dans les transformateurs ou dans la ligne en observant que là, les chutes en ligne sont en quadrature avec celles dues à la réactance des génératrices.

Pour l'établissement des séries de construction, ces intensités maxima d'interruption serviront de base aux subdivisions des séries de tensions ; dans chacune desquelles on pourra comprendre des appareils de 1.000, 2.000, 5.000, 10.000, 15.000 et 20.000 ampères. Si l'on s'impose la condition de couper les arcs dans l'intervalle maximum d'une période, ces intensités n'auront qu'une influence restreinte sur le volume d'huile. Ce sont les masses des contacts, les vitesses et les distances d'interruption, la multiplicité des ruptures qui interviendront principalement.

Pour la netteté des conventions, les appareils devraient porter les indications ayant trait à la tension et l'intensité de série, à la fréquence et aux tensions d'essais définis comme il a été dit, ces dernières pouvant être remplacées par les coefficients de sécurité m et m_1 .

Dispositif Mario Buffa. — Il a pour but de provoquer l'ouverture de l'interrupteur automatique placé à l'origine de la ligne à haute tension chaque fois qu'un fil de cette ligne se brise ou vient en contact, soit direct, soit indirect avec la terre ou avec des lignes à basse tension, pourvu que ces lignes aient un point neutre mis à la terre directement ou par l'intermédiaire d'un limiteur de tension.

Le dispositif est représenté par la (fig. 1466). Sur les barres omnibus on dérive trois bobines de self identiques formant une étoile, dont le centre est lié à la plaque de terre ; un petit transformateur triphasé sans circuit secondaire peut être utilisé dans ce but. D'une manière analogue on met à la terre le centre d'une étoile semblable placée à la fin de la ligne.

En série sur les trois fils de ligne, on dispose trois bobines, placées

sur un même noyau magnétique (transformateur symétrique) et sur le même noyau est monté un circuit secondaire qui peut alimenter, soit un relais de déclenchement pour l'interrupteur automatique, soit des signaux optiques ou acoustiques.

Dans les conditions normales de la ligne, la somme des trois courants circulant dans les bobines primaires du transformateur symétrique est nulle; les centres sont pratiquement au même potentiel zéro et il n'y aura pas entre eux de circulation de courant. Mais si un conducteur vient à se briser, la plaque prend un potentiel qui est la moyenne des potentiels des deux conducteurs non brisés dans les points de dérivation.

Il est bon de régler toujours le relais sur place de manière

que l'interrupteur soit appelé à fonctionner toutes les fois qu'un homme de résistance très faible (5.000 ohms), en touchant les objets qui sont en contact avec un conducteur (poteaux, filets, arbres, lignes à basse tension, etc.) pourrait recevoir un courant supérieur à un dixième d'ampère.

L'électricité atmosphérique ainsi que les décharges oscillatoires sont sans influence sur cet appareil.

Enfin on construit des relais à action différée sans amortisseur. Les firmes Brown-Boveri, Alioth, l'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft établissent ces appareils avec moteurs électriques à induction.

Le courant est toujours soumis à l'action du courant d'intensité normale par l'intermédiaire d'un transformateur donnant, de même que dans l'ampèremètre, un courant de très faible tension, de sorte que le relais s'installe sur les tableaux de manœuvre, où il peut être observé et réglé à l'aise, tandis que le transformateur et l'interrupteur ou disjoncteur munis de leur bobine de déclenchement sont éloignés du tableau de manœuvre. Le déclenchement s'opère électriquement à distance soit par un courant continu fourni par une source spéciale, soit par le courant alternatif lui-même, direct ou transformé, suivant sa tension. Il y a aussi des relais à déclenchement mécanique, mais ils sont moins sensibles que ceux à action électrique.

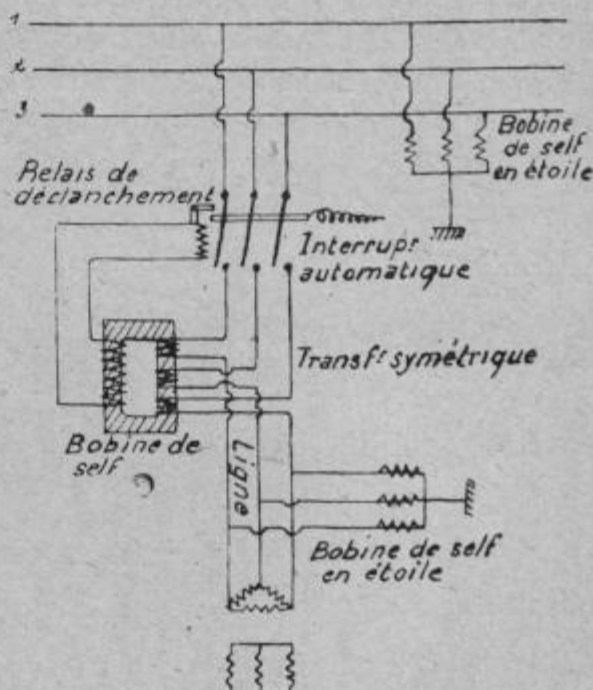


FIG. 1466.

Cependant la firme Brown-Boveri emploie avec succès un relais mécanique qui déclenche directement l'interrupteur. Cet appareil est réglé de façon à ne provoquer le déclenchement que lorsque l'intensité atteint 1,5 fois la valeur du courant normal pendant plus de 30 secondes ou 2,5 fois cette valeur pendant 5 secondes.

Le fonctionnement des interrupteurs n'a lieu qu'après un temps va-

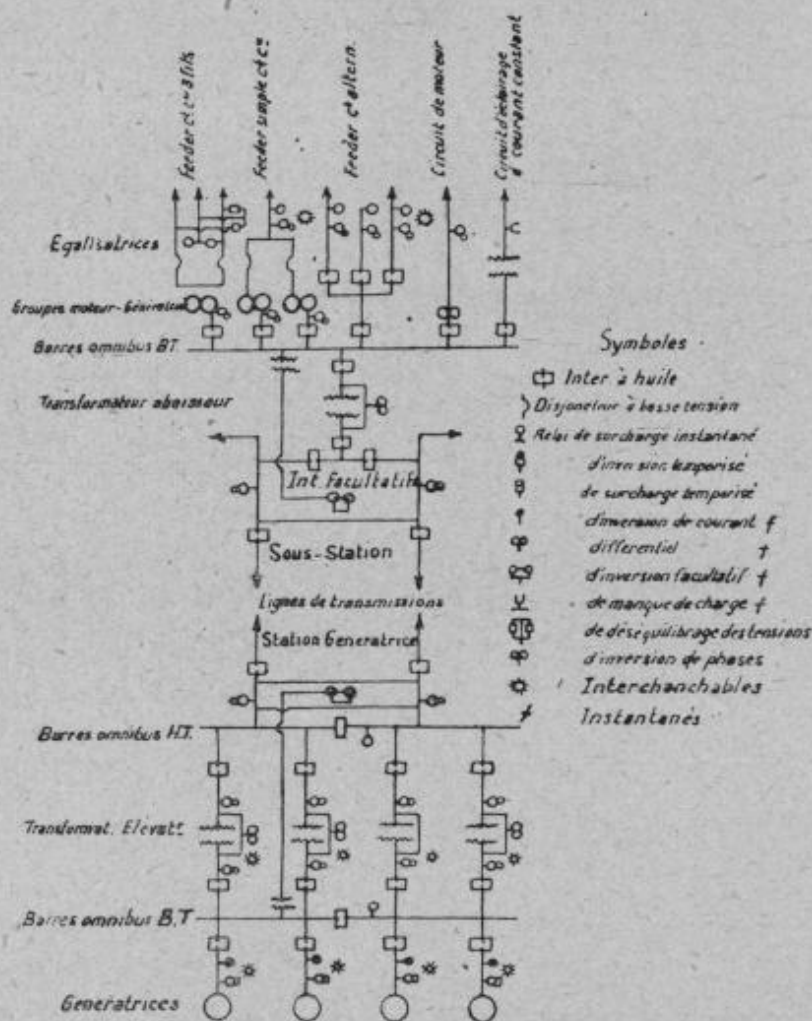


FIG. 1467. — Schéma général de montage de relais sur un fil d'une distribution triphasée, montrant l'emploi judicieux des diverses sortes d'appareils.

riable avec la valeur de la surcharge, par exemple 15'' pour 50 0/0 de la surcharge, 10'' pour 160 0/0, 3,5'' pour 200 0/0 et 2'' pour 600 0/0.

Les courbes des (fig. 1468 et 1469) montrent le fonctionnement de trois relais à action différée, construits par la maison Siemens et Halske, prévus pour des retards, de 25 secondes au maximum pour le premier réglé à 25 secondes, de 25 secondes au maximum également pour le second réglé à 12,5 secondes et enfin de 8 secondes au maximum pour le dernier

réglé une fois à 8 secondes et une autre fois à 4 secondes. Par la création de ces types on a pu conserver aux relais à temps leur action sélective même dans les cas de très forts courts-circuits, tout en faisant dépendre le temps de rupture de l'intensité du courant ; qualité que ne possèdent plus les relais indépendants de la charge. Ces courbes montrent que le temps de rupture du relais réglé à 25 secondes est en retard de 2 secondes, même dans le cas de très grande surcharge, sur celui réglé à 12,5 secondes qui, à son tour, ne déclenche que 2 secondes après le troisième, réglé à 4 secondes. De tels décalages sont, dans tous les cas, suffisants pour permettre au premier appareil actionné d'exécuter complètement

son mouvement de rupture avant que la bobine du déclencheur suivant

ne soit excitée par le contact du relais à temps correspondant.

La sûreté de ce fonctionnement rend possible le couplage de ces relais par trois en série, sans craindre un départ intempestif de l'un d'eux, c'est-à-dire dans un ordre différent de celui qui lui est assigné. On peut donc,

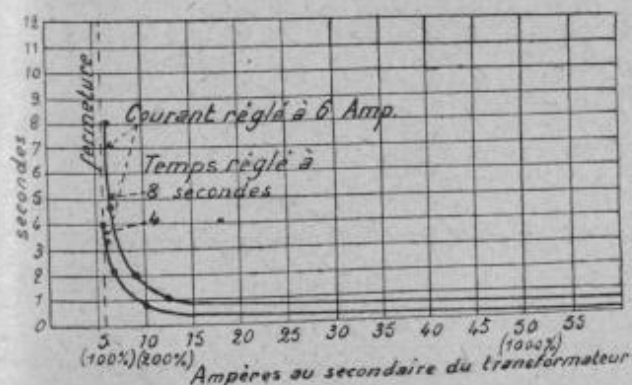


FIG. 1469.

lorsque des génératrices travaillent en parallèle sur les barres omnibus d'un réseau, éviter que la perturbation résultant d'un court-circuit sur

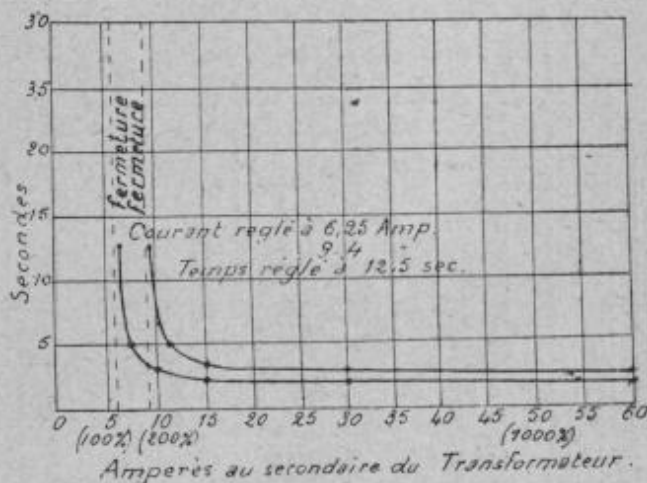
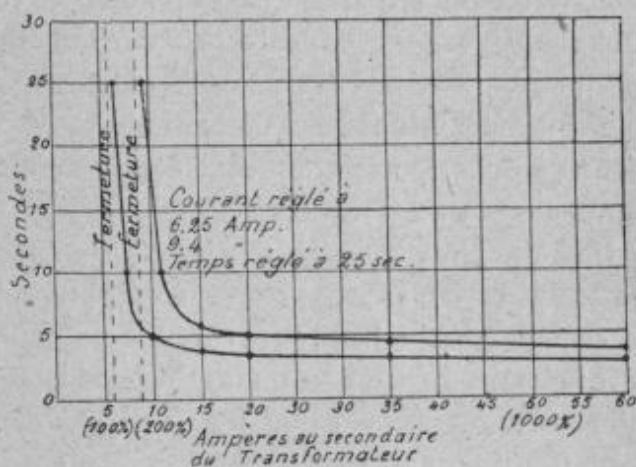


FIG. 1468.

la ligne de transmission ou de distribution ne se répercute sur les génératrices ou sur la partie non endommagée du réseau. Il suffit pour cela d'intercaler, sur les conducteurs, de départ des relais de 8 secondes maximum et de réserver ceux de 25 secondes maximum aux génératrices. On opère de même pour les dérivations prises sur les feeders ou pour le réseau de distribution, qui sont équipés de relais différents de ceux des lignes de transmissions, etc.

Une exception se présente pour les conducteurs en parallèle, dont l'un sert de réserve à l'autre ; alors, en effet, un relais à temps ne suffit plus à lui seul pour empêcher que parfois la rupture ne se produise sur le conducteur indemne au lieu du conducteur troublé, car un court-circuit se trouve alimenté aussi bien par l'un que par l'autre.

La (fig. 1470) donne le schéma des connexions d'un interrupteur auto-

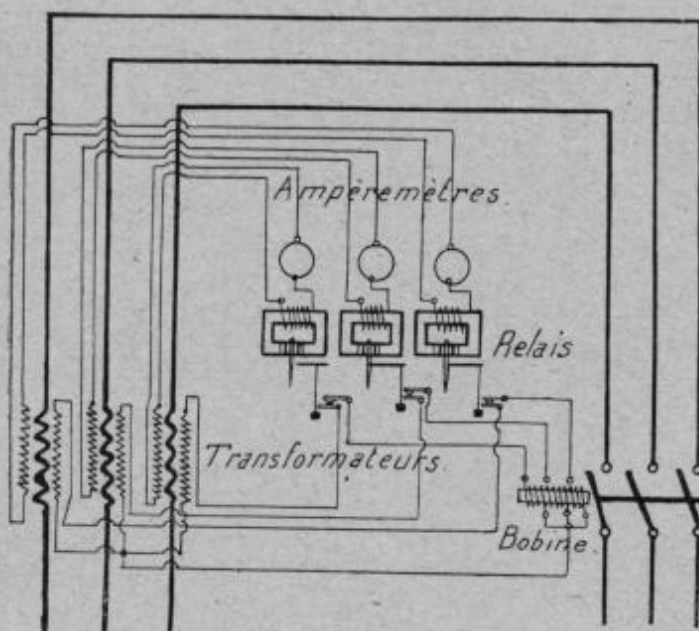


FIG. 1470. — Schéma des connexions d'un interrupteur automatique avec relais triphasé (Brown-Boveri).

matique avec relais triphasé à maxime avec déclenchement sur courant continu système Brown-Boveri.

Le fonctionnement du relais repose sur la rotation d'un disque d'aluminium placé dans le champ magnétique d'un électro-aimant feuilleté, ce dernier recevant un courant proportionnel au courant normal fourni par un transformateur statique. L'axe

de rotation ou disque porte un petit tambour sur lequel vient s'enrouler un cordonnet de soie muni d'un contrepoids. Quand le mouvement de rotation produit par les courants de Foucault, correspondant à une valeur déterminée de la surcharge, atteint et dépasse la valeur du couple de torsion correspondant au contrepoids du tambour, celui-ci forme un contact avec deux ressorts intercalés dans le circuit de la bobine de déclenchement placée sur l'interrupteur, circuit de courant continu fourni par une batterie d'accumulateurs ou par une excitatrice. Alors l'interrupteur, sous l'action de puissants ressorts, ouvre le circuit. Ce relais est très sensible et d'un fonctionnement sûr.

Dans les relais à maxime avec déclenchement par courant alternatif,

construit par la même maison, le transformateur d'intensité du relais à maxima est muni d'un second enroulement secondaire dont le circuit se ferme sur la bobine de déclenchement de l'interrupteur par l'intermédiaire du contact de ressorts (*fig. 1471*). Quand le premier enroulement secondaire agit sur le relais à maxima déjà cité et détermine le contact, la puissance d'action du circuit auxiliaire devient d'autant plus grande que la surcharge est plus considérable. Le transformateur remplit un triple but : lecture de l'ampèremètre, rotation du disque du relais et la production du courant de déclenchement.

Le relais Alioth à maxima est construit sur le principe électro-dynamique, mais il ne possède qu'une seule bobine fixe, tandis que dans l'électro-dynamomètre il y a une bobine fixe et une mobile. Cette disposition a l'avantage d'éviter absolument les collages par l'effet du magnétisme rémanent. Le courant pour le déclencheur est du courant à 50-250 volts et 0,5 ampère.

Les relais à tension nulle et à maxima s'emploient

pour opérer le débranchement des gros moteurs à courants alternatifs, quand par le fait d'un accident de réseau, la tension tombe à zéro. Cela évite au moment de la remise en marche la détérioration du moteur et facilite les opérations du couplage du réseau de l'usine.

Dans les relais pour tension nulle de la firme Brown-Boveri, à l'effet de protéger le moteur lors d'une fausse manœuvre de son démarreur, la commande de l'interrupteur est reliée, par une transmission appropriée, avec la commande de l'appareil de démarrage du moteur, en sorte que l'interrupteur, une fois ouvert, ne peut plus être fermé avant que la commande du démarreur ne soit remplacée dans sa position de départ.

Quand il y a plusieurs génératrices couplées en parallèle, il peut survenir un défaut d'ajustage du régulateur mécanique d'une turbine hydraulique ou un mauvais réglage du courant d'excitation des inducteurs d'une unité ; il s'ensuit alors que l'alternateur correspondant fonctionne comme moteur sans que les ampèremètres puissent renseigner sur le changement

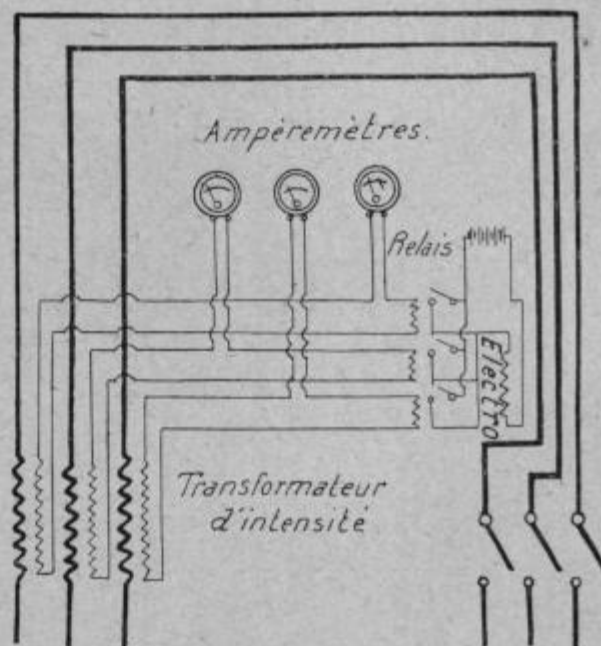


FIG. 1471. — Schéma des connexions d'un interrupteur automatique avec relais tripolaire et déclenchement à courant continu (Brown-Boveri).

de marche. Plus fréquemment encore, des moteurs synchrones alimentés par une canalisation à grande distance renvoient l'un dans l'autre l'énergie au lieu de la recevoir, à la suite d'un trouble survenu dans le réseau ou dans la station centrale.

Les relais sont généralement employés avec les déclencheurs à courant de retour pour courant alternatif. Il n'est pas d'usage d'en employer avec des déclencheurs pour les appareils à courant de retour dans les installations à courant continu ; on préfère tolérer un courant de retour un peu plus fort, mais produire la rupture immédiate dès que la limite tolérée est atteinte.

Les relais à courant de retour Brown-Boveri sont d'une construction sensiblement la même que celle du relais à maxima, avec cette différence que les disques en aluminium sont soumis à l'influence de deux électros à noyau feuilleté : l'un avec enroulement pour la tension, l'autre avec enroulement pour l'intensité, tous deux calés à 90° l'un de l'autre.

Le relais à courant de retour de la maison Alioth est basé sur le même principe, mais il y a deux bobines, l'une à gros fil et l'autre à fil fin alimentées respectivement par transformateur série et par transformateur en dérivation. Il se règle pour déclencher avec un courant de retour de 5 0/0.

On se heurte à une difficulté dans l'application des relais à retour de courant, parce que leur fonctionnement est intimement lié à la tension, puisqu'ils comprennent deux enroulements, l'un à gros fil, l'autre à fil fin. Or, quand le court-circuit sur le conducteur se manifeste au voisinage du relais, il n'y a de disponible aux bornes de l'appareil que la petite différence de potentiel existant entre lui et le défaut. Pour assurer néanmoins son fonctionnement, la maison Siemens et Halske y a introduit deux perfectionnements. Le premier consiste à donner au relais une grande échelle de sensibilité, de sorte qu'il s'impressionne encore sous l'action d'un courant de retour correspondant à peu près à 10 0/0 de la charge normale ; le second, le plus important, s'adresse surtout aux distributions par cou-

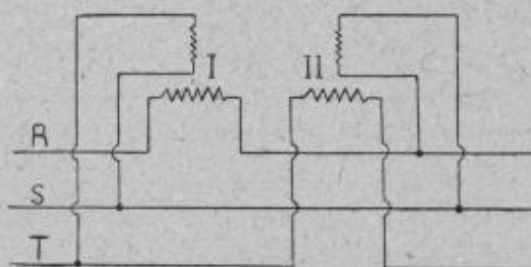


FIG. 1472.

rants triphasés. Ici on ne soumet plus le fil fin à la tension de la phase même comprenant le gros fil, mais à la tension composée existant entre les deux autres phases, suivant le schéma de la (fig. 1472). Quand un court-circuit se produit entre les phases R et S, les conducteurs correspondants

sont traversés par un courant énorme et la tension entre R et S s'annule, tandis qu'elle conserve sa valeur initiale entre S et T. Or, le relais I subit

l'influence d'une part du courant de la phase R et, d'autre part, de la tension entre S et T; il fonctionnera sûrement. Dans tous les cas, on localisera un court-circuit par l'emploi de deux relais à retour de courant sur les réseaux triphasés à trois fils et de trois relais sur les réseaux triphasés à quatre fils ou dont le neutre est à la terre.

Les (fig. 1473 et 1474) représentent un interrupteur automatique à maxima à haute tension et à bain d'huile de la Société A. E. G., pour 4.200 volts, 100 am-pères.

La rupture sur chaque phase est double et elle peut être obtenue à l'aide d'un dispositif à poignée commandé par un système de leviers indépendants. Le système est aussi actionné automatiquement, même pendant la commande à la main. Les relais sont munis de deux transformateurs de courant.

Les interrupteurs du système Voigt à maxima et à minima (*fig. 1475*),

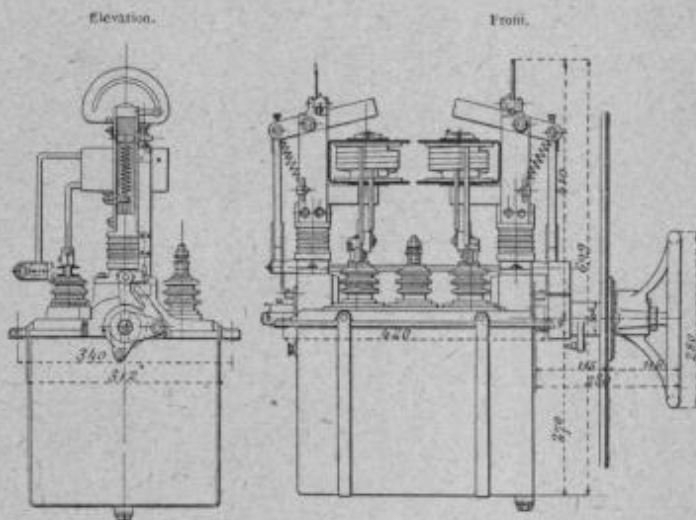


FIG. 1473. — Interrupteur automatique à maxima, à haute tension et à bain d'huile de l'A. E. G.

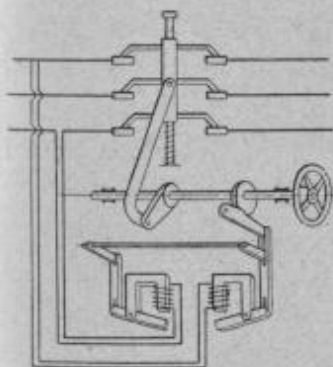


FIG. 1474. — Schéma
du mouvement.

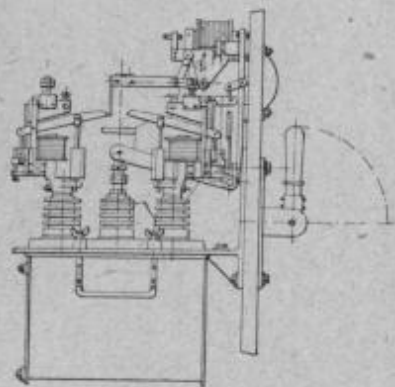


FIG. 1475. — Interrupteur à déclenchement à maxima et minima système Voigt.

comportent des cliquets de déclenchement actionnés directement par les électro-aimants.

Les interrupteurs à 110.000 volts du transport d'énergie de la « Southern Power Company » doivent pouvoir interrompre efficacement tout

court-circuit à 120.000 kilowatts de puissance. Chaque pôle est rendu entièrement indépendant des autres, au point de vue électrique, par immersion dans une cuve séparée. Les trois cuves ont à peu près la hauteur d'un homme.

Au point de vue mécanique, les contacts correspondant aux trois phases de la distribution, bien qu'isolés, n'en sont pas moins reliés à une poignée unique et la commande peut se faire soit à la main, soit électriquement. Sur chacun des contacts, il y a un dispositif de double rupture pour l'étincelle. Un petit interrupteur bipolaire, manœuvré par un mécanisme auxiliaire, indique la position des contacts de rupture en faisant fonctionner un signal lumineux.

Une question très importante parmi celles qu'a soulevé l'emploi des hautes tensions a été la réalisation des bornes de sortie pour les interrupteurs, les transformateurs et autres appareils de haute tension. La tendance est, en effet, de mettre ces appareils dans des caisses métalliques et il est, dès lors, nécessaire de prendre des précautions pour le passage des conducteurs à travers cette enveloppe. On a alors créé des bornes du type à condensateur, basées sur les principes posés par Ryan, Smith, Nagel, etc.

La (fig. 1476) donne le principe de l'isolateur condensateur. Les bornes

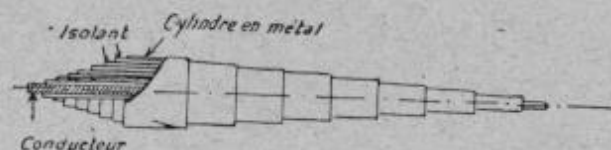


FIG. 1476. — Principe de l'isolateur-condensateur.

conçues sur ce principe sont fabriquées comme suit : sur un tube de métal, on enroule du papier ou du mica que l'on fait adhérer au moyen

de laque ; à intervalles réguliers, déterminés par l'accroissement du diamètre, une feuille de papier d'étain est semblablement placée autour du cylindre. On passe ensuite une couche de vernis isolant destiné à empêcher l'absorption de l'huile par la partie qui plongera dans le liquide. Sur les bouts du cylindre et en contact électrique avec eux, on dispose des an-

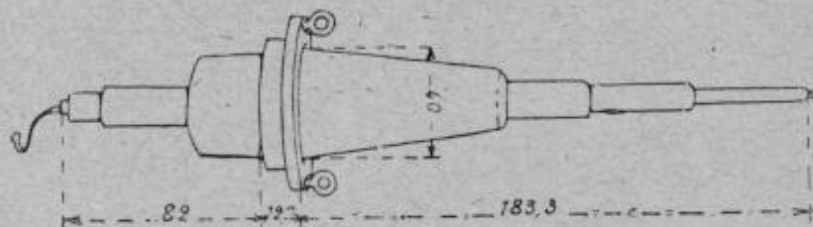


FIG. 1477. — Isolateur condensateur ordinaire.

neaux métalliques de diamètre approprié et on complète le dispositif en surmontant la tige centrale d'une cloche de grand diamètre (fig. 1477).

La supériorité de cet isolateur sur les autres dispositifs, au point de vue

de l'isolement, est très marquée ; ainsi, deux bornes de même longueur et de même diamètre, respectivement homogènes et à couches alternées peuvent supporter l'une 105.000 volts et l'autre 225.000 volts. Deux pièces établies pour supporter la tension de 200.000 volts pendant une minute mesurent respectivement 278 et 213 centimètres de longueur totale.

Cette construction est particulièrement avantageuse pour les appareils destinés à être installés à l'air libre ; elle est toutefois modifiée dans ce cas par l'adjonction, à chaque couche métallique et en contact avec celle-ci, d'une cloche conique en métal (*fig. 1478*) ; de plus, l'intervalle entre les cloches est protégé par un cylindre en porcelaine.

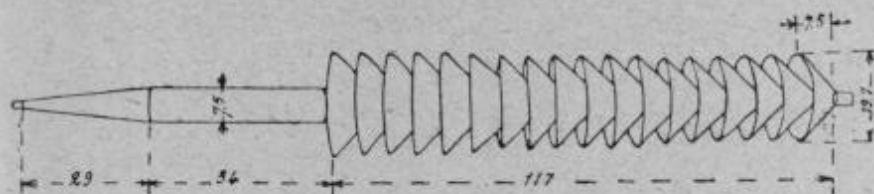


FIG. 1478. — Dimensions d'isolateurs-condensateurs pour installation à air libre (100.000 volts sous pluie).

Au point de vue de l'emploi des interrupteurs et coupe-circuit à haute tension on peut les classer comme suit :

- 1° Interrupteurs automatiques placés aux bornes des alternateurs de l'usine centrale ;
- 2° Interrupteurs automatiques placés sur un groupe de feeders ;
- 3° Interrupteurs automatiques placés au départ sur chaque feeder, alimentant les sous-stations de transformateurs ou les postes de transformation ou de sectionnement.

Pour ces trois catégories on fait usage d'interrupteurs à maxima, à déclenchement retardé, munis de relais spéciaux permettant ce déclenchement à temps. En ce qui concerne spécialement les usines centrales, on utilise parfois des appareils à retour de courant.

- 4° Interrupteurs sur chaque feeder, à l'arrivée dans les sous-stations, postes de transformation ou de sectionnement.

Là ce sont le plus souvent des interrupteurs automatiques à retour de courant.

- 5° Interrupteurs automatiques sur chaque nouveau feeder ou distributeur sortant d'un poste de sectionnement. S'il s'agit de distributeurs bouclés, d'autres interrupteurs automatiques sont souvent intercalés dans ces distributeurs pour la marche en parallèle.

- 6° Interrupteurs automatiques avant l'entrée de chaque convertisseur rotatif ou transformateur statique dans les sous-stations ou les postes de transformation.

On fait usage d'appareils à maxima ; les relais à maxima peuvent être à déclenchement instantané ou à temps et les relais, à retour de courant à rupture instantanée.

7° Interrupteurs automatiques placés aux bornes de chaque convertisseur rotatif (côté courant continu) ou de chaque transformateur statique (côté basse tension).

8° Interrupteurs automatiques sur chaque feeder secondaire.

9° Coupe-circuits ou interrupteurs automatiques à retour de courant à l'arrivée de chacun de ces feeders sur le réseau à basse tension.

10° Interrupteurs automatiques ou simples permettant la marche en parallèle ou le sectionnement du réseau en différents tronçons.

11° Coupe-circuits ou interrupteurs automatiques placés au départ de chaque dérivation.

Ce sont des interrupteurs à maxima ou à retour de courant selon les cas, ceux à maxima sont souvent à déclenchement instantané.

552. Disjoncteurs. — Dans le paragraphe précédent nous avons expliqué le rôle de ces appareils par rapport aux interrupteurs automa-

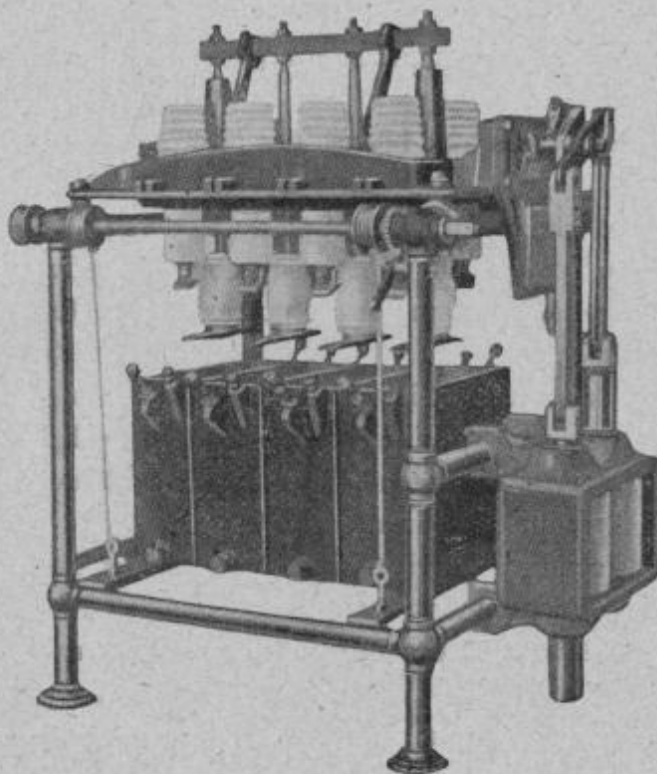


FIG. 1479. — Disjoncteur à commande électrique à distance. (Société Industrielle des Téléphones.)

tiques. Les modes de déclenchement de ces appareils sont les suivants : à maxima direct sur haute tension ; par transformateur d'intensité ; à minima de tension directe ou par transformateur ; à maxima direct et à minima de tension ; à maxima d'intensité direct et à minima de tension par transformateur ; à maxima par transformateur d'intensité et à minima de tension par transformateur ; à maxima d'intensité par relais à action différée et transformateur d'intensité.

Les disjoncteurs s'établissent de plus en plus à renversement ou à minima, c'est-à-dire lorsque l'intensité prend une valeur négative assez importante. On se sert dans ce cas d'un courant dérivé, mais l'inconvénient de ce système est d'exiger,

pour un fonctionnement précis, une tension d'alimentation sensiblement constante, de façon à ce que le champ des électros à fil fin ne varie pas.

Les disjoncteurs à maxima sont ceux qui fonctionnent dans le cas où l'intensité dépasse la valeur normale. Les bons appareils sont à noyau de fer doux placé dans le champ d'un solénoïde. La maison Védovelli et Priestley construit ces derniers appareils de façon à avoir une bobine d'un type unique, comme on le fait pour les appareils de mesure à shunter et un «renclenchement empêché», tel que lorsqu'on ferme le disjoncteur, et une fois celui-ci fermé, on ne puisse l'empêcher de déclencher, même si l'on tient la manette à la main.

Pour permettre aux disjoncteurs de supporter une certaine surcharge de la machine, on les construit pour fonctionner avec un certain retard, c'est-à-dire qu'ils sont à action retardée, différée, temporisée, à temps. Ces termes, pouvant prêter à une certaine ambiguïté, M. Védovelli a proposé d'appeler «temporisés» ceux qui ne fonctionnent qu'au bout d'un nombre de secondes déterminé quand il y a excès de débit et «retardés», ceux à retard variable, d'autant plus court que l'intensité est plus forte. Les constructeurs obtiennent ces résultats sans complication excessive des appareils.

L'inconvénient de ce système est d'exiger, pour un fonctionnement précis, une tension d'alimentation sensiblement constante, de façon à ce que le champ des électros à fil fin ne varie.

Dans les disjoncteurs de la Société industrielle des Téléphones, il n'existe pas de relais; le courant secondaire des transformateurs montés en série passe directement dans deux électros en série, dont le noyau mobile vient buter contre un levier de déclenchement lorsque l'intensité

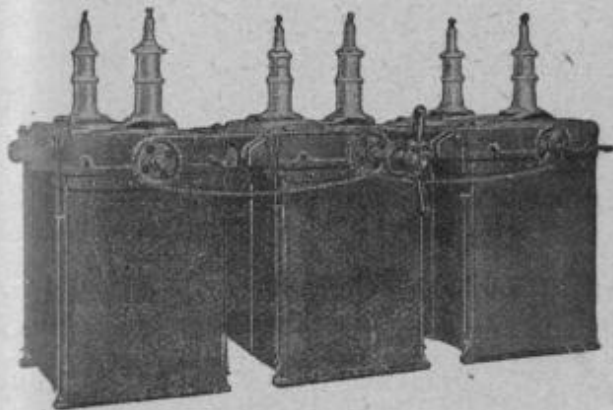


FIG. 1481. — Interrupteur-disjoncteur tripolaire 50.000 volts. (Société l'Éclairage électrique.)

possède une grande valeur. Le retard est obtenu en faisant varier la course d'un piston solidaire du noyau du disjoncteur dans un cylindre à glycérine relié au mécanisme du déclenchement.

Quand ce noyau est soulevé, son mouvement est retardé par la résistance qu'éprouve la glycérine à s'écouler entre le piston et la paroi, pour

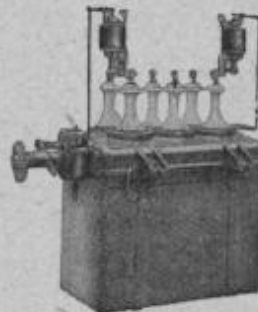


FIG. 1480. — Disjoncteur tripolaire à maxima direct sur haute tension. (Société l'Éclairage électrique.)

passer sous le piston où le vide tend à se produire. Une vis sert à bloquer le cylindre dans onze positions différentes grâce à un même nombre de trous répartis sur sa périphérie. On peut donc pour chaque intensité de déclenchement obtenir onze retards différents. En cas de court-circuit le déclenchement est presque instantané.

Le disjoncteur automatique Kelman (*fig. 1482*) comporte en plus d'un déclencheur à maximum D avec bobine R en série sur la ligne à haute

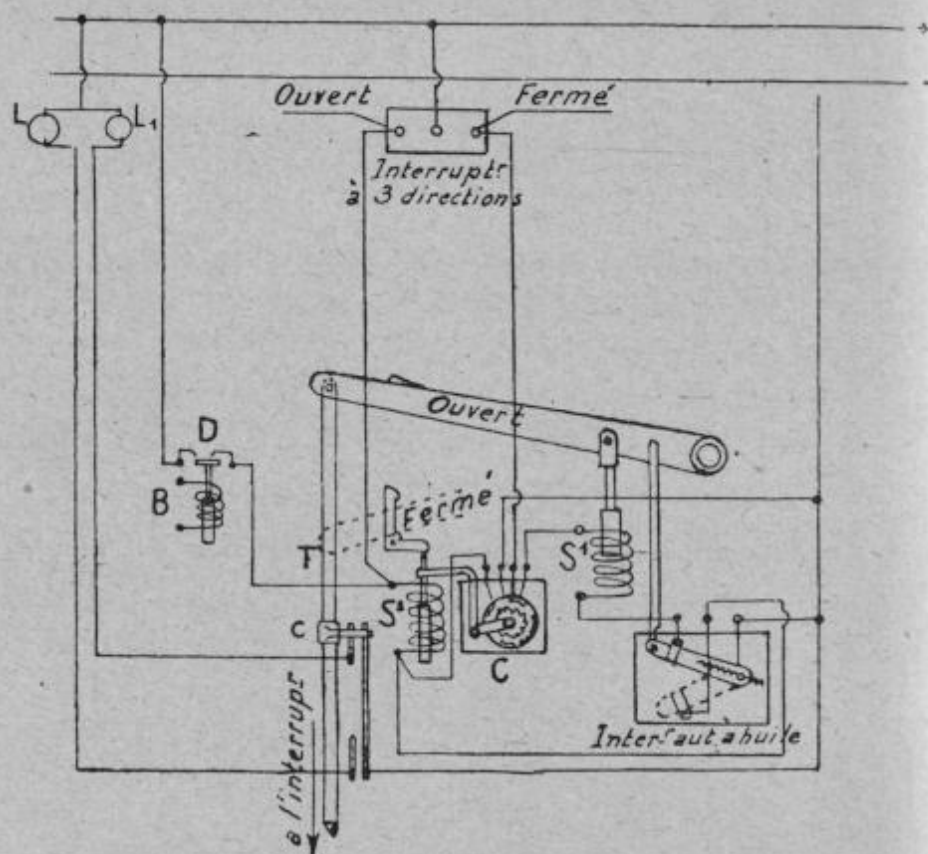


FIG. 1482. — Interrupteur automatique Kelman.

tension un commutateur tournant auxiliaire C actionné par un électroaimant d'ouverture S^2 . Cet organe supplémentaire a pour effet, si l'interrupteur principal ouvre le circuit, par l'action d'une surcharge, de forcer l'opérateur à envoyer un courant dans la bobine d'ouverture pour pouvoir refermer l'appareil.

Les disjoncteurs à double rupture par pôle, avec une ouverture de disjonction très grande de la Compagnie Westinghouse, ont de nombreux avantages en comparaison avec les appareils à rupture multiple. Dans le premier cas, le volume des pièces déplacées lors de la rupture est réduite au minimum, d'où un très faible volume d'huile mis en mouvement lors de la rupture et étouffement certain de l'arc. De plus, la double rupture

limite le nombre des contacts et des isolateurs, d'où une grande simplicité et minimum de chance d'avarie. Chaque isolateur est scellé dans la bride métallique, fixée sur la base en fonte de l'appareil. Les surfaces de la bride et de la base étant usinées, le remplacement s'opère facilement et l'ajustage reste précis.

Ces appareils sont à réenclenchement empêché. Les bobines de déclenchement sont conçues de telle manière qu'un réglage à volonté peut s'obtenir sur place dans les limites de 30 0/0 en dessous et 50 0/0 au-dessus de l'intensité normale prévue pour le déclenchement pour lequel l'appareil

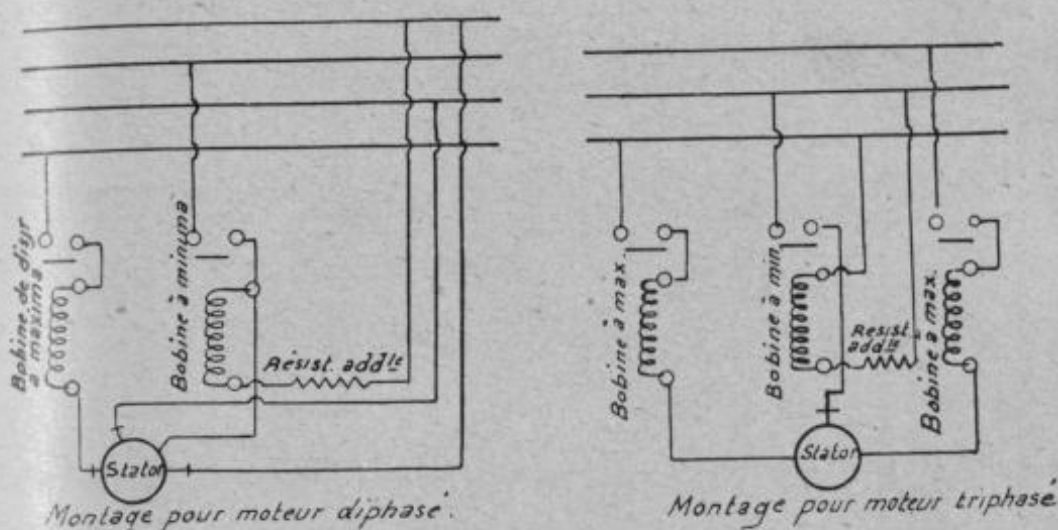


FIG. 1483.

est construit. Chaque noyau de déclenchement peut être ajusté indépendamment de l'autre. Cet ajustage se fait sur le tableau de distribution au moyen d'une vis de butée réglant la course de chacun des noyaux plongeurs suivant une échelle graduée. La commande électrique a lieu du tableau de distribution au moyen d'un petit commutateur et deux lampes témoins de couleur différente indiquent la position ouverte et fermée de l'appareil.

553. Coupe-circuit. — Sous quelque forme que l'on emploie les coupe-circuit, ils ne conviennent qu'imparfaitement pour les hautes tensions et médiocrement pour les fortes intensités. Quand leur fusion est provoquée par une forte surcharge, se développant brusquement, elle se fait avec une explosion qui détruit souvent le support. Elle met d'ailleurs, en tout cas, momentanément hors de service la partie de l'installation que le dispositif protège.

Les fusibles d'un système triphasé ne fonctionnent pas toujours simultanément et ce peut être là une grave source de danger. D'autre part pour

de grandes intensités, les sections des fusibles sont importantes et le calibrage ne peut se faire avec exactitude, enfin les conditions de température et de ventilation influent beaucoup sur le fonctionnement.

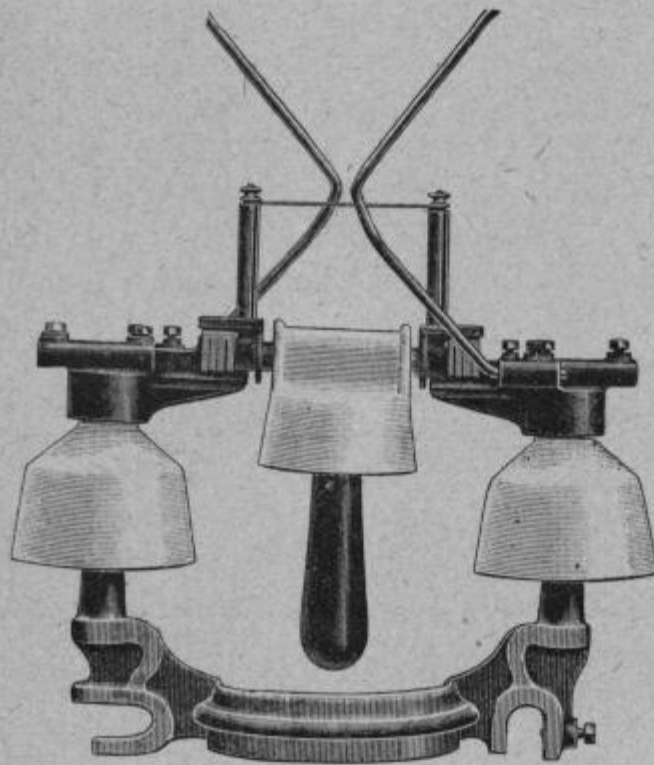


FIG. 1484. — Coupe-circuit à haute tension, système Védovelli.

Le temps, qui s'écoule depuis le régime de la surcharge, jusqu'au moment de la fusion du coupe-circuit, dépend toujours de l'état de régime précédent ; tant que le circuit est faiblement chargé, le fusible reste froid, il lui faut dès lors quelque temps pour s'échauffer et pour fondre ; au contraire, la fusion est beaucoup plus rapide pour la même surcharge si, par le fait

d'une intensité antérieure, plus forte, le fusible est déjà chaud.

Le prix relativement élevé des disjoncteurs à haute tension paraît être le seul point qui conduise encore les industriels à se servir de coupe-circuit.

Les coupe-circuit disposés en certains points d'une ligne à haute tension et aux dérivations prises sur cette ligne doivent être facilement manœuvrables. Ils sont constitués par des isolateurs dont les mâchoires portent les fusibles garantis contre les intempéries. Les métaux employés dans la fabrication des fusibles sont le plomb et l'étain alliés ($60 \text{ Pb} + 40 \text{ Sn}$), le cuivre, le maillechort, le fer, l'aluminium et l'argent.

Les coupe-circuits du type à « cornes » sont les plus usités. L'arc est

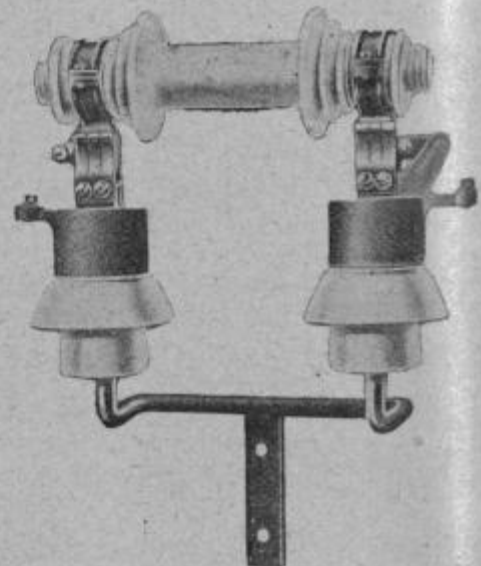


FIG. 1485. — Coupe-circuit avec tube amovible en porcelaine.

rompu sur des cornes de zinc et d'aluminium inclinées à 45°. La longueur du fusible varie de 3 à 14 centimètres pour des tensions de 1.000 à

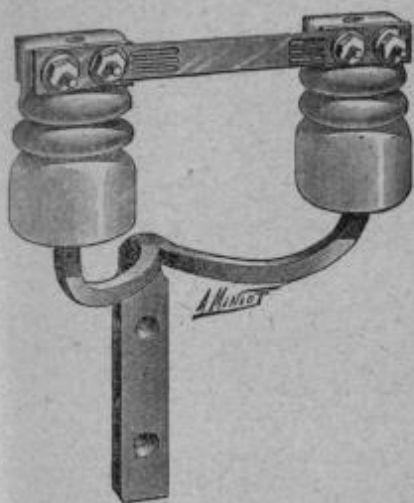


FIG. 1436. — Coupe-circuit unipolaire aérien pour basse tension.

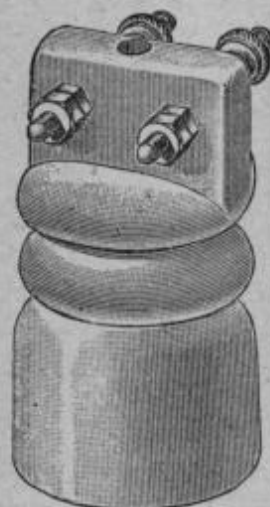


FIG. 1487. — Coupe-circuit aérien pour lignes à courant continu.

15.000 volts, et la longueur d'une branche de corne de 30 à 100 centimètres.

Les fusibles des tableaux de distribution sont ordinairement renfermés dans un tube de verre ou de porcelaine formant poignée isolée et portant aux

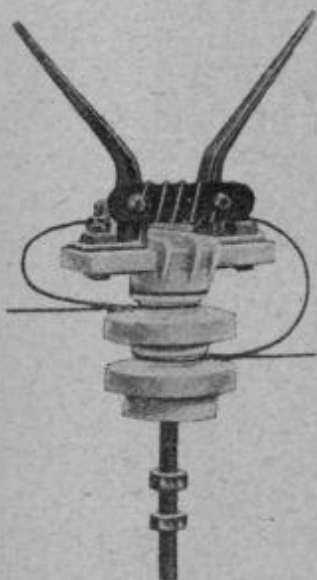


FIG. 1438. — Coupe-circuit aérien pour tension jusqu'à 6.000 volts.

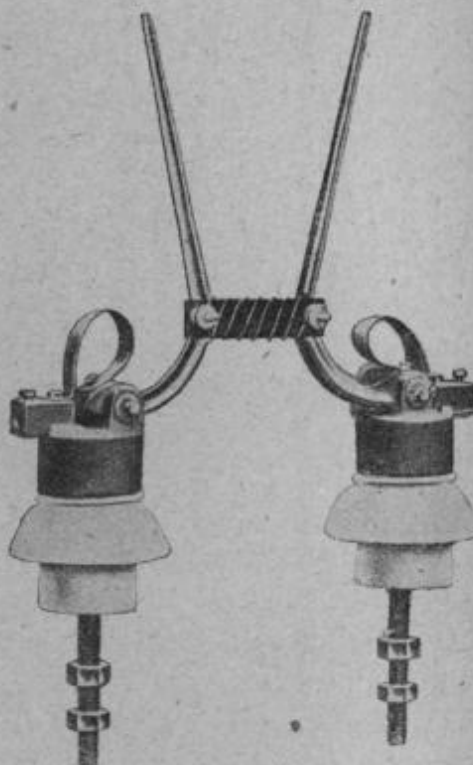


FIG. 1489. — Coupe-circuit aérien pour tension jusqu'à 6.000 volts.

deux extrémités des renflements destinés à protéger la main. Aux bouts

sont disposés des ressorts en cuivre qui viennent se poser sur des lames de cuivre fixées à des isolateurs placés à une certaine distance l'un de l'autre. Il faut avoir soin d'interposer une matière formant matelas amortisseur entre le fusible et la poignée de porcelaine au moment de la fusion.

Pour les très hautes tensions, le fusible est généralement un fil d'argent immergé dans l'huile. Ils sont placés dans des compartiments ménagés dans un mur, ouverts devant et installés sur une seule rangée de façon à éviter tout dégât, lors de la production d'un arc permanent. On emploie aussi des fils faits d'un alliage composé de tungstène et de maillechort.

Dans le fusible enfermé, il faut non seulement éteindre l'arc, mais en outre rendre inoffensif la formidable puissance d'expansion de la vapeur

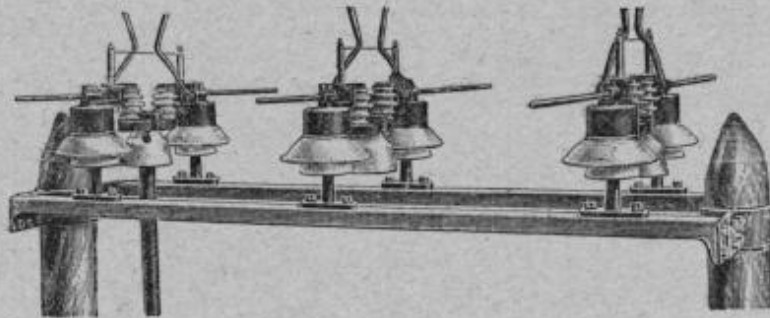


FIG. 149'. — Coupe-circuit tripolaire monté sur deux poteaux.

métallique renfermée dans une étroite enceinte. Cette dernière difficulté devient plus grave à mesure que croît la capacité du fusible. Elle dépend, d'une part, du rapport du volume du fusible au volume du tube qui le renferme et, d'autre part, de la distribution du métal dans le bourrage formé par la matière poreuse. Il convient, à cet effet, que la surface du fusible soit assez développée pour que les gaz chauds puissent s'échapper facilement ; de là, l'utilité des fusibles multiples, c'est-à-dire formés de plusieurs fils ou lames en parallèle. Pour les fusibles de grande capacité on devra faire usage de fils, avec une grande extension de la surface du métal et un contact aussi développé avec le bourrage pour donner aux gaz le dégagement le plus facile.

On emploie pour les fusibles des alliages à basse température : plomb, étain, bismuth, mercure et cadmium. Pour éviter l'effet du refroidissement par les bornes, dans les fusibles de sécurité pour hautes intensités, la longueur du fusible varie entre 15 et 23 centimètres.

Les meilleurs fusibles sont ceux construits avec des matières présentant un haut point de fusion, à la condition que le métal fondu ne devienne pas lui-même une source de danger là où le fusible est placé. Pour la détermination des dimensions d'un fil fusible fondant sous l'action d'un cou-

rant donné, M. Zetter a fait des expériences dont le tableau ci-après présente le résumé.

Les lames sont en étain pur, de 12 centimètres de longueur et 5 millimètres de largeur, fixées sur une feuille de fibre et serrées à leurs extrémités par des attaches en cuivre. La rupture de la lame d'étain pur se fait sans projection de métal fondu et les intensités de courant déterminant la fusion d'un coupe-circuit de dimensions données sont constantes.

INTENSITÉS EN AMPÈRES		ÉPAISSEURS	SECTION	DENSITÉ
DE PROTECTION	DE FUSION	DES LAMELLES en mm ²	DES LAMELLES en mm ²	DU COURANT en ampère mm ²
1	3,5	0,02	0,10	15
2	7	0,03	0,45	13
3	9	0,05	0,25	13
4	12	0,06	0,30	12
5	17	0,09	0,45	11
7	22	0,12	0,60	11
8	25	0,15	0,75	10
10	30	0,24	1,05	10
15	45	0,36	1,80	9
20	60	0,50	2,50	8

Il n'y a pas de différence entre les intensités de courant nécessaire pour fondre le fusible, que le courant soit continu ou alternatif.

Un fusible, avec le temps, ne donne lieu à aucun changement moléculaire dans sa constitution, mais, dans la pratique, les fusibles sont sujets à des variations qui, dans certains cas, peuvent élever leur point de fusion et dans d'autres cas abaisser d'une manière considérable la valeur de l'intensité provoquant la fusion.

La Société Lahmeyer, de Francfort, emploie des coupe-circuits présentant une double sécurité au point de vue de la rupture de l'arc. La maison Voigt et Haffner met la poignée à la terre par un conducteur : le fusible est enfermé dans un cylindre

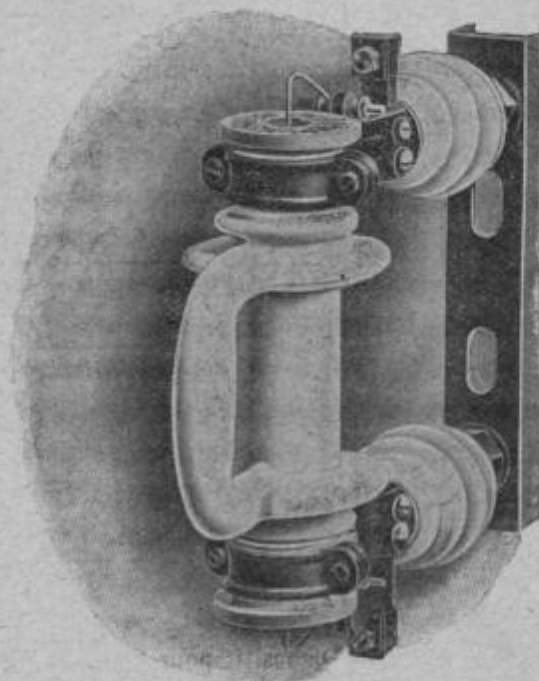


FIG. 1491. — Coupe-circuit à haute tension pour intérieur. (Maljournal et Bourron.)

portant un poids qui fait tomber la partie inférieure de ce fil dès qu'il a fondu, de manière à empêcher la formation de l'arc. Les coupe-circuit Brown-Boveri et Thomson-Houston ont le fusible placé dans une sorte de caisse munie d'une étroite ouverture ; quand il fond, il y a dégagement de gaz par l'ouverture et l'arc est rompu.

Les coupe-circuit à haute tension pour intérieur (type CPO) sont construits par la maison Maljournal et Bourron à ouverture longitudinale le long de la poignée, ce qui offre aux chauds et aux vapeurs métalliques un large dégagement. Elle les dirige du côté du mur sur lequel est fixé l'appareil et prévient tout effet de compression. La barrette spéciale permet une manœuvre à la main particulièrement facile ; elle est essayée à 18.000 volts (pour 6.000 volts en service). La fixation à demeure de ces appareils est particulièrement simplifiée.

Les fusibles ont l'inconvénient d'amener des surtensions, par étouffement de l'arc, dans tous les circuits, et des dissymétries dans les réseaux triphasés.

554. Limiteurs de tension. — Ces appareils se composent en général d'un certain nombre de rouleaux en métal isolés les uns des autres,

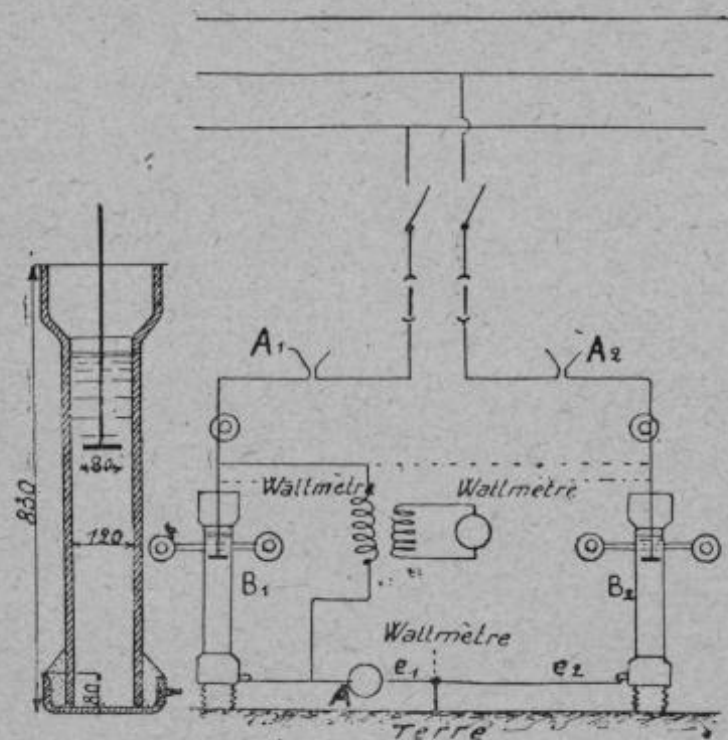


FIG. 1492. — Dispositif pour la mesure à haute tension des résistances liquides à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

dont l'écartement total est tel que, dès que la tension s'élève au-dessus de la normale, un arc s'amorce. Une résistance doit être intercalée pour

limiter l'intensité de l'arc à 0,1 ampère environ. Cette résistance doit naturellement être non inductive et ne pas s'échauffer ; on emploie généralement des poteries contenant de l'eau.

Les rouleaux permettent, par exemple, à un arc amorcé à 10.000 volts de se rompre à 9.000. Cette anomalie tient à la difficulté qu'a l'arc à se maintenir si on lui offre une grande masse à échauffer et à volatiliser.

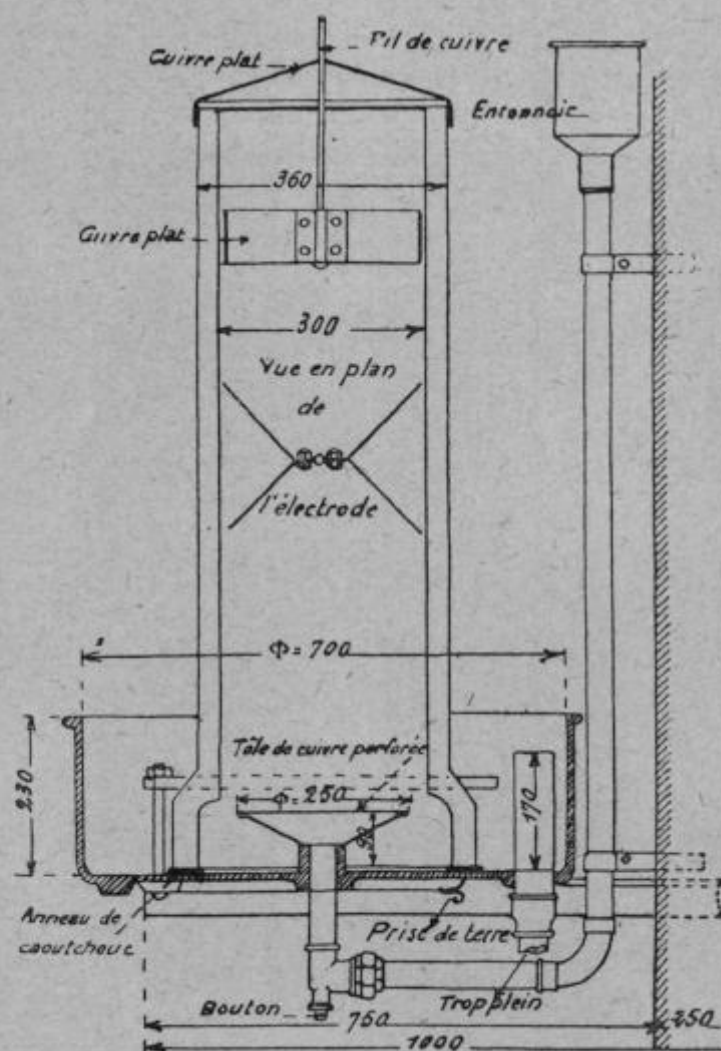


FIG. 1493. — Résistance hydraulique intercalée entre le neutre des transformateurs et la terre ($R = 650$ ohms pour 27.000 volts et 1.300 ohms pour 45.000 volts).

Les limiteurs de tension Vedovelli se composent d'une série d'obus en zinc strié, séparés les uns des autres par un intervalle d'air de 1 millimètre environ. Ils sont réglés pour s'amorcer à un voltage de 50 % supérieur au voltage normal.

Ces appareils sont reliés aux bornes de départ des feeders par l'intermédiaire d'un coupe-circuit à huile destiné à couper le courant de décharge au cas où celui-ci atteint une trop grande valeur. Lorsque le fusible

vient à se rompre à la suite d'une surintensité, le ressort attire vivement l'arc dans l'huile et cet arc est alors étouffé instantanément. Sur le circuit de terre des limiteurs se trouvent branchées en série des résistances ohmiques pour limiter le courant de charge.

Indicateurs de terre. — Pour les hautes tensions on se sert d'un voltmètre pouvant successivement être branché sur chaque fil à l'aide d'un commutateur. On mesure la tension existant entre chaque conducteur et la terre. Si la déviation est la même pour tous les fils la ligne est dans un état de bon isolement électrique. Sinon c'est l'indice d'une terre plus ou moins franche sur le fil qui présente le plus bas voltage. Si l'installation est à courant continu, on dispose une résistance de protection en série avec le voltmètre. Si c'est une installation triphasée avec point neutre à la terre, on peut ne placer sur le fil de terre qu'un ampèremètre sensible avec un relais actionnant une sonnerie.

555. Tableaux de distribution. — Les tableaux de distribution ont subi de remarquables transformations et leur aménagement est à même de garantir ces appareils de tout incendie provenant de la marche des engins auxquels ils servent de support, ainsi que le personnel, de tout danger d'accident.

Ces résultats ont été obtenus par l'emploi d'interrupteurs à rupture dans l'huile, par le contrôle de ces interrupteurs à l'aide de relais, en assurant l'ouverture automatique dans des conditions bien déterminées, par la séparation complète des appareils à basse tension et de ceux à haute tension, par l'emploi d'instruments à basse tension raccordés aux circuits principaux par l'intermédiaire de transformateurs, par l'adoption de la commande à distance, soit mécanique, soit électrique, soit pneumatique, des appareils à haute tension, par le logement des appareils dans des cellules réfractaires, par l'insertion de couteaux de séparation entre les barres collectrices et les circuits alimentés, par l'emploi d'indicateurs et d'instruments automatiques de synchronisation, enfin par le groupement des appareils générateurs, des feeders, etc., en groupes, pouvant travailler indépendamment ou en parallèle.

On dispose les tableaux en plusieurs compartiments établis sur le même plan ou sur des plans différents ; chaque barre de polarité différente est placée dans une alvéole et se trouve isolée non seulement électriquement, mais aussi mécaniquement. Le cloisonnement ne doit pas seulement servir à séparer les différentes unités, mais pour chacune des phases d'un alternateur.

La construction des tableaux en cloisonnements en ciment armé permet de réaliser simplement et économiquement tous les tracés, si complexes qu'ils soient, et offre une résistance mécanique uniforme, facilitant

l'établissement de points d'appui solides et la confection des scellements.

Les dimensions données aux compartiments servant de cloisonnements pour barres et pour sectionneurs sont principalement déterminées par la distance minimum reconnue nécessaire entre les organes sous tension et les matériaux supports, ainsi que par la dimension des appareils et enfin pour tenir compte de l'effet des surtensions.

Nous signalons avec intérêt l'article qu'a consacré à cette question M. A.-R. Garnier et où il formule des indications pratiques résultant de renseignements recueillis dans un grand nombre d'installations ⁽¹⁾.

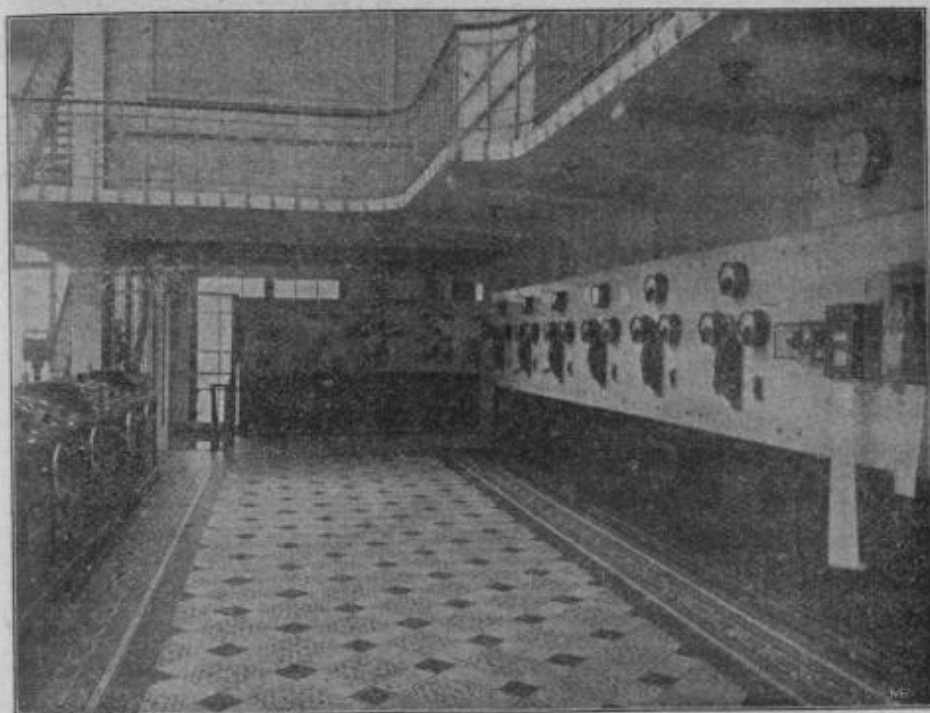


FIG. 1494. — Tableau de distribution de l'usine de Wasquehal.

A gauche, pupitre de commande des alternateurs ; à droite, commande des feeders ; au fond, service de l'usine. (C^{te} Électro-Mécanique.)

Les panneaux de commande à distance, dans les postes importants, sont généralement réunis par une estrade dominant d'une certaine hauteur la salle des interrupteurs. Ces panneaux comportent, en dehors des relais, des wattmètres et des ampèremètres, des commutateurs accompagnés de lampes indicatrices, destinés à envoyer le courant dans les solénoïdes ou les moteurs électriques agissant sur les interrupteurs. Les lampes servent à indiquer si le mouvement désiré a été correctement réalisé.

Pour la canalisation raccordant les transformateurs d'intensité et de

(1) La *Technique Moderne*, T. VI, n° 3, page 102.

potentiel ainsi que les moteurs et les solénoïdes à l'estrade des panneaux de manœuvre, dont il vient d'être parlé, la meilleure solution consiste à réunir les fils à des câbles isolants à plusieurs conducteurs placés à même le sol des caniveaux.

Lorsque les panneaux de manœuvre sont disposés sur une estrade, s'avancant en encorbellement sur la salle des machines, on peut aligner, sur la partie antérieure de l'estrade, tous les pupitres relatifs aux commandes des génératrices, des moteurs des services auxiliaires et des cou-

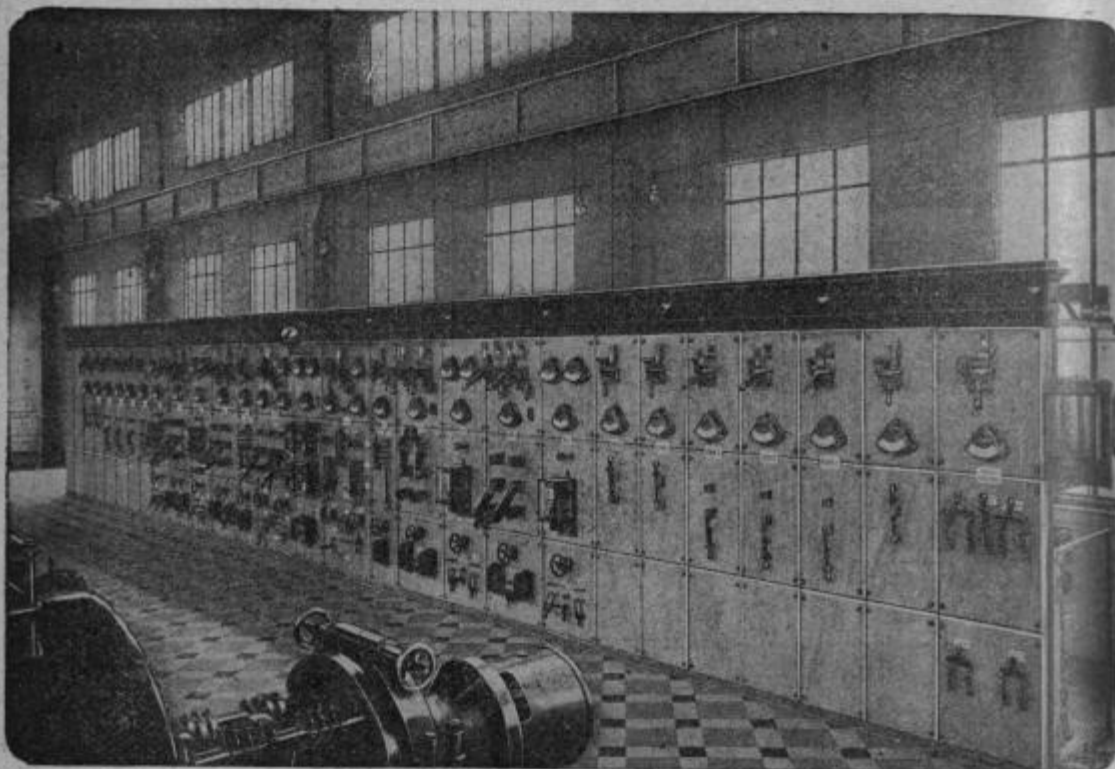


FIG. 1495. — Vue du tableau de distribution.
(Station électrique de l'usine à gaz de la Villette).

teaux de couplage, tandis que le mur séparant le poste de la salle des machines supporte les panneaux de commande des feeders.

Les pupitres de chacune des machines génératrices comportent les appareils suivants : ampèremètre d'excitation, voltmètre de l'induit, ampèremètre de l'induit, commutateur d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, relais bipolaire de disjonction de l'interrupteur, relais à retour de courant, lampes indicatrices de déclenchement et d'enclenchement des interrupteurs, compteur de la machine, wattmètre enregistreur du groupe feeder correspondant, rhéostat de champ, interrupteur de champ avec résistance de décharge, plot de synchronisation, indicateur de facteur de puissance ; chacun des pupitres de couplage porte les voltmètres de synchronisation, les lampes de phase, le commutateur d'ouver-

ture et de fermeture de l'interrupteur, le relais bipolaire de disjonction et les lampes d'enclenchement et de déclenchement. Les panneaux des feeders reçoivent les ampèremètres donnant le courant pris par chaque

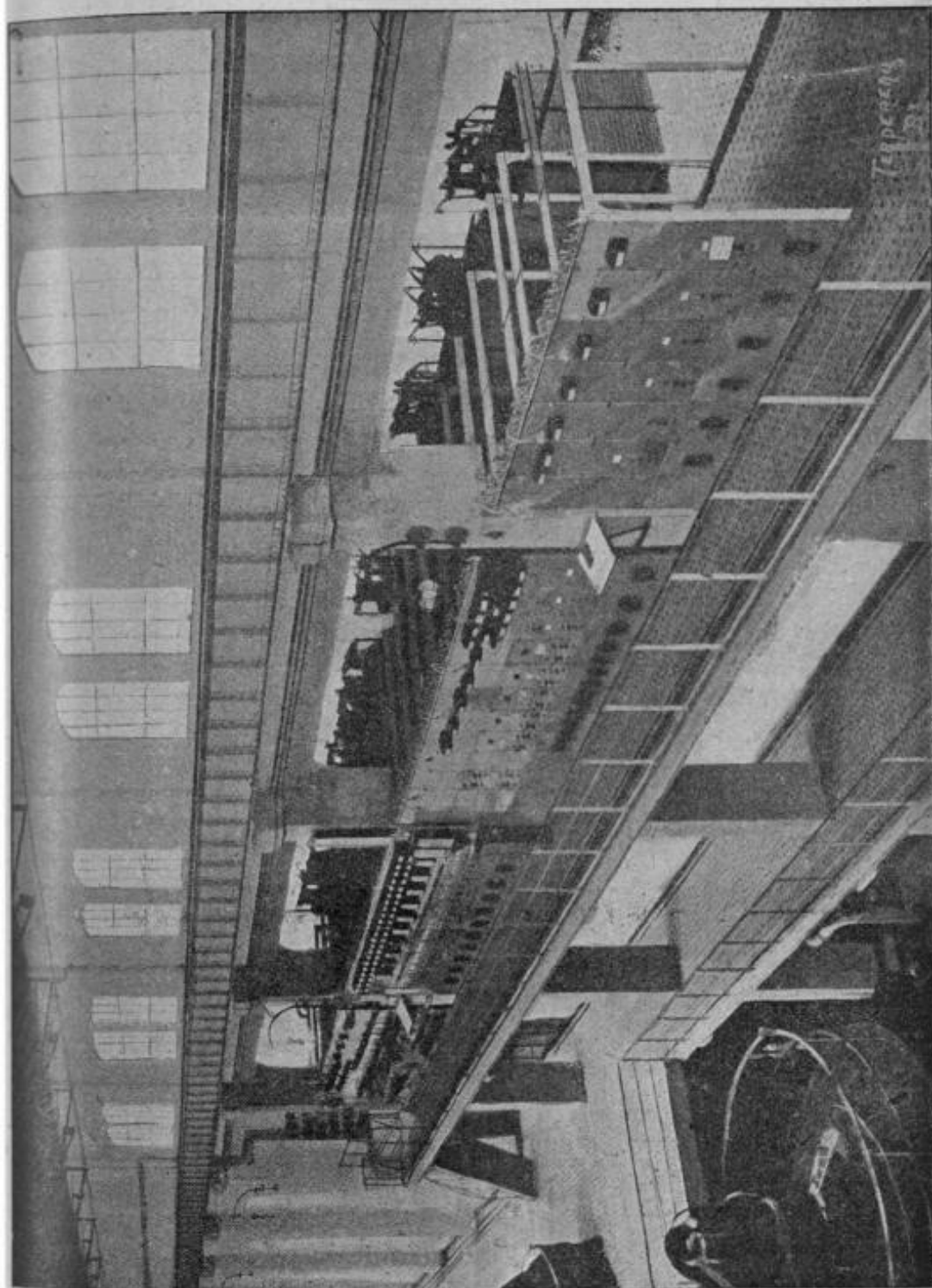


FIG. 1496. — Tableau de distribution en ciment armé.

phase, les commutateurs d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, les relais bipolaires des disjoncteurs, les lampes indicatrices et les compteurs.

toutes conditions de service ; réduction au minimum des travaux de nettoyage, des essais et de la surveillance ; robustesse de construction, permettant de supporter les plus durs services et d'éliminer les risques d'incendie ; accessibilité rapide des parties qui nécessitent absolument des visites régulières ; protection contre les chocs ou commotions par la mise hors circuit automatique des parties à visiter avant qu'il soit possible de procéder à la visite ; enfin ventilation des locaux affectés à l'emplacement des appareils.

D'une façon générale le bâtiment recevant les panneaux de la distribution est divisé en étages, le sous-sol par exemple, est réservé aux câbles et boîtes de raccordement, le local au niveau de la salle des machines aux transformateurs, le premier étage aux interrupteurs et appareils de mesure et les étages supérieurs aux barres omnibus.

On peut reprocher à la disposition de l'encagement des interrupteurs dans des cellules ou alvéoles, l'inconvénient de confiner les vapeurs dans un espace limité, au moment de l'entrée en fonction des appareils à bains d'huile, lesquelles vapeurs tendent à l'affaiblissement de l'isolement entre tous les conducteurs du voisinage immédiat et à produire aussi des courts-circuits.

Un des dispositifs les plus satisfaisants pour les distributions à courants triphasés, d'ailleurs appliqués déjà sur une vaste échelle, est le système « Mez Price » ou système de protection par équilibre. Dans ce cas, le fonctionnement réside en ce que, tant que la section protégée reste saine, le courant doit être de même intensité à l'entrée et à la sortie du dispositif. Des transformateurs d'intensité sont installés au départ et à l'arrivée de chaque section ; leurs propriétés sont en équilibre. Dès qu'un dérangement ou une perte se produit, le courant au départ n'est plus le même qu'à l'arrivée. L'équilibre est ainsi rompu, et par l'intermédiaire de relais, les interrupteurs ou disjoncteurs sont automatiquement ouverts aux extrémités de la section défectueuse.

Le système peut être basé, soit sur l'équilibre des forces électromotrices, soit sur l'équilibre du courant, soit enfin sur l'équilibre du fil neutre.

La (fig. 1498) indique les connexions des divers modes. L'équilibre est obtenu en mettant en opposition les forces électromotrices aux bornes secondaires des transformateurs d'intensité ; dans les conditions normales aucun courant ne circule dans le fil pilote.

Ce mode comporte lui-même deux dispositions différentes : la première a été désignée sous le nom d'*équilibre magnétique* et l'autre sous le nom de *méthode du pont*.

Enfin, dans le troisième système, appelé équilibre du fil neutre, les secondaires des transformateurs sont connectés comme dans le système

précédent ; le fil neutre réunit les points de même potentiel aux deux extrémités de la section ; dans les conditions normales le système pilote sur lequel sont montés les relais n'est parcouru par aucun courant.

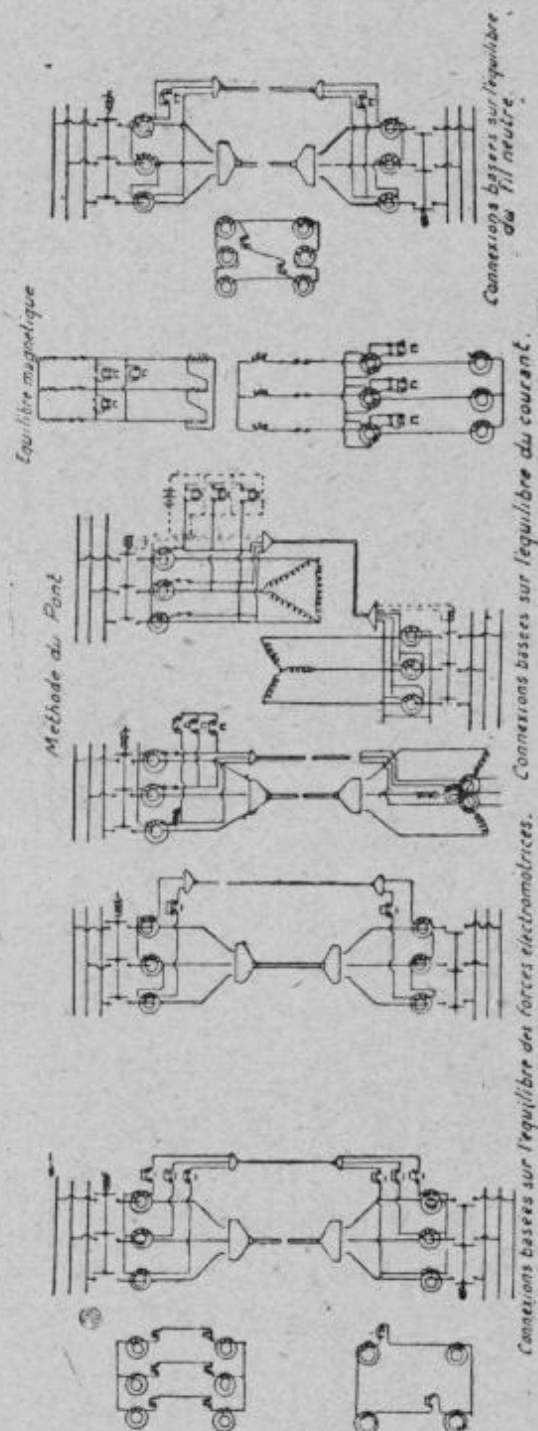


Fig. 1498.

On peut compléter, dans certains cas, le système que nous venons d'exposer par des dispositifs assurant la protection contre les surcharges soutenues, en insérant tout simplement des fusibles dans les conducteurs secondaires de protection. On peut aussi introduire un dispositif à action différée appliqué à la protection des feeders.

Un des développements intéressants du système de protection par équilibre est celui dit système *d'équilibre des conducteurs*, ou de protection contre les pertes. Ce système assure l'isolement d'un circuit dans le cas de défaut ou de perte à la terre.

L'équilibre est maintenu sur le circuit du relais aussi longtemps que la somme algébrique des courants dans les trois conducteurs du câble principal est à zéro. La protection à action différée contre les surcharges est réalisée par l'introduction de fusibles et d'une autre bobine de déclenchement.

Les barres d'omnibus doivent offrir par elles-mêmes une sécurité absolue, de sorte qu'il n'est pas besoin de dispositif de protection automatique. Cependant

elle peut être réalisée en plaçant des transformateurs d'intensité à chaque entrée et sortie du tableau et connectés de façon que, dans les conditions normales, l'équilibre soit maintenu dans le secondaire. C'est une solution à mettre en balance avec celle du doublement des barres

omnibus, des interrupteurs ou même des panneaux entiers. Questions de dépenses et de complication d'installation dans les deux cas.

Par la considération ci-avant on peut se rendre compte qu'une protection automatique, complète et efficace, est possible sans l'emploi de transformateurs de tension, les dispositifs préconisés étant uniquement mis en action par les courants prenant naissance dans la partie défectueuse. Disons que, quand leur emploi est absolument inévitable, (par exemple quand on n'a pas d'autre source pour l'alimentation à basse tension des wattmètres et ampèremètres) il est recommandable de les connecter à un circuit protégé et non directement aux barres omnibus.

Nous signalerons aussi les tableaux *armés ou cuirassés* où les barres omnibus sont enfermées dans une case métallique indépendante, en plusieurs parties assemblées, correspondant aux divers panneaux. Les barres et leurs joints entre panneaux sont noyés dans une composition isolante. Les transformateurs d'intensité sont enfermés dans une case ou enveloppe indépendante pour chaque panneau et noyés aussi dans une composition isolante. L'interrupteur à rupture dans l'huile peut être tiré vers l'extérieur.

Pour assurer la continuité de service, il faut parer aux troubles provenant de la répercussion des chutes de tension et de fréquence ainsi que de la propagation des surtensions par une disposition rationnelle des interrupteurs des tableaux de distribution. On y arrive par un sectionnement des barres et par la marche en unités multiples. De ce fait les troubles, les surtensions qui se produisent à l'ouverture des interrupteurs, coupant de fortes charges, sont localisées et on limite la puissance absorbée par un court-circuit éventuel à celle d'une unité. On n'a obtenu jusqu'ici des résultats satisfaisants dans ce sens qu'avec des interrupteurs manœuvrés à la main.

Nous signalons les dispositifs ci-après qui permettent d'utiliser l'automatisme désirable et les qualités de souplesse et de précision nécessaires pour assurer un bon service. Le but principal est que le sectionnement, par le moyen des interrupteurs n'existe que virtuellement, et qu'il ne s'effectue pas qu'en cas d'accident. Et pour résultats additifs le dispositif doit pouvoir délimiter, suivant les besoins, le nombre de feeders desservis par une unité en marche, et éviter qu'un alternateur qui ne se trouve pas directement branché puisse être privé de courant par le fonctionnement des interrupteurs de sectionnement. On peut, de cette façon, en toute sécurité, ne protéger les unités génératrices que par une action à retour, l'action à maximum étant reportée au point où elle est vraiment utile et n'offre pas de danger, c'est-à-dire sur le passage des courants d'échange de section à section exclusivement.

La (fig. 1499) représente schématiquement une centrale équipée suivant ce dispositif. Les numéros portent les significations ci-après :

1. Barres générales ; 2. Interrupteurs de sectionnement ; 3. Feeders ;
4. Génératrice ; 5. Commutateurs pour la mise hors service d'une unité quelconque ; 6. Interrupteur à déclenchement automatique ; 7. Relais ;
8. Ligne générale ; 9. Batterie auxiliaire ; 10. Relais à maximum ;
11. Ligne ; 12. Interrupteur auxiliaire à commande électrique ; 13. Ligne ;
14. Contact.

En cas d'accident ce dispositif fonctionne comme suit : un trouble quelconque déterminant une surcharge de l'un ou de l'autre des alter-

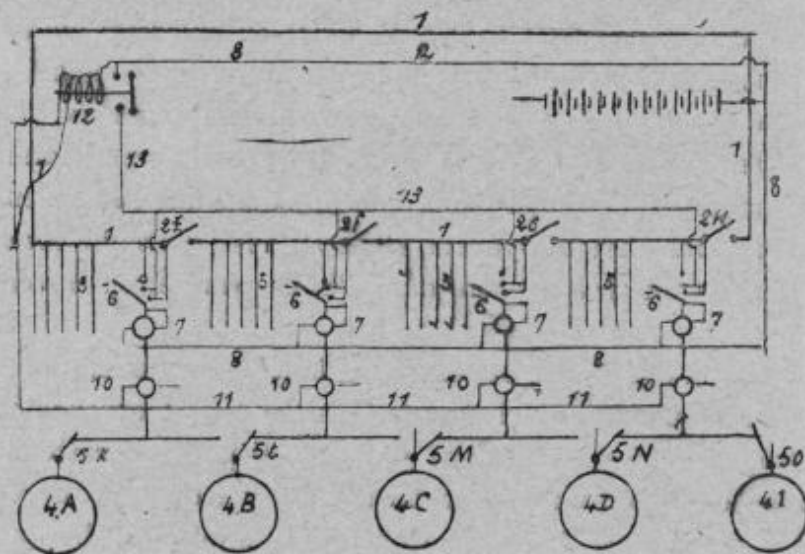


FIG. 1499.

nateurs en marche, le relais (10) correspondant se ferme. Lorsqu'un de ces relais a fonctionné, la ligne (11) étant du fait mise sous tension, les contacts de verrouillage (14) des alternateurs en marche livrent passage à un courant provoquant le déclenchement de l'interrupteur de sectionnement voisin. De la sorte, lorsque plusieurs unités sont en service, les sections se limitent chacune par la position du raccordement de ces unités aux barres générales. L'étendue des sections ainsi composées diminue au fur et à mesure que le nombre d'unités en service augmente.

La batterie auxiliaire a pour but d'assurer le fonctionnement des lampes témoins, des relais et des interrupteurs.

Ce dispositif est applicable dans les centrales à courant continu ainsi que dans les sous-stations de transformation de courant alternatif en courant continu où l'on peut mettre à profit la grande souplesse des batteries d'accumulateurs.

Il est, en effet, désirable d'obtenir l'entrée en jeu automatique et énergétique de celles-ci pour subvenir au débit de la section accidentée et

éviter un arrêt, même partiel, en gagnant le temps nécessaire à la mise en marche de l'unité de réserve.

Ces dernières dispositions ont été appliquées avec succès dans la nouvelle sous-station de la ville de Bruxelles.

Tableau de distribution pour alternateurs à 30.000 volts directs de l'usine hydroélectrique d'Amiène-Rome. — Il est divisé en trois parties : 1^o le tableau de manœuvre proprement dit, situé dans la salle des alternateurs et d'où s'exécutent les opérations sur le courant à haute tension, au moyen de commandes à distance par l'usage exclusif de courant à basse tension. Ce tableau est divisé en cinq sections et est monté sur armatures en fer. La section du milieu comprend les rhéostats d'excitation, l'appareil de mise en marche, d'arrêt et de régulation de vitesse des turbines, la commande à distance de l'interrupteur de mise en parallèle des alternateurs et les lampes de phases. Les deux sections voisines contiennent chacune la commande à distance de l'interrupteur d'une machine, un indicateur de phase, un voltmètre qu'on peut brancher sur chaque phase, et trois ampèremètres, un par phase.

Enfin les sections extrêmes comprennent la commande à distance des interrupteurs des lignes et trois ampèremètres, un par phase.

2^o Le tableau des alternateurs, comprenant les interrupteurs à 30.000 volts, les réducteurs de tension et de courant et les transformateurs de services locaux.

3^o Le tableau de ligne, comprenant les interrupteurs, les réducteurs des voltmètres de ligne et enfin des appareils de sécurité.

Ces deux derniers tableaux sont dans des locaux écartés et à des étages différents.

Les interrupteurs des alternateurs et de lignes ont leurs pôles séparés par des cloisons en ciment armé et peuvent être commandés à distance.

Chacun des conducteurs provenant des alternateurs traverse une impédance, un transformateur d'intensité, un groupe de quatre spires de résonance reliées à cinq déchargeurs à cornes avec bypass et couteaux correspondants ; l'interrupteur de l'alternateur ; deux couteaux entre lesquels est dérivé l'interrupteur de mise en parallèle. Ces deux interrupteurs sont commandés à partir du tableau de manœuvre. Les impédances et les spires de résonance, sont placées dans le sous-sol, les autres appareils étant au premier étage.

En continuant le trajet d'un conducteur, on rencontre : un interrupteur de ligne et son relais, un transformateur d'intensité, un déchargeur à cornes avec résistance de terre dans l'huile, un déchargeur à jet d'eau, un système d'ancrage des fils de ligne, avec triple isolement. Les déchargeurs à jet d'eau et ampèremètres correspondant sont à l'extérieur. Ce

tableau ne comporte pas de barres omnibus, selon le système instauré par M. Mengarini qui en a fait un modèle de simplicité.

Tableau de distribution haute tension avec pupitres. — Le tableau type que nous relatons se divise en quatre parties distinctes :

1° Le tableau basse tension qui comprend les appareils de mesure de toute l'installation, les manettes des commandes électriques des interrupteurs et disjoncteurs haute tension, les volants des rhéostats d'excitation, tous appareils qu'on peut toucher sans danger.

Ce tableau est généralement placé au milieu de la salle des machines et en face des machines sur une estrade. Il est divisé en un certain nombre

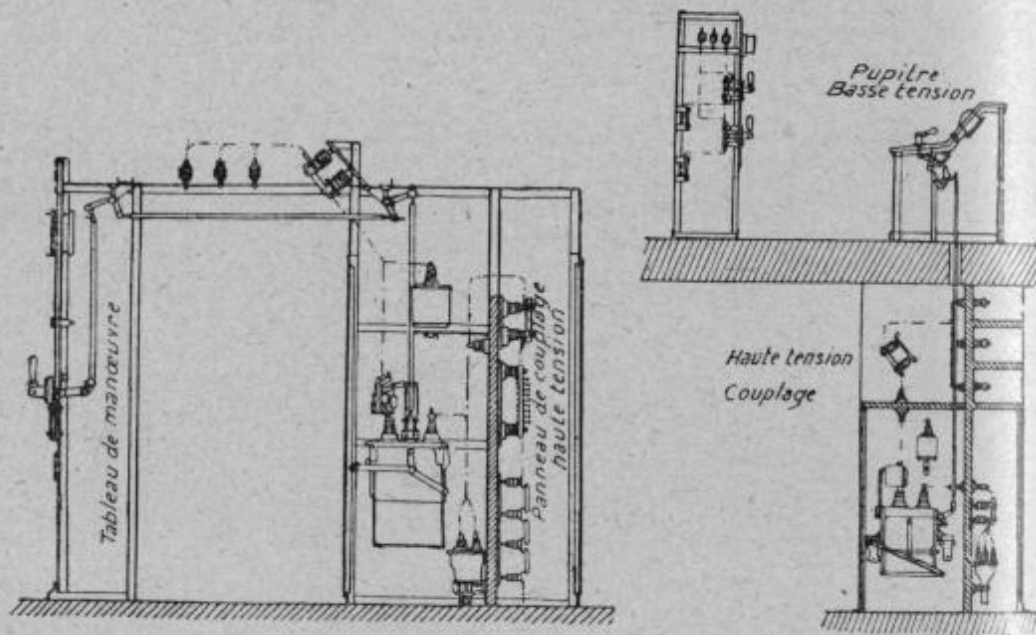


FIG. 1500. — Schéma d'installation de tableaux à haute tension.

de pupitres, savoir ceux qui commandent les alternateurs, la mise en parallèle des barres collectrices avec l'arrivée du courant et la station à vapeur de secours, la mise en parallèle de la station hydroélectrique avec la centrale ou station principale et enfin ceux qui commandent les excitatrices.

Les pupitres des alternateurs portent sur la face avant les volants de commande des rhéostats d'excitation, avec enclenchement entre eux pour la marche en parallèle, et les manettes de commande des interrupteurs d'excitation ; sur la table de marbre sont disposés : les ampèremètres et voltmètres, les commutateurs de voltmètres, les manettes des contrôleurs de commande électrique des interrupteurs à huile et un bouton de synchronisme.

Le synchronoscope est placé, par exemple, sur une colonne placée au milieu de l'estrade, face à l'opérateur ainsi que les voltmètres.

Le pupitre de la mise en parallèle des barres collectrices a sur sa face avant une manette pour l'interrupteur à huile et sur la table les mêmes appareils que ceux que nous venons de citer pour les alternateurs.

Le pupitre commandant l'usine génératrice d'énergie porte, sur la face verticale, les relais tripolaires à minima et à temps différé et sur la table les voltmètres, les ampèremètres, les contrôleurs pour la commande électrique des disjoncteurs à huile et les boutons de synchronisme.

Le pupitre de mesure porte un volant permettant d'agir simultanément sur les rhéostats d'excitation des alternateurs, un interrupteur bipolaire

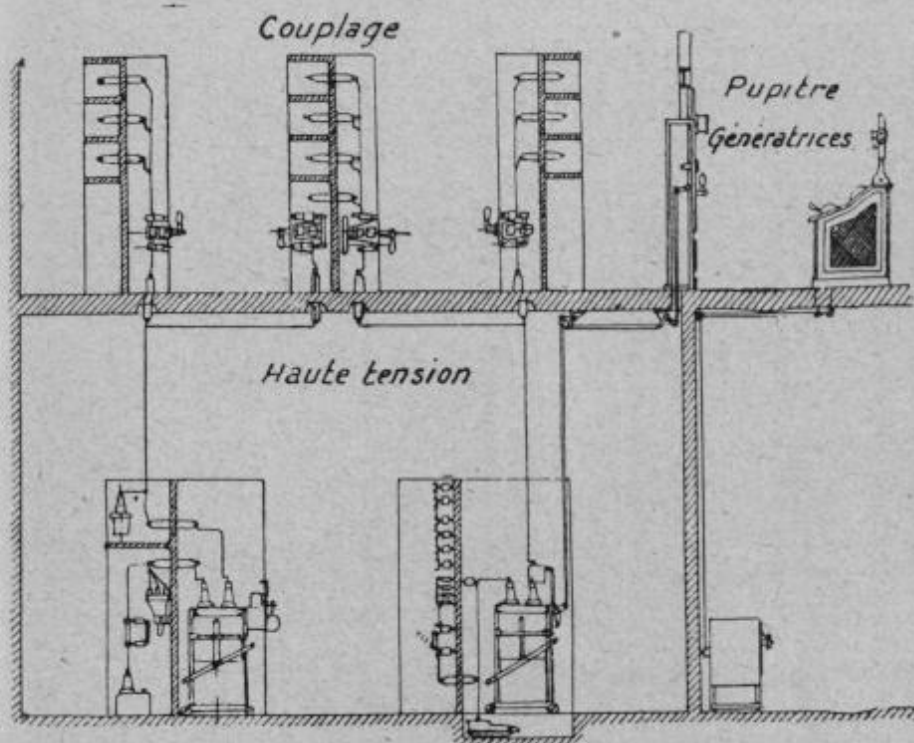


FIG. 1501. — Schéma d'installation de tableaux à haute tension.

à double direction avec fusibles permettant de relier à l'une ou l'autre des excitatrices les barres omnibus sur lesquelles sont branchées les bobines de commande des divers appareils automatiques ou des interrupteurs et disjoncteurs manœuvrés électriquement à distance. On peut y adjoindre des signaux avertisseurs de la non-ouverture du robinet de circulation d'eau de l'un des transformateurs si, par inattention, on veut enclencher le disjoncteur de ce transformateur. Les pupitres des excitatrices comportent pour chacun d'eux : sur la table de marbre les ampèremètres et voltmètres courant continu et sur leur face avant, les volants de manœuvre des rhéostats d'excitation et les leviers des disjoncteurs. Ces derniers peuvent être déclenchés des pupitres au moyen d'interrupteurs à boutons, des lampes à témoin indiquant la position d'ouverture ou de fermeture des disjoncteurs.

2^o Le châssis haute tension qui peut être subdivisé comme suit : un

panneau pour l'arrivée du courant haute tension intermédiaire ; un panneau de départ pour le même courant et destiné à alimenter une ligne aérienne à cette tension ; un panneau central servant à la commande des transformateurs et enfin un ou deux panneaux pour les départs de feeders de la haute tension.

Le châssis haute tension est placé aussi sur l'estrade mais en arrière des

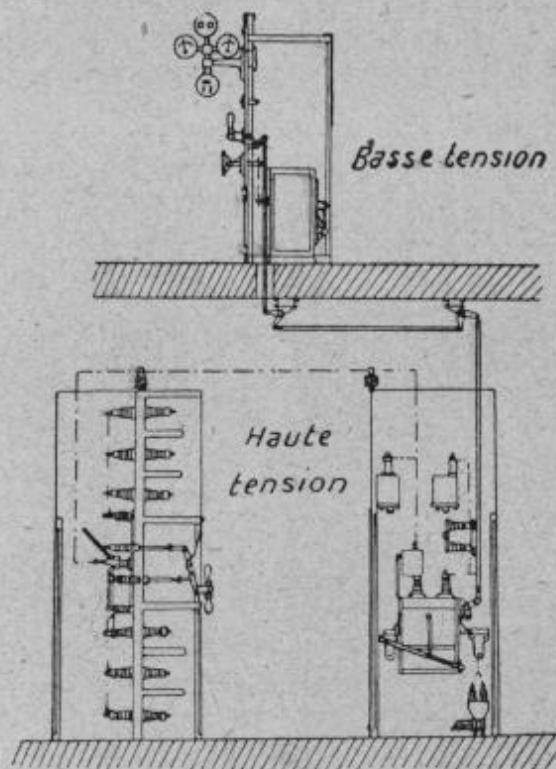


FIG. 1502. — Schéma d'installation de tableaux à haute tension.

pupitres signalés plus haut. Le panneau d'arrivée de la tension intermédiaire porte les ampèremètres à courant alternatif, commutateur de voltmètre, contrôleur de commande pour disjoncteurs à huile, relais à minimum et à temps différé et voltmètres à courant alternatif.

Le panneau de départ de la tension intermédiaire comprend : ampèremètres à courant alternatif, relais à minimum et à temps différé et contrôleurs de commande des disjoncteurs.

Le panneau de commande des transformateurs porte pour chaque transformateur un ampèremètre, un relais à maximum et à temps différé, les

manettes des contrôleurs de commande à distance pour les disjoncteurs.

Les panneaux de la haute tension correspondant aux départs des feeders portent chacun : trois ampèremètres courant alternatif, un voltmètre avec commutateur, manette de contrôleur de commande à distance du disjoncteur à huile, un interrupteur à fiches reliant les enroulements fil fin des wattmètres enregistreurs aux transformateurs de la ligne, un relais à maximum et à temps différé, et enfin un indicateur de terre.

Sur chaque panneau de transformateur, sur ceux de départ et sur celui de l'arrivée à tension intermédiaire sont placées en arrière du marbre, avec trous de vision, des lampes couleur témoins, pour les indications d'enclenchement ou d'ouverture des appareils.

En dessous de l'estrade portant le tableau basse tension on dispose les appareils suivants : commandes des pupitres supérieurs et fixés sur un châssis vertical en fer, rhéostats d'excitation, disjoncteurs type balais

pour les excitatrices, interrupteurs de champ bipolaires et résistances de décharge pour les alternateurs.

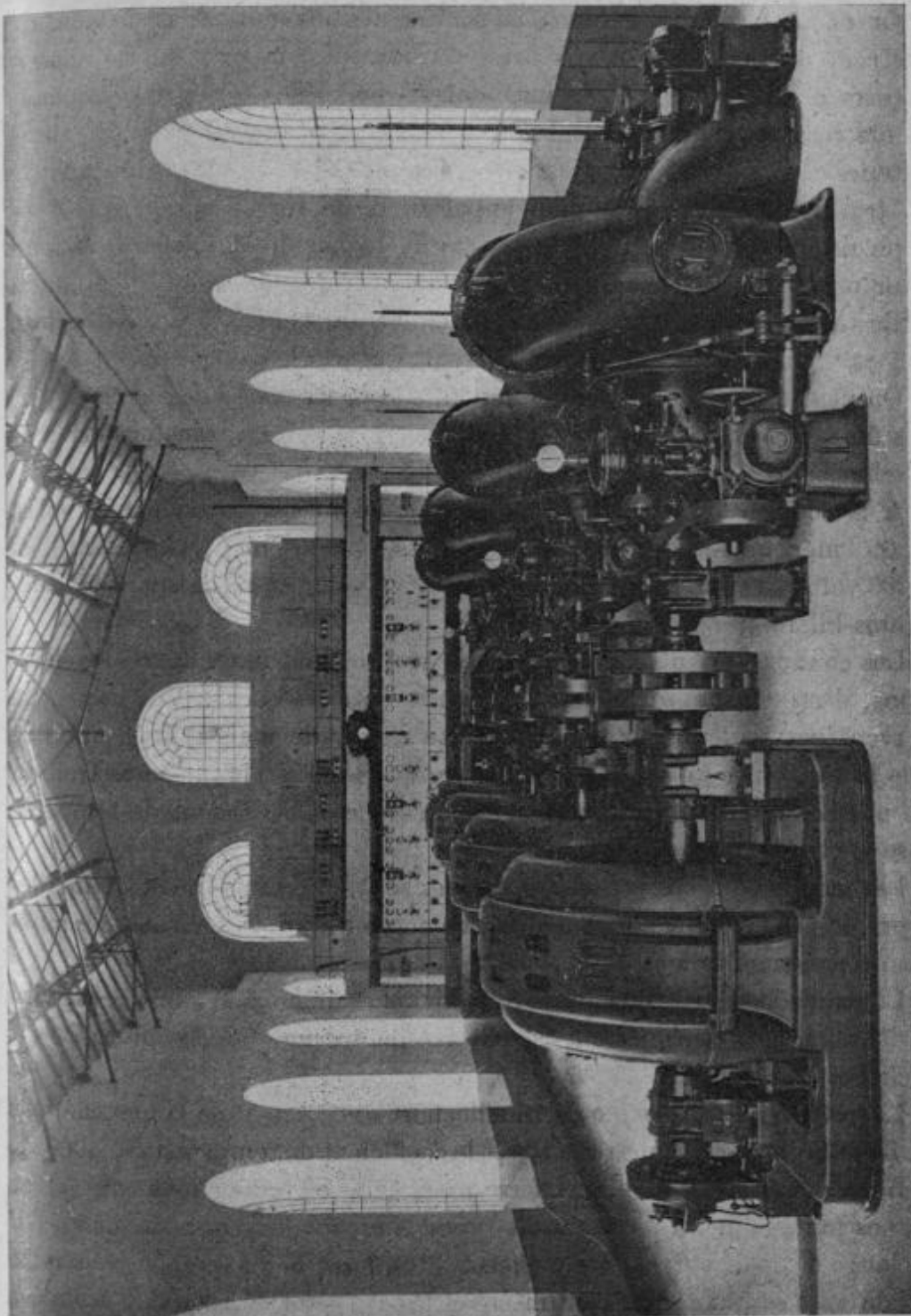


Fig. 1503. — Salle des machines avec tableau à pupitre central.

On y adjoint à proximité un panneau pour les appareils des services auxiliaires.

3° Le châssis pour la haute tension intermédiaire. Il est disposé en

sous-sol de la station et peut être divisé en deux parties : service des alternateurs et de l'arrivée du courant de la station de secours thermique et service des transformateurs.

On dispose la partie réservée au service des alternateurs en dessous de l'estrade portant les tableaux basse tension ; il comporte quatre châssis adossés deux à deux : le premier châssis porte des séries de compartiments correspondant au nombre des arrivées de câbles venant des alternateurs et de l'installation à vapeur ; en plus, figurent pour chaque arrivée les transformateurs shunt pour appareils de mesure, lesquels sont protégés par des fusibles. Les câbles traversent ensuite la cloison du fond pour passer dans le deuxième châssis où se trouvent les interrupteurs à huile tripolaire, manœuvrés électriquement du châssis à basse tension. Les câbles remontent ensuite et passent à la partie supérieure.

On peut tabler sur les chiffres suivants pour les résistances d'isolement des fils isolés pour tableaux de distribution, postes de transformation et machines.

A la tension 220 volts : 600 mégohms-kilomètre ; tension 500 volts, 1.200 mégohms-kilomètre ; 1.500 volts, 3.000 mégohms-kilomètre ; 3.000 volts, 5.000 mégohms-kilomètre ; 5.000 volts, et au-dessus, 5.000 mégohms-kilomètre.

Les conducteurs pour résistances en tête de feeders ou autres applications, destinés à absorber une grande quantité d'énergie électrique, ne doivent pas seulement avoir une haute résistivité mais il faut en outre que la résistance ne varie pas à mesure que le fil s'échauffe sous l'action du passage du courant, et, par suite, posséder un coefficient de température le plus faible possible.

Les métaux qui ont été le plus utilisés sont le platine-argent, le maillechort, le platinoïde et le manganin ; ce dernier a un coefficient de température presque négligeable.

Le maillechort à 60 de cuivre, 8 de nickel et 32 de zinc a une résistivité de 19 microhms centimètre à 0° ; elle atteint 64 pour 50 de cuivre, 30 de nickel et 20 de zinc.

La résistivité du platinoïde (maillechort avec 1 0/0 de tungstène) est de 34 microhms-centimètres à 15° et le coefficient de température, 0,00021.

Le manganin (cuivre, nickel, ferro-manganèse en proportions variées) est de nos jours le métal le plus utilisé pour la confection des résistances. Au mélange de 65 de cuivre, 5 de nickel et 30 de ferro-manganèse, la résistivité est de 42 à 46 microhms-centimètre et le coefficient de température n'est que de 0,00025.

II. — ISOLATEURS

556. Nature et qualités des isolateurs. — Les transformateurs statiques modernes sont aptes à subir des tensions bien supérieures à celles

utilisées dans les grands transports d'énergie actuels ; seuls les isolateurs retardent le bénéfice acquis par les progrès obtenus dans le matériel de transformation ; on comprendra donc tout l'intérêt que les ingénieurs attachent à l'étude et à la réalisation d'un isolateur industriel pouvant s'adapter aux lignes-travaillant sous des tensions pratiquement inconnues à ce jour. Cependant la fabrication des isolateurs a fait de grands progrès ces dernières années et les épreuves de surtensions auxquelles on les soumet en usine et après montage permettent d'éliminer ceux qui sont mal fabriqués ou qui ont été endommagés en cours de manutentions.

L'isolateur idéal pour très hautes tensions devrait pouvoir s'accommoder de tous les climats et fonctionner aussi bien avec du brouillard que couvert de poussières et de dépôts salins ; il devrait, par suite, avoir aussi peu de cavités abritées que possible, de façon à éviter l'accumulation de ces dépôts.

La conduction massique (conductibilité) dans les bons isolateurs doit être absolument négligeable. La conduction superficielle ou dispersion qui se produit par l'humidité et les poussières existe toujours dans une mesure plus ou moins grande et enfin la perforation peut toujours se produire et la disruption (ou perforation du diélectrique air) n'a lieu qu'aux tensions très élevées ⁽¹⁾. L'obstacle à la perforation est l'épaisseur que

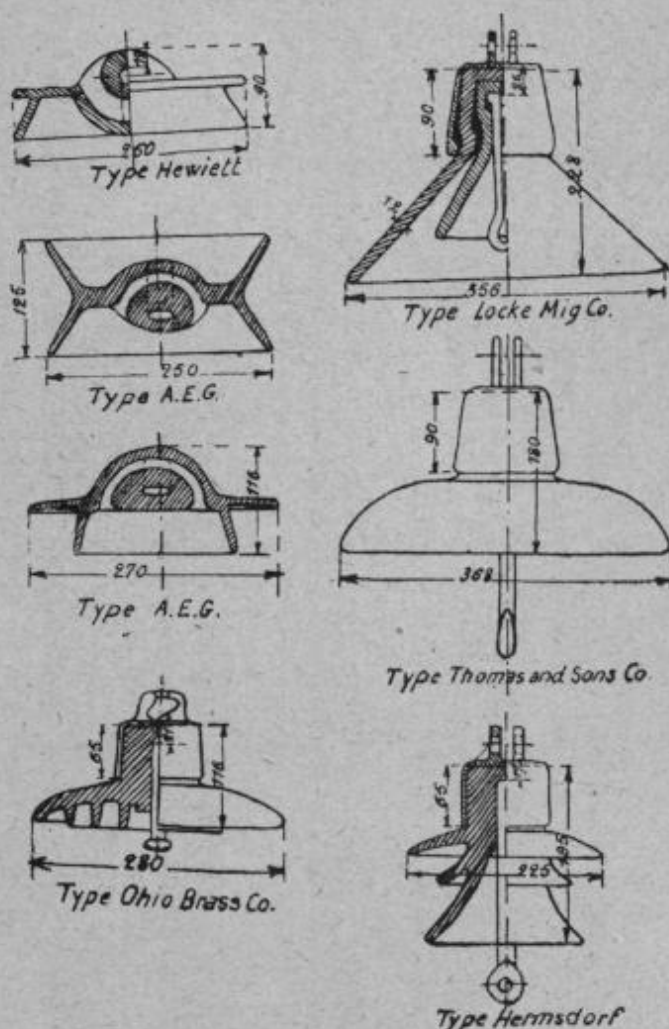


FIG. 1504 — Types d'isolateurs dont la disruption se produit à une tension de 130 à 135 kv.

⁽¹⁾ Les deux séries de phénomènes qui intéressent la vie d'un isolateur sous tension sont les uns dus à la tension seule : effluves, aigrettes et arc (comme on le verra plus loin, en traitant des surtensions) et les autres dus surtout à la capacité : ramicelles, étincelles, ou phénomènes de haute fréquence.

On peut donner à la porcelaine et celui à la disruption dépend des dimensions de l'isolateur, de sa forme et de la disposition des cloches. La disruption étant grandement facilitée par la pluie, il faut donc tendre à repousser celle-ci de l'isolateur; de là la forme préconisée des cloches à angle aigu, c'est-à-dire présentant des plans très inclinés pour l'écoulement des eaux (types Paderno, Delta, etc.).

Un bon isolateur doit posséder en outre une rigidité électrostatique suffisante, une ligne de fuite aussi grande que possible, une résistance mécanique telle que l'appareil résiste aux efforts de rupture provenant de la tension de la ligne, et enfin offrir un isolement persistant même par les pluies les plus intenses.

Les efforts mécaniques qui s'exercent sur un isolateur sont dus au poids du conducteur même et de ses surcharges qui ont une direction verticale, à l'effet du vent et à celui des angles dans le tracé de la ligne qui ont en général une composante horizontale. Il y a lieu de tenir compte aussi des efforts accidentels et des chocs. Mais les isolateurs travaillant mal à la traction, on doit d'une manière générale ne leur faire supporter que des efforts de compression. La résistance mécanique des isolateurs en porcelaine est de 4.000 kilos par centimètre carré à la compression et 1.700 kilogrammes à la traction, mais ils résistent mal aux chocs.

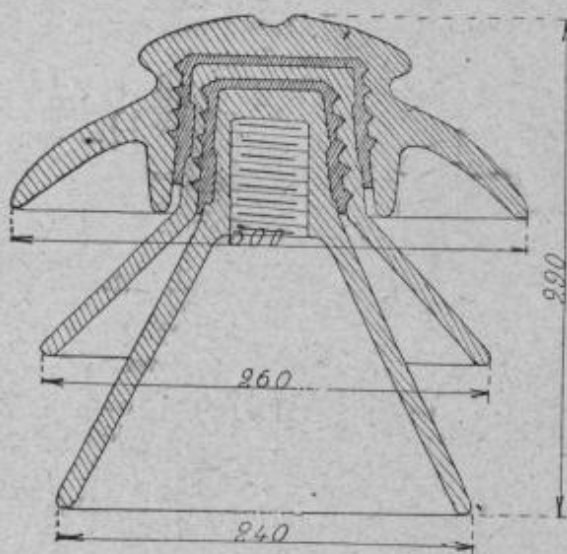


FIG. 1505. — Isolateur en verre.
Tension 50.000 volts.

Le verre condense davantage que la porcelaine l'humidité à sa surface; en outre, il est plus cassant et résiste mal aux changements de température; il ne convient pas pour des tensions supérieures à 15.000 ou 20.000 volts. Cependant la verrerie de Folembray établit des isolateurs de 55.000 volts (fig. 1505) ⁽¹⁾. On a dû édifier pour cela un verre spécial peu alcalin, se détériorant peu à l'attaque des agents atmosphériques et d'une grande résistance méca-

nique à la condition d'être très soigneusement recuits. Les isolateurs en verre ont l'avantage de laisser voir facilement les défauts et les fentes intérieures.

⁽¹⁾ La Société d'Énergie Électrique du Littoral Méditerranéen emploie des isolateurs en verre pour ses lignes à 55.000 volts.

On a remarqué que les isolateurs dans lesquels la répartition de la tension est la meilleure sont les plus denses et ceux dont la structure a une apparence vitreuse.

Les isolateurs en verre coûtent environ la moitié de ceux en porcelaine. Entre 40.000 et 50.000 volts un isolateur pèse 3 à 4 kilogrammes, tandis qu'il pèse 15 à 20 kilogrammes pour 76.000 volts. On doit demander aux isolateurs qu'ils aient subi une bonne cuisson, car c'est de là que l'on peut compter sur sa résistance électrique.

Les isolateurs à haute tension, tels qu'on les emploie de nos jours, sont faits avec une pâte d'argile, de feldspath et de quartz, soigneusement purifiée par filtration pour la débarrasser de tout corps étranger qui pourrait créer un point faible dans l'isolateur. Une fois l'isolateur formé, il est trempé dans une solution vivifiante et porté à l'étuve pour un premier séchage, puis dans un four où il est soumis à une température de 370°. L'opération de la cuisson est des plus délicates et joue un rôle très important. L'isolateur doit avoir un gain très fin pour ne pas absorber l'humidité, offrir une cassure nette et brillante et l'émail exempt de toute gerçure. Les isolateurs à cloche modernes sont plutôt larges que hauts pour avoir une bonne résistance d'isolement de masse. On remarque aussi une tendance à employer la porcelaine émaillée vert ou brun.

La capacité des isolateurs est très faible en raison de la forte épaisseur qu'on leur donne. Au point de vue de l'isolement, si une ligne n'a aucun point à la terre, les isolateurs doivent résister, dans le cas du courant continu, à une tension x (tension maxima du courant mesurée) et, dans le cas du courant alternatif, à une tension $\sqrt{2}x$, x étant la tension efficace entre deux conducteurs, aussi bien pour le courant alternatif simple que pour le courant triphasé. Quand un point de la ligne est à la terre, dans le cas de courant continu et de courant monophasé, une seule série d'isolateurs est soumise soit à la tension x , soit à la tension $\sqrt{2}x$, et l'isolation est deux fois plus éprouvée. Il faut mettre à la terre soit le milieu de l'enroulement induit des alternateurs, soit le milieu de l'enroulement des transformateurs-élevateurs de tension, pour que l'isolation ne soit pas plus éprouvée que dans le premier cas, la tension par isolateur étant $\frac{x}{2}$ pour le courant continu et de $\sqrt{2}x$ pour le courant monophasé. Avec du courant triphasé on peut mettre à la terre les centres des étoiles et, dans ce cas, chaque série d'isolateurs doit résister à une tension donnée par l'expression : $0,577 \sqrt{2}x$, c'est-à-dire plus élevée qu'avec le courant continu.

La mise à la terre a cependant l'inconvénient de doubler pour ainsi dire les chances d'interruption de service.

Si on appelle V la tension appliquée à la gorge de l'isolateur, la ferrure

étant à la tension 0 et I l'intensité du courant qui va de la gorge de l'isolateur à la ferrure, la résistance d'isolement a pour valeur :

$$R = \frac{I}{V}$$

La (fig. 1506) donne en fonction de la tension du réseau, les facteurs de

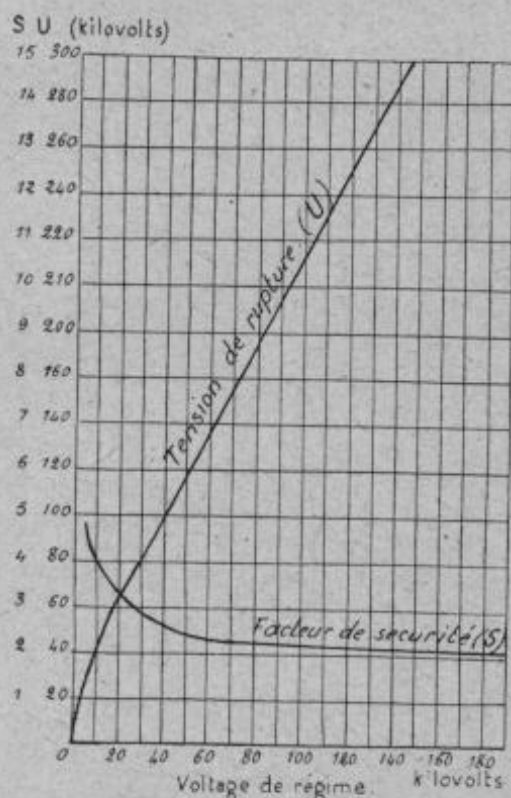


FIG. 1506.

sûreté généralement employés (rapport de la tension que peut supporter l'isolateur à la tension d'utilisation). Pour déterminer ces courbes on a supposé que les deux conducteurs sont isolés par rapport au sol ; il peut alors exister entre l'un d'eux et la terre 50 à 60 0/0 de la tension ; on voit, d'après la courbe, que le facteur de sûreté varie de 6,5 à 2. Ces valeurs sont évidemment plus ou moins variables selon l'importance et la nature de la station ; mais en tout cas, même avec un conducteur à la terre, on ne pourrait les abaisser de plus de 70 à 80 0/0.

Pour les isolateurs à haute tension, on a intérêt à se rendre compte de la valeur du courant

qui traverse l'isolateur quand il est soumis à la tension normale de la ligne dans les diverses conditions de service auxquelles il peut être soumis. D'après les recherches entreprises par M. Nègre au laboratoire de l'Institut électrotechnique de l'Université de Lille, il résulterait qu'il existe pour chaque isolateur une tension critique en dessous de laquelle la résistance d'isolement est constante et que cette tension critique varie avec les dimensions, la forme et l'état de l'isolateur. A partir de cette tension critique, la résistance d'isolement décroîtrait d'autant plus rapidement que l'isolateur est plus sale ou plus mouillé et que le diamètre de la cloche supérieure est plus faible.

M. Nègre cite un cas où, avec un isolateur de 50.000 volts, de 352 millimètres de diamètre, il a observé 32.000 volts pour la tension critique (isolateur sec et propre) et 16.000 volts (isolateur noirci et mouillé).

Sur les lignes situées au voisinage de la mer on a affaire à un ennemi redoutable, le sel, qui contribue à former sur la surface de l'isolateur une

épaisse couche conductrice, de sorte qu'au bout d'un certain temps l'isolement de la ligne est totalement détruit. Ainsi le long de la Riviera on a été obligé de déplacer la ligne pour l'éloigner de la mer. Les constructeurs américains ont recours, pour éviter cet inconvénient, à l'emploi d'isolateurs très grands et à l'établissement de deux lignes, pour pouvoir en laver une pendant que l'autre fonctionne.

M. Anfossi a expérimenté sur les parties de la ligne de l'Acquedotto de Ferrari Galliera (tension 25.000 volts) exposées à l'action de la mer, le type d'isolateur représenté par la (fig. 1507) qui, après dix-huit mois de service, se trouvait dans de bonnes conditions et permettait encore de faire régulièrement le service ⁽¹⁾.

Dans les isolateurs, la distance du conducteur à la tige doit être assez grande pour qu'aucun arc ne puisse se former même dans le cas de sur tension. D'après M. Friese, le phénomène de la décharge par le bord inférieur d'un isolateur provient de ce que, lorsque la surface est mouillée, la cloche supérieure est conductrice et que les filets d'eau qui coulent le long du rebord sont au même potentiel que la cana-

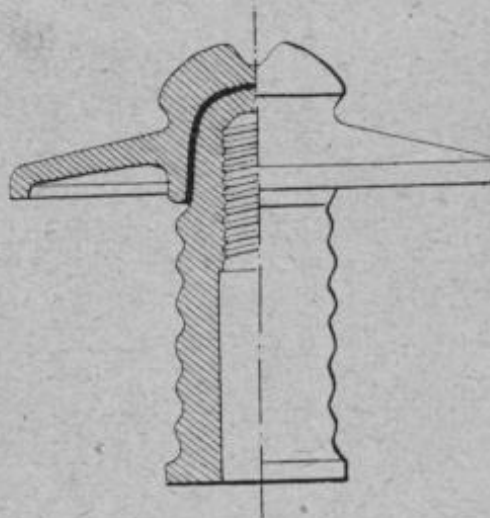


FIG. 1507.

lisation, de sorte qu'ils ne suivent plus les lois de la pesanteur, mais sont attirés par la tige qui est à un potentiel différent. En outre, l'action du vent renforce cette attraction en chassant la pluie horizontalement, car elle permet à la décharge de se produire à une tension moins élevée que quand la pluie tombe verticalement.

Les pertes d'énergie dues aux isolateurs ont lieu par l'intérieur du système, qui joue le rôle d'une très grande résistance ; par hystérésis, par la conductibilité de la surface de l'isolateur et par la composante wattée du courant de capacité lorsque l'appareil doit résister à une résistance alternative. Les deux premières pertes sont négligeables et les autres ne deviennent sensibles qu'au-dessus de 30.000 volts.

Sur une ligne établie avec des isolateurs à cloches en verre, de 14 centimètres de diamètre et 13 centimètres de hauteur, la perte n'a pas dé-

(1) Sur cette ligne on a remarqué aussi que, dans la partie supérieure de la canalisation, qui serpente au milieu d'étroites vallées montagneuses, les isolateurs se conservent à peu près propres et que les isolateurs sont d'autant plus sales qu'on descend les vallées se dirigeant vers la mer et que l'incrustation de la poussière a lieu de préférence là où sa formation est moins dérangée par le vent.

passé 2 watts par isolateur pour une tension de 25.000 volts entre le fil et la monture. Sur une ligne à la tension de 50.000 volts on peut compter une dizaine de watts par isolateur sec et propre. Au-dessus de la tension critique les pertes augmentent rapidement avec la tension.

Les isolateurs pour 50.000 à 60.000 volts ont un diamètre de 360 millimètres, et pèsent 11 kilogrammes. Pour résister à des tensions de 80.000 volts, il faut compter sur un diamètre de 400 à 500 millimètres et un poids de 20 à 25 kilogrammes.

Il est indispensable que la surface des isolateurs soit bien lisse et ne

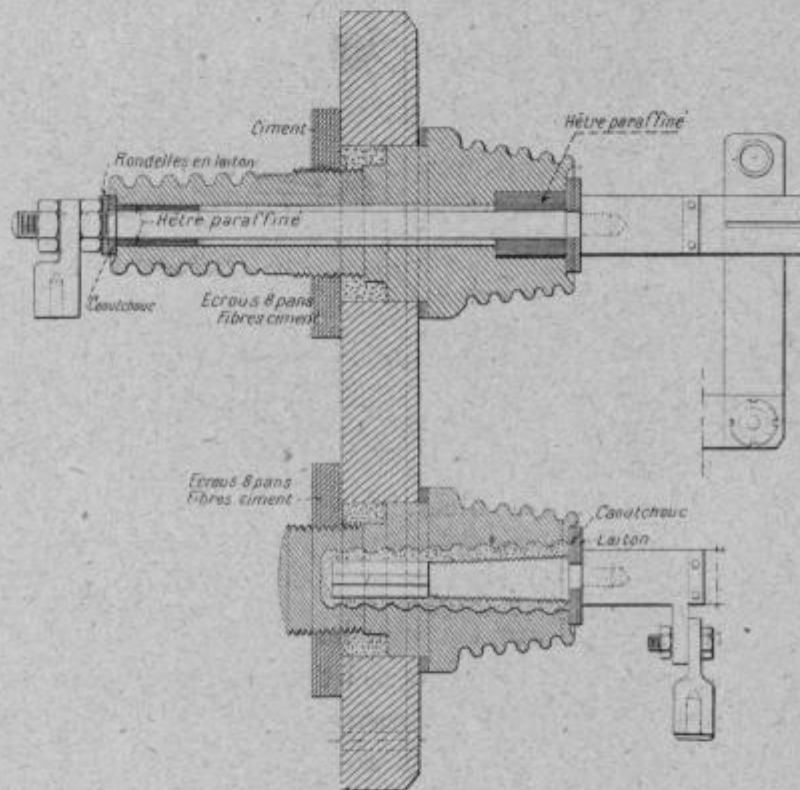


FIG. 1508. — Isolateurs à haute tension pour canalisations intérieures.
(Usine hydroélectrique de la Brillanne.)

présente aucune rugosité pouvant retenir les poussières ; les isolateurs mal'euits et craquelés doivent être rejetés. Les scellements en soufre bien faits donnent de bons résultats. En Amérique, ainsi que nous l'avons signalé, on visse dans l'isolateur une tige de bois paraffinée, résistante et élastique, à l'effet de diminuer et la fatigue de l'isolateur et sa capacité.

On a créé des types d'isolateurs où on a ménagé des chambres à l'effet d'empêcher le remous de l'air, par suite, le dépôt de gouttelettes d'eau provenant du brouillard.

Pour les isolateurs d'angle et d'arrêt, on leur donne une disposition telle que la ferrure puisse être maintenue par ses deux extrémités, afin d'en augmenter la solidité. Les ferrures demandent à être constituées par des

fers de première qualité et enfoncées assez avant dans la tête de l'isolateur. On peut faire travailler ces fers à raison de 10 kilogrammes par millimètre carré.

Les isolateurs à l'intérieur des bâtiments sont généralement des tubes en porcelaine avec nombreuses gorges à l'extérieur dont la longueur dépend de la tension du courant. Pour les très hauts voltages, on dispose une double épaisseur.

La tension de rupture pour les isolateurs de supports pour l'intérieur, qu'on fait généralement en porcelaine travaillant à la compression, dépend beaucoup de leur état hygrométrique. On est donc obligé de prendre un

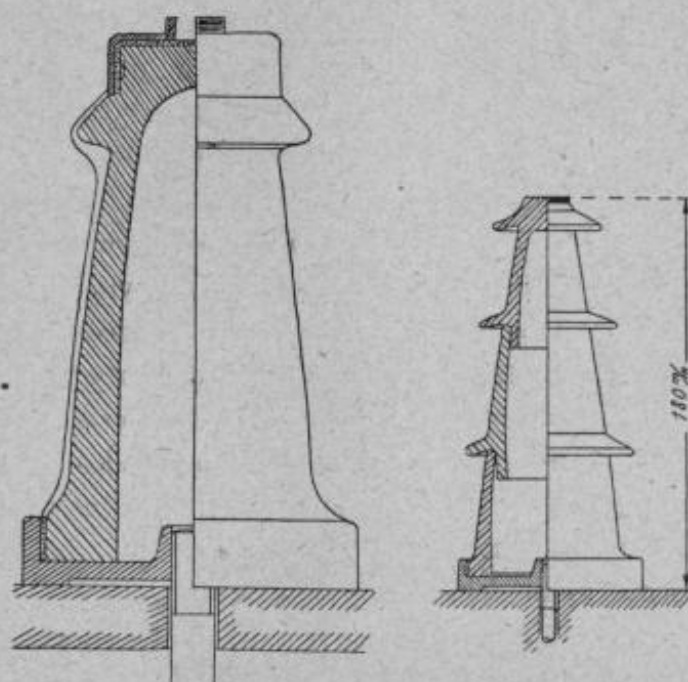


FIG. 1509.

facteur de sûreté beaucoup plus grand pour les très hautes tensions : 3 et même 3,5. La résistance à la rupture doit être de 30 à 35 0/0 plus élevée que celle indiquée à la (fig. 1506).

L'isolateur Kuhlmann, employé par l'A. E. G. (fig. 1509) évite l'emploi des sillons qui ont l'inconvénient d'absorber les poussières. Cet isolateur est vide à l'intérieur et il est hermétiquement clos en bas par un couvercle métallique. La rupture ne peut ainsi se produire que superficiellement, même si l'isolateur se brise en haut ; pour augmenter la rigidité mécanique, la section des porcelaines a une forme parabolique.

La fixation des couteaux d'interrupteurs pour tableaux de distribution a lieu de différentes façons, soit à l'aide de porcelaines pleines, soit de porcelaines perforées, offrant toute garantie tant pour l'isolement que pour la solidité mécanique.

Pour les isolateurs d'entrées de bâtiments, on a constaté que la longueur du trajet selon laquelle la foudre se fait passage le long de l'isolateur est plus grande que la longueur correspondante dans l'air pour la même tension ; ce qui s'explique encore par la plus grande capacité linéique qui provoque des étincelles superficielles de charge avant la rupture. Pour diminuer cet effet, il faut proportionner le diamètre à la longueur et rendre surtout à l'endroit de la douille d'attache la capacité très faible.

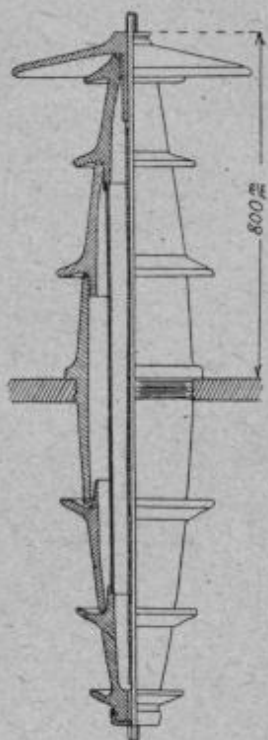


FIG. 1510. — Isolateur
A. E. G.
Tension 125.000 volts.

L'A. E. G. emploie l'isolateur Kuhlmann (fig. 1510) qui est rempli à l'intérieur par de l'huile ou des éléments composés. Cet isolateur chasse d'une manière efficace l'eau de pluie par la vaporisation.

La (fig. 1511) montre un genre d'isolateur très utilisé aux États-Unis. Le type *a* se compose de trois parties : une paire de disques en porcelaine parfaitement émaillée, un tube de porcelaine et un conducteur en cuivre traversant le tube et terminé par des cosses auxquelles on raccorde les fils. Le type *b* montre le même appareil combiné avec des couteaux permettant d'isoler la ligne. Grâce à la forme même des pièces, on obtient un bon isolement malgré la pluie, la neige et autres intempéries ; de plus, ce dispositif s'oppose à l'établissement des nids d'oiseaux que l'on observe que trop fréquemment près des tubes d'entrées de poste.

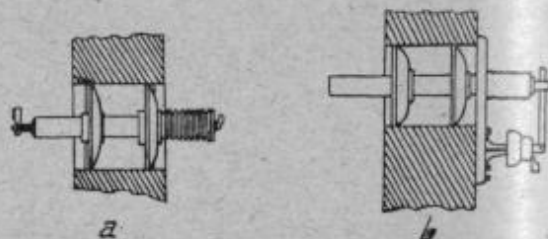


FIG. 1511.

557. Types d'isolateurs. — Actuellement les isolateurs pour les tensions élevées sont construits en plusieurs parties ; et ces pièces sont ou scellées ensemble avec un mastic spécial au moment de la pose, ou bien on effectue ce scellement lors de la fabrication. Le premier procédé permet de procéder à des essais avec chaque pièce séparément, ce qui facilite la fabrication et évite le jaillissement des étincelles disruptives contre la gorge et le support métallique de l'isolateur et alors on peut employer des tensions individuelles moins élevées qu'il est nécessaire d'utiliser pour les isolateurs entièrement montés et, dans ce dernier cas, on peut avoir à

produire des tensions de 400.000 volts que l'on n'a pas toujours à sa disposition. En France, on peut livrer de nos jours des isolateurs à cloche résistant à 70.000 volts.

L'isolateur *Semenza* porte deux cloches en porcelaine réunies au moyen de mastic et montées sur tige en fer. A sa partie supérieure est une capote en forme d'ombrelle, à l'effet de garantir l'appareil contre la pluie, et l'attache du fil de la ligne se fait plus près du pied de l'isolateur, ce qui diminue la valeur du moment de rupture. Ce chapeau est en terre cuite spéciale moins cassante que la porcelaine. De semblables isolateurs ont résisté à une tension de 110.000 volts, sous une pluie ayant donné en une heure une hauteur d'eau de 1^m,20. Ce résultat proviendrait de ce fait que toute la partie, où le fil de ligne est en contact avec l'isolateur, se trouve, grâce à l'ombrelle, complètement abritée de la pluie.

Les divers types d'isolateurs de la (fig. 1512) ont trait à des installations de transport à haute tension.

Le premier en partant du haut de la figure et à gauche est un isolateur de la ligne de la Niagara Lockport and Ontario Power and Co (60.000 volts) à trois cloches superposées, et assemblées au ciment entre elles d'abord et ensuite avec la broche d'acier qui sert à le fixer sur le pylône. Le câble passe dans une rainure de la tête et lui est attaché par une solide ligature. La ligne est constituée par des câbles en aluminium de 19 brins à section totale de 325 millimètres carrés, équivalant à 200 millimètres carrés de cuivre.

Les deuxième et troisième concernent un type d'isolateur Anfossi, employé sur la ligne de l'Acquedotto de Ferrari Galliera à Gênes (25.000 volts). Il a été étudié par M. Anfossi en vue de protéger les isolateurs contre l'encrassement par la poussière et les dépôts de sels dus au voisinage de la mer, dépôts qui produisent des pertes à la terre très appréciables. Les cannelures, dont toutes les parties sont largement balayées par le vent empêchent la formation de toute incrustation.

Le quatrième concerne un isolateur tubulaire pour traversée de murs (200.000 volts). Un premier tube en porcelaine D, facile à remplacer, entoure immédiatement le conducteur et loge dans un tube double A également en porcelaine. Ce dernier est maintenu par deux plaques en porcelaine B, au centre d'un manchon C. Les deux manchons en porcelaine E sont munis de quatre chapeaux superposés. Toute décharge par les surfaces extérieures des tubes A et E, qui peuvent devenir conductrices dans l'air humide, est empêchée par le disque F.

Le cinquième est un isolateur de la maison F. G. Baum, de San-Francisco (100.000 volts).

Le sixième est un isolateur d'amarrage des fils du transport d'énergie de la Sioule (20.000 volts).

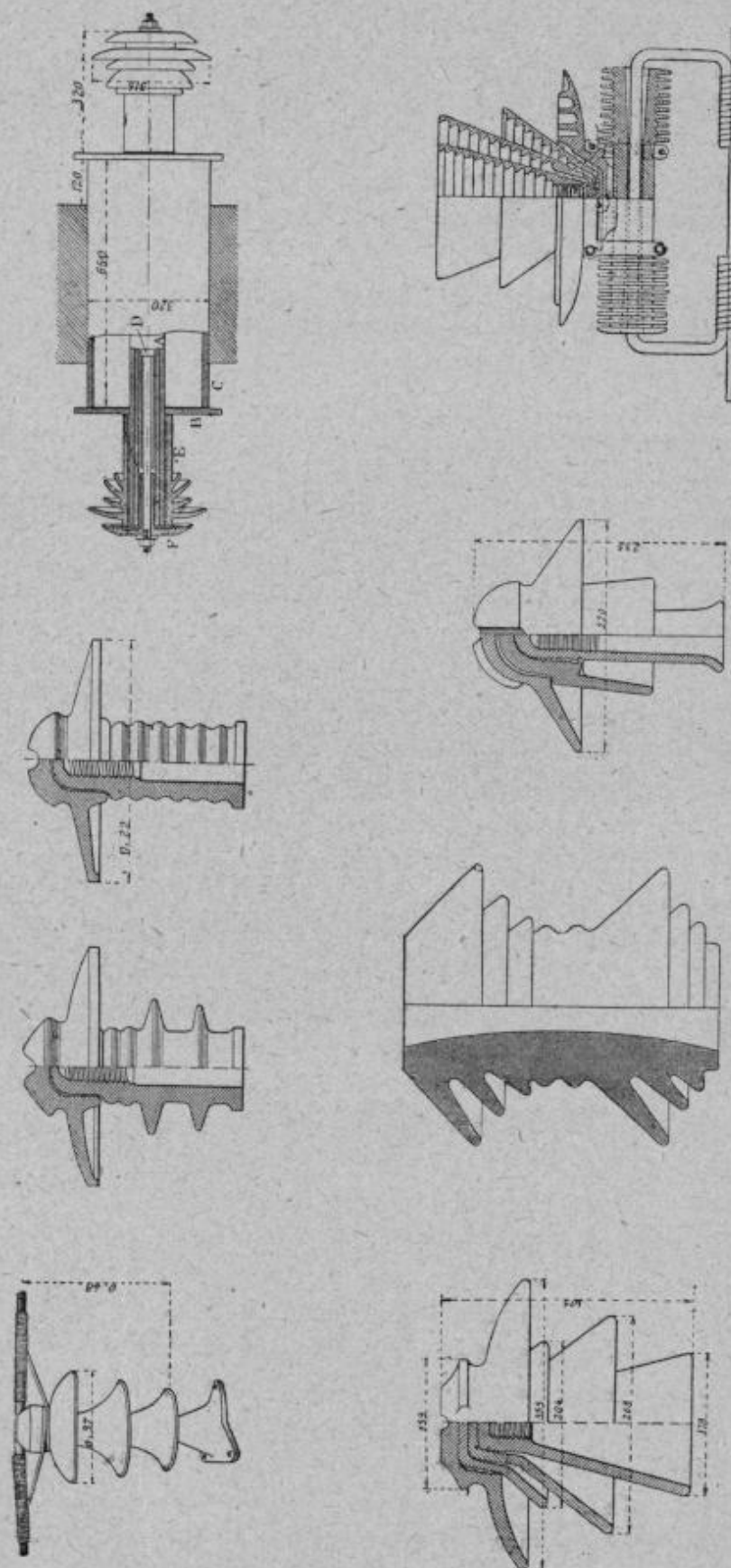


FIG. 1512.

Le septième a été employé sur la ligne Moutiers-Lyon (57.000 volts).

Le huitième est un type utilisé sur la ligne de la Grand Rapids Muskegon Power Co (72.000 volts). Il se compose de deux isolateurs distincts. Celui inférieur comporte quatre robes coniques réunies par leur sommet à la manière ordinaire par cimentage. Les robes sont cannelées intérieurement pour présenter une grande surface d'isolement. L'isolateur supérieur tubulaire a ses deux extrémités garnies d'une série d'ailettes. Il est réuni à l'isolateur à cloches par des étriers métalliques. Deux anneaux en métal cimentés dans la partie médiane reçoivent le fil de ligne avec lequel ils sont ligaturés.

M. Kiefer a imaginé un isolateur où, dans la rainure pratiquée habituellement à la partie supérieure, il a ménagé un logement demi-circulaire présentant une courbure dans le plan horizontal ainsi que deux coins en bois bouilli dans l'huile de lin qui pressent énergiquement le fil dans son logement par l'intermédiaire d'un

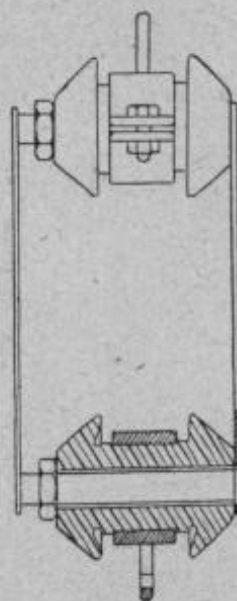


FIG. 1513. — Isolateur Brown-Boveri à haute tension pour extérieur.

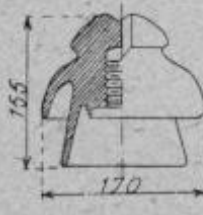
Ligne du Loup



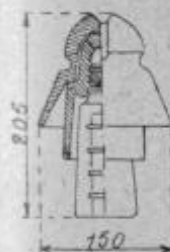
Ligne de la Mescla



Ligne d'Antibes.



Ligne de Menton



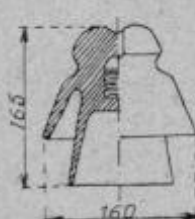
Ligne Loup-Grasse-Mougins



Ligne Siagne-Grasse



Ligne de Cannes



Ligne du Var



FIG. 1514. — Isolateurs des lignes du Littoral de la Méditerranée.

tampon en caoutchouc ou en bois et empêchent ce fil de se déplacer. Tout effet de ce dernier augmente le serrage et enfin, en cas de rupture de la ligne, le coin opposé au brin rompu se met en action et, par ce fait même, assure le serrage.

Les isolateurs du transport Hoja-Salto-Bolarque (Espagne), à 50.000 volts, sont en deux pièces ; la jupe supérieure est large et cannelée à la partie

inférieure; ceux du transport de la Sociedad Hidroelectrica Espanola (Madrid), à 66.000 volts, sont aussi des isolateurs en deux pièces, la partie supérieure avec une grande cloche en recouvrant deux petites, et la partie inférieure avec une jupe large et une plus étroite et longue. La

maison Rosenthal et C^{ie}, qui a fourni les isolateurs de ces deux lignes d'énergie, préconise pour des tensions de service de 100.000 à 120.000 volts des isolateurs d'un modèle analogue mais en trois pièces et avec la grande jupe beaucoup plus large.

Les transports de Trollhattan-

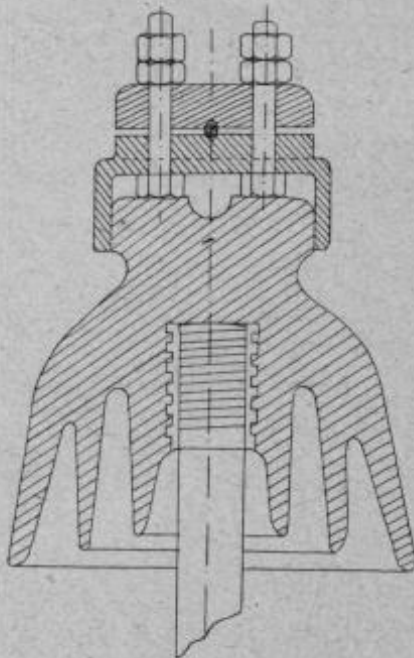


FIG. 1515. — Isolateur 20.000 volts pour très longues portées. (Réseau de Thiers).

Skarra et Sels-Zurich, à 50.000 volts, comportent des isolateurs dont la partie supérieure porte deux cloches et l'inférieure une seule avec jupe profonde; ils sont scellés sur des tubes en fer de 30 millimètres de diamètre extérieur.

La ligne d'énergie El Corchado-Sevilla, à 50.000 volts, emploie des isolateurs à triple cloche en porcelaine blanche d'une seule pièce et très petits; ils sont montés sur tube en fer de 22 millimètres de diamètre.

Les isolateurs de la Porzellanfabrik d'Hermsdorf, pour tensions de 100.000 à 120.000 volts, sont constitués par quatre cloches indépendantes en porcelaine blanche et cimentées ensemble; un modèle est recouvert

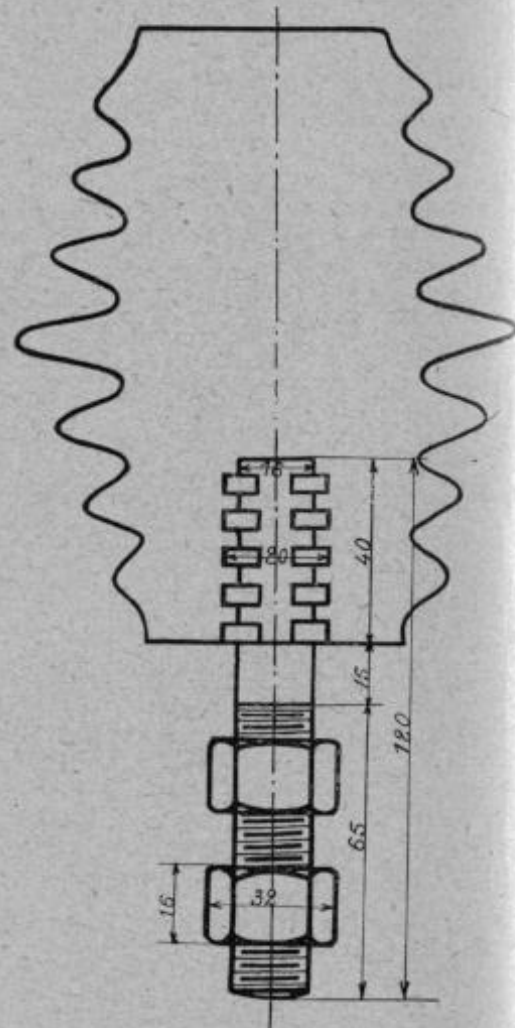


FIG. 1516. — Isolateur 10.000 volts. (Réseau de la Brillanne.)

d'un immense chapeau en tôle émaillée abritant de la pluie les jupes inférieures. La même maison fabrique, pour les très hautes tensions, des iso-

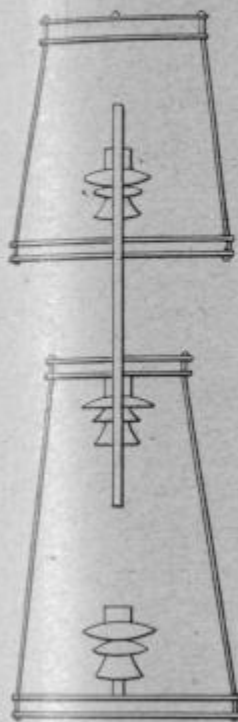


FIG. 1517.

lateurs « suspendus » qui se font en deux modèles ; les uns percés de deux ouvertures se croisant permettent de passer des câbles de suspension, les autres avec des têtes et des tiges métalliques scellées ; la tige de l'un étant raccordée non rigidement à la tête du suivant, la première tête est accrochée à la potence du poteau et la dernière tige supporte le fil. Ce genre de support a été envisagé par M. Blondel pour le transport d'énergie du Rhône à Paris.

Les isolateurs suspendus ou à chapelet offrent une très longue ligne de fuite et une résistance mécanique considérable. On en a fait qui supportent plus de 3 tonnes à la traction.

La (fig. 1517) représente un type d'isolateur suspendu (underhung) de 150.000 volts ayant résisté à une tension d'essai de 280.000 volts, fabriqué par la Central Laboratory Supply Company, Lafayette, Ind. Il supporte des charges mécaniques de 20.000 livres anglaises; des cadres sont suspendus l'un dans l'autre comme une chaîne et il est par suite impossible que la ligne tombe. Sa décharge, aux essais, s'est produite entre les cadres et n'a nullement endommagé l'isolateur.

La (fig. 1518) montre le type d'isolateur de l'installation de Colgate (Standard Electric Co), de 60.000 volts, fabriqué par la maison Locke. La tête a 27 centimètres de diamètre avec gouttière et becs pour l'écoulement en dehors de la traverse sur laquelle est fixée l'isolateur. La tige en acier est entourée d'un manchon

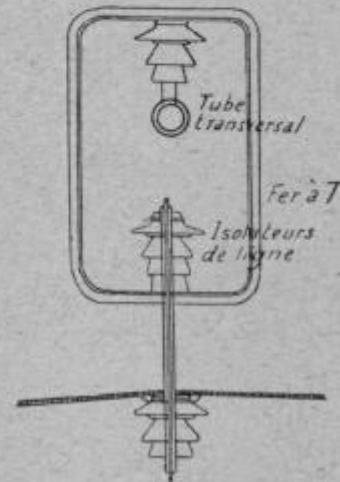


FIG. 1518.

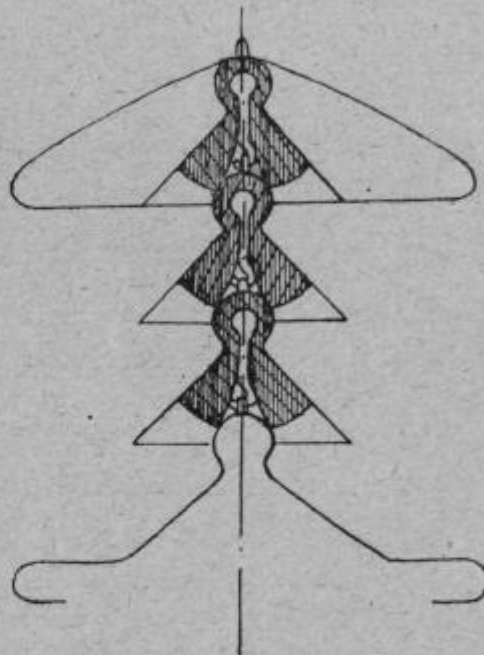


FIG. 1519. — Isolateur système Fortescue, à suspension.

en porcelaine et elle porte, à sa partie supérieure, une pièce filetée en bois paraffiné.

L'isolateur, système Fortescue à suspension (fig. 1519 et 1520), comporte

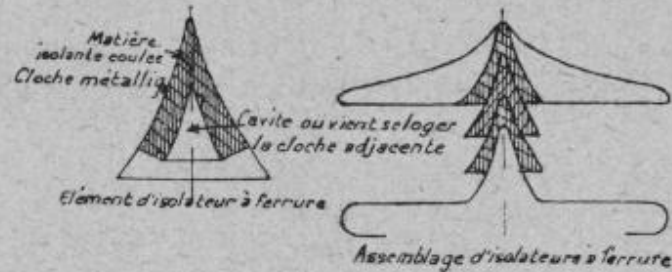


FIG. 1520. — Isolateur système Fortescue, à ferrure.

une cloche métallique de forme telle qu'elle puisse servir d'électrode à l'élément adjacent portant à son intérieur une matière isolante dans laquelle vient se loger la cloche voisine.

La surface du diélectrique qui est emprisonné entre deux cloches voisines est moulée de façon à s'adapter aux lignes du champ statique qui existe entre les deux cloches.

On a reconnu, au point de vue de la fabrication, que dès que les isolateurs atteignent 30 centimètres de diamètre, leur coût les rend prohibitifs. Les fabri-

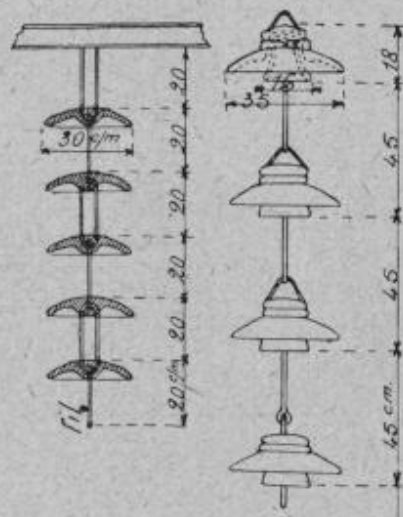


FIG. 1521.

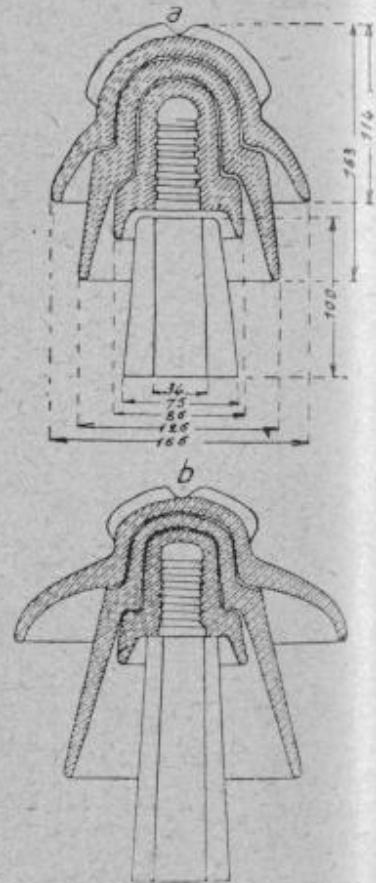


FIG. 1522.

a, Isolateur à 10.000 volts de la ligne de Tivoli. — b, Isolateurs à 30.000 volts de la ligne de Subiaco.

cants se sont alors attachés à éviter l'emploi de pièces de porcelaine aussi grandes et ont porté leurs efforts à réaliser des isolateurs en forme de chapelet vertical dont la (fig. 1521) donne une idée. Dans ce cas la matière

isolante travaille à la compression et on place de distance en distance à droite et à gauche des deux conducteurs des isolateurs horizontaux de façon à éviter le balancement. Ces isolateurs peuvent être placés dans toutes les directions et être gardés en service en cas de rupture de un ou plusieurs chapelets ou maillons. Dans cet ordre d'idées, la General Electric Company a imaginé un type d'isolateur constitué par une série de chapeaux reliés entre eux par quatre ou cinq

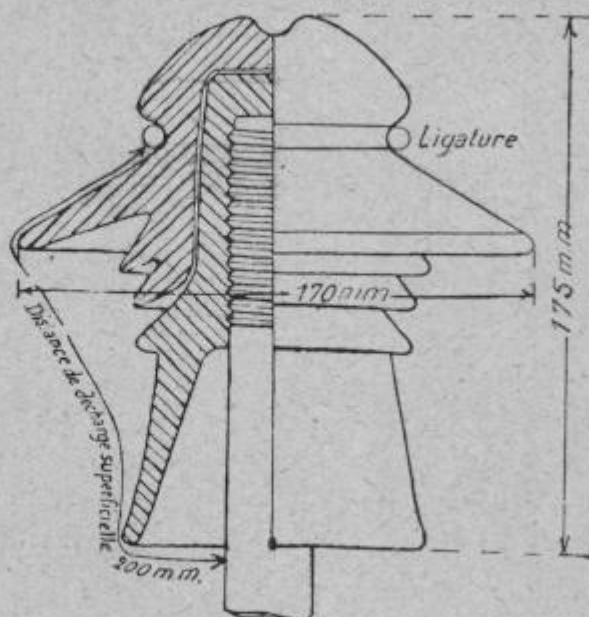


FIG. 1523. — Isolateur Rosenthal.

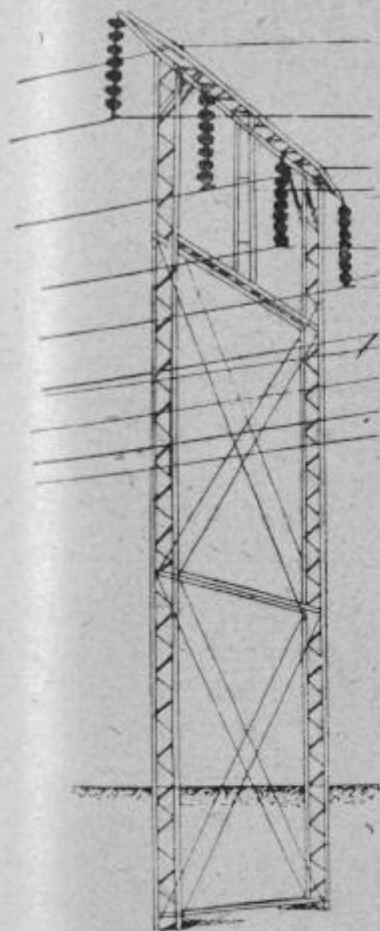


FIG. 1524. — Support Archbold-Brady avec isolateurs à très haute tension 100.000 volts.

tours de fils d'acier toronnés de 3 millimètres de diamètre. Ce dispositif nécessite le perçage dans la porcelaine de deux trous en U convergents, en exigeant que ces trous ne se communiquent pas pour permettre à chaque plateau de supporter une tension totale de quelques 60.000 volts. Ce type d'isolateur qui a donné de bons résultats à bien des égards présente l'inconvénient que les boucles métalliques entre les sections tendent à faire plusieurs condensateurs en série dans chacun desquels l'effort le plus considérable se porte, comme toujours, sur les plateaux extrêmes.

L'impossibilité d'interposer entre le fil de ligne et le premier maillon métallique plus d'un chapeau de porcelaine, ce qui serait cependant indispensable pour des transmissions devant supporter des tensions de 60.000 volts et plus, rend ce dispositif prohibitif pour les lignes sujettes à des variations spasmodiques de tension ou aux atteintes de la foudre. Dans ce cas il est préférable de recourir à la disposition de la (fig. 1521)

qui permet de résister à de très grands efforts. Les chapeaux sont soutenus par des colliers et des étriers métalliques assez tenaces pour résister

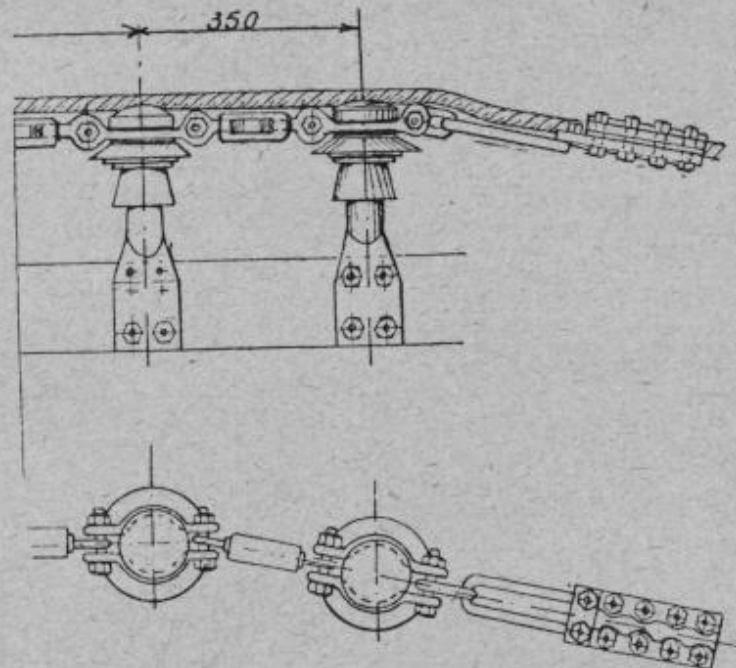


FIG. 1525. — Chaîne pour isolateurs aux angles de la ligne (70.000 volts).

à un effort de traction de 3.000 kilogrammes, ce qui dépasse de beaucoup tout ce qui peut se rencontrer sur les lignes modernes de transmission.

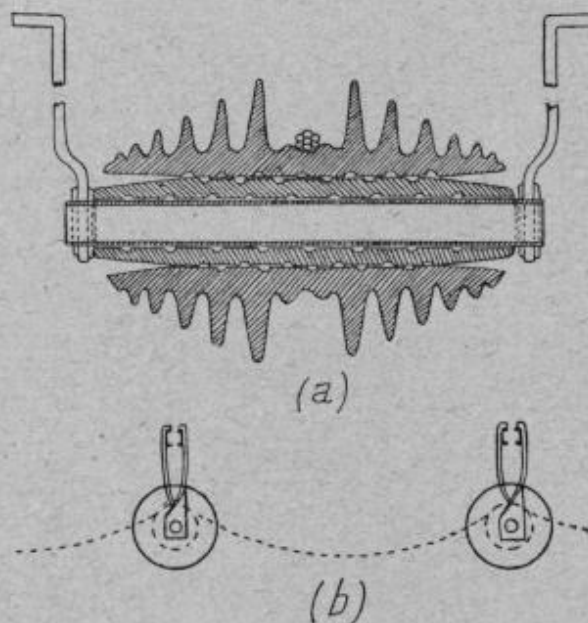


FIG. 1526.

On a reconnu que les chapeaux extrêmes devaient être assez forts pour résister à la tension totale de la ligne et, pour atteindre ce résultat sur une ligne à 100.000 volts, il a été nécessaire d'interposer deux pièces de porcelaine comme le montre la figure. On a pu réaliser un isolateur à éléments en série, n'ayant pas plus de 1^m,50 de haut et capable de fonctionner à 220.000 volts sous une forte pluie. Les chapeaux sont simples et les attaches métalliques à bas prix. Mécani-

quement et électriquement, ce dispositif est très robuste et sa construction n'offre en aucun point quoi que ce soit qui présente une difficulté.

Beaucoup d'ingénieurs pensent que l'isolateur « suspendu » présente plus de garanties que les types à cloches usuels, aussi bien au point de vue mécanique qu'électrique. Ce genre d'isolateur aurait en effet l'avantage de présenter une plus grande distance

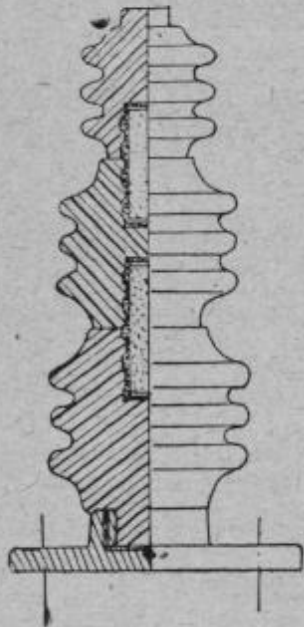


FIG. 1527. — Isolateur d'intérieur.

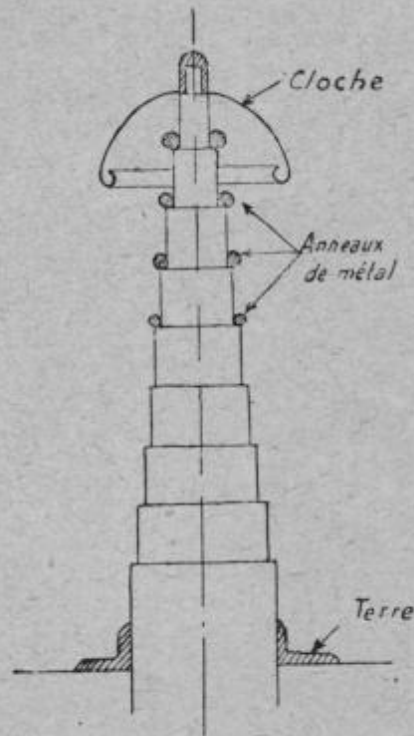


FIG. 1528. — Disposition employée pour éviter les décharges.

explosive entre les points à différence de potentiel maxima.

La (fig. 1526) montre un de ces isolateurs qui permet de donner une grande sécurité au point de vue de la crainte de rupture des supports et qui offre en outre le moyen d'un réglage plus facile de la flèche du conducteur. La cheville de support de cet isolateur étant soutenue à ses deux extrémités peut recevoir une charge huit fois plus grande à égalité de longueur, qu'avec les isolateurs ordinaires.

Comme dispositif de protection, l'anneau (fig. 1528) évite, quand un arc s'amorce entre la ligne et le dit anneau, que l'isolateur ne s'échauffe par les décharges et reste intact ; si l'arc ne se souille pas de lui-même, la ligne est générale-

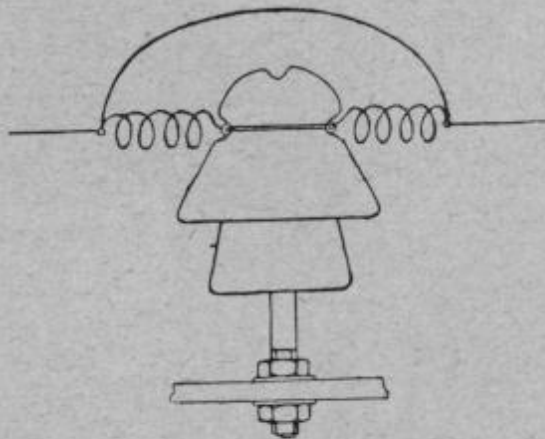


FIG. 1529. — Isolateur protégé par une réactance.

ment mise hors circuit instantanément par le déclenchement de l'inter-rup-teur automatique.

Les (fig. 1529 et 1530) montrent des dispositions de sûreté pour la protection des isolateurs.

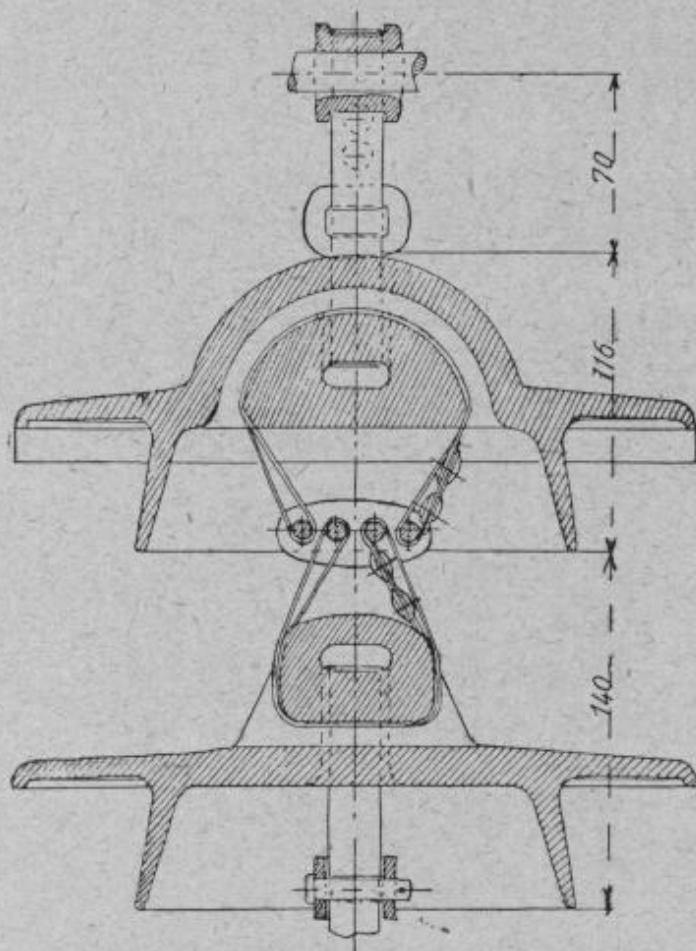


FIG. 1530. — Dispositif d'attache de sûreté contre la rupture pour isolateurs à mailles.

Le tableau ci-après montre les résultats qui ont été obtenus sur la ligne de transport de force Niagara-Syraguse à 60.000 volts par l'adoption de l'anneau.

SPÉCIFICATION DES ACCIDENTS	AVANT L'APPLICATION DES ANNEAUX DE PROTECTION		APRÈS L'APPLICATION
	1907	1908	1909
Interruptions nécessitées pour le rem- placement d'isolateurs.....	59	139	4
Isolateurs endommagés mais non hors d'usage.....	16	35	13
Arrêts de longue durée dans l'exploita- tion.....	12	26	1
Mises en court-circuit de la ligne et pertes à la terre ayant provoqué un déclen- chement de l'automatique, mais sans arrêt de l'exploitation.....	32	38	19
Journées d'orage.....	41	54	14

La longueur de la ligne est de 314 kilomètres et le nombre d'isolateurs, de 11.078.

Chaque fois qu'une ligne n'est pas protégée par un fil de terre courant tout le long de son parcours, l'usage des anneaux s'impose. Et pour éviter le déclenchement de l'automatique on peut faire usage de *relais sélectifs* (fig. 1531).

I représente l'isolateur par lequel s'écoule la décharge ; A, B et C les trois phases de la ligne ; F l'interrupteur de soufflage de la surtension et S le relais sélectif. Au moment où l'arc s'amorce entre le conducteur et la masse, il se produit un déséquilibre du potentiel des trois phases A, B et C. Le relais S fonctionne alors et provoque la fermeture de F qui met, pendant un temps très court, la phase correspondant à la terre et qui a pour effet de souffler l'arc, si ce dernier s'est amorcé pour une cause temporaire. Les relais sont électrostatiques ou électromagnétiques (§ 551).

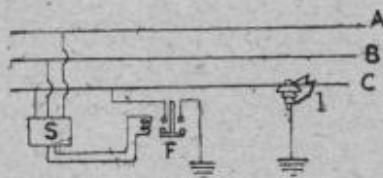


FIG. 1531.

L'appareil électrostatique est représenté d'une manière schématique par la (fig. 1532). A l'extrémité d'un pendule, trois plaques d'aluminium sont disposées, radialement, les normales de ces surfaces formant entre elles des angles de 120° ; elles sont installées en face de trois isolateurs reliés à chacune des phases de la ligne.

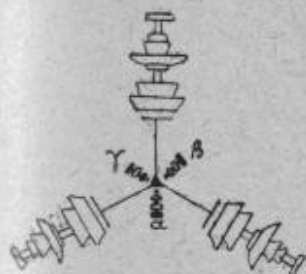


FIG. 1532.

Tant que la ligne est indemne de toute perturbation, le pendule se maintient en équilibre, mais dès qu'une des phases reçoit une décharge les actions électrostatiques des deux autres phases l'emportent sur la première, de manière à déplacer le pendule qui vient fermer le contact d'un interrupteur, lequel provoque la mise à la terre de la phase attaquée pendant un laps de temps très court (1 seconde à 1 seconde $1/2$).

Le principe des appareils électromagnétiques est le même que celui des appareils électrostatiques. Une résistance d'amortissement auxiliaire est prévue dans l'interrupteur pour empêcher que la mise à la terre de l'une des phases détermine un court-circuit direct de la ligne. En outre les interrupteurs coïncidant avec les relais dans les trois phases sont verrouillés entre eux par des solénoïdes, de manière à ce que deux interrupteurs ne puissent se trouver simultanément dans la position de fermeture. Ces relais sont utilisés sur différents réseaux de l'Amérique du Nord, notamment sur celui de la Southern Power Co, à 44.000 volts.

558. Essais des isolateurs. — A leur réception, chaque isolateur doit être vérifié pour se rendre compte s'il est exempt de défauts mécaniques, soufflures, fissures, solution de continuité dans le couvercle, et si les joints des parties différentes de l'isolateur qui doivent être assemblées et réunies s'ajoutent convenablement.

Pour reconnaître l'état de la résistance d'isolement, on fera supporter à l'isolateur pendant une période de quinze minutes une tension alternative triple de la tension normale de service. Les ferrures des isolateurs sont réunies en parallèle par un fil de cuivre aux bornes d'un transformateur et les collets des isolateurs réunis de même à l'autre borne. Si les pièces défectueuses dépassent 10 à 15 0/0 de l'ensemble du lot on refuse la fourniture. Si l'isolateur est constitué de plusieurs pièces assemblées, chacune d'elles sera essayée à une tension proportionnelle ; par exemple chaque élément d'un isolateur constitué par l'assemblage de quatre éléments devra supporter pendant cinq minutes une tension égale aux trois quarts de la tension normale de service. Si durant les essais de tension on constate des décharges locales particulièrement intenses, quoique n'accusant pas de rupture, l'opération devra être poursuivie pendant deux nouvelles périodes additionnelles de chacune cinq minutes. Une décharge localisée excessive ou un échauffement exagéré, s'ils persistent, sont des indications de manière à faire éliminer l'isolateur. L'essai diélectrique sera appliqué à chacun des isolateurs à employer sur la ligne.

Les isolateurs doivent supporter en outre une épreuve diélectrique suffisante sous une pluie artificielle (*fig. 1533*). Sous une précipitation verticale équivalant à un degré pluviométrique non inférieur à 7^{mm},5

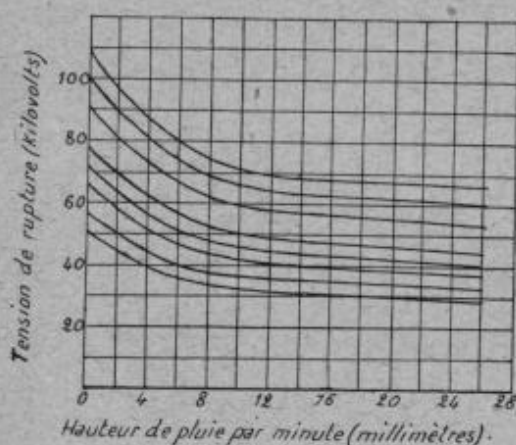


FIG. 1533.

d'eau par minute et n'excédant pas 10 millimètres, l'isolateur complet, monté sur une ferrure droite très longue, devra supporter, sans décharges ou pertes excessives, une tension double de la tension normale de la ligne. La durée d'essai sera de dix minutes à quinze minutes. Il est prudent de répéter l'essai, l'isolateur monté sur la ferrure que l'on compte employer, avec le même degré pluviométrique, mais l'isolateur et

son support inclinés de telle manière que la pluie frappe la cloche sous un angle de 45°, l'appareil devra supporter, pendant le même temps, une tension égale à une fois et demie la tension de service. Cette même tension sera exigée pour contrôler la résistance de l'isolateur à la rosée ;

à cet effet l'isolateur refroidi jusqu'à la température de 0° centigrade sera porté dans une atmosphère saturée, à la température de 30° à 40° C., jusqu'à ce que la buée de condensation soit nettement déposée sur la cloche.

D'après les résultats de l'expérience, la tension de décharge superficielle des isolateurs, sous pluie, est de 60 à 70 0/0 du maximum de celle de décharge dans l'air sec ; si on a un coefficient de sécurité égale à 2, il faut que dans l'air celui-ci soit de 3 à 3,5 au moins ; en d'autres termes, le coefficient de sécurité doit être sensiblement le même sous pluie, pour les installations d'extérieur, qu'à l'air sec pour les isolateurs d'intérieur ; pour un isolateur à 10.000 volts, il est désirable que la tension de décharge sous pluie soit de 40.000 volts et elle sera alors de 60.000 à 70.000 volts à l'air sec.

La tension de décharge intérieure (rigidité diélectrique) de la partie fixe doit être encore plus élevée, de 25 à 50 0/0, que la tension de décharge superficielle à l'air sec, et c'est donc toujours pour la décharge superficielle à l'air sec et sous pluie que doit se faire l'essai.

L'eau employée pour les essais hydrauliques sous la pluie doit être propre et on la fait tomber en gouttelettes sur une section équivalente à la surface horizontale projetée correspondant au plus grand diamètre de l'isolateur.

Pour l'essai mécanique des isolateurs montés sur leurs supports, la traction doit être exercée latéralement à angle droit par rapport à la tige et suivant la rainure d'attache du conducteur de transmission.

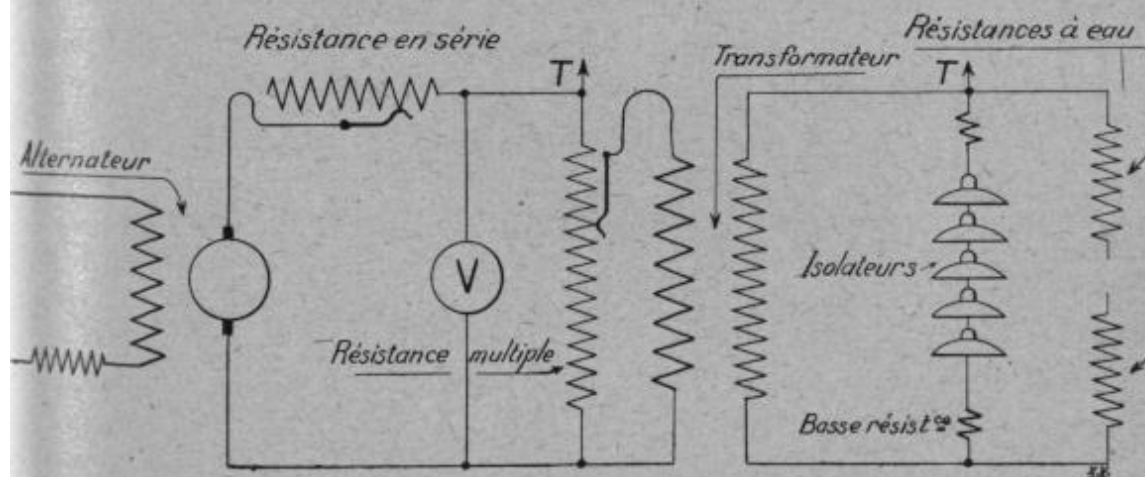


FIG. 1534.* — Schéma d'une installation d'essais pour isolateurs.

On soumet aussi assez souvent les isolateurs à des essais de perforation à sec et d'établissement de l'arc lorsque l'isolateur est humide ; pour ce dernier cas, on emploie une tension égale à 1,5 fois la tension entre fils. Pour ce genre d'essais, l'isolateur monté sur sa ferrure, se fait en plon-

geant la cloche dans une cuve d'eau servant d'électrode, l'autre pôle étant directement relié au support métallique ; dans le cas où le support n'est pas scellé, on remplit d'eau la cavité dans laquelle plongera la connexion de l'autre pôle.

L'essai à la dilatation, qui doit se faire avant les autres, consiste à tremper les isolateurs d'abord dans de l'eau à 90° et ensuite les plonger brusquement dans l'eau froide.

Pour reconnaître après cassure de l'échantillon les fissures produites

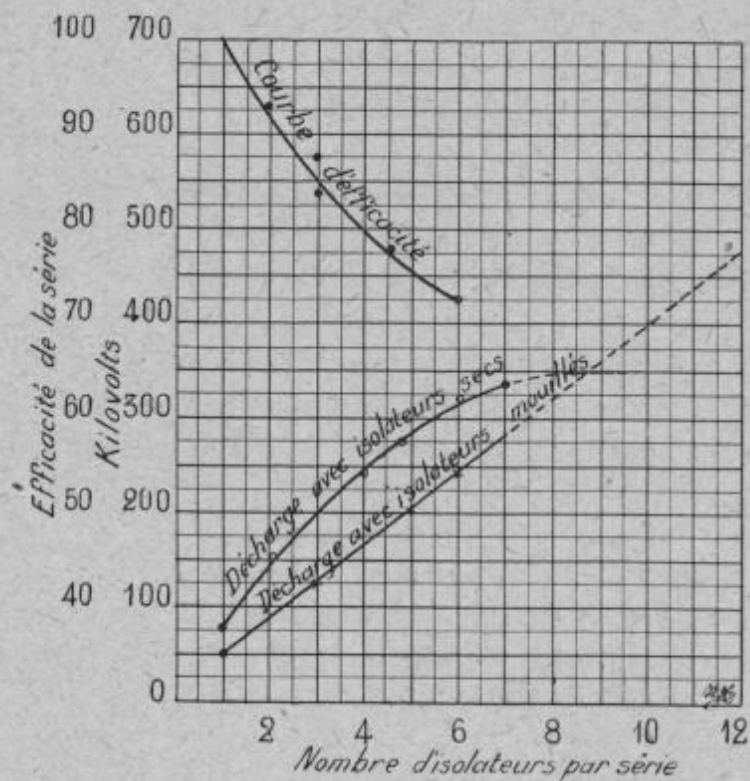


FIG. 1535. — Courbes de tension de décharge superficielle à sec ou sans pluie par différents nombres d'éléments en série.

par la décharge aux essais, de celles de la cuisson, on plonge l'isolateur dans du violet d'aniline dissous dans l'alcool. On lave l'isolateur, puis il est séché et soumis à la tension dans l'huile. On enlève celle-ci avec de l'essence et on sèche au-dessus de 100°. On plonge ensuite dans une solution alcoolique rouge d'aniline qui pénétrera dans toutes les fissures produites par la décharge. On brise la porcelaine une fois séchée. Les fentes existantes avant l'essai diélectrique apparaîtront en violet avec une couche de rouge superposée ; celles produites par les décharges seront seulement colorées en rouge.

Pour reproduire des conditions d'isolateurs exposés à des variations brusques de température, on plonge les isolateurs dans de l'eau bouil-

lante, puis dans l'eau froide. Des défauts dus au manque d'élasticité sont révélés de ce fait.

Des isolateurs qui ont supporté une certaine tension avant cet essai de refroidissement sont souvent rompus par la décharge après cette épreuve.

Les essais à l'oscillateur à haute fréquence mettent également en relief l'influence des cannelures et des cloches dans les différents types d'isolateurs ainsi que celle de l'épaisseur, et en général des qualités que l'on doit demander aux isolateurs. Ils peuvent être appliqués des heures durant à de bons échantillons sans dommage.

La (fig. 1537) donne le schéma de l'installation d'essai de divers types d'isolateurs suspendus.

On a adopté pour les dits essais l'ordre suivant : essais à sec, sous la

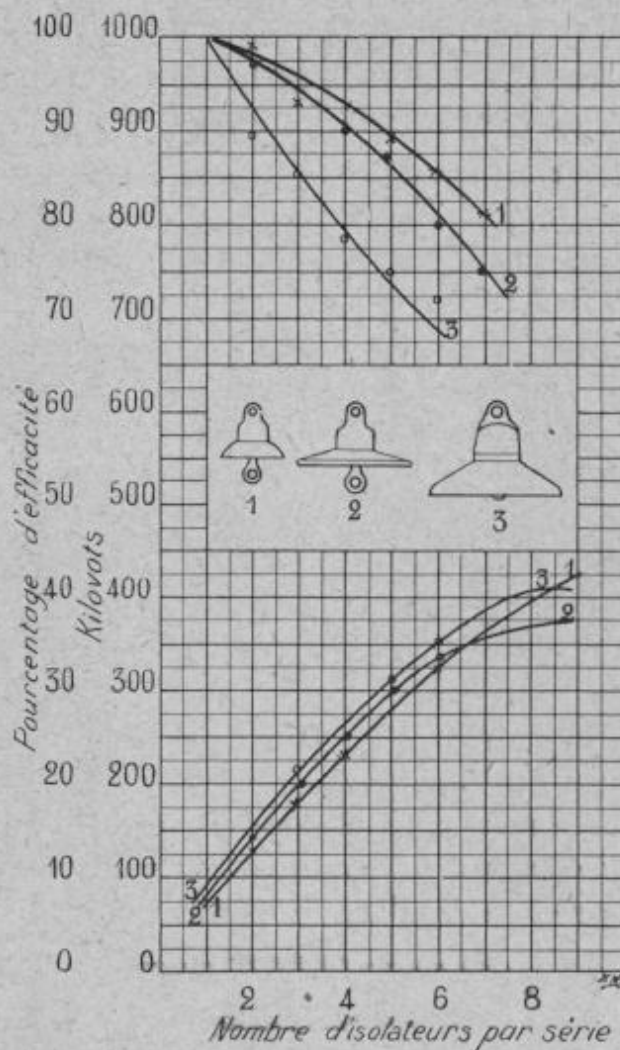


FIG. 1536. — Courbes caractéristiques de trois types d'isolateurs.

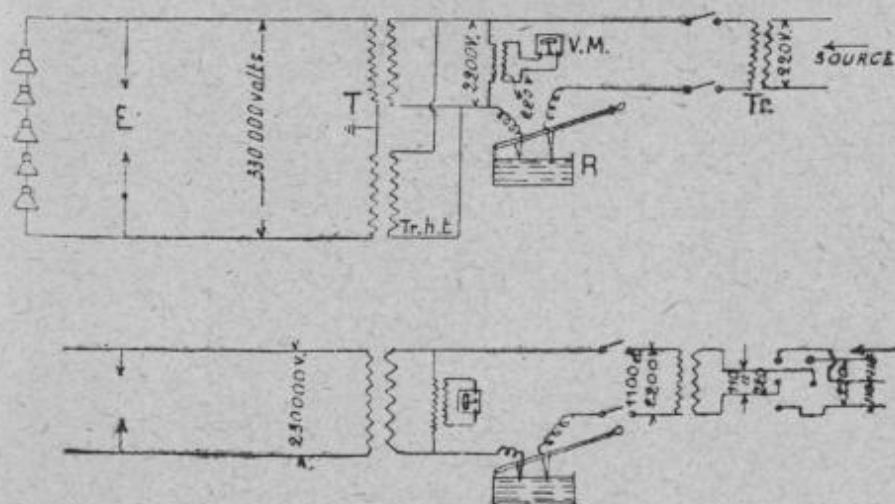


FIG. 1537. — Schéma d'essais d'un isolateur.

I, isolateur essayé. — E, éclateur. — T, tension. — Tr. h. t., transformateurs à haute tension. — VM, Voltmètre. — R, résistance liquide. — Tr, transformateur de 50 kv.

pluie, en parallèle, à sec et sous la pluie, à la perforation dans l'huile et essai de résistance mécanique.

Le tableau ci-après renseigne sur les résultats généraux obtenus :

Type	Nombre d'éléments	Les effluves deviennent visibles à	Fortes décharges statiques mais pas d'arc
A	5	150 kw	330 kw
C	5	250 »	330 au sommet
D	5	250 sur le crochet	330 à la pointe du crochet
E	7	300 sur la goupille	Pas excessive à 330 kw
F	5	250 »	»

Les essais sous la pluie qui sont les plus significatifs ont donné les résultats suivants pour une précipitation de 12^{mm},7 d'eau par minute.

Type	Nombre d'éléments	Les effluves deviennent visibles à	Le claquage s'est produit à
A	5	150 kw	160 kw
C	5	225 »	265 »
D	5	250 »	280 »
E	7	225 »	260 »
E	8	250 »	300-310 »
F	5	250 »	300 »

Un point particulièrement observé : presque toujours la décharge fut amorcée par un angle aigu ou une pointe des parties métalliques qui rassemblent les éléments entre eux. Il en résulte qu'il est indispensable de

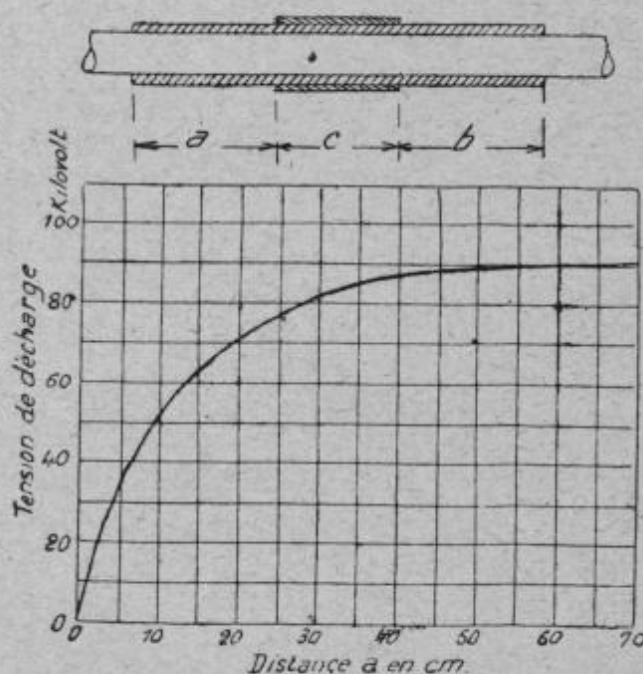


FIG. 1538. — Résultats d'essais d'isolateurs d'entrée.

supporter des efforts s'échelonnant entre 1.200 et 8.000 kilogrammes avec des tensions d'amorçage de l'arc à sec variant de 15.000 à 70.000 volts.

faire les parties métalliques des isolateurs aussi symétriques que possible et leur donner une surface unie, sans aucune partie saillante.

La chaîne constituée par les maillons doit être relativement souple et les dimensions de chaque élément doivent être déterminées selon les efforts à supporter, le calcul de résistance étant basé sur un coefficient de sécurité de 5.

Les maillons V. P. C. sont construits pour

Il y a intérêt à tous les points de vue de constituer la chaîne par de petits maillons plutôt que de gros éléments ; en particulier l'emploi de ces derniers oblige à limiter la totalisation de l'épaisseur du diélectrique.

On peut comprendre facilement l'intérêt d'employer un grand nombre de petits éléments quand on sait que, par exemple, dans une chaîne de 12 maillons V. P. C. suffisants pour isoler parfaitement une ligne de 60.000 à 80.000 volts, l'épaisseur totalisée du diélectrique est de 15 centimètres environ, et comme dans chaque maillon la tension d'amorçage extérieur est considérablement plus faible que la tension nécessaire au percement, on a ainsi la certitude absolue que toute surtension autre devra, pour vaincre l'isolement, passer par l'extérieur et, par conséquent, sera sans action sur la conservation de l'isolateur.

On sait que dans une chaîne d'isolateurs c'est le maillon voisin du conducteur qui supporte la plus grande partie de la tension électrique appliquée et que l'autre extrémité de la chaîne ne reçoit qu'une fraction très minime de cette tension. Cela est dû à la présence des armatures métalliques reliant les éléments entre eux, par suite le facteur de sûreté d'un isolateur considéré individuellement est d'autant plus faible que cet élément est plus près de la ligne à haute tension.

La (fig. 1539) donne le schéma des capacités des éléments et des armatures, des tensions et des courants le long d'une chaîne d'isolateurs.

Dans cette figure C est la capacité des armatures de part et d'autre d'un isolateur, c la capacité des armatures par rapport au milieu ambiant, J courant de déplacement en même temps qu'un courant i va de l'armature au mât et à la terre, E tension de l'armature par rapport à la terre. L'expérience donne la valeur de $\frac{c}{C}$ pour chaque type d'isolateur et chaque mode de suspension.

Pour le $n^{\text{ème}}$ élément compté à partir du point de suspension, on a :

$$\frac{c}{C} E_n = E_{n+1} - 2 E_n + E_{n-1}.$$

Cette relation caractérise l'allure de la tension dans une chaîne d'isolateurs.

La contrainte électrique ou différence de potentiel des isolateurs considérés isolément est fournie par l'expression :

$$e_n = E_n - E_{n-1}.$$

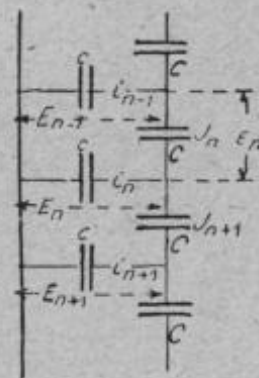


FIG. 1539. — Schéma des tensions et des courants dans une chaîne d'isolateurs de suspension.

C'est le dernier élément qui subit la contrainte maximum.

Au point de vue du rendement d'une chaîne d'isolateurs en série, il y a avantage aussi à donner au rapport $\frac{c}{C}$ des valeurs aussi faibles que possible.

La station d'essais de la fabrique de porcelaines à Merkersgrün peut porter la tension à 250.000 volts. Elle comprend un transformateur élévateur et deux cuves d'essai ; des barrières séparent le tableau de distribution, le transformateur et les cuves les uns des autres. Pendant les essais des portes verrouillées automatiquement isolent les différents emplacements. Le réglage se fait au moyen d'un régulateur d'induction manœuvré du tableau de distribution. Le stator bobiné pour une tension de 500 volts est relié directement au réseau de force de l'usine. Le rotor, également bobiné, est déplacé par un mécanisme de façon que sa position varie vis-à-vis de celle du stator. Les tensions varient ainsi progressivement et sans à-coup de 0 à 1.000 volts et sont amenées au transformateur à haute tension et par conséquent celui-ci peut fournir un courant allant de 0 à 250.000 volts. Le transformateur monophasé à haute tension est à bain d'huile ; les électrodes à boules peuvent être écartées suivant la tension à laquelle on opère.

Un interrupteur bipolaire à huile assure la mise en circuit du transformateur et un relais à tension nulle amené au bipolaire entre en fonction dès que les contacts des portes sont fermés ; un contact de rupture ferme un circuit secondaire actionnant le verrouillage des portes, de sorte que toute sécurité est assurée pendant l'essai. L'installation est en outre protégée contre des surcharges éventuelles.

Une installation à l'air libre, située sur le toit, peut être utilisée par tous les temps et permet de faire des essais de très longue durée qui se rapprochent des conditions de la pratique. Un dispositif a été prévu pour produire une pluie artificielle variable à volonté.

Au laboratoire d'essais des usines de Fuisseaux, le transformateur statique monophasé de cette installation est construit pour une puissance normale et continue de 50 kilovolts-ampères soit 250 volts au primaire et 250.000 volts au secondaire pour une fréquence de 40 périodes-seconde.

Son enveloppe extérieure se compose de tôles en fer assemblées par rivets ; sa capacité est près de 3 tonnes d'huile. Le circuit magnétique comprend deux noyaux et deux culasses en tôles de fer doux et l'enroulement primaire comporte deux bobines, une par noyau ne comportant qu'une couche de spires enroulées sur une armature en matière isolante. L'enroulement secondaire comprend une série de bobines concentriques à l'enroulement primaire sur chaque noyau et connectées en tension. Entre le primaire et le secondaire sont disposés plusieurs tubes concen-

triques en matière isolante spéciale entre lesquels la circulation de l'huile s'effectue librement.

Les bornes à haute tension sont constituées de trois parties : un tube en matière isolante comprimée entourant le conducteur, un isolateur concentrique fixé au couvercle de l'appareil et la borne proprement dite en laiton emboîtée sur le tube. Une tige micromatique permet, soit de limiter la tension d'essai par distance d'écartement des pôles, une tête des pôles étant pivotante, soit de mesurer la tension au secondaire au moyen de tables donnant les distances disruptives dans l'air par rapport aux tensions. Par couplage des enroulements on peut obtenir 50 kilowatts à 250.000 volts entre bornes extrêmes, 25 kilowatts à 125.000 volts par noyau ou 50 kilowatts à 125.000 volts entre bornes extrêmes (couplage parallèle).

L'échelle des tensions peut aller de 500 en 500 volts entre 0 et 250.000 volts tant à vide qu'à pleine charge. Pour éviter toute surtension éventuelle du courant on peut mettre à la terre un des pôles de l'enroulement primaire et, entre l'autre pôle et la terre, est branché un parasurtension en capacité prévu de telle façon que quand la tension entre conducteur et terre atteint 250 volts, la mise en court-circuit direct des deux pôles de l'enroulement primaire s'effectue. L'enroulement secondaire d'un transformateur auxiliaire est relié au primaire du transformateur principal par l'intermédiaire d'un interrupteur à rupture brusque et d'un disjoncteur automatique à maxima de courant et à tension nulle.

La mesure habituelle de la tension d'essai s'effectue au moyen de cinq voltmètres branchés sur le primaire et gradués directement pour la haute tension. Un commutateur bipolaire à cinq directions permet d'obtenir les chiffres suivants : 0/20.000 ; 10/5.000 ; 40/100.000 ; 60/150.000 et 0/250.000 volts.

559. Montage et entretien des isolateurs. — La foudre, les chocs accidentels, l'imprudence ou la malveillance des passants, les dilatations anormales, le dépôt de matières conductrices, etc., peuvent occasionner le bris ou la fêlure des isolateurs.

Les conséquences des détériorations ne sont pas les mêmes avec les appuis métalliques qu'avec les poteaux de bois, et pour ces derniers, par la pluie et par le temps sec ; elles dépendent enfin de la tension du courant et de quelques conditions accessoires d'établissement des supports, des systèmes de distribution, etc.

Dans les lignes à haute tension, la simple fêlure d'un isolateur occasionne des ruptures sur la voie publique par suite d'échauffement anormal sur l'isolateur, l'inflammation des poteaux de bois, la mise en charge d'appuis métalliques encastrés dans un bloc de béton relati-

vement isolant, l'incendie des maisons auxquelles les appuis étaient fixés.

Les embruns maritimes corrodent à la longue les fils de cuivre ; en particulier le sel qui se fixe aux isolateurs amène la rupture des ligatures. Enfin les fumées sulfureuses atteignent aussi le cuivre et l'altération finit par atteindre toute la section.

On scelle les isolateurs au plâtre, au ciment, à la toile, au chanvre goudronné et au soufre. Celui-ci est le plus économique, mais il est très cassant et doit être fait avec beaucoup de soin. Le plâtre convient plus spécialement pour le verre. Il est bon de dissoudre dans l'eau de gâchage de



FIG. 1540.

la colle de menuisier, environ 5 centilitres pour 10 litres d'eau.

On doit attendre deux jours avant la mise en place de l'isolateur. Le scellement au moyen de chanvre imprégné d'huile rend possible le descellement sans briser l'isolateur. On em-

ploie aussi le chanvre trempé dans un lait de ciment Portland à prise rapide. Le dernier système entré dans la pratique est celui exécuté à l'aide d'enveloppes en papier extra-fort imprégné d'une substance isolante (*fig. 1540*).

On place les uns au-dessus des autres un certain nombre de ces supports sur l'extrémité de la ferrure, généralement quatre de ces capots suffisent pour faire une garniture. Le démontage de ces isolateurs est d'une très grande facilité et il n'est pas nécessaire de remplacer le support, enfin les isolateurs sont moins sujets à rupture. Il paraîtrait en outre qu'avec ce genre de scellement la résistance de l'isolateur est bien supérieure à celle que l'on obtient avec les autres modes de scellements.

Pour éviter le bris des isolateurs par la dilatation, il y a lieu de se rendre compte des dilatations relatives de la porcelaine et du mastic employé, tant pour le scellement des cloches entre elles que pour celui de l'isolateur complet sur sa ferrure. En plongeant l'isolateur scellé, successivement dans l'eau chaude et dans l'eau froide et en réalisant une différence de température de 85° à 89°, on s'assurera que le mastic employé est bon. En général le ciment Portland donne de bons résultats avec toute espèce de porcelaine.

Les isolateurs, une fois installés, doivent pouvoir supporter, pendant cinq minutes, une tension au moins double de la tension normale de service.

L'état de propreté des isolateurs et le degré d'humidité influent énormément sur l'isolement des lignes. Par les temps de brouillard, l'isolement

tombe très vite, et après les périodes de grandes pluies, qui opèrent un lavage énergique des poussières répandues à la surface des isolateurs, les isolements augmentent dans une forte proportion. Dans tous les cas, sur les réseaux alternatifs, par le fait des phénomènes de la capacité des lignes par rapport à la terre, l'isolement de la ligne en charge est inférieur à celui de la transmission à l'état de repos.

Comme règle générale, on peut alléguer que, lorsque l'isolement de la ligne tombe à 1 mégohm, on doit s'inquiéter de rechercher les causes qui ont déterminé l'affaiblissement de l'isolement.

Au cas où un isolateur est brisé et où le fil vient en contact avec les supports transversaux, il arrive que la combustion de celui-ci et du poteau n'est pas tellement rapide qu'on n'ait cependant quelques minutes pour couper le circuit. Avec des pylônes, on réduit le nombre des supports et par conséquent celui des isolateurs ; par suite, ces derniers peuvent alors être plus gros et leur fixation être l'objet des plus grands soins.

Près des côtes de la mer, la condensation du brouillard sur les isolateurs réduit l'isolement à un tel point que les traverses et les poteaux de bois prennent assez facilement feu.

Sur la ligne du chemin de fer électrique de Locarno on a installé un dispositif spécial permettant de révéler les défauts pouvant survenir aux isolateurs de la ligne à haute tension (6.000 volts). L'appareil se compose d'un tube isolant, hermétiquement fermé par des capsules métalliques réunies à l'intérieur du tube par un fil de cuivre. L'une d'elles est assujettie au fil de déclenchement spécial des interrupteurs de ligne, une autre au support de l'isolateur ou à la console. Si un courant, même de quelques ampères seulement, passe par l'appareil, le fil de cuivre fond à l'intérieur du tube et l'air renfermé à l'intérieur du tube s'échauffe par l'étincelle qui acquiert une force explosive considérable qui projette au loin et avec détonation les capsules métalliques. Si donc un isolateur quelconque est défectueux, il passe un courant par le support de l'isolateur ou par sa console, par l'appareil révélateur et par le fil de déclenchement, ce qui produit

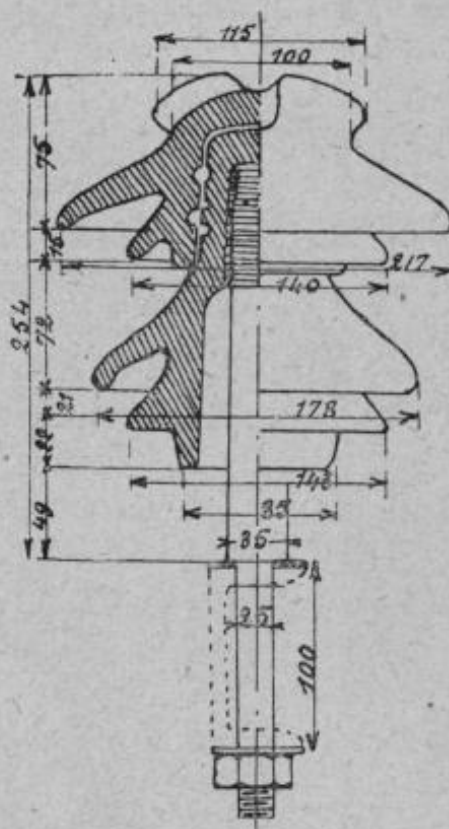


FIG. 1541. — Isolateur monté sur cornière.

L'ouverture de l'interrupteur de ligne (ce courant en question ne peut pas passer directement à la terre, car par l'emploi de poteaux en bois, on intercale une résistance assez forte entre les supports d'isolateurs et la terre). En même temps, l'explosion du tube se produit, laissant l'une des capsules métalliques fixée à la tige de l'isolateur ou à sa console et l'autre au fil à déclenchement. Il est donc très facile de reconnaître l'isolateur défectueux.

III. — PARAFODRES DÉCHARGEURS ET LIMITEURS ⁽¹⁾

560. Nature des décharges atmosphériques. — On attribue la formation de l'électricité atmosphérique à l'ascension de la vapeur d'eau dans l'air sec. La variation diurne de l'électricité atmosphérique, qui s'observe principalement au lever et au coucher du soleil, a aussi son influence. Les couches électriques de même origine peuvent occasionner sur les sommets des montagnes et certains cols des phénomènes électriques très intenses se produisant pour ainsi dire en tout temps. De là des élévations de tension très fortes dans les lignes aériennes entre conducteurs et terre. Sur la ligne de l'Oberland bernois, passant de l'altitude 2.000 à 1.250, à la tension de 1.500 volts, les conducteurs se chargent statiquement en tout temps et on a pu tirer en temps clair, de la ligne coupée à ses deux extrémités, des étincelles de 3 centimètres de longueur correspondant à une différence de potentiel d'au moins 40.000 volts.

Les couches équipotentiellles atmosphériques prennent leur caractère le plus aigu aux approches ou au cours d'orages jusqu'à produire le claquage des machines électriques, par suite des grandes différences de potentiel qu'elles peuvent occasionner entre des points voisins dans l'espace ou entre conducteurs et masse.

Les coups de foudre au lieu de se décharger d'une façon continue, comme les phénomènes cités plus haut, produisent des décharges locales sous forme d'éclairs, facilitées par la forme des nuages, par l'abondance de la pluie ou de la grêle. Elles peuvent atteindre un demi million à 1 million de périodes par seconde avec une intensité instantanée allant jusqu'à 10.000 ampères.

Les décharges atmosphériques se manifestent sous trois formes principales : un coup de foudre éclatant entre un nuage et la terre, qui parcourt

⁽¹⁾ A titre documentaire, on a successivement utilisé autrefois : les parafoudres sans arc, ceux où l'arc se produisait dans un milieu isolant ; les parafoudres à force électromotrice opposée à l'arc ; ceux divisant l'arc en plusieurs parties (Brown-Boveri) ; parafoudres à rupture mécanique et magnéto-mécanique ; les parafoudres à rupture d'arc par échauffement de corps solides et enfin les parafoudres à soufflage par échauffement de l'air.

un conducteur sur une longueur plus ou moins grande ; un coup de foudre éclatant entre deux nuages ou entre un nuage et la terre, qui produit une perturbation dans les conducteurs de la ligne ; enfin un nuage fortement chargé, se trouvant au-dessus de la ligne, qui induit dans les conducteurs une charge électrostatique et élève considérablement son potentiel.

La décharge peut être oscillante ou non (premier cas) et, dans les deux autres cas, elle paraît être toujours oscillante. La nature des effets est différente, que la décharge soit oscillante ou non. Mais, dans les deux cas, elle rencontre dans les conducteurs une impédance de valeur supérieure à leur résistance ohmique. Lorsque la décharge n'est pas oscillante, le flux d'énergie circule dans les conducteurs comme une onde de courant ordinaire ; lorsqu'elle est oscillante, avec une fréquence toujours très grande, la résistance ohmique devient négligeable comparée à l'inductance énorme du circuit. Dans ce dernier cas, la décharge trouve son passage dans l'air, plutôt que de suivre le circuit métallique. Ainsi il arrive qu'une décharge ayant suivi les conducteurs arrive à la génératrice, passe par la carcasse en relation avec la terre et néglige le circuit induit. Dans une décharge non oscillante, le coup de foudre tend à suivre la ligne, jusqu'à ce qu'il arrive à un point où l'isolement soit faible par rapport à la terre. Si, en ce point, il y a une couche d'air, il y a production d'étincelle et, si c'est un isolant, il est perforé. Une décharge oscillante cherche à se diriger vers la terre par le trajet qui présente la plus faible inductance, de là sa tendance à suivre des intervalles d'air plutôt qu'à traverser une bobine.

Quand une décharge est oscillante, il ne paraît pas difficile d'empêcher qu'elle atteigne la machine et les transformateurs ; mais l'effet le plus difficile et le plus dangereux à éviter est le suivant : presque toujours les divers conducteurs d'une ligne se déchargent simultanément ; alors les deux étincelles, les conducteurs et la terre constituent une dérivation dont la résistance peut être très faible. Il en résulte dans toute l'installation un court-circuit qui, pour peu qu'il ait une certaine durée, peut causer des avaries graves aux appareils et même arrêter le fonctionnement de tout ou partie de l'installation. Ainsi s'expliquerait, selon M. G. Semenza, la plupart des avaries que subissent les machines à la suite des coups de foudre et la fusion fréquente des coupe-circuits sous l'action d'une décharge atmosphérique. Il est d'ailleurs évident que ces actions se produisent d'autant plus facilement que la tension de l'installation est plus élevée, que les dégâts sont d'autant plus considérables et que la puissance en jeu est plus grande.

Que la décharge soit oscillante ou non, l'effet le plus dangereux qu'elle produit est presque toujours la mise en court-circuit de toute l'installation,

un ou plusieurs conducteurs étant mis à la terre par une dérivation de résistance très faible, c'est-à-dire par l'étincelle.

Quelle que soit la tension, on a pu constater que les dégâts sur les lignes par suite de coups de foudre sont localisés sur des longueurs rarement supérieures à 300 mètres.

Les coups de foudre directs sont accompagnés de déplacements considérables des couches équipotentiels se traduisant par l'arrachement des tiges de fixation des isolateurs, par leur éclatement, par le fendillement ou le défibrement des poteaux, parfois même par des arcs entre conducteurs.

Les coups de foudre indirects, c'est-à-dire entre des nuages ou entre un nuage et la terre, mais à une certaine distance de la ligne, peuvent provoquer des ondes de grande amplitude aux extrémités des lignes.

Les phénomènes statiques, tels que passage des nuages électrisés au-dessus des lignes, le vent soufflant en tempête, la neige, la pluie, la grêle, les aurores boréales donnent aussi lieu à des accidents importants dans les installations jusqu'à produire des amorçages d'arcs aux isolateurs ou aux parafoudres.

Enfin les ondes hertziennes traversant l'espace peuvent amener des troubles, voire même des accidents par suite de leur pouvoir inductif très élevé dans les enroulements ; elles se propagent parfois à plusieurs milliers de kilomètres, mais n'ont un caractère dangereux que dans la région immédiate où elles sont émises.

La ligne est soumise à la tension la plus élevée au point le moins distant du nuage inducteur. La tension diminue en deçà et au delà, dès qu'on s'éloigne de ce point. Cette observation montre l'utilité des parafoudres de ligne. Si l'inductance du réseau est telle que le potentiel aux isolateurs conserve sa valeur d'éclatement pendant un temps égal au retard diélectrique, l'étincelle jaillit par-dessus l'isolateur et suit le poteau de ligne. Les ondes de décharge parcourent la ligne d'autant plus vite que leur fréquence est plus élevée ; par suite, les parafoudres sont influencés beaucoup plus tôt par les décharges accidentelles que par celles de la ligne.

Un système complet de protection contre les décharges atmosphériques doit satisfaire aux conditions suivantes : protéger la ligne des décharges directes ou coups de foudre frappant la ligne ; empêcher que les décharges oscillantes passent directement du conducteur à l'appui ou à la terre ; empêcher que les décharges atteignent les appareils du tableau, les génératrices et les transformateurs et enfin que les parafoudres ne produisent des courts-circuits.

Un système rationnel de protection des lignes contre les phénomènes atmosphériques doit comprendre non seulement la protection contre les

décharges directes, mais encore et surtout la préservation contre les effets inductifs des décharges qui se produisent dans le voisinage des appareils à protéger. Les décharges directes sont toujours destructives aux points qu'elles atteignent, mais de tels accidents sont assez rares sur les réseaux électriques. Les effets d'induction, tant électrodynamiques qu'électrostatiques, peuvent aussi être destructeurs, mais il est plus facile de les combattre.

Le moyen de parer à de tels effets consiste à dériver à la terre, d'une manière efficace, les décharges indirectes dans les lignes de transmission électriques. Les décharges de la foudre ne traversant que très difficilement les circuits inductifs, alors qu'ils franchissent aisément les résistances ohmiques, il convient, d'une part, que les appareils et les machines à protéger soient reliés au réseau par des résistances inductives, et, d'autre part, que les conducteurs et les parafoudres n'aient aucune résistance inductive. Enfin, la dérivation à la terre doit être rompue aussitôt que la décharge s'est écoulée. La première de ces conditions définit l'efficacité du parafoudre en tant que protection des autres appareils contre les décharges atmosphériques, et la seconde, l'aptitude du parafoudre à se préserver lui-même de la destruction qui ne manquerait pas de résulter de la persistance de l'arc amorcé par la décharge.

A l'entrée des lignes dans les centrales, les sous-stations et les postes de transformateurs, on met, pour protéger les machines et les appareils, des limiteurs de tension capables de déformer les ondes dangereuses ou d'écouler à la terre les surtensions de grande amplitude ou bien de les refouler sur la ligne. Ces appareils ne doivent laisser passer le courant du réseau qu'en quantité aussi faible que possible et pendant un laps de temps très court et leur fonctionnement ne doit laisser engendrer à leur tour des perturbations et des surtensions dans la ligne.

Un système complet de protection devra comprendre selon la disposition schématisée (fig. 1542) les installations

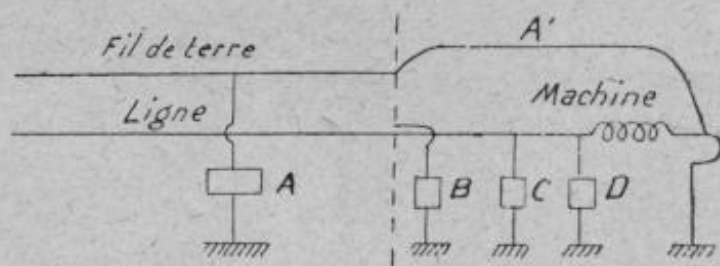


FIG. 1542.

ci-après : A, protection contre les coups de foudre directs ; A' continuation de l'installation A autour de la centrale ou de la station ; B, appareils fonctionnant sous l'effet des phénomènes à haute fréquence ; C, appareils dérivant à la terre les surtensions de basse et moyenne fréquence ; D, appareils déchargeant à la terre les charges statiques.

Au point de vue de la réalisation de l'installation la (fig. 1543) montre la disposition des appareils.

A est la ligne de terre montée au-dessus de la ligne active (coups de foudre directs); B batterie de condensateurs avec bobine de self sans

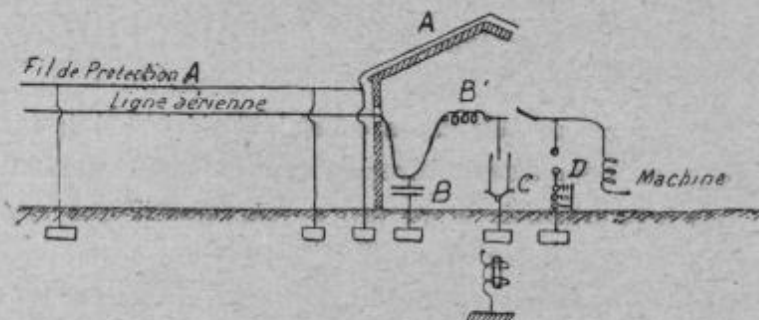


FIG. 1543.

noyau B'; C appareil à jet d'eau ou C' bobine d'induction à noyau de fer et D appareil à soupape genre Giles.

Le meilleur moyen pour éviter les coups de foudre directs est le fil de terre au-dessus de la ligne à protéger (fig. 1544).

Le fil de terre doit avoir une résistance élevée au point de vue méca-

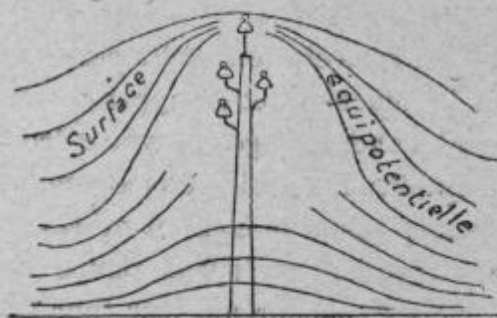


FIG. 1544.

nique (câble tressé avec âme de chanvre en acier doux galvanisé). Il est relié en différents points au sol constituant une bonne terre. Si la ligne comporte des poteaux en bois, ceux-ci sont isolés du fil de terre.

Ce dernier permet en outre de diminuer l'amplitude des phénomènes inductifs dans les con-

ducteurs sous courant et d'améliorer les communications téléphoniques lorsque les conducteurs destinés à ces dernières sont montés sur les mêmes poteaux.

Pour éviter le dépense du fil sur toute la longueur de la ligne, pour des lignes de moindre importance, on peut simplement munir chaque poteau d'un écran métallique et on n'installe le fil de terre que dans un rayon de quelques kilomètres autour de la centrale et des postes de transformation.

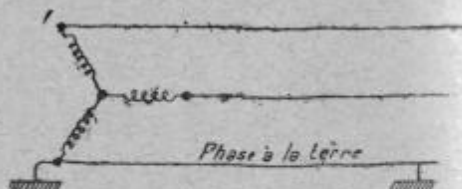


FIG. 1545.

Cependant dans les installations triphasées ordinaires on peut éviter le fil de terre en mettant directement l'une des phases à la terre (fig. 1545),

et dans celles à point neutre à la terre, on se servira avec avantage de ce dernier comme fil de terre (*fig. 1546*).

On peut admettre que le fil de terre suffit pour annihiler les effets des phénomènes de surtension dans la ligne elle-même, y compris les phénomènes inductifs à haute et moyenne tension.

Un exemple typique est celui qui nous est fourni par la ligne de transport de force du Central Colorado Power C^{te} charriant 5.000 kilowatts sous 100.000 volts à 60 périodes, qui passe à certains endroits à des altitudes supérieures à 4.000 mètres pour redescendre en plaine. Le fil de terre seul est employé comme moyen de protection au cours de la ligne.

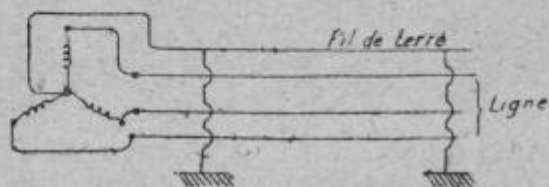


FIG. 1546. — Installation triphasée avec point neutre à la terre et fil de retour.

Tous les appareils de protection ayant une résistance trop forte sont sans valeur.

Les parafoudres à coupure avec résistance en série sont à peu près inefficaces.

En effet, soit I_0 le courant oscillatoire circulant dans la ligne, la surtension théorique a pour valeur :

$$I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

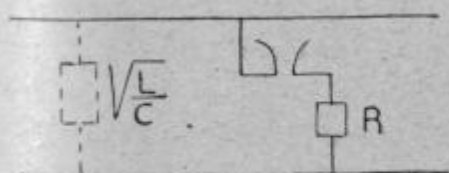


FIG. 1547.

L et C étant la self et la capacité kilométrique avec $\omega L < R$.

La résistance combinée des deux circuits d'écoulement en parallèle (*fig. 1547*) de la décharge à la terre a pour expression :

$$\frac{R \sqrt{\frac{L}{C}}}{R + \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Et la surtension correspondante est :

$$E_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}} + R}$$

Le coefficient de réduction de la surtension due à la présence du parafoudre est donc :

$$\frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}} + R}$$

Or $\sqrt{\frac{L}{C}}$ varie de 100 à 1.000 ohms pour les machines, 100 à 150 pour les câbles, et de 300 à 600 ohms pour les lignes aériennes. Pour ces dernières on peut donc écrire pour le coefficient de réduction :

$$\frac{IR}{600 + R}.$$

Si la résistance en série avec le parafoudre à cornes ou à rouleaux est élevée, soit 2.000 à 3.000 ohms, par exemple, la réduction de la valeur de la surtension n'est que de 20 à 25 0/0. Si, au contraire, elle est trop faible (200 à 300 ohms), le fonctionnement même de l'appareil pourra créer des perturbations graves.

Dans les réseaux aériens à haute tension, très étendus et faiblement chargés, on observe souvent des phénomènes de résonance quasi permanents très caractéristiques (effet Ferranti) contre lesquels il n'existe aucun appareil de protection directe.

Signalons cependant que, dans certaines installations, on a obtenu de bons effets en introduisant des résistances hydrauliques dans le neutre des transformateurs.

Enfin les lignes à très haute tension peuvent se protéger d'elles-mêmes, à cause de l'effet couronne ⁽¹⁾.

Il suffit de faire fonctionner la ligne au voisinage de la tension critique pour que les pertes par effet couronne rendent impossible les surtensions dangereuses. On cite une ligne à 140.000 volts du lac Michigan qui fonctionne d'après ce principe et qui se comporte d'une façon satisfaisante.

561. Conditions d'établissement des parafoudres. — Les cinq types de parafoudres les plus ordinairement employés sont ceux à cornes, à espaces multiples, à jets ou à colonnes d'eau, ceux dits électrolytiques, et enfin les parafoudres à condensateurs. Ces divers appareils, selon leur mode de fonctionnement, peuvent être classés en : 1° parafoudres à circuit de terre continu ; 2° parafoudres à circuit de terre avec une discon-

⁽¹⁾ Pour l'effet couronne, nous rappellerons la formule de Peck, pour la détermination de la tension critique :

$$U = 22,1 m \delta a \log \frac{D}{a}$$

U tension simple en kilowatts efficaces ;

m coefficient dépendant de l'état de la surface des conducteurs ($m = 1$ pour les fils polis, 0,98 à 0,93 pour des fils exposés à des intempéries, et 0,87 à 0,83 pour des câbles à 7 torons) ;

δ coefficient de densité de l'air $= \frac{3,92}{273 + t}$, p pression atmosphérique en centimètres de mercure ;

a rayon du conducteur et D distance entre conducteurs, en centimètres.

tinuité, et 3° parafoudres avec circuit de terre à discontinuités multiples.

Les parafoudres sont, en principe, constitués par deux parties, séparées par une résistance ohmique ; l'une des parties est reliée à la terre et l'autre au conducteur à protéger. La résistance ohmique doit avoir une valeur telle qu'elle s'oppose au passage du courant à faible fréquence qui parcourt la ligne. Les résistances sont établies à peu près indifféremment en graphite, en carborundum, en fils métalliques, ou encore sont constituées par une colonne liquide, eau pure ou additionnée de glycérine, renfermée dans un tube de grès ou de porcelaine. Quant à la résistance du câble de terre, il faut qu'elle soit très faible et sans self ; le fil de terre doit descendre verticalement, sans coudes, et être constitué par une série de fils fins parallèles et nombreux ou par une large bande de cuivre ou d'aluminium. La résistance de contact d'une terre ne doit pas dépasser 8 à 10 ohms.

Dans un parafoudre, l'espace d'air à franchir par la décharge atmosphérique doit être en rapport avec la tension en ligne, tout en observant que, si cet espace est par trop grand, il laissera un passage facile à la foudre. La décharge atmosphérique s'évite en intercalant des résistances liquides entre les parafoudres et les prises de terre. La résistance ohmique du liquide empêche les courts-circuits, et, en même temps, l'absence de self permet le passage de la décharge atmosphérique, dont le potentiel atteint une valeur impossible à préciser.

Une ligne, pour être convenablement protégée, recevra un certain nombre de parafoudres le long de son parcours, chaque parafoudre possédant une terre séparée. De plus, à chaque extrémité de la ligne, il importe de placer une bobine d'induction en série sur chacun des conducteurs, et le parafoudre est monté en dérivation avant la bobine (fig. 1549).

Pour les installations d'un voltage supérieur à 20.000 volts, on a proposé de faire précéder les parafoudres d'une sorte d'excitateur. On a conseillé aussi de mettre les parafoudres en série sur les conducteurs, mais pourvus d'un dispositif de mise de la ligne à la terre. On range aussi quel-

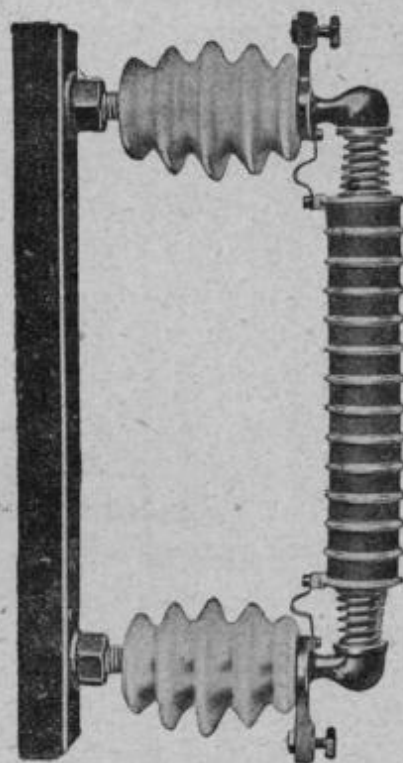


FIG. 1548. — Résistance multiplexe ou graphitique, type Gola. (Maljournal et Bourron.)

quefois plusieurs séries de parafoudres en parallèle, séparés par des bobines de réaction ; il y a ainsi des chances pour qu'à chaque bobine la décharge soit mise à la terre. Dans tous les cas, il est indispensable de protéger les parafoudres eux-mêmes par l'ad-

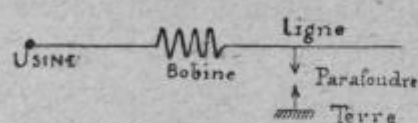


FIG. 1549.

jonction d'une résistance dont la valeur dépend de la tension de la ligne et de la dimension des machines à garantir.

562. Examen des types de parafoudres. — Une ligne peut être protégée des coups de foudre, qui la frappent directement, ainsi qu'il est expliqué ci-avant, à l'aide d'une ronce portant des pointes, et alors celle-ci règne sur toute la ligne et est mise à la terre tous les cinq poteaux environ, ou au moyen de trois fils de ronces, l'une au sommet du poteau et les deux autres à chacune des extrémités de la traverse supérieure, ces trois ronces supportées par des isolateurs en verre, et mises à la terre à chaque poteau.

Dans quelques installations, on a muni de pointes les poteaux, pointes reliées entre elles et à la terre par un fil de fer ; mais, dans ce cas, il faut garnir de pointes au moins quatre ou cinq poteaux de part et d'autre des poteaux formant les points hauts de la ligne. Néanmoins, ces dispositifs n'ont pas donné de bons résultats et ils tendent à disparaître.

Une disposition qui donne de bons résultats consiste à tendre sur les lignes trois fils (mis à la terre à intervalles assez rapprochés) placés l'un en dessous, les deux autres de chaque côté de la ligne. Mais il faut aussi disposer des parafoudres aux extrémités des lignes. Au Mexique, sur une ligne triphasée, de 160 kilomètres et à la tension de 60.000 volts, on a disposé avec succès, au-dessus du fil le plus élevé de la ligne, un câble d'acier qui, à chaque support, était relié à la terre.

Nous avons dit que les parafoudres, ainsi que les limiteurs de tension dont il sera parlé plus loin, se classent en appareils de fonctionnement continu et en appareils à fonctionnement discontinu.

La distance des armatures des appareils à fonctionnement discontinu varie avec la tension du réseau à protéger, avec la forme de la courbe de la force électromotrice du courant d'utilisation, avec la destination des appareils (parafoudres ou limiteurs) et enfin avec les influences extérieures.

Les armatures affectent la forme de pointes, de petites sphères ou de cylindres, d'antennes ou cornes, de disques superposés, etc. La matière est un alliage de cuivre et de zinc, auxquels métaux on ajoute de l'antimoine.

Pour déterminer l'extinction de l'arc de court-circuit, on a adopté certains dispositifs : les cornes pour les armatures, le soufflage magnétique et continu, la combinaison de ces deux systèmes, un fusible mis sur le circuit

de l'appareil, la mise en série avec les appareils de résistances ohmiques sans self et enfin la subdivision d'intervalles d'air entre les armatures.

Pour que la protection due aux parafoudres soit efficace, il faut qu'il y ait un amorçage de l'arc entre les armatures de l'appareil à un point très voisin, voltage normal de la ligne et qu'il y ait rupture de l'arc, dès que le voltage redevient normal. L'on parvient à un tel résultat en adoptant une distance très faible entre armatures et en mettant en série avec le parafoudre une résistance très grande pour limiter l'intensité du courant de court-circuit.

Les déchargeurs de ligne ou les limiteurs de tension à fonctionnement continu laissent sans cesse circuler un certain courant de fuite fonction de la tension ; on calcule d'ailleurs la résistance de façon qu'en régime normal la perte d'énergie soit minima. La plupart de ces résistances sont constituées par des colonnes d'eau courante pour éviter l'échauffement. Les parafoudres à filets d'eau courante sont reliés d'un côté à la terre et de l'autre à la ligne à protéger. Un limiteur de tension continu hydraulique doit être réglable, de manière qu'en faisant varier les dimensions du filet d'eau on puisse faire varier le débit du courant de fuite de 0 à 1 ampère et même plus, suivant qu'il y a plus ou moins de danger.

563. Parafoudres à cornes. — Les appareils les plus simples sont constitués d'un intervalle d'air dont les pôles se prolongent en antennes divergeant vers le haut. L'arc jaillit à la partie inférieure, puis est chassé par réaction dynamique ou par le courant d'air chaud dans la partie où les cornes divergent. Il s'allonge donc progressivement jusqu'à rompre. Une résistance sans self est placée en série pour limiter le courant fourni par l'alternateur et amener l'extinction de l'arc.

Ces résistances sont généralement liquides ou parfois en carborundum, celles en métal présentant trop de self.

Mais l'arc alternatif lui-même peut subsister dans l'air pendant un grand nombre de périodes, et en outre il est très difficile de régler la lon-

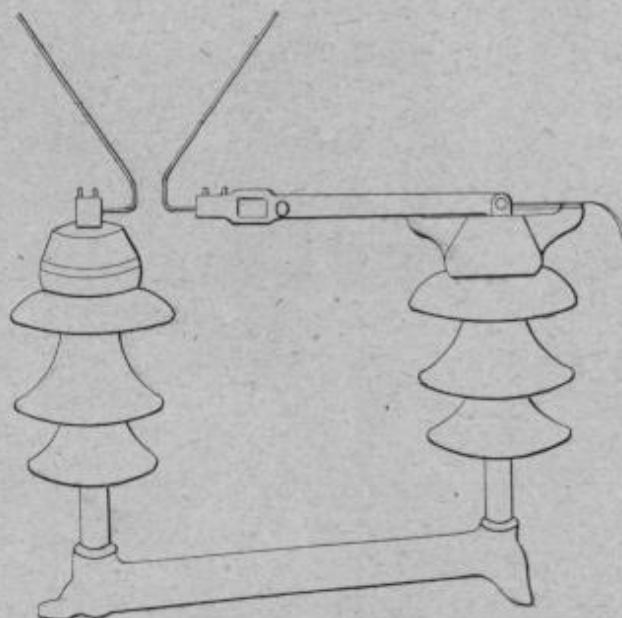


FIG. 1559. — Parafoudre à cornes.

gueur de l'intervalle assurant l'amorçage à une tension donnée, et cela d'autant plus que l'intervalle est plus grand. Le rapprochement de deux éléments ne doit pas descendre au-dessous de 8 millimètres ni dépasser

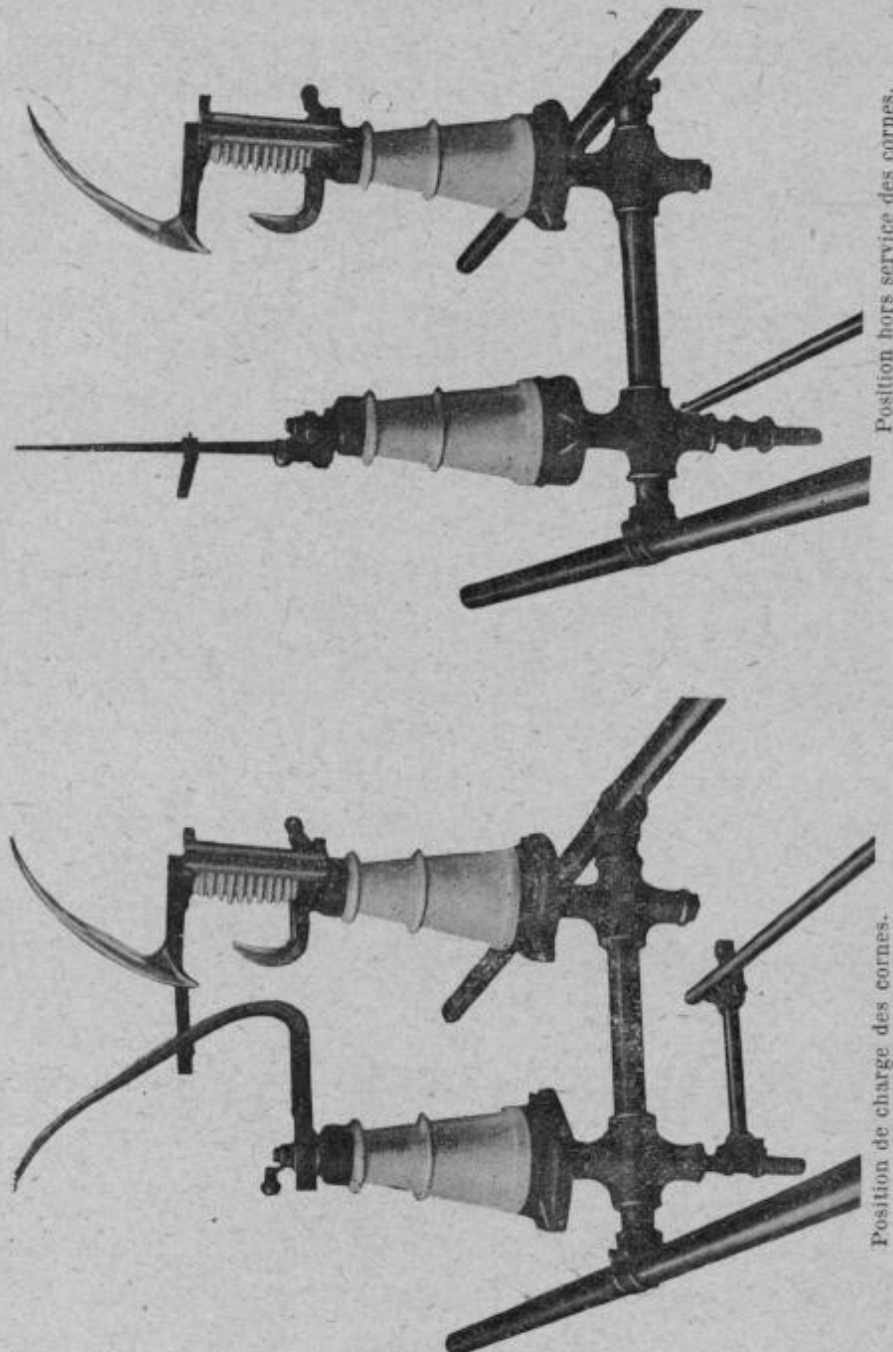


Fig. 1551. — Parafoudre type 60.000 volts. (Thomson-Houston.)

15 millimètres. D'ailleurs la tension d'amorçage varie avec une foule de causes : fréquence de la surtension, forme du circuit, pression atmosphérique, dépôts de poussières, etc.

Nous avons dit que, pour les parafoudres à cornes, il était nécessaire, d'une part, d'intercaler une assez grande résistance sur le circuit de terre

et, d'autre part, de laisser entre les cornes un large intervalle. En effet, la résistance du circuit de terre n'a pas seulement pour but de limiter l'intensité du courant dérivé à la terre à une valeur telle que l'arc, amorcé par la décharge, ne puisse subsister sous la tension normale existant entre le fil de la ligne et la terre, elle a également pour objet d'empêcher la décharge de devenir oscillante et de créer dans le réseau des oscillations propres ou forcées, qui, par suite de la résonance, peuvent être aussi dangereuses pour les isolants que la surtension principale ayant amorcé le parafoudre. La valeur de la résistance à intercaler

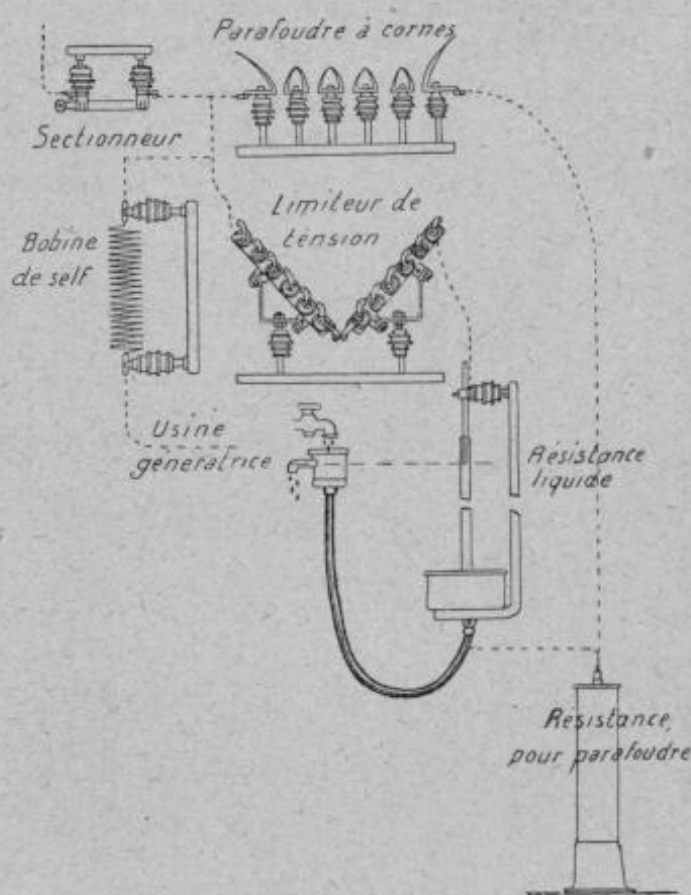


FIG. 1552. — Type de protection pour tension de 5.000 volts.



FIG. 1553. — Parafoudre à cornes monté sur poteau. (Société l'Éclairage Électrique).

dans le circuit de terre dépend également de la capacité et de la selfinduction de ce circuit.

L'écartement des bases des cornes doit être notablement supérieur à la distance explosive correspondant à la différence de potentiel normale entre le conducteur à protéger et la terre. Un intervalle tant soit peu par trop grand empêche des surtensions relativement faibles, cependant déjà dangereuses, de s'écouler dans le sol. Dans le nouveau parafoudre Siemens et Halske (qui se compose de plusieurs parafoudres à cornes disposés en parallèle les uns au-dessus des autres, les écarts des cornes allant en croissant du plus bas au plus élevé), dans le but de pallier aux inconvénients d'un intervalle trop grand entre les cornes, on amorce la décharge entre les cornes au moyen d'une étincelle auxiliaire éclatant entre deux conducteurs dont la distance est très peu supérieure à celle explosive corres-

pendant à la tension du réseau ; cette étincelle est d'ailleurs produite par la surtension même qu'il s'agit d'éliminer.

On a eu l'idée d'augmenter l'écartement des cornes grâce à un petit excitateur d'étincelles qui permet de régler l'appareil avec plus d'exactitude. Par suite de l'emploi de cette étincelle excitatrice, l'espace entre

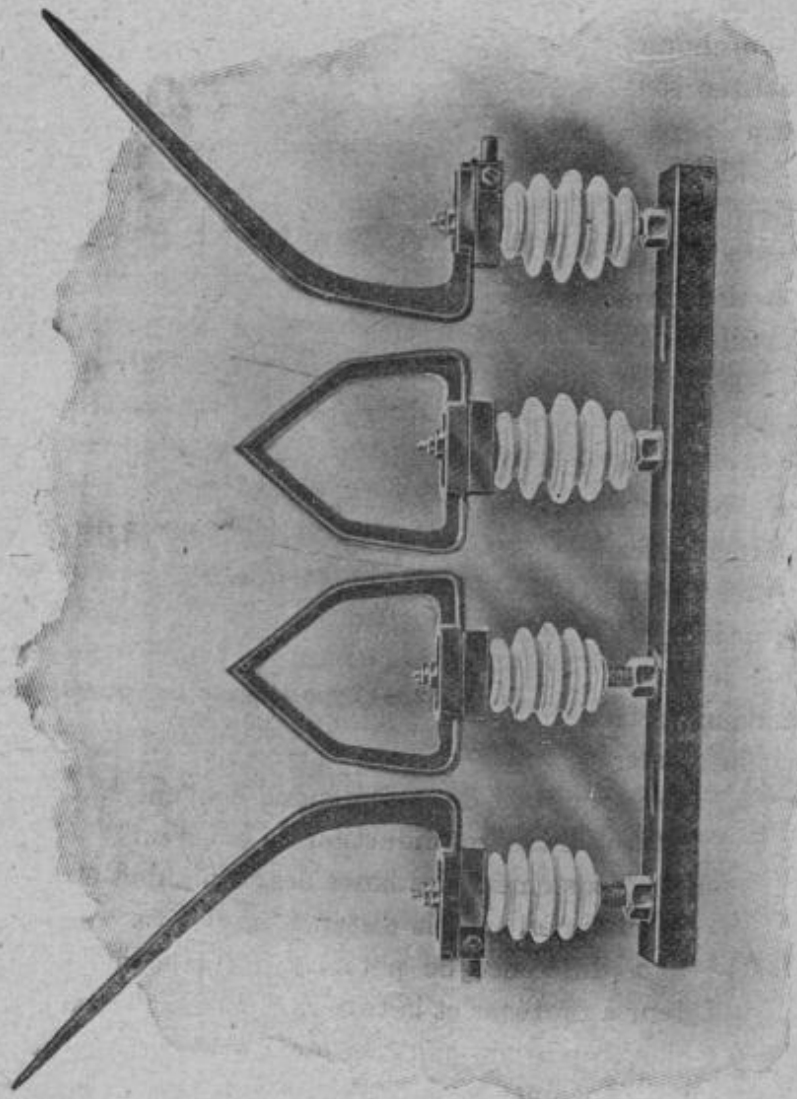


FIG. 1554. — Parafoudre à cornes à intervalles multiples pour intérieur.
(Maljournal et Bourron).

les deux électrodes peut être augmenté jusqu'à environ dix fois la distance des appareils ordinaires à cornes. L'allongement de la distance explosive empêche en outre la formation des oscillations électriques, qui prennent particulièrement naissance avec les appareils ordinaires dont les électrodes ont de grands rayons de courbure, donnant naissance à des étincelles claquantes qui provoquent des ondes de résonance. Dans cet appareil, les cornes ont été remplacées par des plaques triangulaires en cuivre à grandes surfaces de refroidissement, qui ont pour effet de chasser

rapidement la chaleur qui se produit à la base de l'arc lumineux, de faciliter un courant d'air froid et de fournir en même temps une grande stabilité aux électrodes.

On peut donner aux cornes des parafoudres un écart plus grand que dans les appareils ordinaires en munissant la corne, reliée à la terre, d'un ajutage laissant couler un filet d'eau.

La maison Maljournal et Bourron conseille de suivre les indications

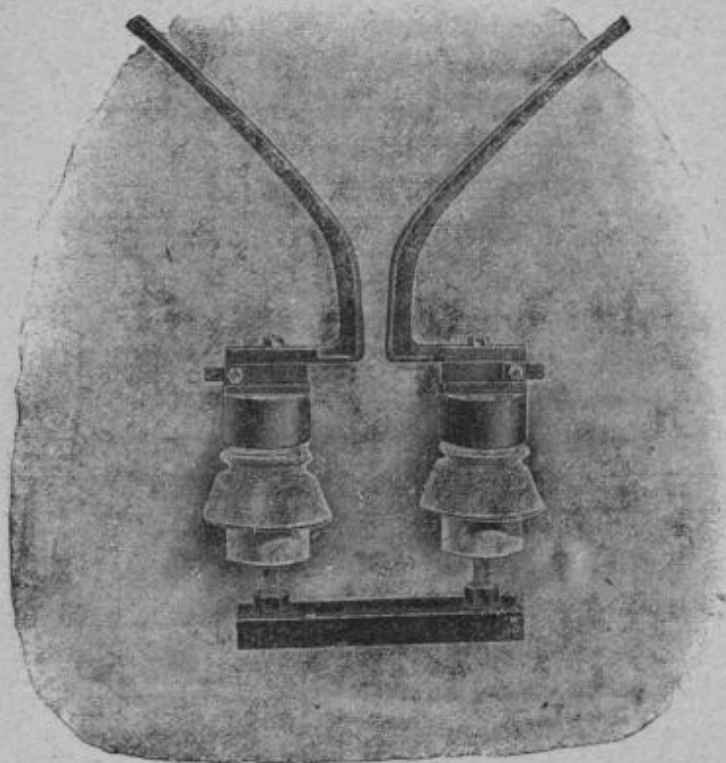


FIG. 1555. — Parafoudre à cornes à intervalle unique. (Maljournal et Bourron.)

ci-après pour le montage de ses appareils. Si on appelle C l'écartement extrême entre les pointes des cornes, on prendra :

Distance des pointes au plafond du local	2 C
— entre cornes voisines (à l'intérieur)	2 C
— — — (à l'extérieur)	3 C
— des cornes aux connexions du même conducteur.	0,5 C
— entre cornes et cloison	0,75 C
Largeur d'une cloison (en profondeur)	2,5 C

M. G.-M. Stanoievitch conseille d'employer pour les cornes, au lieu d'une paire de tiges de section plus ou moins arrondie, comme on le fait à présent, des surfaces étroites, repliées en zigzags ou dentelées en dents aiguës, de sorte qu'entre les deux branches dentelées puisse s'établir l'ac-

tion des pointes. De cette façon le parafoudre devient non seulement plus sensible et plus régulier, mais la décharge d'électricité atmosphérique

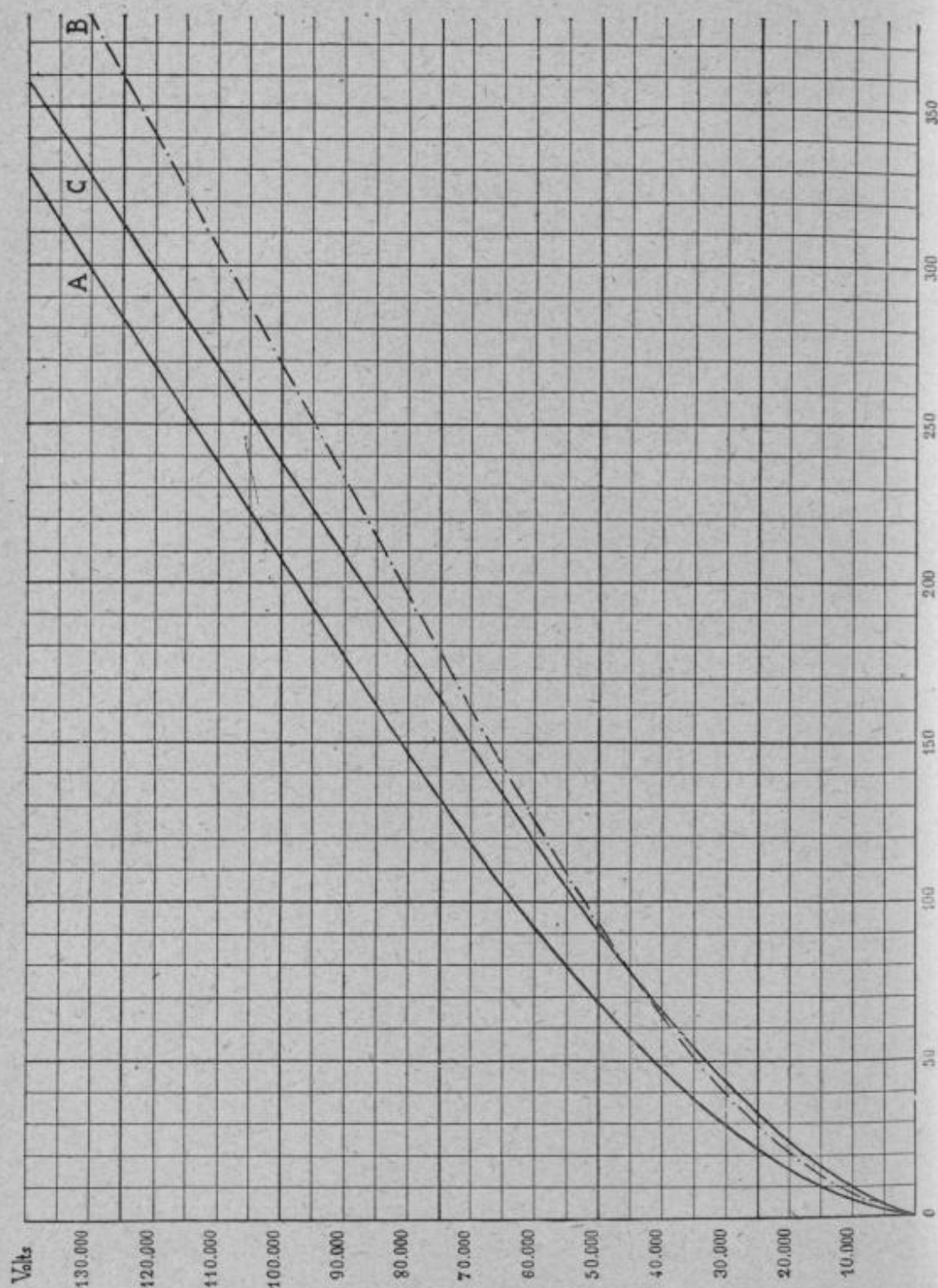


FIG. 1556. — Courbes pour le choix des parafoudres à cornes. (Mal'ournat et Bourron.)
A, Longueur d'arc dans l'air entre cornes (en mm). — B, Écartement conseillé pour les cornes en fonction de la tension de service (parafoudres placés à l'intérieur, en série avec leurs résistances, courant triphasé). — C, Longueur d'arc dans l'air entre pointes (en mm.)

entre des dents plus pointues étant plus facile, on peut écarter davantage les branches dans leurs parties les plus rapprochées et rendre impossible

la communication des deux branches par des gouttes de pluie ou autres corps étrangers. On donne ordinairement un écart de 1 millimètre par 100 volts avec un minimum de 10 millimètres.

Les parafoudres à cornes s'établissent avec relais, basés sur le même principe que ceux à excitateur ; mais l'étincelle excitatrice éclate ici directement entre les deux cornes, sous l'effet même de la décharge oscillante du circuit excitateur. Il convient cependant de ne voir là qu'une complication de plus de l'appareil, et il apparaît qu'on ne l'emploie le plus souvent qu'à l'intérieur des bâtiments.

564. Parafoudres à intervalles. — Les parafoudres à cylindres ou à rouleaux, dits aussi parafoudres à intervalles d'air multiples, peuvent être réglés avec beaucoup plus de précision que les parafoudres à cornes. On doit leur adjoindre une résistance en série assez considérable ; mais, comme pour les parafoudres à cornes, cette résistance empêche l'écoulement rapide de grandes quantités d'électricité. On remédie à cet inconvénient en mettant en dérivation sur la résistance de terre un second parafoudre qui fournit aux décharges puissantes un nouveau chemin pour se rendre à la terre.

M. Wirt a remarqué que la protection des lignes par des parafoudres munis de résistance en série est fréquemment défectueuse. Les nombreuses expériences qu'il a entreprises ont montré que les parafoudres à étincelles multiples sans résistance en série occasionnent des courts-circuits et que l'arc persiste. Pour remédier à cet inconvénient, il faut disposer un très grand nombre de coupures explosibles, mais pratiquement impossibles à réaliser. M. Wirt a alors résolu le problème en shuntant par une résistance une partie des cylindres qui constituaient les appareils en observation (parafoudres de la General Electric Co). Il a pu, de cette façon, limiter à un nombre acceptable celui des intervalles explosifs et faire tomber le courant de décharge à une valeur telle qu'un fusible de 3 ampères ne fonde pas lorsque l'appareil fonctionne.

M. Osgood, qui s'est livré à de très intéressantes expériences pratiques sur la ligne de transmission à 33.000 volts de New Meilford (Connecticut), a reconnu que les appareils à étincelles multiples sans résistance en série donnaient plus de sécurité que ceux avec résistance en série.

Il apparaît comme indispensable, pour la bonne protection de la ligne, de munir celle-ci des deux genres de parafoudres, leur action se complétant l'une l'autre. En effet, le parafoudre à cornes n'est pas assez sensible pour donner une protection efficace contre les faibles surtensions, et les limiteurs de tension à action continue et les parafoudres à rouleaux ne peuvent laisser écouler assez rapidement les grandes quantités d'électricité que certaines perturbations mettent en jeu.

Enfin M. Wirt, qui a aussi étudié les effets produits par la mise à la terre d'un des conducteurs d'une ligne triphasée, a remarqué pour les lignes dont le point neutre n'est pas relié à la terre, que les intervalles explosifs des parafoudres sont franchis par des étincelles qui amorcent des arcs dynamiques préjudiciables aux appareils. Mais, dans le système en étoile avec point neutre à la terre, toute dérivation à la terre provoque le fonctionnement des disjoncteurs, à moins qu'une résistance ne soit intercalée dans les jonctions du point neutre à la terre ; au contraire, avec un système en étoile avec point neutre isolé, la ligne peut continuer à fonctionner, dans beaucoup de cas, avec un fil à la terre. Aussi, en Amérique, les ingénieurs ont tendance à préférer le système en triangle.

Au point de vue des élévations de tension sur les lignes de transmission, les parafoudres doivent être établis pour limiter la tension entre conducteurs aussi bien qu'entre la ligne et la terre, puisque les surtensions qui se

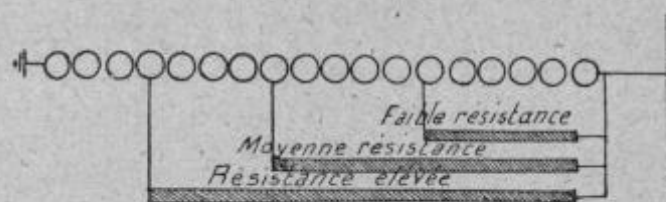


FIG. 1557.

produisent entre conducteurs présentent autant de danger pour l'isolement que celles qui existent entre ligne et terre.

Les (fig. 1557 et 1558)

représentent sous forme de schéma la disposition d'un parafoudre à intervalles d'air multiples composé d'une succession de cylindres métalliques shuntés en nombre variable par des résistances ohmiques croissantes.

Les cylindres agissent comme les armatures de condensateurs placés en série, et c'est là un trait caractéristique de ce genre de parafoudre. Lorsqu'une tension statique s'établit sur une série de cylindres branchés entre ligne et terre, cette tension se répartit instantanément d'une extrémité à l'autre de la série et la charge va en diminuant à partir du premier jusqu'au dernier.

Lorsque la différence de potentiel de la quantité d'électricité induite devient suffisamment grande, l'étincelle s'amorce dans le premier intervalle, le deuxième cylindre prend le potentiel de la ligne et le deuxième intervalle devient le siège d'une étincelle, puisque la tension électrostatique à laquelle il est soumis a subitement augmenté.

Lorsque l'étincelle s'est amorcée dans tous les intervalles d'air, le courant dynamique de la ligne peut s'y dériver si, à ce moment, le potentiel dynamique est suffisant. Par suite de l'intensité relativement grande de ce courant dynamique, la chute de potentiel s'uniformise d'un cylindre à

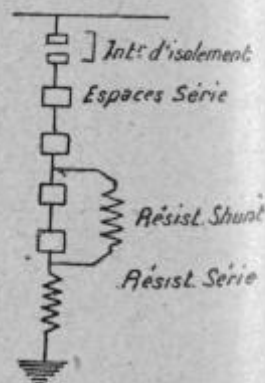


FIG. 1558.

l'autre ; puis ce courant continue à se dériver dans le parafoudre jusqu'à la fin de la période durant laquelle l'arc s'est amorcé, c'est-à-dire jusqu'au moment où le voltage alternatif de la ligne passe par zéro.

A ce moment entre en jeu la propriété des cylindres de déterminer l'extinction de l'arc. Plus l'intensité du courant dynamique est grande, plus les intervalles d'air doivent être nombreux pour l'extinction de l'arc ; plus la fréquence des courants oscillatoires dus à la foudre ou autres phénomènes est haute, moins le voltage nécessaire à la décharge doit être élevé.

Dans les appareils construits par la C^{ie} Thomson-Houston, les distances entre les différentes branches d'un parafoudre suivant les tensions du réseau sont, pour 6.000 à 12.000 volts, 14 centimètres ; pour 15.000 volts, 17 centimètres ; pour 20.000 volts, 21 centimètres ; pour 30.000 volts, 34 centimètres ; pour 40.000 volts, 50 centimètres ; pour 45.000 volts, 55 centimètres ; pour 50.000 volts, 62 centimètres, et pour 60.000 volts, 70 centimètres.

La General Electric Company a les éléments de ses appareils, en forme

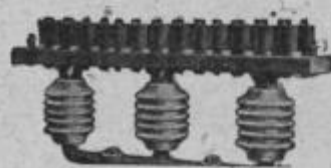


FIG 1559. — Soupapes à rouleaux. (Société l'Éclairage Électrique.)

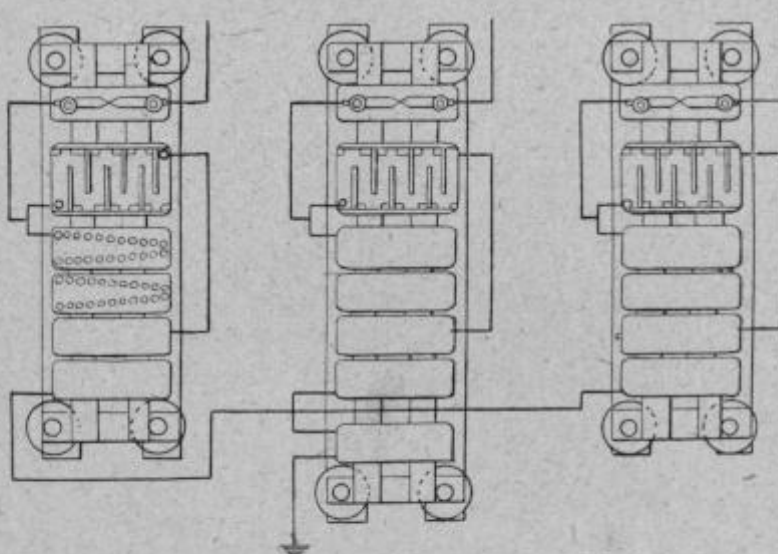


FIG. 1560. — Parafoudre à boules de la General Electric Company pour tension de 15.000 volts.

de V, constitués par plusieurs boules d'un métal spécial. Les éléments sont associés avec des résistances en charbon (*fig. 1560*).

Les parafoudres en métal anti-arc avec intervalles multiples du système Wurtz sont formés d'une série de petits cylindres métalliques séparés par des intervalles de 0^{mm},8 ; le nombre de ces cylindres est déterminé par la tension de la ligne et doit être suffisant pour qu'un arc ne se produise

après une décharge statique. De même que pour les parafoudres à cornes, on met une résistance ohmique en série avec les cylindres, et pour diminuer la résistance que celle-ci oppose à la décharge statique, on shunte

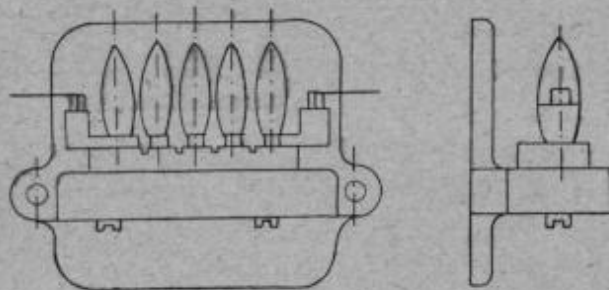


FIG. 1561. — Parafoudre à cylindres type Wurtz.

une partie des cylindres par une résistance ohmique (environ la moitié); par suite le parafoudre doit comporter environ le double des intervalles nécessaires pour maintenir la tension de la ligne, et quand il n'y a pas de décharges, la moitié des intervalles non

shuntés sert à maintenir cette tension. Ces parafoudres donnent d'excellents résultats.

Une modification de ce modèle de parafoudre consiste dans l'adjonction d'une plaque de terre vis-à-vis des intervalles les plus rapprochés de la ligne, comme le montre les schémas (fig. 1562 et 1563). Ce montage, outre qu'il assure une meilleure distribution du potentiel entre les intervalles, permet de réduire notablement le nombre de ces intervalles.

Le parafoudre Schœn et Félix, construit par la Société de constructions électriques à Lyon, est du type à espaces déflagrateurs multiples. Il se compose d'une série

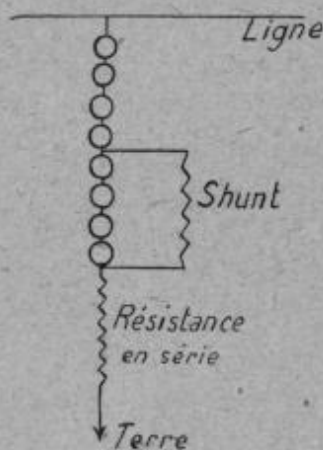


FIG. 1562.

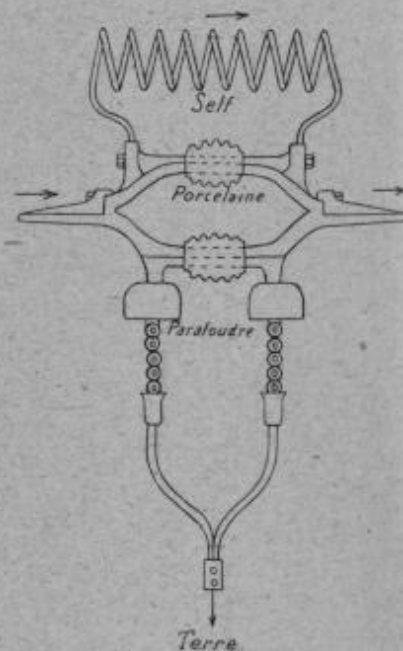


FIG. 1563.

de plots à alliage à base de zinc montés les uns à la suite des autres sur une barre isolante et séparés entre eux par un intervalle d'air d'une fraction de millimètre, intervalle que l'on peut régler en fai-

sant pivoter les plots autour de leur axe. Le nombre des plots varie suivant le voltage normal de la ligne à protéger. Pratiquement on fait le montage par séries de plots ou éléments de 1.200 à 2.400 volts. Leur action est telle que les arcs amorcés par les décharges sont aussitôt coupés sans qu'il soit nécessaire d'ajouter aucune résistance supplémentaire entre le dernier plot et la terre.

Pour des tensions supérieures à 5.000 volts, l'isolement est doublé par l'emploi d'un deuxième étage d'isolateurs superposés aux premiers. Ce genre de parafoudre n'absorbe en temps normal aucune parcelle de l'énergie utilisable ; il n'est pas susceptible de dérangement et il assure une extinction rapide des arcs amorcés, le soufflage étant facilité par la nature des plots et par leur forme ; le montage en est facile et il nécessite peu d'entretien.

Les limiteurs de tension à rouleaux construits par la maison Maljournal et Bourron sont surtout des sou-

papes très efficaces pour les surtensions de grandeur moyenne, de courte durée, d'origine atmosphérique ou interne.

Le parafoudre construit par MM. Beliol et Reiss, de Paris, se compose d'une série de cylindres en métal anti-arc ou en charbon, très rapprochés, variables, suivant la tension et supportés par des isolateurs en porcelaine.

L'un des pôles de la génératrice ou de la canalisation à protéger est relié au premier cylindre de gauche par l'intermédiaire d'un interrupteur. Le dernier cylindre à droite est mis à la terre à travers une série de résistances en charbon supportées par des isolateurs. Le nombre des cylindres déterminé d'après la tension normale du réseau est tel qu'aucune étincelle ne peut éclater entre deux cylindres consécutifs lorsque cette tension n'est pas dépassée d'une quantité fixée à l'avance. Quand la tension

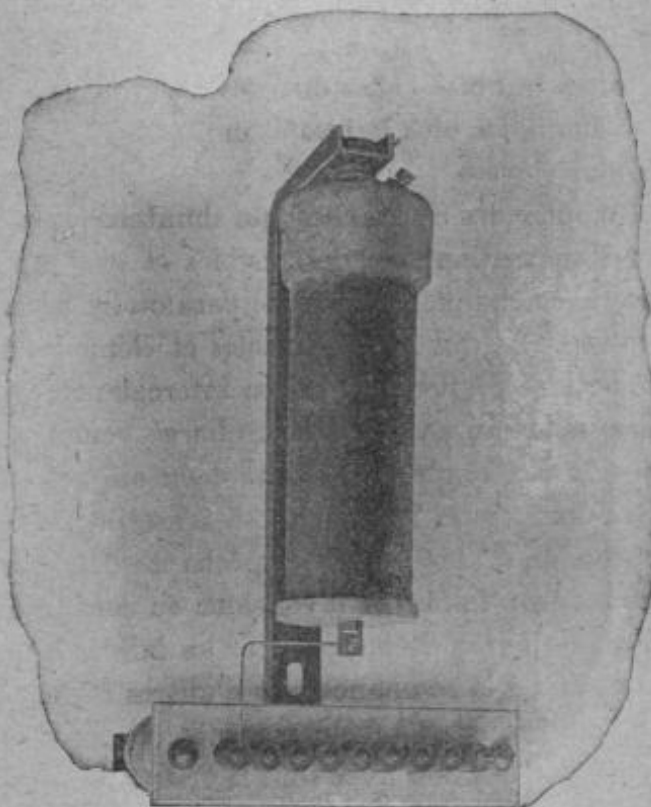


FIG. 1564. — Limiteur à rouleaux avec résistance liquide. (Maljournal et Bourron).

dépasse en général de 30 à 50 0/0 la tension normale, les étincelles qui se produisent entre les cylindres mettent automatiquement à la terre le pôle correspondant. Le soufflage de l'arc est produit par des pointes disposées à la partie supérieure des cylindres.

Les nouveaux parafoudres de la C^{ie} Thomson Houston ont leurs cylindres en métal, contenant un alliage spécial, et sont guillochés sur tout leur pourtour, guillochage qui a pour effet d'attirer l'arc sur les pointes et par conséquent de conserver le cylindre le plus longtemps possible. Les grandes et moyennes résistances sont en composition à base de graphite ; elles ont des valeurs variant de 20 à 45 ohms pour les valeurs les plus faibles et de 75.000 à 125.000 ohms pour les valeurs les plus élevées.

En outre des résistances, qui shuntent les intervalles d'air, la C^{ie} Thomson-Houston emploie des fusibles et des éléments éclateurs disposés en série avec chaque branche de parafoudre et en parallèle l'un par rapport à l'autre. Le but de ces fusibles et éléments éclateurs est de protéger le parafoudre proprement dit en intercalant un intervalle d'air supplémentaire, si le courant dû à la décharge venait à dépasser une valeur supérieure à 150 ampères pendant deux ou trois secondes.

La Compagnie Westinghouse construit un système de parafoudre pour tension de 25.000 volts, empêchant d'exercer son action pour des décharges trop faibles et favorisant, au contraire, son fonctionnement dans les cas de fortes décharges ; car les faibles décharges peuvent être dues à la tension, à la résonance et à d'autres causes qui se produisent normalement sur les circuits. On comprend ainsi qu'une rupture auxiliaire réglable permette d'adapter avec soin la résistance du parafoudre tout entier à la tension de la ligne.

Les parafoudres Westinghouse-Wurtz se composent de plusieurs éléments appelés « espaces série », de cylindres constituant les « espaces shunt », d'une résistance spéciale en dérivation sur les espaces d'air « shunt » et enfin d'une résistance mise en série avec les espaces d'air « série », qui ne présente pratiquement aucune self-induction.

Le courant de la ligne qui tend à suivre la décharge, peut, à cause de sa faible fréquence, comparativement à la haute fréquence de la décharge, traverser la résistance « shunt » ; à ce moment, l'arc amorcé dans les espaces d'air « shunt » s'étouffe, aussitôt la décharge atmosphérique passée. La résistance ohmique totale des résistances « shunt et série » est établie de telle sorte qu'elle limite le courant provenant du réseau à une valeur telle qu'il ne peut plus se maintenir à travers les espaces d'air « série ». Le nombre des espaces d'air « série » est établi de façon que le parafoudre puisse résister au voltage normal de la ligne, même dans le cas où un des fils serait à la terre. Les cylindres de métal anti-arc compo-

sant les espaces d'air « shunt et série » sont réunis par groupes de sept pour constituer un élément.

A l'effet d'augmenter l'efficacité des appareils à rouleaux on dispose sur chaque conducteur (*fig. 1565*) en série des bobines de self *S* de grand diamètre et d'un petit nombre de spires et on branche à leurs bornes trois séries de rouleaux *R* réunis à la terre par l'intermédiaire d'une quatrième série de rouleaux.

En traitant des surtensions qui se produisent dans les réseaux d'électricité, nous avons dit que l'élévation du niveau électrique qui en était la conséquence se présentait sous forme d'ondes de différentes longueurs, ayant leurs sommets et leurs nœuds. Dans ces conditions, il arrive que chaque fois qu'un déchargeur vient à se trouver en correspondance avec un sommet de l'onde, il reste submergé par elle et permet une dérivation de courant; mais chaque fois qu'il

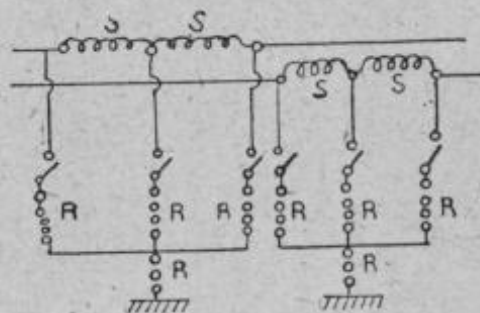


FIG. 1565.

se trouve en rapport avec un nœud, il reste tout à fait en dehors de l'onde et ne peut pas entrer en fonction, quelle que forte qu'ait été la décharge, et quelle que haute qu'ait été cette onde, qui peut très bien, dans un autre point, avoir dépassé la limite franche de la canalisation (cas de foudroiements aux isolateurs ou aux machines). Il s'ensuit qu'il ne suffit seulement pas de multiplier les parafoudres sur une ligne électrique, mais qu'il importe de les placer aux bons endroits par rapport à l'onde électrique. Mais s'il est difficile, en raison de la diversité de longueurs d'onde des différentes décharges, de juger de la place la plus convenable pour un déchargeur, l'on sait par contre que, lorsqu'une décharge frappe un conducteur, celui-ci devient le siège d'un courant qui le suit plus ou moins loin et va éclater en général là où il rencontre une discontinuité notable dans la forme et les dimensions du conducteur ou dans la nature du milieu qui l'entoure. C'est pourquoi les machines électriques sont souvent foudroyées; en effet, dans une installation, elles en sont la discontinuité la plus importante, et sans elle les courants ondulatoires provoqués par les décharges abandonnent facilement un mince fil en cuivre pour se porter dans la masse magnétique qui en est le milieu.

C'est en s'inspirant de ces considérations que M. Gola, à l'effet d'obliger le phénomène à se produire ailleurs, a pourvu, en intercalant dans la canalisation, avant les machines, une solution de continuité très notable, où le circuit homogène constitué partout par des fils de section presque

constante, toujours du même métal (cuivre), toujours dans un diélectrique (air ou matériel isolant), est ainsi coupé brusquement par diverses parties conductrices en matières magnétiques de section et de surface considérablement plus grandes, reliées par des conducteurs de cuivre de section réduite et disposés dans un milieu magnétique, de même que dans les fils, dans les machines. Par suite, dans ce point va se former un sommet de chaque onde, et probablement le sommet le plus haut, déterminant la position ainsi propre pour appliquer les déchargeurs.

M. Gola, dans l'établissement de son parafoudre, s'est surtout préoc-

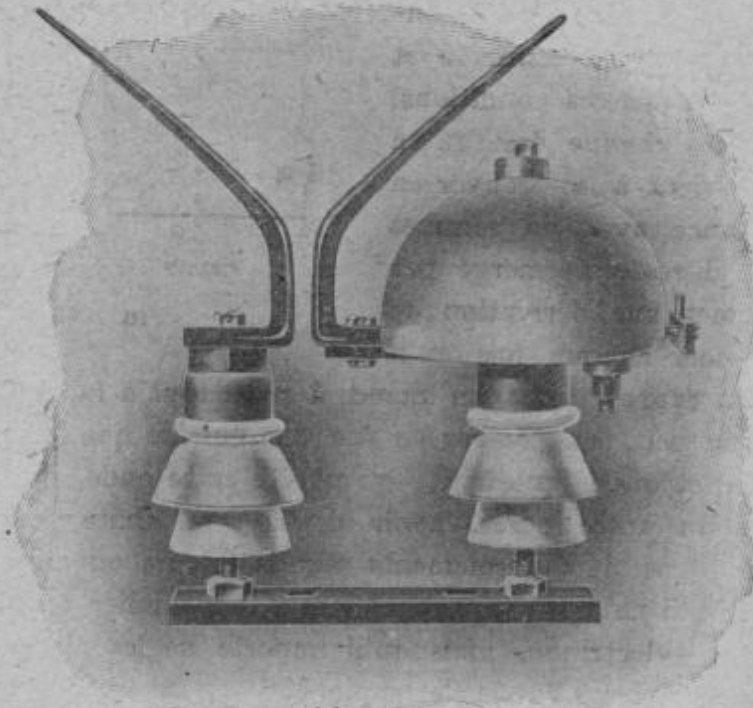


FIG. 1566 — Parafoudre en série, type Gola. (Maljournal et Bourron.)

cupé de réaliser un appareil pouvant être disposé en série sur la ligne. Il a complété l'impédance de l'enroulement de self-induction par une impédance d'une autre forme, et l'ensemble de son appareil constitue un obstacle infranchissable pour les courants à haute fréquence. En outre, l'appareil est établi de telle sorte que la dérivation, que l'on cherche à produire à l'endroit du parafoudre pour décharger la ligne, se trouve en l'un des points les plus favorables de l'installation.

Le parafoudre Gola est constitué par deux ou plusieurs calottes courtes AA' en fonte ou en acier embouti (fig. 1566 et 1567), courbées sur des rayons différents d'un point à l'autre, qui s'appliquent l'une sur l'autre, interposant un diaphragme F en métal anti-arc et non magnétique qui comporte une entretoise intérieure G de petites dimensions où aboutit

la bobine de self et une saillie extérieure constituant le déversoir électrique. Les calottes sont réunies en bas par un noyau en fer laminé sur lequel s'enroulent les spires de la bobine de self : l'ensemble des calottes et du noyau forme un circuit magnétique interrompu par le diaphragme qui devient le siège d'un champ magnétique.

Les courants portés sur la ligne, avant d'agagner les machines, sont forcés de passer par le diaphragme F et les points P et P', et le courant industriel à fréquence normale va par G et parcourt la bobine de self H ; les courants engendrés par les décharges atmosphériques rencontrant au contraire la grande impédance offerte par l'appareil s'ouvrent une voie dérivée par le diaphragme anti-arc et une corne disposée à distance réglable et reliée à la terre.

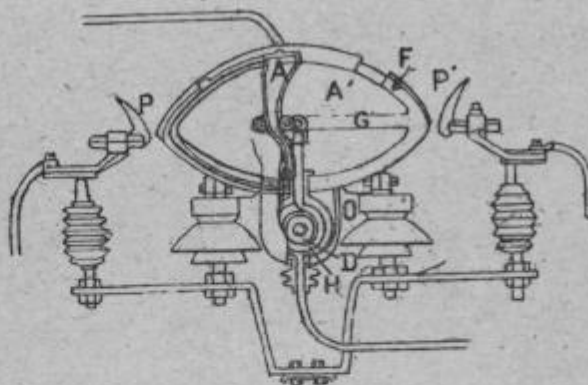


FIG. 1567.

L'appareil comprend donc le parafoudre proprement dit et le déchargeur et, pour les installations au-dessous de 10.000 volts, il suffit d'y ajouter une résistance ohmique. Pour les tensions au-dessus, on préfère subdiviser la distance explosive en deux ou plusieurs espaces d'air distincts, insérant entre le parafoudre en série et la résistance ohmique un déchargeur *ad hoc* pour assurer une plus efficace et brusque rupture de l'arc.

Les parafoudres Brown-Boveri, utilisés dans le transport triphasé de Livet à Grenoble (26.000 volts), comprennent chacun trois parafoudres distincts, soit un par phase. Chaque parafoudre est composé d'une série de 17 éléments, constitués eux-mêmes par une série de 7 rouleaux en bronze molletés, espacés les uns des autres de 1 millimètre environ et renfermés dans un berceau en porcelaine. Ces 17 éléments sont en communication, d'une part, avec la terre et, d'autre part, avec un conducteur qui réunit 4 groupes de 4 de ces mêmes éléments disposés en série, les 4 groupes étant montés en parallèle. En outre, chacun de ces derniers est relié à une bobine de self, le tout isolé du sol par des isolateurs à haute tension.

Le courant arrivant de la ligne se trouve d'abord en présence d'une première série d'éléments égale à $17 + 4 = 21$, et de la première bobine de self. Après avoir traversé trois autres groupes identiques, le courant se rend à l'enroulement primaire du transformateur, après avoir passé par un disjoncteur automatique et par le tableau de haute tension. Le grand nombre de ruptures en série sur le circuit de terre empêche la formation d'un arc puissant et, par suite, en facilite l'extinction.

Cet appareil agit aussi comme déchargeur continu, c'est-à-dire que chaque surtension, provenant des causes que nous avons énumérées, est lancée dans le circuit de terre.

Enfin, ce genre de parafoudre offre le moyen de supprimer les résistances ohmiques que l'on est obligé d'intercaler sur le circuit de terre des parafoudres à cornes, à l'effet d'éviter la formation de courts-circuits pendant leur fonctionnement. M. Védovelli, dans le but de faciliter l'amorçage, resserre les cylindres et en augmente le nombre.

Pour le nombre d'intervalles, M. Védovelli donne les indications suivantes :

Isolements	Nombre d'intervalles d'air	Voltages minima	Voltages maxima
6.000 volts	1	4.000 volts	5.000 volts
15.000 —	2	6.000 —	12.000 —
30.000 —	4	15.000 —	25.000 —
50.000 —	6	20.000 —	35.000 —
60.000 —	8	25.000 —	50.000 —
60.000 —	10	30.000 —	50.000 —
70.000 —	12	40.000 —	50.000 —
80.000 —	15	50.000 —	50.000 —

Un appareil intéressant est le parafoudre multiple à cylindres et à



FIG 1563. — Parafoudres à rouleaux, système Sprecher et Schuch, employés avec résistances à eau ou en carborundum pour tension d'exploitation pouvant aller jusqu'à 35.000 volts

soufflage de la Société d'Applications industrielles, caractérisé par la disposition de cylindres métalliques à grandes surfaces et de pièces métalliques en forme de V, laissant respectivement entre elles un intervalle en vue de conduire à la terre les décharges atmosphériques ou autres à haute tension, et de souffler l'arc amorcé par la décharge, par sectionnement, par refroidissement sur lesdits cylindres à grande surface, et par allongement entre les pièces métalliques en forme de V.

La Société Sprecher et Schuch a réalisé une combinaison du parafoudre à cornes et du parafoudre à rouleaux (fig. 1568).

Dans l'appareil Grimaldi (fig. 1569) on a combiné au contraire l'appareil à rouleaux avec des bobines de self ; ce système présente le grave inconvénient de faire travailler l'appareil dans des conditions défavorables avec les décharges statiques. Dans les cou-

rants de basse fréquence ou avec le courant continu l'amorçage devient

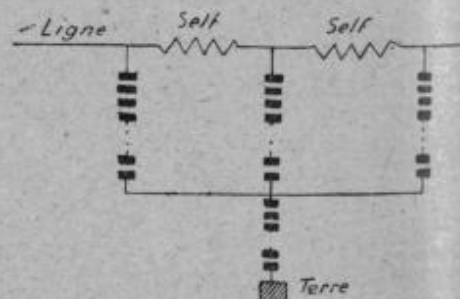


FIG 1569 — Représentation schématique du parafoudre système Grimaldi.

très difficile et d'autre part le soufflage de l'arc amorcé s'obtient difficilement.

565. Parafoudres électrolytiques. — Ces déchargeurs sont assez en vogue actuellement en Amérique. M. Wirt les considère comme très efficaces.

Il en existe deux types, basés sur le même principe de l'extinction de l'arc par une force contre-électromotrice : le déchargeur électrolytique à cuve, étudié par Creighton, et le déchargeur électrolytique à pellicule d'aluminium.

La résistance ohmique du premier est à peu près nulle, quelle que soit la tension appliquée ; celle du deuxième est très grande jusqu'à 350 ou 400 ohms par élément, valeur pour laquelle elle ne laisse passer que 1 ampère environ ; au delà elle s'annule brusquement.

Les parafoudres électrolytiques à cuve consistent en un bac qui contient un électrolyte. Des électrodes, reliées soit aux deux conducteurs à protéger, soit à un conducteur et à la terre, pénètrent dans la cuve. Si elles plongent dans le liquide, il est nécessaire d'interposer, pour empêcher un courant de perte, un éclateur réglé pour s'amorcer vers 120 à 150 pour 100 de la tension de service. Tout dispositif spécial de soufflage d'arc est inutile ; c'est la cuve qui remplit ce rôle.

Dès qu'une surtension dépasse la tension de réglage de l'éclateur, l'arc jaillit et l'énergie de la surtension s'écoule en court-circuit au travers de l'électrolyte ; un second arc se forme aussitôt entre les électrodes et le liquide qu'il repousse. Il détermine une force contre-électromotrice, s'allonge et sa résistance croît jusqu'à ce qu'il s'éteigne.

Cette extinction, progressive, ne détermine pas de surtensions. Creighton dit avoir vérifié ce dernier point à l'oscillographe.

Aussitôt après, le liquide reprend son niveau et le déchargeur se trouve prêt à fonctionner de nouveau.

Si les électrodes ne plongent pas dans le liquide, mais y affleurent seulement, le fonctionnement diffère.

L'arc se produit de suite entre électrode et électrolyte, en déterminant une force contre-électromotrice notable que Creighton évalue à 1.500 volts par élément. Il n'y a donc plus de court-circuit initial comme dans le premier cas, et à première vue ce déchargeur semble devoir se comporter comme un déchargeur à intervalles ordinaires.

Mais, dans ce dernier, le passage du courant abaisse, par l'élévation de température de l'air et par la vaporisation du métal des cylindres, la résistance des intervalles. La chute de tension aux bornes décroît très vite au lieu d'augmenter comme dans le déchargeur à cuve.

D'après Creighton, quatre intervalles de 0^{mm},8 en série entre cylindres

métalliques sont franchis par l'arc vers 5.000 à 6.000 volts et la différence de tension aux bornes extrêmes descend aussitôt à 70 volts.

Un déchargeur à deux cuves, présentant le même nombre d'intervalles (deux par cuve), laissera passer l'arc aux tensions supérieures à 3.000 volts avec une intensité proportionnelle à l'excès, sur cette valeur, de la tension appliquée. Au delà, l'intensité ne sera limitée que par la résistance ohmique de l'électrolyte ; autrement dit, il y aura court-circuit. Ce déchargeur ouvrira donc comme le premier, mais moins rapidement peut-

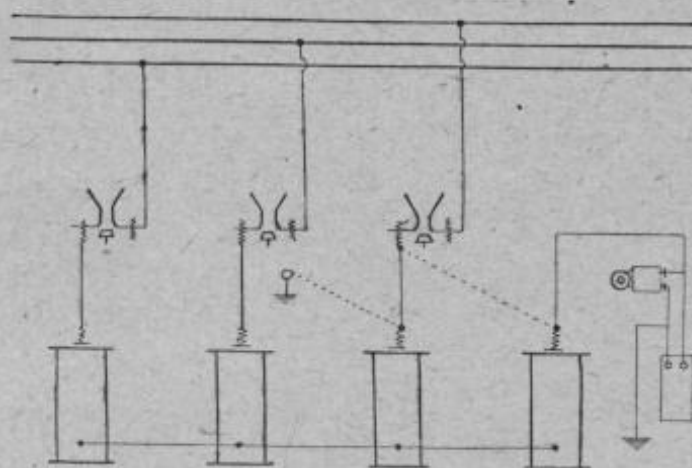


FIG. 1570. — Montage d'un parafoudre électrolytique sur un circuit triphasé à point neutre non mis à la terre.

être, une soupape pour l'écoulement de l'énergie de surtension. Comme le premier aussi il assure l'extinction de l'arc dès que la tension redescend à 3.000 volts.

Les parafoudres électrolytiques à pellicule d'aluminium doivent être munis d'un intervalle d'air en série réglé bas, si

l'on ne peut admettre le courant de perte notable (1 ampère) qui les traverse.

La différence qui distingue un tel appareil d'un diélectrique ordinaire est, qu'après l'avoir soumis à un potentiel élevé, il ne produit aucune décroissance de tension malgré que la pellicule soit traversée par un courant dynamique notable. Suivant que la charge est continue ou alternative, la caractéristique volts-ampères est différente. Dans le premier cas, il n'y a, en deçà de la tension critique, d'autre courant dans le circuit du parafoudre que le courant de fuite, lequel est toujours très faible. Dans le second cas, le courant de capacité de l'appareil s'ajoute au courant de fuite, mais ne correspond toutefois qu'à une perte d'énergie inappréciable en raison de son décalage sur la tension voisine de $\frac{2}{\pi}$. Dans ces con-

ditions, le nombre d'éléments dans le circuit sera toujours choisi pour que la tension dynamique moyenne soit toujours inférieure au voltage critique permanent de l'appareil (420 volts). Une seconde propriété courante du parafoudre électrolytique repose sur l'aptitude que présente la pellicule à modifier son épaisseur proportionnellement à la tension appliquée.

La General Electric Co et la Westinghouse Co construisent toutes deux

ces limiteurs, qu'elles recommandent pour les tensions dépassant 50.000 volts.

Ils sont constitués par des cuvettes d'aluminium empilées les unes sur les autres et contenant un électrolyte de composition tenue secrète. D'après la General Electric Co, c'est à la surface de l'électrolyte que se formerait la pellicule d'hydroxyde.

L'éclateur est réglé, comme pour l'appareil à cuve, à 150 0/0 à de la tension de service. Pour 80.000 volts, la Compagnie Westinghouse lui donne 230 millimètres. Le réglage est obtenu par le déplacement de l'une des branches.

La Compagnie Westinghouse a publié deux oscillogrammes montrant que, relié à un alternateur sans interposition d'intervalle d'air, ce déchargeur prend un courant de capacité, décalé de 70° en avant, et aussi que, pour le nombre de cuvettes adopté, le courant commence à filtrer vers $9.000 \sqrt{2}$ volts et passe en court-circuit à $12.000 \sqrt{2}$ volts.

Pour entretenir la pellicule, la General Electric Co recommande d'envoyer journellement dans l'appareil un courant de 1 ampère en amenant la branche mobile assez près de la branche fixe pour que l'arc jaillisse. Cet entretien paraît donc assez assujettissant.

Aussi la General Electric Co recommande-t-elle de régler les déchargeurs des postes isolés à 175 ou 200 pour 100 de la tension de service, afin d'éviter un fonctionnement trop fréquent et de régler, au contraire, à 150 pour 100 les déchargeurs d'usines ou de sous-stations surveillées.

Les parafoudres électrolytiques sont montés en série avec un parafoudre à cornes ou un parafoudre à rouleaux, le premier type étant utilisé pour les lignes à haute tension, le second pour les lignes dont la tension est inférieure à 13.500 volts ; l'enveloppe de fonte du parafoudre électrolytique est reliée directement au sol, et la plaque d'aluminium placée à la partie supérieure de la pile est connectée avec le parafoudre à cornes ou à rouleaux.

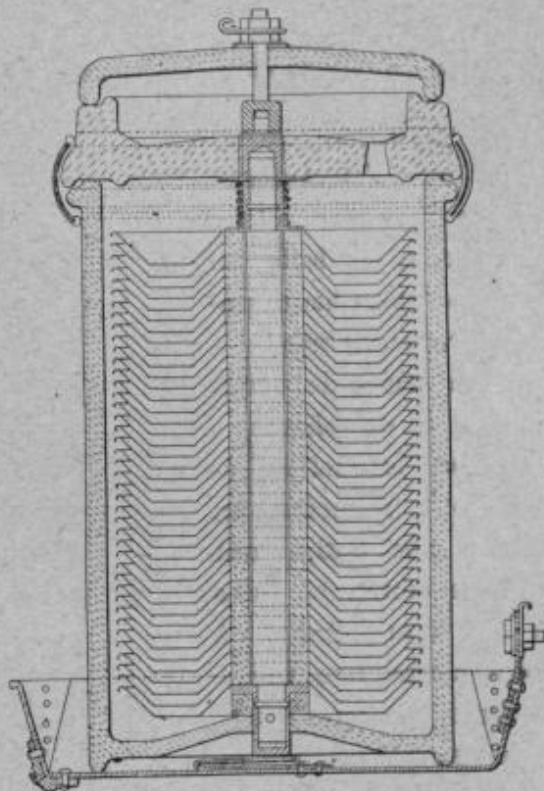


FIG. 1571.

La Compagnie Thomson-Houston construit un parafoudre électroly-

A l'intervalle à corne.....

Isolateur de porcelaine.....

Couvercle métallique.....

Cuve soudée en acier.....

Huile.....

Conducteur tubulaire en cuivre.....

Tirant d'assemblage en bois.....

Huile.....

Électrolyte.....

Cônes en aluminium
(vue en coupe).....

Cônes en aluminium
(vue en perspective).....

Base métallique.....



FIG. 1572. — Vue en coupe d'un parafoudre électrolytique. (Système Thomson-Houston)

7.000 volts. A l'exception de l'électrolyte, tout ce qui relie les cônes entre eux les isole en même temps. Chaque parafoudre comporte autant de séries de cônes qu'il y a de phases à protéger, lesquelles séries sont montées en étoile, c'est-à-dire ont un pôle commun. Dans le cas d'un circuit à point neutre non mis à la terre, on ajoute une série additionnelle de cônes, branchée entre ce pôle commun et la terre.

Ces parafoudres ne doivent pas être disposés d'une manière permanente entre le réseau et

tique composé de deux électrodes en aluminium immergées dans un électrolyte convenable et sur lesquelles on a fait venir, par des traitements chimiques ou électrochimiques, une pellicule d'hydroxyde d'alumine.

Tous les types de ce nouveau parafoudre sont constitués par une ou plusieurs séries de cônes ou cuvettes coniques superposées, en aluminium, écartées d'environ 7mm,5 (fig. 1571 à 1574). L'ensemble des cônes est immergé dans une cuve en acier, pleine d'huile, et pour les circuits à voltage au-dessus de

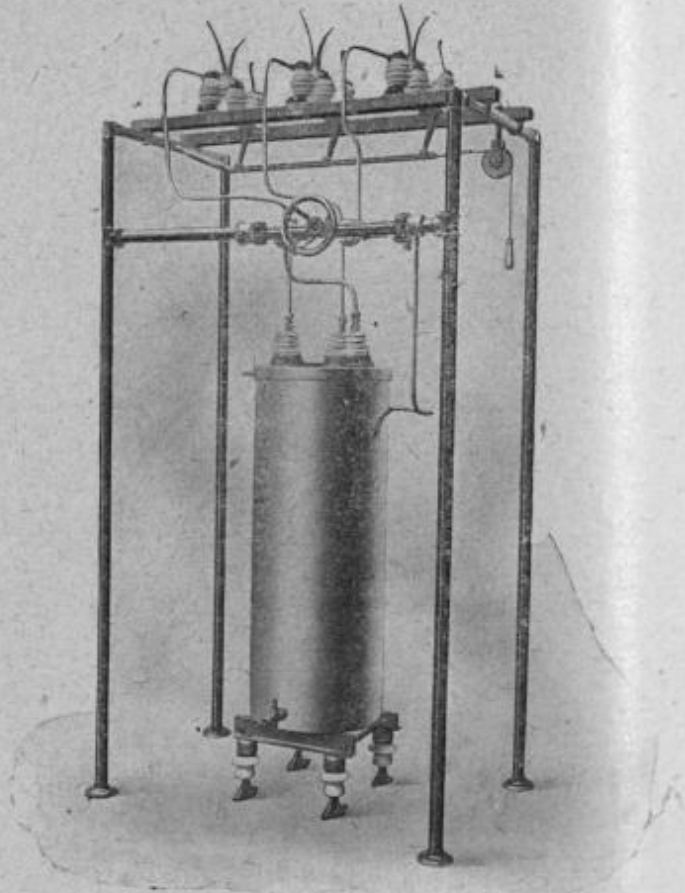


FIG. 15.3. — Parafoudre électrolytique triphasé de 7.500 volts. (Thomson-Houston.)

le sol. On interpose normalement entre le réseau et le parafoudre un intervalle d'air à cornes, réglé pour un voltage légèrement supérieur à celui du réseau. Ces intervalles à cornes sont construits de

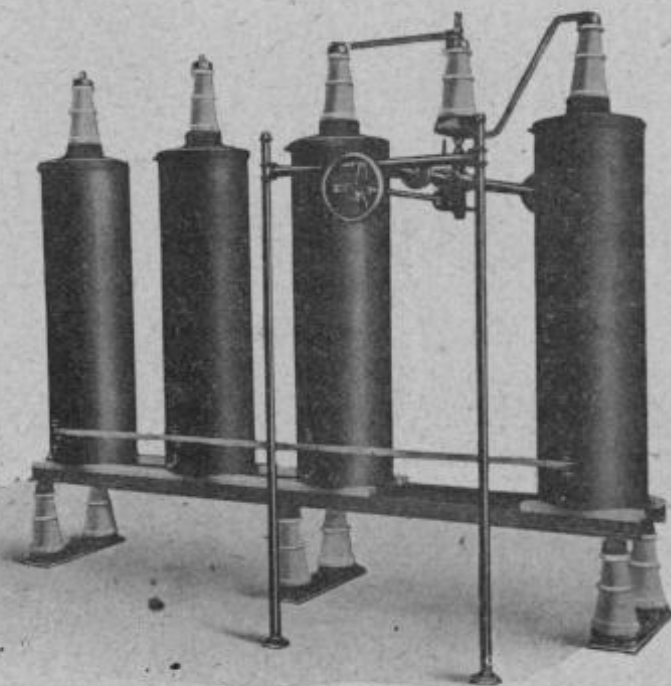


FIG. 1574. — Parafoudre électrolytique Thomson-Houston de 15.000 volts.
Ensemble des cuves.

façon à pouvoir : 1° mettre hors circuit le parafoudre lorsqu'on désire l'isoler complètement de la ligne, dans le but soit de le retirer, soit de le réparer ; 2° brancher directement, c'est-à-dire sans l'interposition d'un intervalle d'air, le parafoudre sur la ligne, opération qu'il est nécessaire

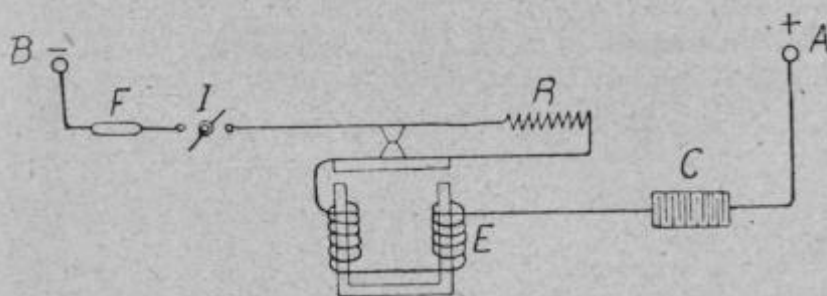


FIG. 1575 — Schéma des connexions du parafoudre électrolytique pour réseau du courant continu de la Société des condensateurs de Fribourg

A, pôle positif. — B, pôle négatif. — C, condensateurs. — E, électro-aimant.
F, coupe-circuit. — Interrupteur. — R, résistance.

d'effectuer une fois par jour en vue de maintenir la pellicule d'hydroxyde à l'épaisseur voulue. Cette opération s'effectue très simplement en fermant simultanément pendant un instant les intervalles à cornes, et les ramenant aussitôt à leur position primitive jusqu'à 27.600 volts ; ces para-

foudres peuvent être installés à l'intérieur des bâtiments. Au-dessus de ce voltage, on les dispose à l'extérieur.

Pour assurer un bon entretien la General Electric C^{ie} emploie une solution ammoniacale de tungstène et la Société Westinghouse une solution ammoniacale de bore.

Le courant de 1.000 ampères que le parafoudre électrolytique peut supporter quelques instants est supérieur à celui des décharges atmosphériques actuelles.

Le parafoudre à cornes que l'on insère habituellement à la suite du parafoudre électrolytique a l'inconvénient de décomposer l'oxyde d'aluminium des cuvettes ; pour l'éviter le parafoudre à cornes a une de ses

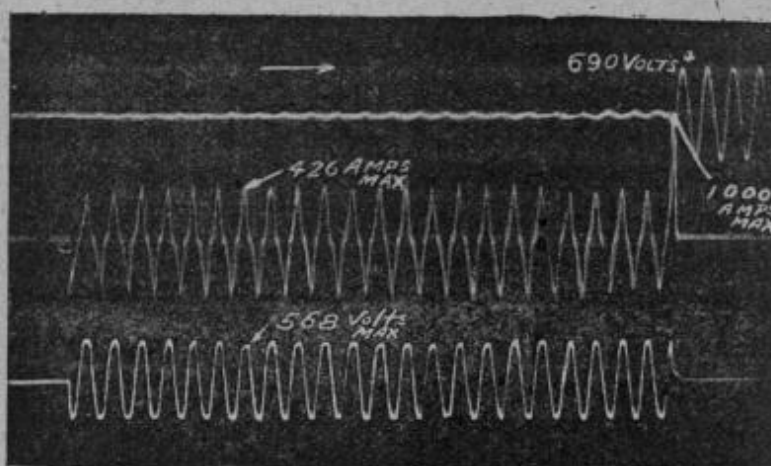


FIG. 1576. Parafoudre électrolytique Thomson-Houston.

branches montée sur un pivot vertical, de façon que en mettant chaque jour, pendant quelques instants, les deux branches en contact, on produit artificiellement une décharge suffisante pour maintenir adhérente la couche d'oxyde.

On a reconnu la nécessité d'une recharge électrique, soit à l'aide d'une corne mobile, soit au moyen de cornes fixes, qu'un taquet mobile peut mettre en court-circuit. Pour les tensions inférieures à 25.000 volts c'est ce dernier système qui est employé. Pour les tensions supérieures, la distance explosive est suffisante pour échapper à l'influence d'un jeu ou d'une déformation résultant de l'emploi de la corne pivotante.

Parafoudres à chambre de compression. — Pour les installations à voltage moyen (3.000 volts) et pour protéger les transformateurs installés sur poteaux, on peut utilement employer le parafoudre à chambre de compression assez couramment utilisé en Amérique. On le pose sur le même poteau que le transformateur et son prix qui est peu coûteux auto-

rise ce mode d'opérer. En principe l'appareil se compose : d'un socle en porcelaine (fig. 1577) à l'intérieur duquel sont les antennes constituées par deux bandes de métal en forme d'U ; d'un manchon en porcelaine dans lequel sont placés les éclateurs composés chacun de deux chapeaux métalliques d'alliage spécial. Un tube de porcelaine maintient ces éclateurs écartés l'un de l'autre.

Au-dessus de ces antennes est une tige de faible résistance ohmique, au sommet de laquelle s'adapte un contact à ressort. A l'extrémité du tube de porcelaine est cimenté un chapeau de même matière, à travers lequel passe le fil de connexion à la ligne. La connexion à la terre est un fil qui passe à travers le fond du socle et est relié aux antennes ainsi qu'à l'éclateur inférieur. Le parafoudre est scellé hermétiquement évitant l'accès de la poussière et de l'humidité.

Ainsi qu'on peut s'en rendre compte, cet appareil est une variante du parafoudre à intervalles. On peut régler à volonté la tension d'étincelle ; la meilleure valeur paraît être de 0,7 de la tension à laquelle l'isolement du transformateur est éprouvé.

Il est recommandé de placer un sectionneur sur le fil de terre.

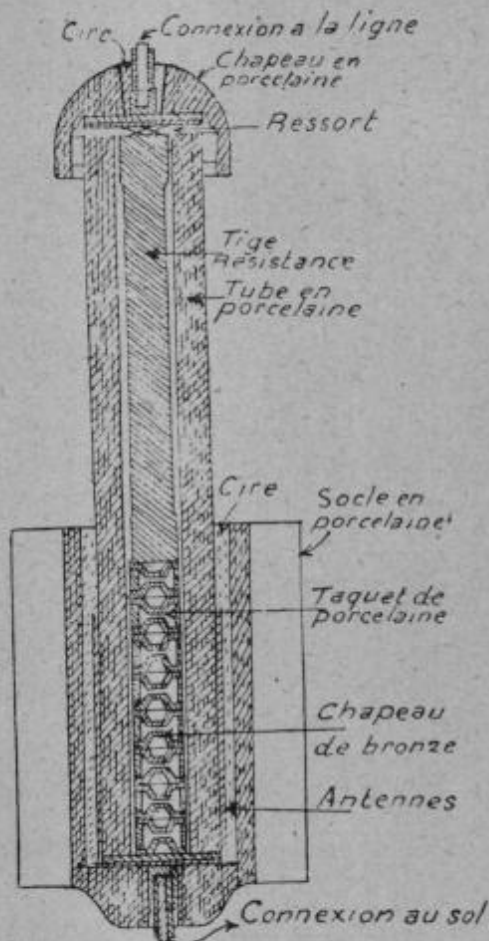


FIG. 1577.

566. Limiteurs à condensateurs. — Lorsqu'on monte des condensateurs en série dans un circuit ayant de la self, ils donnent lieu à une surélévation de tension qui peut les mettre hors service. Les diélectriques peuvent s'échauffer et donner lieu à des conséquences dangereuses. Ils ont ainsi une trop faible résistance à la rupture du diélectrique ; ils manquent de contact intime du diélectrique et de l'armature dans toute leur surface et ils ont un refroidissement insuffisant.

Il y a quelques années Moscicki entreprit ses travaux pour la réalisation de condensateurs à haute tension ; les efforts de cet inventeur furent couronnés de succès et aujourd'hui l'industrie électrique a à sa disposition un appareil des plus intéressants, car les applications des condensateurs

aux courants alternatifs, fort nombreuses, étaient restées jusqu'ici sans succès, presque uniquement à cause de l'insuffisance de stabilité de ces appareils.

Au lieu de tourner dans le cercle ingrat des condensateurs plans comme ses devanciers, Moscicki eut l'idée de recourir à la forme tubulaire. Ses appareils, dont il a confié l'exploitation à la Société générale des condensateurs électriques de Fribourg, sont constitués par un tube de verre à col renforcé, fermé à la partie inférieure et ouvert à la partie supérieure, l'inventeur ayant trouvé qu'avec une épaisseur renforcée au col supérieur l'appareil résistait mieux aux voltages élevés, la résistance du condensateur diminuant considérablement sur les bords du diélectrique. M. Moscicki a pu ainsi reconnaître que du verre d'une épaisseur de 1/2 millimètre pouvait supporter une tension allant jusqu'à 60.000 volts si la partie sur les bords est assez renforcée ; tandis que le même verre avec une épaisseur uniforme ne supporte guère plus de 11.700 volts.

L'armature intérieure se compose d'une argenture entièrement mince obtenue chimiquement ainsi que celle extérieure, à l'effet d'éliminer complètement l'interposition de l'air. De plus, l'armature extérieure est elle-même recouverte d'un cuivrage beaucoup plus épais qui lui donne la consistance nécessaire.

L'extrémité libre du tube est revêtue d'un isolateur à cannelures, scellé au verre et muni d'un emmanchement à baïonnette. Chaque élément porte un contact supérieur relié à l'armature intérieure et un contact inférieur en rapport avec l'armature extérieure. Il est ensuite disposé dans un tube de laiton ou de tôle, à fermeture étanche. La prise de courant inférieure est réunie au tube enveloppe, et la partie annulaire est remplie d'un mélange incongelable d'eau et de glycérine. Les tubes de verre sont fixés à l'enveloppe par des supports élastiques. Les éléments ainsi constitués sont de trois types de 135, 95 et 55 centimètres de hauteur ; l'épaisseur du verre est de 1 millimètre par 10.000 volts, et son diamètre de 5 centimètres reste toujours constant. Ces dimensions correspondent à une tension critique de 135.000 volts avec un coefficient de sécurité de 13,5. Les éléments sont utilisés normalement pour des tensions de 10.000 volts à 20.000 volts. Pour des tensions plus élevées, les éléments sont groupés en série et certaines batteries sont établies pour 100.000 volts.

Ainsi, indépendamment de leur emploi souhaité dans les stations centrales pour fournir le courant magnétisant nécessaire aux moteurs asynchrones, les condensateurs ont donné lieu à une nouvelle classe de parafoudres. Pour les fréquences très basses, la résistance de ces appareils est presque infinie, ce qui a l'avantage de permettre la suppression complète de tout intervalle d'éclatement en série, au contraire de ce qui a lieu pour les limiteurs électrolytiques.

L'inconvénient évident du système est de laisser la ligne sans protection contre les surtensions de basse fréquence. Pour y remédier, Moscicki a proposé une soupape qui est, en somme, constituée par un éclateur réglé haut, une forte résistance ohmique et une ligne d'intervalles dont tous les cylindres sont dotés d'une capacité artificielle par rapport à la terre, le dernier seul étant mis en communication directe avec celle-ci.

Moscicki établit toute une batterie de ces déchargeurs, réglés de manière qu'ils fonctionnent successivement et fractionnent, pour l'amortir, l'énergie de la surtension. Les batteries sont branchées au réseau par l'intermédiaire de couteaux hydrauliques.

Dans les nombreuses applications qui ont été faites de ce genre de parafoudre en Suisse et en Italie, utilisé comme dispositif de protection contre les surtensions de haute fréquence, les batteries de condensateurs sont connectées d'une part directement à la ligne, et, d'autre part, à la terre, par l'intermédiaire d'une résistance ; un parafoudre à cornes est, en outre, disposé en parallèle avec les condensateurs.

Soupapes Giles. — La Société de Fribourg, énoncée ci-avant, fabrique également un appareil de protection de construction plus récent, destiné à fonctionner sous l'effet des surtensions de basse et moyenne fréquence. Cet appareil est formé de 6, 8 ou 12 colonnes parallèles ayant, suivant les cas, des résistances individuelles de 800 à 25.000 ohms, ce qui fait que certaines de ces soupapes ont des résistances de 70 ohms. L'appareil présente les caractéristiques suivantes : obtention de résistances d'écoulement très faibles sans produire des surtensions ou phénomènes de résonance ; obtention de l'extinction de l'arc amorcé, au bout d'une demi-période du courant des machines.

567. Limiteurs à jets d'eau ou à colonnes. — Ces appareils ont l'avantage d'être peu coûteux, et ils donnent de bons résultats, malgré qu'on leur reproche d'être une cause permanente de pertes, surtout pour les tensions élevées. Il existe un grand nombre de modèles de ce genre de parafoudre ; tous peuvent fonctionner sans interposition d'un éclateur qui est susceptible de donner lieu à des résonances.

Ils constituent une protection efficace contre les surtensions en général, mais principalement contre celles dues aux charges statiques, et ils réalisent un système excellent pour mettre une installation d'une façon permanente à la terre.

Ils sont constitués par un jet d'eau ascendant ou descendant, contenu dans un tube sur toute sa longueur, et lancé contre un bouclier métallique. Le jet d'eau relie une phase à la terre et on règle sa résistance en modifiant sa longueur. D'autres forment de véritables nappes d'eau à

grande surface. Ils demandent un entretien et une certaine surveillance. On utilise soit de l'eau courante ou de la même eau que l'on reprend dans un bassin au moyen d'une pompe et telle qu'on puisse obtenir le refroidissement suffisant de l'eau.

Le réglage de ces appareils s'effectue, suivant le type, à l'aide d'un ampèremètre ou d'une lampe, qui sont munis de courts-circuiteurs.

Le tableau suivant, publié par la maison Maljournal et Bourron renseigne sur les hauteurs moyennes de jet et les diverses caractéristiques du réglage des appareils que cette maison construit.

TENSION de SERVICE	HAUTEUR MOYENNE du jet	COURSE du RÉGLAGE	DIAMÈTRE des AJUSTAGES	DISTANCE NORMALE entre jets	DÉBIT MOYEN PAR POLE et par heure
	millimètres	millimètres	millimètres	millimètres	litres
6.000	150	150	10	500	750
10.000	200	200	10	600	850
15.000	300	300	8	800	700
26.000	400	400	8	1.000	800
35.000	500	500	6	1.350	500
45.000	650	650	6	1.500	350
70.000	800	800	6	1.800	650

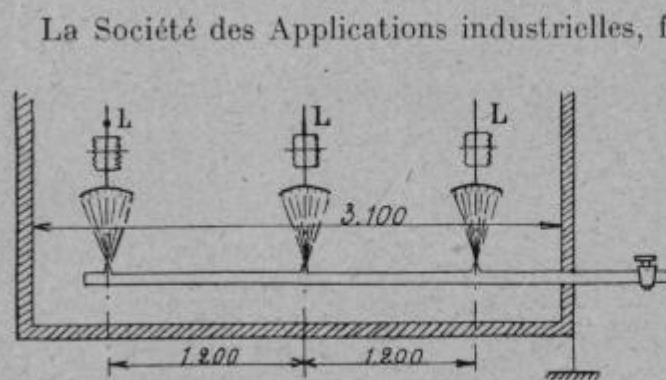


FIG. 1578.

La Société des Applications industrielles, fondée par le regretté ingénieur Bernheim, installe sur les réseaux qu'elle construit un parafoudre hydraulique (*fig. 1578*) à fonctionnement continu, dans lequel la mise à la terre des lignes se fait par l'intermédiaire de trois jets d'eau qui jaillissent entre des coupelles aux-

quelles sont reliés les conducteurs ; le tuyau d'amenée est mis à la terre.

Le parafoudre « Schuckert » est constitué par un mince jet d'eau fourni par la conduite principale d'alimentation des turbines, lequel va frapper une lame de cuivre reliée métalliquement avec le conducteur de la ligne que l'on veut protéger. Le jet se manifeste sous forme de pluie produisant ainsi un très grand nombre d'intervalles entre la lame de cuivre et le point de sortie.

La Compagnie Vaudoise des forces motrices des lacs de Joux et de

l'Orbe a placé sur son réseau triphasé aérien, à 15.000 volts, des limiteurs

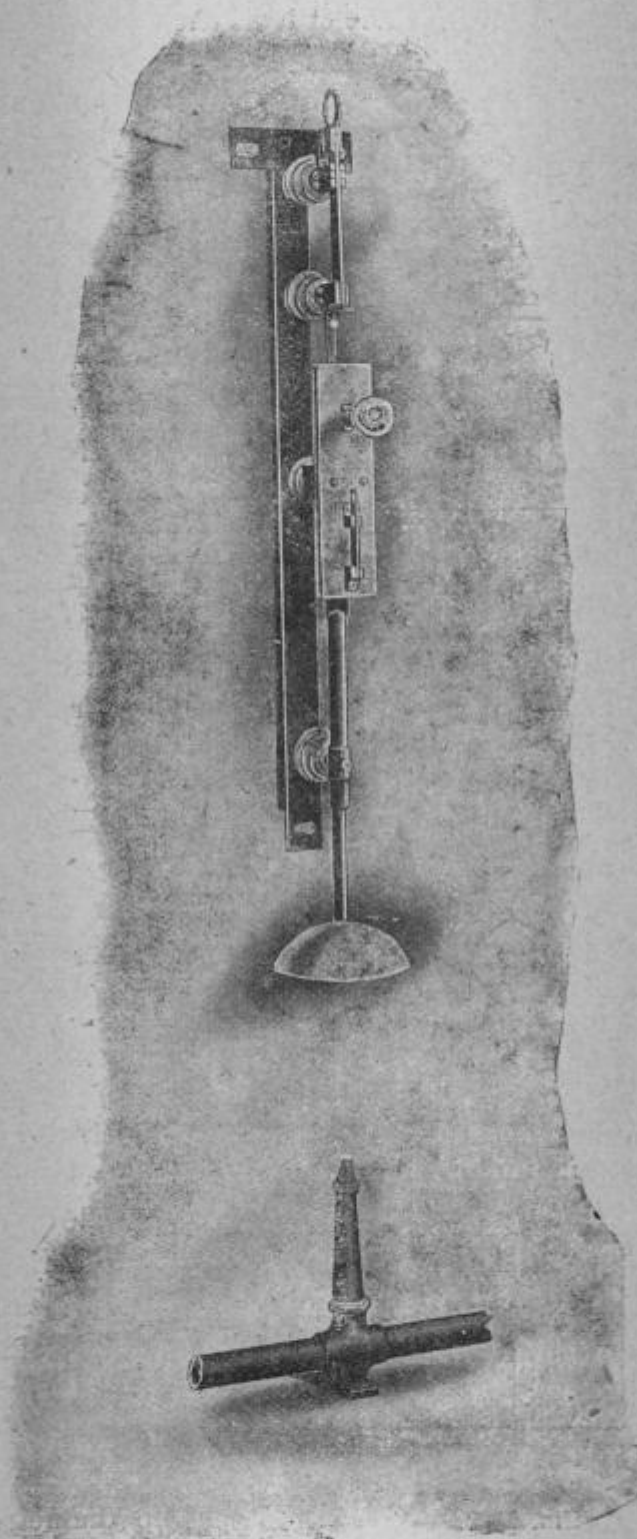


FIG. 1579. — Limiteur de tension à jet d'eau. Réglage par lampe avec sectionneur.
(Maljournal et Bourron).

continus représentés schématiquement par la (fig. 1580). Chaque pôle est

mis à la terre par une résistance liquide constituée par deux colonnes d'eau s'écoulant librement, d'une part, entre un premier réservoir R alimenté par une conduite spéciale et trois entonnoirs N reliés chacun à un

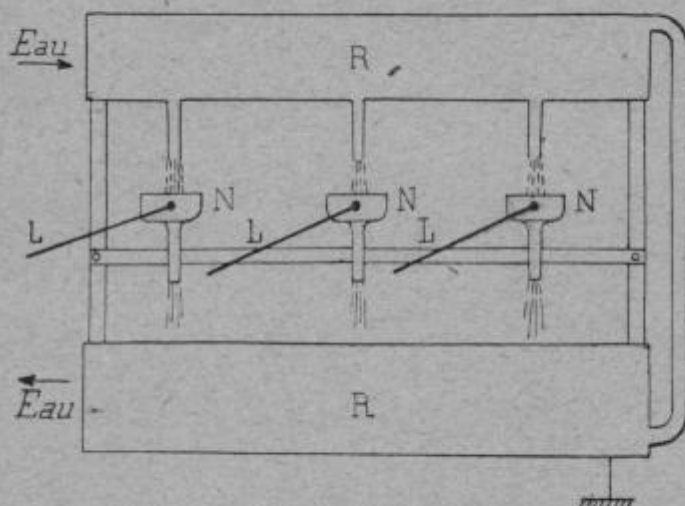


FIG. 1580.

des pôles et, d'autre part, entre ces entonnoirs est un second réservoir R'; les deux réservoirs sont reliés ensemble et à la terre.

A l'usine hydroélectrique des chemins de fer de la Valteline, à Montegno, donnant du triphasé à 20.000 volts directs, le parafoudre est constitué (fig. 1581) par trois jets d'eau ali-

mentés par une même conduite soigneusement mise à la terre. Ces jets d'eau ont 15 millimètres de diamètre. Ils viennent frapper contre le fond

de trois cloches métalliques reliées chacune à l'un des fils de ligne. Chaque jet laisse passer 1/10 d'ampère sous 20.000 volts, soit pour l'ensemble une consommation

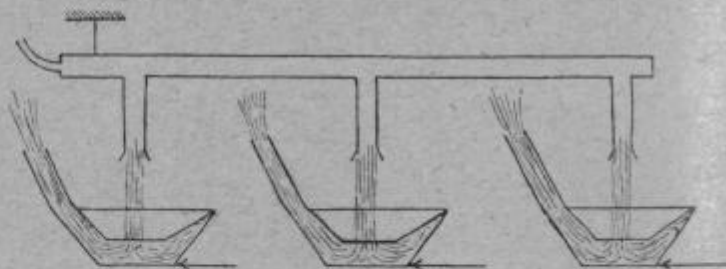


FIG. 1581.

de 3,5 kilowatts. La dépense d'eau est pour les trois jets de 21 l. 5 par seconde.

La (fig. 1582) indique schématiquement la disposition du parafoudre

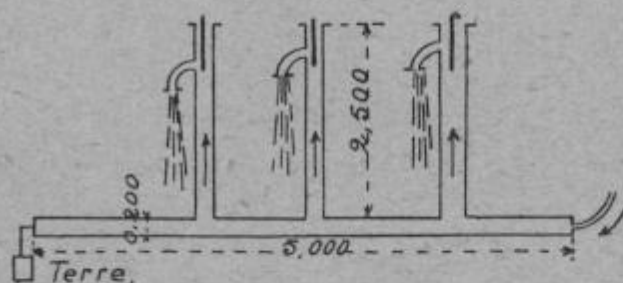


FIG. 1582.

installé par la Société hydroélectrique de Vizille sur son réseau triphasé à 10.000 volts. L'appareil est constitué par trois tubes de grès de 2^m,50 de longueur et 15 centimètres de diamètre fixés sur un tuyau de fonte de 5 mètres

de longueur et de 20 centimètres de diamètre mis à la terre. Un courant d'eau amené par la partie inférieure circule de bas en haut dans les tubes de grès. Chaque pôle de la ligne est mis en contact avec l'eau

d'un de ces tubes par un fil de dérivation qui plonge de quelques centimètres dans le liquide. Cet appareil consomme 5 kilowatts, soit 3/10 d'ampère par colonne.

Parafoudres à réactance en dérivation. — M. Grosselin cite l'installation de la Société industrielle d'énergie électrique à Villelongue, ligne à 11.500 volts de tension étoilée, qui utilise ce genre de parafoudre.

L'installation comporte une batterie de parafoudres à cornes installée comme suit : le premier parafoudre du côté ligne est branché entre ligne et terre ; il sert de dernier secours contre une surtension élevée de grande énergie et de haute fréquence. Il peut couper le courant de l'alternateur à la tension normale. Le second déchargeur à distance de réglage plus faible, inséré au même point, est monté en série sur une résistance métallique placée dans l'huile. Il doit être traversé par la surtension de haute fréquence, mais de tension plus élevée. Le point commun d'insertion des deux premiers déchargeurs est relié aux barres par une bobine de réactance graduée, et trois autres parafoudres, réglés comme le second, viennent se greffer en différents points de cette bobine, de façon que l'impédance opposée à la décharge croisse d'un déchargeur à l'autre. De deux en deux, les bornes éloignées des déchargeurs sont reliées à une résistance métallique dans l'huile. Les décharges sont donc évacuées à la terre par l'un ou l'autre déchargeur, suivant leur fréquence. L'arc s'amorce dans les éclateurs étroits à une fois et demie la tension de service.

568. Limiteurs de tension. — Ces appareils sont en principe constitués par deux armatures dont chacune est reliée à l'un des pôles entre lesquels il est nécessaire d'éviter des surtensions. Ils jouent le rôle d'une soupape de sûreté pour toutes les surtensions ayant leur origine dans la ligne, provenant soit des effets accidentels de capacité, soit d'une rupture de circuit succédant à un court-circuit important.

Les limiteurs de tension fonctionnent plus souvent que les parafoudres, et, de plus, comme ils sont plus sensibles, leur courant de court-circuit est plus fort ; il faut donc mettre en série une résistance plus grande. Il est à désirer que chaque appareil ne fonctionne que pour l'intensité de surtension à laquelle il est destiné : on y arrive assez bien en protégeant les limiteurs par des bobines de self-induction.

Les limiteurs sont, en général, constitués par un ensemble de rouleaux ou cylindres en laiton placés côte à côte avec des intervalles variant de 0^{mm},5 à 2 millimètres ; le nombre de ces rouleaux est naturellement fonction de la tension de service des circuits à protéger ; on leur ajoute habituellement, partie en parallèle, partie en série, des résistances ohmiques constituées par des baguettes en graphique ou par des

cuves en grès remplies d'eau légèrement acidulée ou simplement distillée.

Ces résistances ohmiques sont destinées à limiter le débit des génératrices lorsque l'une des phases d'un feeder se met brusquement à la terre, au travers des rouleaux du limiteur.

On a complété d'ailleurs ce dispositif de résistances ohmiques des limiteurs de tension par l'adjonction, au départ même de chaque génératrice, d'un déchargeur liquide consistant essentiellement en filets d'eau pure qui arrosent constamment, à raison de un par phase, les conducteurs qui relient les génératrices aux feeders.

Lorsqu'une rupture se produit sur un feeder, sous l'action d'une des causes citées plus haut, la génératrice, au lieu de prendre une tension anormale, pouvant détériorer ses enroulements, continue à débiter au travers du déchargeur liquide.

On adjoint aussi aux limiteurs à rouleaux une bobine de self sans fer qui oppose un obstacle presque insurmontable aux courants de haute fréquence provenant de l'atmosphère et laisse passer dans la ligne les courants de basse fréquence provenant de la génératrice ; le fluide atmosphérique traverse alors le limiteur à rouleaux et parvient au sol sans avarier les appareils.

Les limiteurs de tension se placent en général sur tous les départs. Ils se montent entre fils et entre fils et terre.

Ces appareils ne sont en réalité que des parafoudres, et tout ce qui a été dit de ces derniers peut leur être appliqué. Toutefois, les énergies mises en jeu sont moindres qu'avec les parafoudres, et les conducteurs peuvent donc être plus faibles. De plus, les fréquences industrielles n'ayant rien de comparable aux fréquences des décharges statiques de l'atmosphère, il s'ensuit que les précautions recommandées (coudes, self, etc.) sont beaucoup moins importantes.

Dans un limiteur de tension, il faut qu'il y ait amorçage de l'arc à un point très voisin du voltage normal, et il faut aussi que cet arc se coupe quand le voltage revient à la normale. Pour obtenir ce résultat, on a recours à un écartement faible des pièces de rupture et à une résistance ohmique très grande, de façon que le court-circuit amorcé reste de valeur faible et que l'arc peu nourri se rompe facilement. L'intensité ne devra jamais dépasser une fraction minima d'ampère.

Bobines de self. — Les bobines de self à noyau de fer donnent lieu à une économie considérable d'énergie. Ces appareils ont une résistance apparente proportionnelle à la fréquence du courant. Branchés entre conducteurs et terre, ils laissent passer une faible quantité de courant si leur self induction est grande et alternative et le courant continu des charges statiques passe au contraire en grande quantité si leur résistance ohmique

est faible. Dans les réseaux triphasés, on intercale une bobine sur chaque phase. Ces appareils sont toujours plongés dans l'huile.

Les bobines de self sans noyau se placent à l'entrée des postes pour s'opposer à l'introduction des décharges à haute fréquence ou de même nature. Elles doivent être sans capacité appréciable entre spires. Pour les endroits plus spécialement exposés à la foudre on établit les spires au moyen de bandes de fer.

Relais sélectifs. — Nous avons signalé ces appareils au sujet de la protection des isolateurs. L'emploi de ces protecteurs est préconisé en Amérique pour supprimer automatiquement tout arc s'amorçant entre la ligne et la masse par l'intermédiaire d'un isolateur par exemple, sans causer d'arrêt dans l'exploitation.

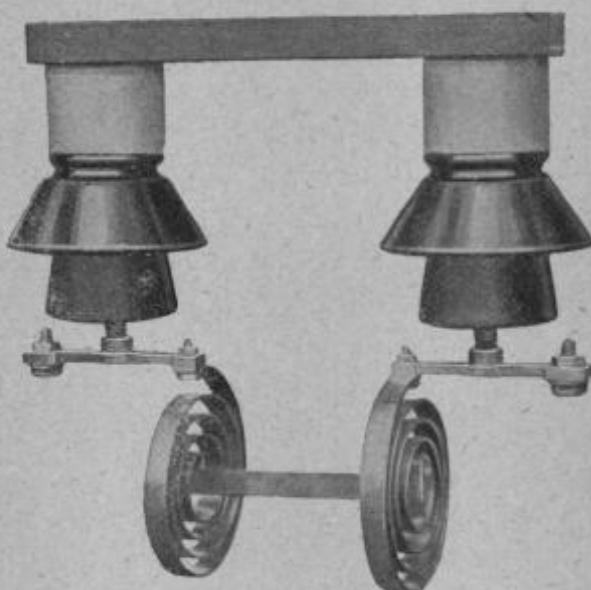


FIG. 1583. — Bobine de self «spirale» pour extérieur. (Maljournal et Bourron).

569. Montage des parafoudres. — A chaque extrémité de lignes et sur tous les points où il y a des appareils à protéger, on place un parafoudre monté en dérivation sur le conducteur, avant la bobine de self, un sur chaque conducteur. Ils sont aussi de rigueur aux raccordements des câbles souterrains et des conducteurs aériens. Le long de la ligne, les parafoudres sont disposés en dérivation sur les conducteurs, et on les fixe directement sur les appuis.

La disposition dite multiple consiste à mettre deux parafoudres en série entre les phases prises deux à deux et deux parafoudres en série entre chaque phase et la terre ; ce mode de montage est reconnu indispensable pour la mise du neutre à la terre.

Indépendamment des parafoudres et pour parer aux ondes de surtension qui peuvent avoir passé devant les déchargeurs, on dispose des bobines de réaction, généralement constituées par une lame enroulée en spires et très soigneusement isolée.

Pour les installations à 25.000 volts et au-dessus, la Société Westinghouse place avant les parafoudres une sorte d'excitateur ; un nombre convenable de déchargeurs Wurtz sont ensuite montés en série. On peut

shunter la moitié des parafoudres avec une résistance purement ohmique et disposer en outre une autre résistance non inductive sur le trajet du fil de terre. Si les parafoudres sont convenablement proportionnés par rapport à la tension de l'installation, leur fonctionnement est excellent ; en réglant la distance explosive de l'excitateur, il est possible de rendre le système assez sensible pour qu'il fonctionne pour une assez faible augmentation de la tension normale sur les conducteurs de la ligne.

Pour le nombre de parafoudres à installer sur une ligne pour sa protection efficace, si la ligne est constamment en plaine, il suffit d'un petit nombre, mais si le parcours est accidenté, il faut les multiplier et les installer au moins à chaque point où la ligne subit une modification de terrain, où l'air ambiant a une température plus basse (gorges de montagnes, traversées de cours d'eau, etc.).

L'emploi de condensateurs, placés en dérivation entre les conducteurs du réseau et la terre, permet l'écoulement facile de ces courants, lorsqu'ils sont de nature oscillatoire. La résistance apparente des conducteurs est, en effet, sensiblement nulle, de sorte que ceux-ci s'écoulent à la terre sans surtensions appréciables. Un condensateur Moscicki qui absorbera à la fréquence 50 un courant de 0,1 ampère par exemple laissera passer un millier d'ampères dès que la fréquence deviendra supérieure à 500.000 par seconde, sans augmentation de voltage.

Pour les parafoudres en métal anti-arc avec intervalles multiples, le meilleur est de shunter une partie des cylindres par des résistances ohmiques, soit environ la moitié. Une modification dans ce modèle consiste dans l'adjonction d'un écran vis-à-vis des intervalles les plus rapprochés de la ligne ; ce montage, qui assure une meilleure distribution du potentiel entre les intervalles, permet de réduire notablement le nombre de ces intervalles.

Dans le montage en parallèle des parafoudres, le parafoudre de résistance maxima est disposé avec les intervalles les plus petits et celui de résistance minima avec les intervalles les plus grands.

Pour les installations avec point neutre isolé, on doit choisir des parafoudres prévus pour le voltage entre fils de ligne, c'est-à-dire pour le voltage maximum de l'installation. De cette façon on protège les parafoudres contre l'amorçage de l'arc quand une partie du circuit est mise accidentellement à la terre. Si le circuit a son point neutre à la terre on doit choisir le parafoudre pour un voltage 20 0/0 plus élevé que le voltage maximum entre la ligne et le sol.

L'emploi des bobines de self dans l'huile est à recommander pour les voltages supérieurs à 25.000 volts.

Les plaques de terre sont le plus souvent formées d'une tôle en fer gal-

vanisé ou d'une plaque de cuivre d'un mètre de côté (*fig. 1584*), que l'on enterre dans des lits alternés de terre et de charbon de bois. Un drain en grès pénétrant dans la masse de charbon permet de maintenir la terre humide, en prenant le soin de verser de l'eau dans les périodes de sécheresse. On prévoira des plaques de terre séparées par groupe d'appareils; une plaque pour trois batteries de condensateurs, une pour les bobines d'écoulement des charges statiques, une pour la mise à la terre des charpentes métalliques, etc. Les appareils de protection (*fig. 1585*) doivent être installés près du sol, disposition qui permet de réduire au minimum la longueur du fil de terre. Les conducteurs et lignes de terre doivent présenter aussi le minimum de coudes. Les sections du fil de terre pourront être de 40 millimètres carrés, sans descendre au-dessous de 25 millimètres carrés.

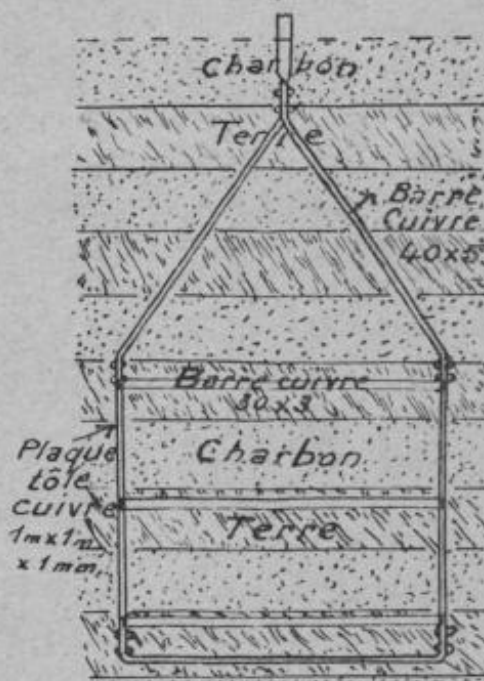


FIG. 1584.

La valeur de la résistance de terre peut être très variable : elle dépend du contact plus ou moins parfait entre la plaque de terre et le terrain, de la nature du sol et de sa conductibilité et de la surface de la plaque de terre.

La résistance mesurée ne doit pas dépasser 20 ohms ; on se tiendra entre 5 et 10 ohms pour procéder à la mesure.

Les résistances liquides pour parafoudres conviennent jusqu'à environ 30.000 volts de tension ; pour des voltages supérieurs, on emploie de l'eau et de la glycérine. Dans les contrées très froides, pour éviter le gel, on fait usage d'eau distillée et de glycérine. Enfin pour éviter la corruption de l'eau, on peut employer du bichlorure de mercure et, à l'effet d'empêcher l'évaporation, une couche superficielle d'huile minérale.

empêcher l'évaporation, une couche superficielle d'huile minérale.

570. Essais des parafoudres. — En ce qui concerne le contrôle des parafoudres pendant l'exploitation, on peut utilement employer un mode excessivement simple et exact, qui consiste à intercaler des bouts de papier mince dans les intervalles explosifs ; chaque fois qu'une étincelle passe, le

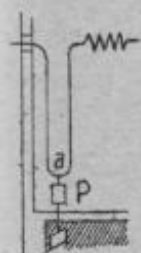


FIG. 1585. — Position du parafoudre par rapport au niveau du sol ; bonne disposition.

papier est percé en un ou plusieurs points, et les trous sont plus ou moins gros selon l'importance de la décharge. On fait aussi usage de petits éclateurs à pointes que l'on relie en parallèle avec les parafoudres, en faisant agir sur les deux genres d'appareils en parallèle une différence de potentiel croissante.

Pour apprécier le fonctionnement des parafoudres, il faut les étudier au point de vue du courant dynamique et à celui des oscillations électriques. Dans l'essai dynamique, on soumet le parafoudre à une tension de même fréquence que celle de la ligne à protéger, et on augmente cette tension jusqu'à ce que l'appareil laisse passer le courant, après quoi la tension est abaissée aussitôt à sa valeur normale d'exploitation, et l'on voit si l'arc s'éteint spontanément. Puis on procède à un essai sur des charges oscillantes, soit au moyen d'un éclateur en parallèle, soit à l'aide d'une machine à influence.

D'après M. Creighton, les méthodes de mesure à appliquer pour les essais des parafoudres en laboratoire sont les suivantes : 1° essai avec une différence de potentiel statique continue ; 2° essai avec une différence de potentiel alternative produite par un alternateur : *a*) à la fréquence de l'alternateur ; *b*) avec une connexion métallique à la terre ; *c*) avec une jonction à la terre par l'intermédiaire d'un arc à haute fréquence (300.000 périodes) ; 3° essai disruptif (décharge disruptive à très grande fréquence sur courant continu ou alternatif) ; 4° essai sur bobine d'induction (fréquence, 100.000) ; 5° essai sur une surtension à basse fréquence produite au moyen d'une bobine de réactance, et 6° essai sur l'extinction de l'arc.

Pour étudier, par un essai, les qualités anti-arc d'un parafoudre, on examine la décharge qui succède à une étincelle statique. Pour cela on peut se servir avantageusement d'un oscillographe. D'ailleurs, M. A. Blondel a publié des courbes fort intéressantes de courant et de force électromotrice dans un arc alternatif, qui montrent que le courant s'éteint avant que la force électromotrice passe par zéro.

On a préconisé de décharger un condensateur, préalablement chargé à haut potentiel, à travers un éclateur en série avec le parafoudre. En dérivation sur celui-ci est monté un autre éclateur réglable que l'on règle jusqu'à ce que la plus grande partie de la décharge s'écoule par le parafoudre. La distance des boules de l'éclateur en parallèle sert à mesurer le degré de protection du parafoudre. Thomas et Creighton, en Amérique, ont cherché à combiner des essais d'une réalisation facile pour tous les ingénieurs, et permettant de comparer entre eux les divers types de déchargeurs, au point de vue de leurs caractéristiques : tension d'amorçage, intervalle équivalent, efficacité du soufflage de l'arc, impédance opposée à la décharge, résistance d'isolement à la terre, extinction de l'arc, sans

dispositif de soufflage, perturbations déterminées par le fonctionnement, endurance aux décharges répétées. Le champ envisagé est vaste, des plus complexes et les résultats connus à ce jour n'ont pas éclairé beaucoup les connaissances de la technique actuelle.

Sur la ligne de Heysham-Morecambe du Midland Railway, en Angleterre, où la traction se fait par courant alternatif simple à haute tension, on a mis en service des enregistreurs inscrivant les périodes de fonctionnement des parafoudres.

L'appareil est représenté schématiquement par la (fig. 1586). Le parafoudre, du système à cornes, a une de celles-ci constituée par du charbon. L'autre se trouve connectée à travers une résistance spéciale non inductive, en charbon, au primaire d'un petit transformateur relié d'autre part à la terre. Le secondaire de ce transformateur est fermé sur un ampèremètre enregistreur ordinaire dont le tambour fait un tour en vingt-quatre heures.

L'aiguille marque simplement un petit V sur le papier chaque fois que le parafoudre fonctionne. Chaque jour on déplace à la main la plume qui trace ainsi sur le cylindre une série de cercles, sur lesquels se détachent très bien les périodes de fonctionnement du parafoudre. A la fin de la semaine, on enlève la feuille et on étudie le diagramme qui paraît-il, est extrêmement intéressant pour l'étude des surtensions et la recherche de leurs origines.

La connaissance approximative des valeurs des résistances destinées à limiter le débit des parafoudres à haute tension offre, pour l'exploitant, un intérêt considérable. Lors du fonctionnement simultané de parafoudres appartenant à deux phases différentes d'un réseau, des résistances trop faibles sont le siège de courants d'intensité élevée. La rupture de ces courants occasionne ensuite des surtensions aussi dangereuses parfois que celles que ces parafoudres avaient pour but de supprimer. D'autre part, des résistances de valeur trop notable atténuent l'efficacité de ces parafoudres.

Pour la mesure en basse tension des résistances électrolytiques, le wattmètre se prête particulièrement bien ; lorsque l'échelle de cet appareil est uniforme, on peut faire des mesures précises des déviations quand la résistance que l'on veut déterminer est intercalée, puis supprimée.

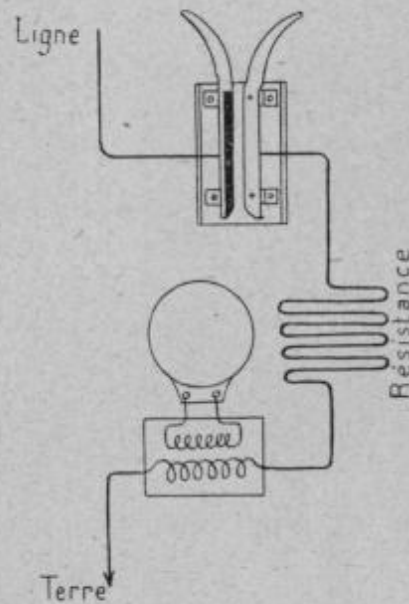


FIG. 1586.

Les mesures par application directe de la haute tension s'opère à l'aide d'un voltmètre avec son transformateur de tension, que l'on intercale entre les bornes de la résistance et un ampèremètre sur le fil de terre.

L'intensité du courant que traverse la résistance liquide croît avec la durée d'application de la haute tension. L'intensité croît aussi quand on passe d'un intervalle d'air nul à la formation de l'arc et surtout quand il se produit des arcs répétés.

De ces considérations il faut conclure qu'une mesure individuelle des résistances s'impose si l'on veut donner aux parafoudres toute leur efficacité. On a vu d'ailleurs que les valeurs à donner aux résistances et à l'écartement entre les cornes des parafoudres dépendent des conditions de self, de capacité, de résonance propres à chaque ligne de distribution et doivent être recherchées dans chaque cas particulier.

IV. — DISPOSITIFS DE PROTECTION EN CAS DE RUPTURE DE CONDUCTEURS AÉRIENS

571. Appareils à fonctionnement automatique. — Les causes qui provoquent le plus souvent la chute des conducteurs sont : les portées trop grandes, la fatigue des conducteurs par le vent, la neige et la glace, les variations de température, la résistance mécanique des jonctions, etc. Aussi l'État a-t-il été amené, pour garantir la sécurité publique, à imposer aux propriétaires de lignes d'énergie électrique l'obligation de munir celles-ci de dispositifs permettant, en cas de rupture accidentelle des conducteurs, la suppression automatique du courant sur ces derniers.

Les appareils utilisés sont soit à action purement mécanique, soit fonction du courant électrique lui-même.

On peut distinguer les appareils qui provoquent le sectionnement du fil de façon que les brins rompus ne soient plus chargés d'électricité ; ceux qui, par court-circuit, font sauter le disjoncteur de l'usine ; ceux qui manœuvrent mécaniquement l'interrupteur ; ceux qui déchargent en ligne en actionnant des disjoncteurs par une dérivation ou par un courant à fréquence élevée ; ceux qui suppriment automatiquement le courant en actionnant des disjoncteurs et ceux qui suppriment le courant en cas de contact d'un fil à basse tension (télégraphe) avec le fil à haute tension.

On peut joindre les fils de protection, par leurs extrémités, à la ligne principale par l'intermédiaire de résistances, plombs fusibles, etc. ; mais, dans ce cas, ils sont isolés de la terre. Dans le circuit de dérivation ainsi pratiqué, on intercale le relais d'un interrupteur automatique qui coupe instantanément la communication entre la ligne et les machines, aussitôt qu'un changement a lieu dans l'intensité du courant traversant le relais.

Pour les autres parties de la ligne, on dispose sur les poteaux des fourches en fer reliées à la terre, sur lesquelles le fil cassé par accident vient tomber. On peut aussi placer, de chaque côté de l'isolateur, une petite fourche au milieu de laquelle le fil tendu passe dessus ; la fourche, qui est fixée à la tige de l'isolateur, est reliée elle-même à la terre.

Il convient de ne pas fermer la boucle sur elle-même (anneau ou tout autre dispositif formant avec le fer des circuits fermés), excepté pour le cas où le circuit est placé autour des trois fils d'une distribution triphasée, car il se produit alors une perte d'énergie due à l'induction dans le fer.

Si le circuit à haute tension a un point mis à la terre (centre de l'étoile ou milieu des enroulements des transformateurs), les plombs fondent lors de la mise à la terre du fil cassé. Dans le cas contraire, en touchant un fil, il peut arriver qu'on supprime son contact avec la fourche, et alors il y a danger pour les personnes.

Nous donnons ci-après les descriptions des dispositifs de protection de la catégorie d'appareils les plus usités.

Dispositif A (fig. 1587). — Cet appareil opère le déclenchement par rapport à la terre. Il se compose d'une pièce en V formée de deux antennes en cuivre rouge, fixées sur un support unique, qu'on peut tirefonner après le poteau de la ligne. Le support est lui-même relié à la terre par un conducteur qui descend le

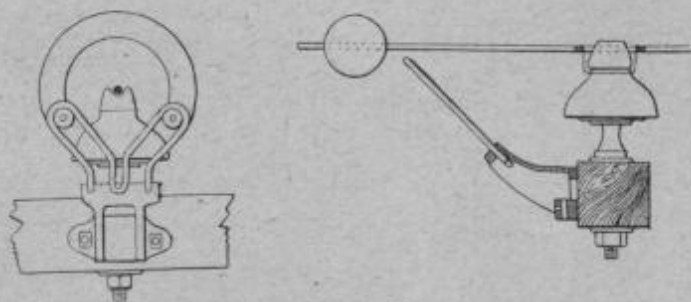


FIG. 1587.

long du poteau. Le tout est placé immédiatement sous l'isolateur de haute tension, de façon que l'axe du dispositif et l'axe du conducteur soient dans un même plan vertical. Les deux antennes sont espacées légèrement à leur partie inférieure, cet espace étant supérieur au diamètre du conducteur, et elles sont taillées en dents de scie afin de retenir le conducteur après sa chute. Enfin, le conducteur supporte un contrepoids en plomb, qui a pour but d'augmenter sa masse après rupture et de lui permettre plus facilement de tomber à l'intérieur du V sans être influencé par les actions extérieures, le vent par exemple, qui est un des facteurs les plus importants. M. Daguerre, directeur de la Société Nord-Lumière, pense toutefois qu'il serait préférable que les deux extrémités des antennes fussent rendues solidaires par une pièce amovible au besoin et assemblée par boulons aux antennes. Il convient que le système ait des dimensions convenables suivant la tension de distribution pour éviter les effluves.

Dispositif B (fig. 1588). — Cet engin est un appareil de court-circuit entre phases. Il se compose, pour chaque conducteur de la ligne, de deux isolateurs placés sur le poteau, l'un étant l'isolateur ordinaire qui supporte le conducteur, l'autre tenant un anneau traversé en son centre par le con-

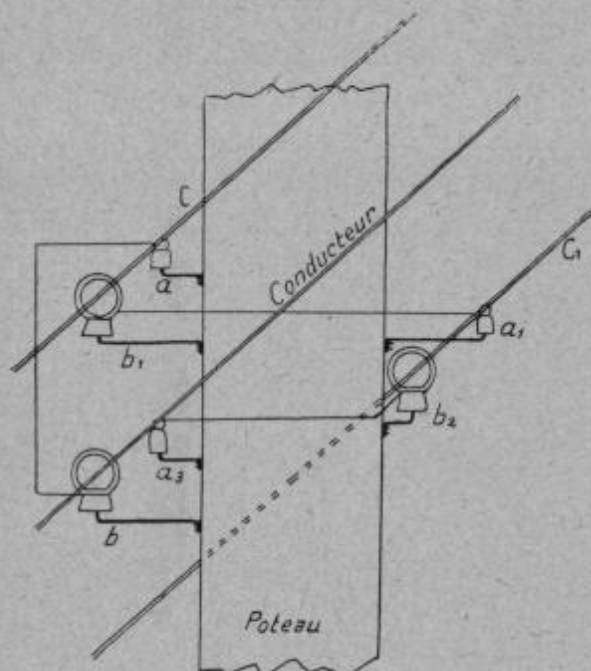


FIG. 1588.

ducteur et dont le plan est perpendiculaire à l'axe du conducteur. Sur la figure, b , b_1 , b_2 sont les isolateurs du conducteur et a , a_1 , a_2 les isolateurs auxiliaires. Que le conducteur c , par exemple, vienne à se rompre, il se met immédiatement en contact avec l'anneau b_1 et par cela même en court-circuit avec le conducteur c_1 et l'automatique à l'usine déclenche aussitôt. Le fonctionnement est identique, quel que soit le fil qui se rompt.

Cet appareil, d'une apparence très simple, est néan-

moins d'installation coûteuse, chaque poteau devant en recevoir un exemplaire ; de plus, chacun des isolateurs de la ligne est solidaire, sur chaque poteau, de deux isolateurs : son isolateur propre et l'isolateur dans lequel passe le conducteur correspondant, puisque cet anneau est relié électriquement. Il peut aussi, au point de vue des déclenchements, déterminer une confusion entre les déclenchements provenant de la rupture du fil et ceux pouvant être la conséquence de défaut d'isolement de deux isolateurs opposés devenus mauvais.

Dispositif C (fig. 1589). — L'appareil se compose d'un isolateur dont la partie supérieure est composée d'une pièce en fonte ; la partie inférieure de cette bague de fonte est filetée et terminée en embase. Sur celle-ci vient reposer un anneau solidaire de deux crochets diamétralement opposés. La position de l'anneau est assurée par une bague écrou vissée sur la partie filetée de la pièce de fonte et rendue solidaire de cette dernière par clavetage.

L'isolateur étant placé sur le poteau, le conducteur aérien est fixé de part et d'autre aux deux crochets au moyen d'étriers en cuivre rouge, qui sont soudés auparavant au conducteur.

En cas de rupture du câble, entre deux poteaux, les deux parties du câble rompu se détachent par leur poids du crochet correspondant, et cela

bien avant qu'elles viennent en contact avec le sol, grâce à la forme spéciale des crochets qui ne permettent le contact avec l'étrier que lorsque le conducteur est parfaitement tendu.

Cet appareil, extrêmement ingénieux, a l'avantage de ne pas charger les poteaux et de ne pas amener de points faibles nouveaux sur le réseau, puisqu'il est fixé sur les isolateurs mêmes de la canalisation. Mais, en cas de vent, l'inégalité de tension sur les deux



FIG. 1589. — Dispositif C.

étriers opposés de l'isolateur peut amener la diminution de la tension mécanique du conducteur et par suite la rupture du circuit par une chute inopportune du conducteur. Il peut aussi se produire un contact douteux des étriers et des crochets, dont la conséquence est la formation d'étincelles pouvant amener des ruptures du circuit.

Dispositif D (fig. 1590). — Cet appareil est basé sur l'angle que fait le câble conducteur avec sa position ordinaire d'équilibre lorsqu'il tombe sur le sol par suite d'accident ; lorsque cet angle a acquis une certaine valeur, l'appareil protecteur déclenche et cause un court-circuit entre phases, qui rompt le courant à l'usine. On voit aisément le fonctionnement

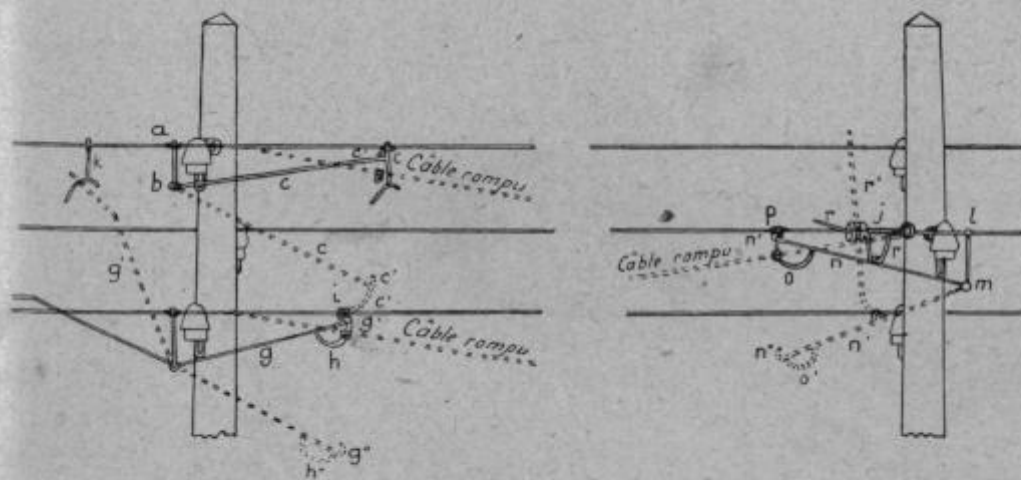


FIG. 1590.

sur le schéma : quand l'angle de chute a pris une certaine valeur, le déclenchement se produit par la sortie du crochet d'arrêt c' du collier d fixé sur le conducteur. Le bras c prend la position c' et appuie sa fourche contre le conducteur inférieur et le court-circuit a lieu. Si c'est le conducteur inférieur, qui vient à se rompre, grâce au contrepoids h , la tringle g vient appuyer sur la pièce de contact que porte le conducteur supérieur, et le

court-circuit se produit. Enfin, pour le troisième conducteur d'une ligne triphasée, qui ne se trouverait pas dans le même plan que les deux autres, le court-circuit se produit par le levier *r*, qui tourne autour d'un isolateur auxiliaire fixé au poteau dès que la tige *no* échappe du collier *p* et vient assurer le contact avec l'un des deux autres conducteurs.

Avec cet appareil l'on n'est pas sûr que le déclenchement de l'automatique à l'usine s'opère avant que le conducteur rompu soit venu toucher au sol, car les tiges de contact sont toutes à articulations, et l'on ne sait trop comment fonctionneraient ces articulations en cas de tempête. D'autre part, les simples oscillations des conducteurs peuvent faire jouer tous ces bras multiples et la sensibilité de l'appareil peut être extrême ; il est d'ailleurs par lui-même d'un prix prohibitif en raison du soin qu'il convient d'apporter dans sa construction. Enfin l'addition des isolateurs auxiliaires du troisième conducteur apporte autant de points faibles sur le réseau.

M. Jules Chevrier a imaginé un appareil consistant en un support isolateur qui peut tourner sur son axe au moment de la rupture d'un câble, sous l'influence de la différence de tension des fils de part et d'autre de l'isolateur ; par cette oscillation, le câble rompu est mis en communication, au moyen d'une fourche ou d'un anneau fixé sur la tige de l'isolateur avec un câble voisin ou avec un conducteur auxiliaire mis à la terre.

Dans la (fig. 1591), si on suppose que c'est le brin de droite (en faisant face à l'isolateur) du fil de ligne qui vient à se rompre, on voit celui-ci mis

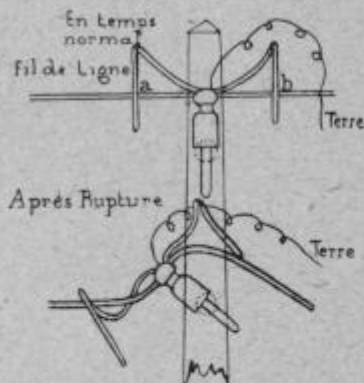


FIG. 1591.

à la terre par l'intermédiaire de la cornue métallique *b* de la ferrure de l'isolateur et du conducteur auxiliaire de mise à la terre. Le brin rompu reste alors sans courant et devient inoffensif. Ce dispositif est d'une très grande simplicité, et il peut toujours, sans augmentation sensible de prix, être réalisé dans l'établissement des lignes à haute tension. Mais il oblige à percer chaque poteau à l'endroit des isolateurs, et le bois ne tarde pas ainsi à pourrir ; les trous s'agrandissent alors, et un jeu important entre la tige de

l'isolateur et le trou du poteau peut amener des fonctionnements inopportuns de l'appareil en cas de vent.

L'appareil de M. E. Giraud (fig. 1592) comporte en principe un collier qui se fixe dans la gorge de l'isolateur, et celui-là porte une articulation formant levier. Le collier est muni de deux pattes s'engageant dans la rainure de tête de l'isolateur pour empêcher tout mouvement de rotation de l'appareil une fois fixé dans sa position définitive. Au levier dont nous

avons parlé, qui repose sur l'isolateur, sont fixées, à une des extrémités, une pièce formant guidage et, à l'autre, une tige munie d'une fourche. Entre celles-ci est disposé un serre-fil.

Le fil de ligne passe librement dans la pince de guidage et est bloqué par le serre-fil ; quant à la fourche, elle se tient à quelques centimètres au-dessus ou au-dessous du fil, selon les cas.

Supposons, pour plus de simplicité, une ligne comportant deux fils seulement et l'appareil installé sur le fil inférieur. En temps normal, la fourche reste en équilibre avec la tension de la ligne dans la position qu'on lui a donnée à la pose et qu'elle garde tant qu'il ne se produit

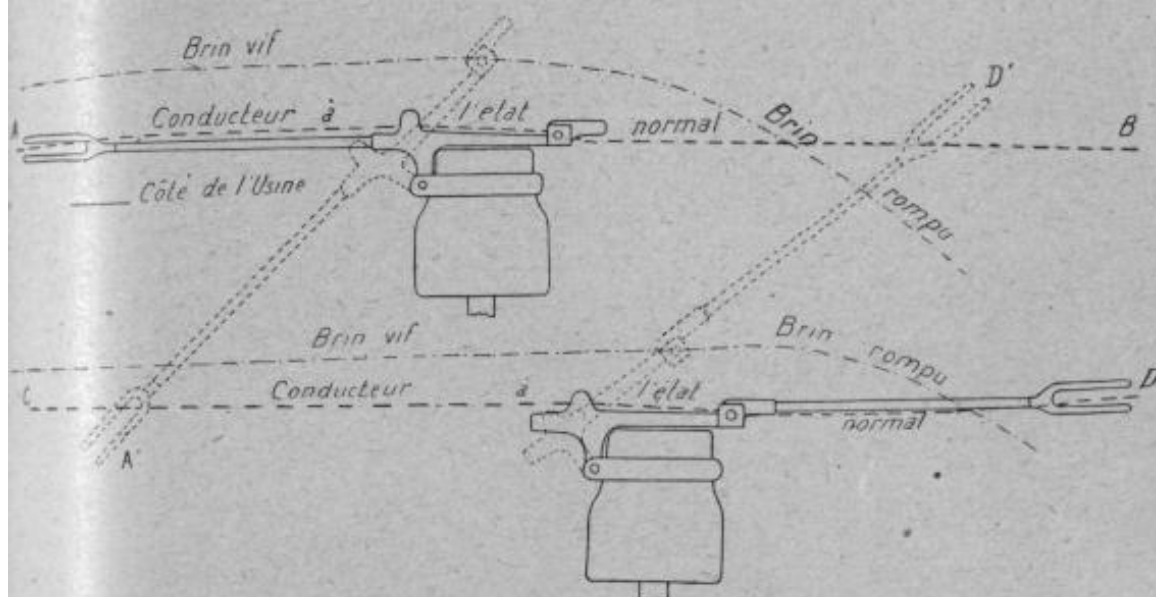


FIG. 1552.

aucune rupture en ligne. Mais un tel accident vient-il à se déclarer, aussitôt l'équilibre mécanique de l'appareil est rompu, et la fourche, en se relevant, vient déterminer un court-circuit avec le fil placé au-dessus de celui qui a reçu l'appareil de protection. Ce court-circuit a lieu bien longtemps avant que le fil rompu n'ait atteint la terre. Généralement on dispose un de ces appareils tous les trois poteaux et, sur les isolateurs intermédiaires, on fait de simples ligatures à l'effet de maintenir le fil dans la gorge supérieure de l'isolateur.

La (fig. 1593) montre un appareil basé aussi sur le fonctionnement d'un disjoncteur automatique ; il est désigné sous le nom de « pince cole ». Cette pince A est munie de deux oreilles saillantes C, isolées par rapport à elle, et percées chacune d'un trou, dans lequel passe une tige de cuivre E, connectée électriquement et mécaniquement avec le fil B. Les tiges E sont isolées sur toute la partie en contact avec les bords de ces trous et munies d'une tête métallique G, qui peut venir toucher la partie métal-

lique D, isolée par rapport à A, des oreilles C, quand la tige est tirée à fond dans ces trous.

Enfin, des parties D des oreilles C, part un circuit aboutissant à l'autre câble de ligne (au rail en cas de lignes de tramways), dans lequel est inter-

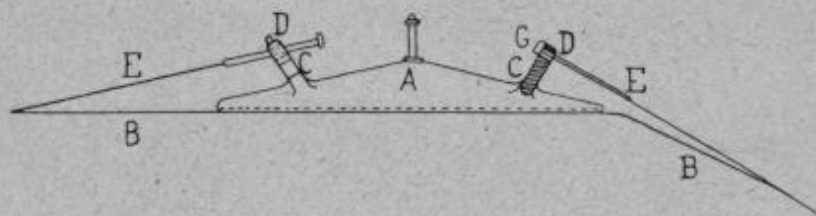


FIG. 1593.

calé l'électro d'un disjoncteur automatique commandant le fil aérien, sur lequel se trouve la pince. Les tiges E sont assez longues pour qu'en aucun cas leur tête G ne puisse venir au contact de D, tant que le fil B est tendu ; mais, aussitôt qu'il se rompt d'un côté, ces tiges E sont tirées dans le trou de D, de façon à amener leur tête G contre D. Le courant venant de B, traversant alors E et D, arrive à l'électro du disjoncteur automatique et le fait fonctionner.

L'appareil de M. L. Corréard (*fig. 1594*) se compose simplement d'un

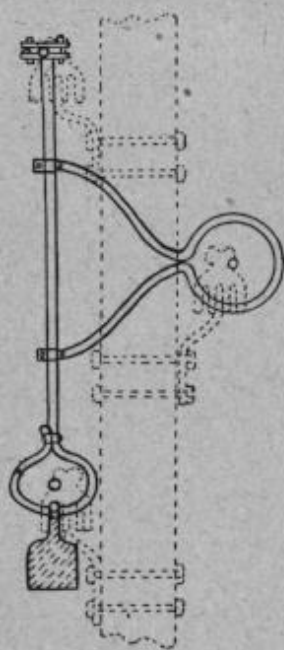


FIG. 1594.

fil de cuivre ou de fer portant un étrier terminé par un poids et qui se fixe sur le fil supérieur, coudé en anneau dans le bas, pour permettre le passage du fil inférieur, et muni d'une seconde pièce en forme de boucle, se fixant sur la première à la hauteur que l'on désire, et dans laquelle passe le troisième fil, si on emploie des courants triphasés.

L'appareil met immédiatement en court-circuit les lignes dès qu'un des trois fils se rompt et cela bien avant que le fil cassé ait touché la terre. En cas de tempête, on n'a pas à craindre un balancement exagéré de l'appareil.

M. Neu a fait breveter un dispositif de sécurité (*fig. 1595*) qui consiste, d'une part, à relier l'extrémité de la ligne à protéger à la terre, soit directement, soit par interposition d'un parafoudre à faible distance d'éclatement, et cela en un point

neutre accessible dans la distribution ou spécialement créé à cet effet, et d'autre part, à faire la même opération à l'origine de la ligne, mais en intercalant dans ce circuit l'enroulement primaire d'un petit transformateur.

Aussitôt qu'une perturbation, telle que la rupture d'un conducteur, se

produit sur la haute tension et avant même, dans ce cas que les extrémités du fil rompu aient eu le temps de tomber à terre, la différence de potentiel produite par la dissymétrie résultant de cette perturbation provoque le passage d'un courant à travers l'enroulement primaire du transformateur auxiliaire et le parafoudre qui se trouve en série avec cet enroulement ; le secondaire du transformateur est alors le siège d'un courant induit qui, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un relais, provoque le déclenchement d'un disjoncteur qui interrompt ainsi le courant.

L'appareil « Arcioni », quand il est destiné à des circuits triphasés, se compose essentiellement de trois électro-aimants reliés en étoile et respectivement dérivés sur les trois conducteurs de ligne, avec le centre à la

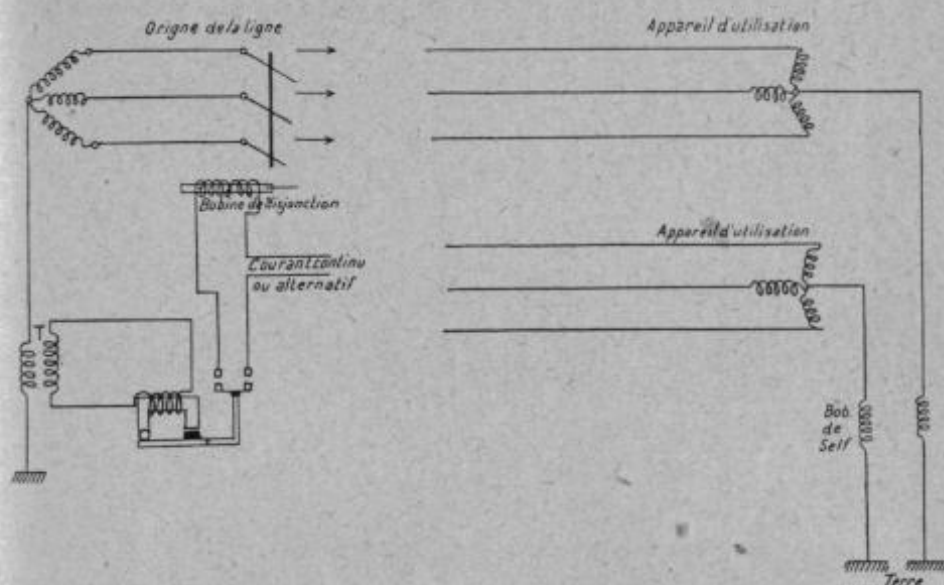


FIG. 1595. — Dispositif de protection pour lignes à haute tension.
Système L. Neu. (Société industrielle des Téléphones.)

terre. Le circuit magnétique de chaque électro-aimant présente seulement une petite coupure au milieu de laquelle se meut un organe tournant, lequel est le siège de courants induits par les trois électro-aimants. Chacun de ceux-ci a une action proportionnelle au carré de l'intensité du flux qui le traverse et les trois actions, indépendantes entre elles, s'additionnent sur le même organe mobile.

Le couple moteur est contrebalancé par une action antagoniste, celle d'un poids ; mais quand l'équilibre est troublé, l'organe se déplace légèrement, fermant un circuit qui entraîne la manœuvre de l'interrupteur et l'isolement de la ligne à protéger. L'appareil peut provoquer l'isolement d'un conducteur, dès que la tension prend par rapport à la terre une valeur 2 fois ou 2 fois et demie supérieure à la valeur normale et il est insensible aux décharges atmosphériques. Chaque électro-aimant, avec une tension de 150 volts et une fréquence de 50 volts, absorbe pour son

fonctionnement un courant de l'ordre de 0,02 ampère. Une variation dans la résistance du contact à la terre n'altère point la sensibilité de l'appareil, lequel est pourvu de fusibles servant à protéger les enroulements dans le cas de surtensions susceptibles de l'endommager.

Nous signalerons aussi un appareil du même inventeur qui a pour but de prévenir les accidents causés par le contact des circuits haute tension et basse tension.

L'appareil Neuhauss interrompt le circuit à haute tension en même temps qu'il met à la terre le circuit à basse tension toutes les fois que ces deux circuits viennent en communication soit par suite d'une rupture de l'isolement des transformateurs abaisseurs de tension, soit par suite d'un contact accidentel entre les conducteurs d'une ligne à haute tension avec ceux d'une ligne à basse tension.

Pour les lignes triphasées l'appareil comprend cinq condensateurs à lame de mica percée d'un trou et dont l'épaisseur est choisie suivant la tension principale du réseau à protéger. Trois de ces condensateurs sont branchés entre chacun des trois conducteurs du réseau secondaire et la terre, les deux derniers entre l'un de ces conducteurs et les deux autres. Quand le réseau primaire se trouve être en communication avec le réseau secondaire, une étincelle jaillit entre les armatures d'un ou de plusieurs des condensateurs à travers les trous des lames de mica. Le fil qui relie à la terre l'une des armatures des trois premiers condensateurs se trouve alors traversé par un courant et celui-ci actionne un relais très sensible (type de moteur monophasé à disque en aluminium) qui ferme un circuit local. C'est ce circuit local qui provoque la mise hors circuit de la ligne à haute tension et la mise à la terre de la ligne à basse tension.

Suivant l'inventeur, non seulement l'appareil est simple, robuste et peu coûteux, mais encore il est suffisamment sensible pour fonctionner avant qu'une tension dangereuse sur le réseau secondaire ne soit atteinte.

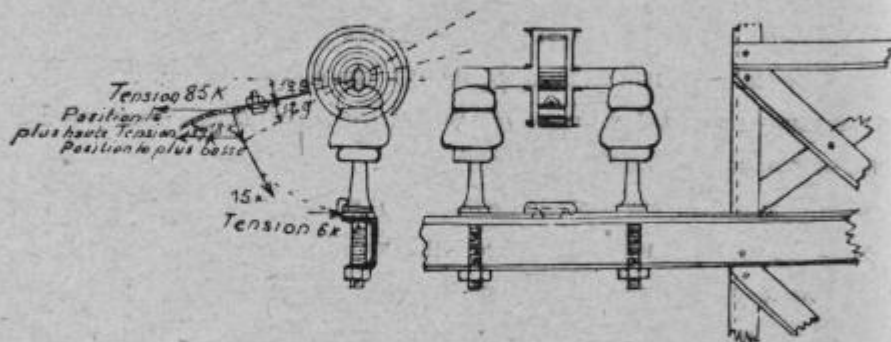


FIG. 1596.

L'appareil Déthiollaz (fig. 1596 et 1597) consiste essentiellement en un ressort en spirale plat *a*, calé sur un axe métallique *b*, porté par deux isolateurs *c*.

L'extrémité libre porte un contact *e* et une lame flexible *g*, à laquelle est fixée l'extrémité du fil de traversée ; cette lame travaille à la traction.

Le fonctionnement du dispositif est le suivant. Chaque extrémité du conducteur de traversée est fixé à un ressort, qui, de ce fait, se trouve tendu dans des conditions déterminées ; si le conducteur se rompt, les deux ressorts se détendent brusquement, en entraînant chacun le brin qui lui est adjacent et viennent buter contre le contact *f*, relié à la terre ; si celle-ci est de faible résistance, les tronçons rompus seront inoffensifs. Le ressort est shunté par un câble en cuivre nu *z* très souple. La présence de cette espèce de bobine de self n'apporte aucun trouble sur les lignes.

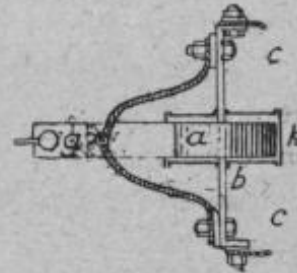


FIG. 1597.

Le ressort est déterminé de manière que sa plus faible tension, qui correspond à la flèche maximum du conducteur, soit telle que la durée de sa fermeture de mise à la terre soit très inférieure au temps que met, en tombant, le tronçon rompu pour venir en contact des fils à protéger.

L'appareil « Coltri » est formé d'un condensateur en série avec une bobine de relais que l'on insère entre un point neutre du réseau à basse tension et la terre. La self-induction de la bobine est proportionnée à la capacité du condensateur, de manière à obtenir les conditions de résonance pour la fréquence normale de service.

Le point neutre choisi peut être celui existant dans le secondaire d'un transformateur ou encore on peut le former artificiellement avec des résistances inductives ou même avec les capacités nécessaires au dispositif. L'appareil ne fonctionne point par suite de la présence d'une terre quelconque dans le réseau secondaire, mais s'il se produit un contact entre circuit primaire et secondaire extérieur ou intérieur au transformateur, le dispositif entre en activité, interrompant le circuit primaire et mettant directement à la terre le circuit secondaire.

La multiplicité des appareils mécaniques et électriques imaginés pour la protection des lignes de tramways, en cas de rupture d'un conducteur, ne nous permet pas d'en donner la description dans cet ouvrage ; nous nous bornerons à signaler l'interrupteur « Siemens » à levier oscillant, l'appareil « Ulmann » pour la mise en contact du fil rompu avec une dérivation reliée à l'usine, l'appareil en dérivation par contact entre charbons installé sur le réseau de la Compagnie des Tramways de Paris et de la Seine, l'appareil « Siemens et Halske » pour la mise en dérivation d'un fil de trolley rompu, ceux de la Compagnie Thomson-Houston et de la Société d'Électricité de Paris, basés sur le même principe que le précédent, etc.

Une méthode de protection des lignes qui a reçu de très nombreuses applications dans ces dernières années est le système de protection différentielle Merz-Price. Dans ce système, chaque ligne est munie d'un transformateur d'intensité à chaque extrémité et les secondaires de chaque couple de transformateurs sont connectés en opposition ; en outre, dans ce circuit, il y a un relais à chaque extrémité.

Dans les conditions normales, le courant dans chaque transformateur est le même et, comme les secondaires sont opposés l'un à l'autre, il ne passe pas de courant dans le circuit des relais. Si une ligne vient à se rompre, il passe un courant plus intense dans le transformateur à l'extrémité générateur qu'à l'autre extrémité et, par conséquent, il passe un courant dans le circuit secondaire, courant qui agit sur les relais et qui ouvre les interrupteurs aux deux extrémités du feeder avarié. Bien entendu, la canalisation secondaire des transformateurs d'intensité est distincte du feeder à protéger et de la même longueur que lui, et l'on doit employer un circuit auxiliaire pour la manœuvre des interrupteurs.

Ce système a été appliqué avec grand succès à la protection des transformateurs aussi bien que des câbles. On peut s'en servir sur des feeders simples ou doubles, canalisations en boucle ou toute autre forme de réseau de distribution et il est remarquablement précis dans son action.

La méthode Mertz-Price nécessite l'introduction de transformateurs d'intensité additionnels, ce qui est un point faible sur un système à haute tension, mais ce désavantage est plus que compensé par la sécurité de l'interruption qu'on obtient.

Relais de rupture pour réseaux triphasés (fig. 1598). — Ce genre d'appareil provoque la fermeture du circuit local d'un interrupteur automa-

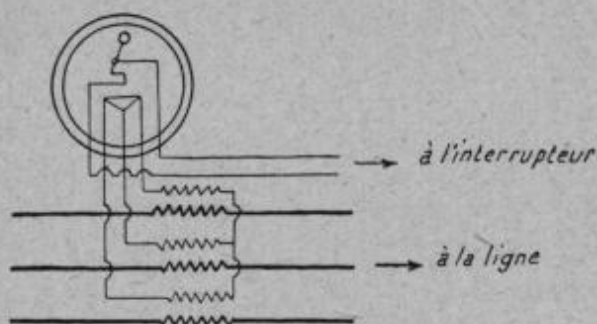


FIG. 1598.

tique commandant une ligne aérienne, lors de la rupture d'un fil de cette ligne ou même lors d'une variation de charge sur l'un des conducteurs de la ligne. Le relais se compose d'une pièce en fer en forme d'anneau portant trois enroulements alimentés par les secondaires

de trois transformateurs d'intensité branchés dans le parcours de trois conducteurs triphasés au départ de l'usine. Les trois pôles de l'anneau de fer sont également munis d'enroulement de court-circuit et d'un tambour métallique mobile et léger, qui porte sur son axe un bras de contact destiné à fermer le circuit local de l'interrupteur automatique de la ligne.

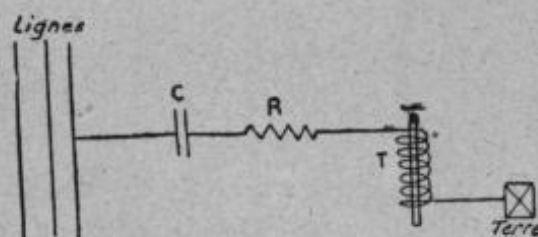
En temps normal, le courant de ligne engendre un couple qui agit dans un certain sens sur le tambour, ce couple ayant été calculé tel qu'il soit légèrement supérieur au couple produit par les enroulements de court-circuit et de sens opposé. Le tambour prend alors une certaine position ; s'il se produit une rupture de ligne, le couple du courant triphasé disparaît, celui des enroulements de court-circuit l'emporte ; le tambour tourne en sens contraire, et le bras de contact ferme le circuit local de l'automatique qui déclenche.

Mais, s'il s'agissait d'une ligne à circuit ouvert, cas possible, la rupture d'un conducteur de cette ligne n'entraînerait aucun fonctionnement du relais, et les accidents de personnes seraient à craindre, puisque le conducteur rompu n'amènerait le déclenchement de l'automatique qu'après son contact possible avec le sol. Un autre inconvénient de cet appareil est son fonctionnement possible lorsque, par suite d'un fusible qui vient à éclater dans un poste important, il y aurait variation de charge sur le conducteur correspondant ; dans ce cas, la ligne se trouverait privée de courant sans accident à elle-même.

Les essais de câbles à haute tension peuvent se faire à l'aide d'un appareil simple qu'on appelle le *phasophone*. L'appareil sert à déceler et à localiser les défauts dans les câbles.

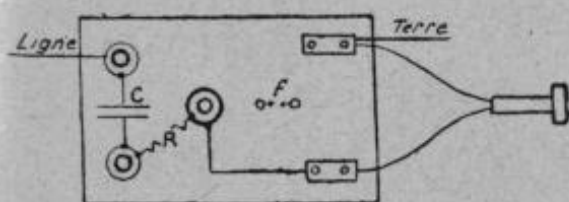
Les parties essentielles sont un condensateur à mica pour haute tension C (*fig. 1599 et 1600*), une résistance non inductive R supérieure à 1 mégohm, un micromètre à étincelles et un récepteur téléphonique T, qui peut être placé à une distance raisonnable du reste de l'appareil.

Le condensateur, la résistance non inductive et le téléphone sont reliés en série entre un fil de ligne et la terre. Le courant circulant alors dans



Connexions du phasophone

FIG. 1599.



Plan du phasophone

FIG. 1600.

ce circuit auxiliaire après avoir traversé la capacité donne une note, dans le téléphone T, d'une hauteur qui dépend de la fréquence du courant principal. Aussi longtemps que l'ensemble de l'installation est en parfait état, la note émise par T est uniforme, mais si la plus petite irrégularité survient (par exemple perte de courant, décharge à la terre, mauvais contacts, couplage défectueux de machines en parallèle, oscillations de

mise en charge, phases non équilibrées, etc.) l'indication en est donnée d'une manière définie et reconnaissable, dans le phasophone.

Lignes en boucle. — Dans le cas de lignes en boucle, il est nécessaire de munir les poteaux d'une telle ligne, de deux appareils de sécurité par conducteur, l'un à droite du poteau, l'autre à gauche. Ceci complique singulièrement l'installation, en élève le prix, en même temps que les frais d'entretien.

Lorsque la ligne aérienne bouclée est alimentée d'un côté par les barres omnibus de l'usine et, d'autre part, par une ligne souterraine, il est utile

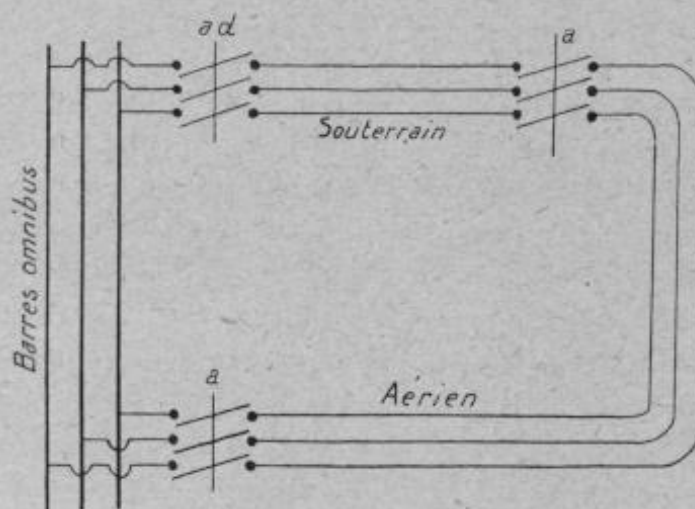


FIG. 1601.

que, dans la station de raccordement de la ligne aérienne à la ligne souterraine, le raccordement se fasse par l'intermédiaire d'un interrupteur automatique (fig. 1601) semblable à l'automatique *a*, placé sur la ligne aérienne au départ de l'usine. Tout accident survenant à la ligne aérienne

ferait déclencher les deux automatiques *a* ; alors, afin que les abonnés desservis par la ligne souterraine ne soient pas privés de courant par le fonctionnement des appareils de sécurité et d'interruption de la ligne aérienne, il serait nécessaire de placer, entre les barres omnibus de l'usine et le départ souterrain, un automatique à action différée *ad*.

Conjointement avec les parafoudres à aluminium on emploie des enregistreurs de décharges, qui se composent essentiellement d'un système de quatre pointes montées parallèlement l'une à l'autre au-dessus d'un tambour ; les pointes sont reliées aux colonnes du parafoudre (colonne de ligne et de terre), de sorte que toutes les décharges y produisent un arc momentané.

Interrupteur d'arc avec la terre. — Un dispositif spécial a été présenté, sous le nom de « arcingground suppressor » ou interrupteur de dérivation dangereuse à la terre, à l'Association des Ingénieurs électriciens américains.

L'arcingground suppressor (fig. 1602) se compose essentiellement d'un interrupteur unipolaire à huile, pour chaque phase, d'un déclencheur automatique pour chaque interrupteur, et d'un dispositif sélecteur, ou relais sélecteur, électrostatique ou électromagnétique, qui commande le

fonctionnement des déclencheurs. Les interrupteurs ont pour but de shunter toute phase sur laquelle se produit une dérivation à la terre, et de rétablir le circuit, aussitôt que, les vapeurs de l'arc s'étant dissipées, le système est à nouveau en état de fonctionnement ; le relais sélecteur, placé sous l'action combinée des trois phases, fait choix de l'interrupteur intéressé.

Le « suppressor » est d'une grande efficacité et il a récemment été essayé pour la protection des réseaux souterrains.

La plupart des dérangements qui peuvent atteindre les câbles souterrains résident précisément dans la production d'arcs vers la terre ; l'emploi du « suppressor » y est donc plus utile encore que sur des lignes aériennes, mais il ne peut y être appliqué de la même façon.

En premier lieu, le « suppressor » ne peut rétablir le circuit lorsqu'il a fonctionné, parce que, lorsqu'un défaut atteint le câble, c'est un défaut

permanent et qui doit être corrigé. En second lieu, il est nécessaire de disposer d'un instrument indiquant quel câble est atteint ; ce dispositif existe aujourd'hui dans le localiseur de feeder défectueux, et le « suppressor » peut donc être appliqué de la façon la plus complète.

Le tellurohmmètre est un appareil pouvant mesurer la résistance ohmique des prises de terre d'une manière très précise par suite de l'élimination des phénomènes de polarisation et des courants perturbateurs.

Cet appareil (*fig. 1603*) se compose en principe : 1° d'un galvanomètre industriel monté en méthode de comparaison ou en pont de Wheatstone ; 2° d'un inverseur automatique. Pour le montage en méthode de comparaison, le galvanomètre est monté en série avec deux résistances r et r_1 et des piles ou des accumu-

lateurs P ; aux bornes ED se trouve monté en dérivation un galvanomètre.

L'appareil portatif (*fig. 1604*) qui fonctionne à quelques centimètres

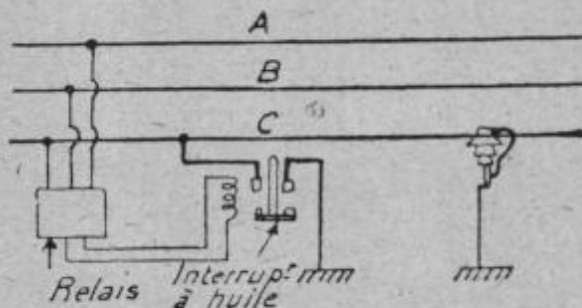


FIG. 1602.

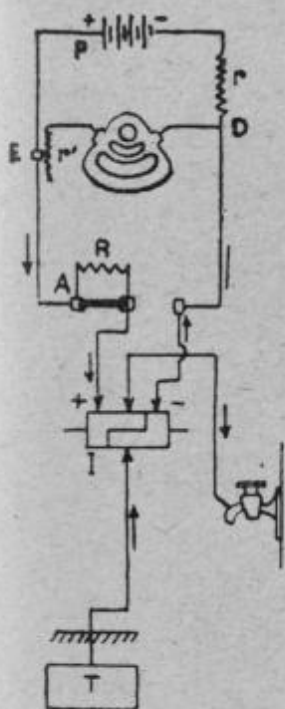


FIG. 1603.

d'un conducteur à haute tension, se compose d'une lame très mince en aluminium AB mobile autour d'un axe C. A l'intérieur de la boîte est un électroscope, celle-ci étant en ébonite, avec deux glaces et un bouton

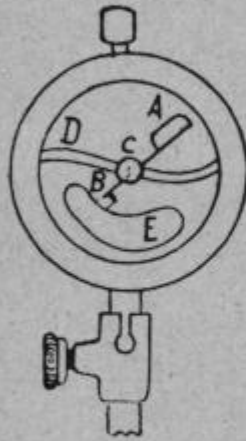


FIG. 1604.

métallique dans le haut. Un manche isolant en ébonite sert à tenir l'instrument et à en vérifier le fonctionnement. A cet effet, il suffit, avant d'approcher l'électroscope d'un conducteur, de détacher le bâton d'ébonite et de le frotter sur le revers de la manche. En le présentant au bouton de l'appareil, on verra aussitôt la lame se relever, qui, au repos, est presque couchée le long du support métallique D. On peut, après cette assurance, l'approcher du conducteur en le tenant par son manche isolant. Si la lame se relève et se dirige vers le bouton, c'est que le conducteur est sous tension.

Synchronoscope Weston. — Ce nouveau synchronoscope est un appareil dynamométrique pour tableaux de distribution. L'aiguille se trouve placée derrière une échelle graduée transparente, laquelle est éclairée par une lampe de phase montée d'après le schéma dit à l'allumage.

La bobine fixe est reliée au réseau par l'intermédiaire d'une résistance. La bobine mobile est reliée à la machine à coupler par l'intermédiaire d'un condensateur. Normalement l'aiguille reste au milieu de l'échelle, l'appareil ne fonctionnant pas.

On peut établir la résistance du circuit fixe et la capacité du circuit mobile, de telle façon que les courants dans ces deux circuits soient décalés entre eux d'un quart de période, lorsque les tensions sont en concordance de phase ou en opposition.

Si les tensions sont en opposition, la lampe de phase ne s'allume pas ; l'allumage de cette dernière ne se produit que lorsqu'il y a concordance de phase ; l'aiguille se trouve au milieu de l'échelle et fortement éclairée lorsque le synchronisme parfait est atteint.

Si au contraire les deux tensions ne sont pas exactement en concordance de phase ou en opposition, l'aiguille s'écarte d'autant plus du milieu de l'échelle que la différence de phase est plus importante.

Si les deux machines ne tournent pas exactement à la même périodicité, l'aiguille est munie d'un mouvement de va-et-vient, et on a l'impression que l'aiguille tourne dans un sens donné et le sens de cette rotation apparente indique si la machine à coupler tourne trop vite ou trop lentement et la vitesse apparente de rotation donne un moyen d'apprécier la différence de fréquence des deux machines.

Les (fig. 1605 et 1606) renseignent sur le montage et les caractéristiques du fonctionnement de l'appareil.

Les courbes du haut sont relatives à deux sinusoïdes de périodicités différentes. La résultante des deux sinusoïdes est représentée en pointillé ;

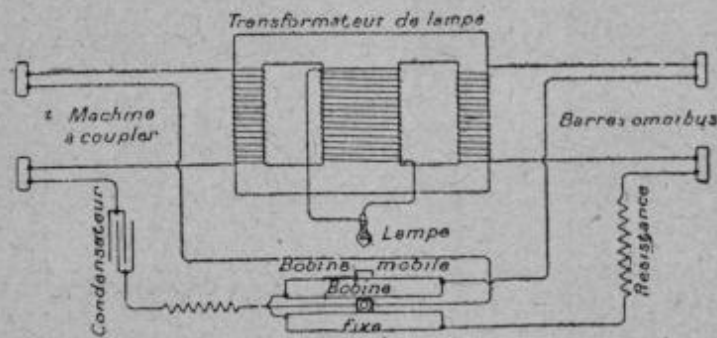


FIG. 1605.

c'est cette résultante qui agit sur la lampe. La partie hachurée correspond aux limites à l'intérieur desquelles le courant dans la lampe n'est pas suffisant pour allumer cette dernière. Tant que le maximum de la résultante reste à l'intérieur de cette zone, on a l'obscurité dans l'appareil.

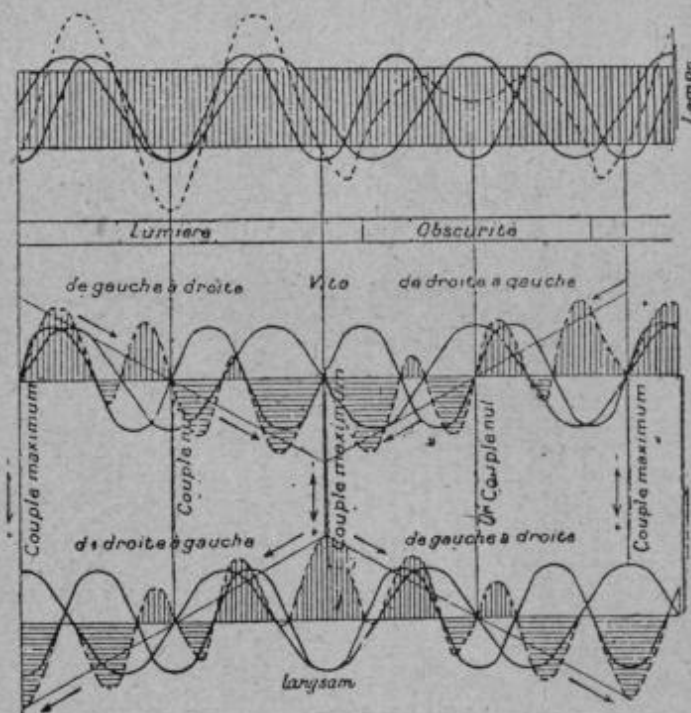


FIG. 1606.

Les courbes du milieu représentent les mêmes sinusoïdes, mais en admettant que la machine à coupler (reliée à l'équipage mobile et au condensateur) tourne le plus vite. Le produit des valeurs instantanées

des deux sinusoïdes peut servir de mesure au couple agissant sur l'équipage mobile. Il est représenté par les surfaces hachurées limitées par la courbe en pointillé. Les hachures verticales correspondent à un couple positif et les hachures horizontales à un couple négatif ; le couple positif

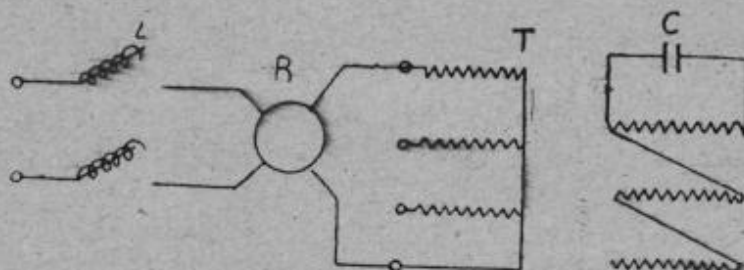


FIG. 1607. — Dispositif pour l'essai après pose des câbles à haute tension (basé sur les phénomènes de la résonance.)

i, disjoncteur automatique ; — R, régulateur à induction ; — T, transformateur ; C, câble.

fait dévier l'aiguille vers la gauche, le négatif vers la droite. Les courbes inférieures sont établies de la même façon, mais avec cette différence que la courbe en retard correspond à la machine à coupler.

Contact avec une ligne télégraphique ou téléphonique. — Au passage des

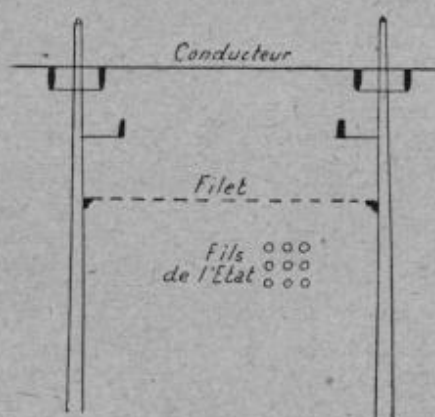


FIG. 1608.

lignes à faible courant, il faut avoir soin de disposer sur les deux poteaux successifs des appareils de sécurité (fig. 1608), et sous ces appareils, à une distance convenable, un filet protecteur qui amortisse la chute du conducteur et l'oblige, si ce n'est déjà fait, à se mettre en contact avec l'appareil de sécurité *a*. En effet, la chute d'un conducteur sur les fils de l'État peut avoir deux conséquences : d'une part l'électrocution des passants sur la voie publique,

d'autre part l'électrocution de ceux qui peuvent être à plusieurs kilomètres du lieu de rupture du conducteur de haute tension.

572. Filets protecteurs. — Pour protéger les lignes à haute tension de tout contact possible avec les lignes télégraphiques ou téléphoniques, on les enveloppe d'un filet en forme de cage, relié à la terre ou soigneusement isolé des fils.

Ils sont faits avec du câble galvanisé pour les fils porteurs et du fil galvanisé pour les mailles. De petits fers à U boulonnés sur les pylônes sont maintenus par des colliers sur les poteaux.

D'après la circulaire ministérielle du 21 mars 1911, la longueur des filets longitudinaux qui se placent au-dessus des fils et signaux en dehors de la projection des conducteurs d'énergie doit être égale à la distance séparant le grillage du conducteur d'énergie le plus élevé. Le grillage doit être relié à la terre et supporté par quatre poteaux qui peuvent être en bois.

Les protecteurs transversaux qui se placent au-dessous des conducteurs se font en forme de V ouvert ou de U, les mailles des filets ayant 40 centimètres au moins pour ne pas retenir les neiges et verglas.

Un intervalle d'au moins un mètre doit le séparer partout du conducteur le plus bas et il ne doit pas y avoir de contact accidentel entre le filet et le conducteur quelle que soit l'intensité du vent.

Le filet doit être relié à la terre et le coefficient de sécurité de l'installation du filet égal à 10, en supposant toutes les pièces de l'installation recouvertes de verglas de 5 millimètres d'épaisseur dans l'hypothèse de la température minima de la région.

Les filets n'apportent aucun trouble à l'exploitation des réseaux quand ils sont isolés, cela quel que soit le système de distribution lorsqu'ils sont mis accidentellement en contact avec un seul conducteur. Ils doivent, dans ce cas, être isolés avec les mêmes soins que les conducteurs eux-mêmes. Si les filets doivent être mis à la terre, il faut que les communications avec le sol soient assurées par un conducteur équivalent à ceux de la canalisation, c'est-à-dire avoir une conductance appropriée à l'intensité prévue. En résumé, la qualité essentielle des filets isolés est la résistance mécanique et celle des appareils reliés au sol, la conductance électrique.

Traversées des voies publiques et des voies ferrées. — L'arrêté ministériel du 21 mars 1908 a allégué les prescriptions imposées dans l'installation des conducteurs d'énergie aux traversées des voies publiques et des lignes télégraphiques ; il semble même avoir abrogé celles de la circulaire du 1^{er} février 1907 concernant la traversée des voies ferrées, mais les exploitants demeurent responsables des accidents que leurs canalisations peuvent occasionner.

On peut distinguer le cas où les lignes d'énergie traversent des voies publiques où il n'existe pas de lignes à courant faible, et celui où ces dernières ne suivent pas les voies ferrées.

La disposition qui consiste à faire passer, aux croisements, les lignes à faible courant au-dessus des conducteurs d'une distribution d'énergie, apparaît plutôt comme défavorable. En effet, les rares opérations d'en-

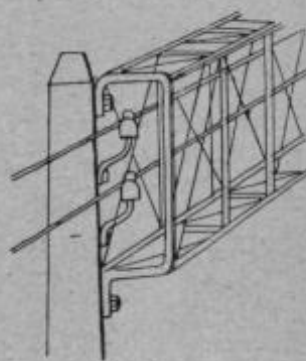


FIG. 1609. — Filet protecteur.

tretien que comportent les canalisations d'énergie s'effectuent le plus souvent après la suspension du courant, aux seules heures où cette interruption n'est pas très dommageable à l'exploitation et les fils qui tombent sont plus susceptibles d'être retenus par les appareils de garde.

Les traversées des lignes télégraphiques comportent deux sortes de protections : les unes concernant la nature et les dimensions des matériaux constituant la canalisation industrielle, les autres l'emploi de dispositifs propres à éviter les mélanges. Relativement à ces dernières, lorsque la distance entre les conducteurs des deux catégories est telle que la présence de corps intermédiaire n'est pas probable, il n'y a lieu, alors, de redouter que la chute d'un conducteur. Il faut dans ce cas recourir à un puissant appareil de garde capable de résister aux surcharges éventuelles et au choc des conducteurs qui viendraient à le frapper. Le mélange ne paraît pas à redouter, si l'écart entre les conducteurs des dernières catégories est supérieur à 2^m,50. Lorsque la distance entre les conducteurs est telle qu'un mélange par corps intermédiaire est possible, on peut y parer en plaçant entre les deux nappes de fils une séparation s'étendant à 0^m,50 de part et d'autre des plans verticaux projetant les fils extrêmes. Si cet écran est continu, il peut être indifféremment isolé ou relié au sol. Cette liaison est nécessaire en cas de discontinuité. Une disposition analogue, complétée par des fils de garde barrant toute la portée, doit être prise si la ligne télégraphique s'infléchit pour traverser la canalisation d'énergie et si le relèvement des fils est à craindre par suite de la rupture d'une attache ou d'une opération d'entretien ou d'extension.

La traversée des voies ferrées comprend trois parties : celle de la voie et de ses accessoires, celle des fils électriques servant aux signaux, enfin celle des fils télégraphiques qui la longent. Il semble qu'à l'heure actuelle, sauf dans des cas particuliers qui ressortiraient de l'article 39 de l'arrêté ministériel du 21 mars 1908, le service du contrôle estime que la sécurité de la voie, de la circulation et des organes accessoires est assurée sans l'emploi d'appareils de garde, si les éléments de la ligne présentent les coefficients réglementaires (5 pour les maçonneries et les bois, 10 pour les organes de surstructure). Mais toutes les Compagnies ne partagent pas cette manière de voir.

La protection des signaux se ramène soit à l'exécution des prescriptions bien définies concernant la mise à la terre des appuis d'énergie, soit à la protection matérielle de la voie elle-même, soit à celle des lignes télégraphiques.

Si la rupture ou l'abaissement d'un conducteur d'une ligne télégraphique sont rendus improbables par les dispositions prises à cet égard, il suffit, pour assurer la sécurité des lignes télégraphiques placées au-dessous, de rendre impossible un mélange par l'intermédiaire d'un con-

ducteur auxiliaire. Les passerelles rigides, capables de recevoir les conducteurs en cas de rupture et calculées en vue des surcharges auxquelles elles sont exposées, offrent, pour la traversée des voies, le maximum de sécurité. Les filets en V peuvent convenir lorsqu'il s'agit d'une canalisation ne contenant que 2 ou 3 fils.

Quelques ingénieurs pensent qu'il faudrait se prémunir contre l'éventualité d'un mélange par contact direct des fils ou par conducteur intermédiaire. Dans ce cas la zone de séparation est constituée par un réseau à mailles étroites relié à la terre.

Si l'on prévoit l'éventualité de la rupture d'un conducteur d'énergie, l'appareil de garde doit présenter une forme et des dimensions qui lui permettent de recueillir le conducteur compris dans la zone où il peut s'écarter et de résister au choc qui en résulte. Les appareils peuvent être établis sur les supports de la canalisation, sur ceux de la ligne télégraphique ou sur des appuis spéciaux.

Le service du contrôle a imposé, dans quelques circonstances, une disposition consistant en un filet en forme de U enveloppant la ligne télégraphique jusqu'au niveau du fil inférieur avec mailles de 0^m,50 au plus de largeur et dont la longueur totale ne peut alors être inférieure au double de la distance du conducteur d'énergie le plus élevé, ou du fil télégraphique le plus bas.

Avec la basse tension, l'isolement des conducteurs sur une certaine étendue aux environs du croisement peut suffire à éviter la mise en charge d'un fil amené au contact ; mais il importe que cet isolement soit assuré. A défaut de câble satisfaisant à cette condition, on peut recourir à des conduits de matière isolante, formés de deux pièces entourant complètement les fils et portant des crochets de retenue aux extrémités.

Pour la protection des lignes à faible courant contre les lignes de tramways où les lignes à haute tension, il y a lieu de distinguer le cas où les fils télégraphiques ont un diamètre supérieur ou inférieur à 2^{mm},5. Avec les premiers, il faut s'environner de toutes les conditions qui peuvent assurer la solidité : réduction de la partie de croisement, remplacement des fils oxydables par d'autres moins exposés aux corrosions, doublement des isolateurs, appuis métalliques, fixation par boulons, etc.

Si ces précautions ne paraissent pas suffisantes, un dispositif de garde permanent est nécessaire. Si la canalisation d'énergie ne comprend qu'un conducteur (tramways) ou seulement un petit nombre comme il est fréquent, et que la ligne télégraphique soit chargée, le filet sera moins étendu s'il est appliqué au voisinage des fils d'énergie. Celui-ci se fait en U dont les branches descendent jusqu'au niveau du plus bas conducteur.

Lorsque les filets sont à placer sur les fils télégraphiques, on les établit en U, ou en V si l'échappement latéral n'est pas à craindre. Dans tous les

cas, les filets doivent être pourvus de crochets de retenue. Ils doivent en outre être reliés au sol.

Pour les lignes à fils de petit calibre, et lorsqu'il s'agit de lignes ne comportant et ne pouvant comporter que quelques fils, il suffit de les ramener à la catégorie précédente en changeant les fils et en renforçant, au besoin, les appuis. Si cette modification n'est pas possible, et si les conditions locales ne se prêtent pas à la création d'une sorte de passerelle à parois infranchissables, il vaut mieux renoncer à la traversée aérienne que d'exposer les deux lignes aux accidents et aux sujétions qu'elles occasionneraient.

Pour la protection contre la chute du conducteur aux traversées de routes, aux points de croisement, etc., on peut utiliser les dispositifs suivants, destinés à remplacer les filets.

1^{re} *Conducteur spécial en forme de réseau trifilaire.* — Ce conducteur est constitué par deux fils reliés de distance en distance par un troisième fil disposé en zigzag et formant un véritable entretoisement. Ce conducteur est tendu généralement avec un coefficient de sécurité égal à 10, soit à 4 ou 5 kilogrammes,

Le conducteur en réseau est complété par un dispositif avertisseur indiquant à temps que les conducteurs corrodés par oxydation doivent être remplacés ;

2^o *Suspension triple.* — Elle comporte trois isolateurs aux extrémités de chaque conducteur ; l'isolateur placé au milieu reçoit le conducteur principal et les deux autres supportent des conducteurs auxiliaires ayant même section que le premier.

3^o *Suspension double.* — Les conducteurs sont supportés par deux isolateurs sur chaque poteau. Le conducteur de ligne est fixé, suivant le mode ordinaire, à l'un des isolateurs. Un conducteur auxiliaire est fixé à l'aide de raccords sur le conducteur de ligne, de part et d'autre du poteau, après avoir été enroulé et fixé lui-même sur un second isolateur. En cas de rupture, près de l'isolateur, le conducteur de ligne reste suspendu.

573. Indicateurs de tension. — Les indicateurs de tension ont pour but, comme on sait, de reconnaître l'état de charge d'un conducteur ou d'une partie quelconque de l'installation. Il est incontestablement nécessaire d'avoir en mains de tels appareils, présentant une sécurité suffisante, et cette nécessité se fera de plus en plus sentir avec le nombre toujours croissant des installations à haute tension, surtout chaque fois que, loin de la centrale, il est urgent de procéder à des réparations. En effet, la méthode généralement adoptée, consistant à fixer une heure déterminée à partir de laquelle, pendant un certain temps, la ligne frappée est privée de courant, ne paraît pas suffisamment à l'abri de tout aléa, et, quand

la mise à la terre réglementaire n'a pas été effectuée suivant les règles par le monteur, cette méthode peut devenir très dangereuse. De même, le moyen adopté fréquemment, savoir de jeter, avant le commencement des travaux, un fil autour des conducteurs pour les mettre en court-circuit, pour obvier à toute éventualité, ne remplit son but qu'autant que l'on observe réellement ce qui a été convenu. S'il n'en est rien, cet essai aura, pour le moins, pour conséquence, la perte de plusieurs coupe-circuits.

Le nombre des indicateurs de tension est très grand. On a employé d'abord un passage d'étincelle, au moyen duquel on chargeait une masse métallique isolée placée à proximité du conducteur ; mais ce procédé paraît peu efficace pour la bonne raison que, lorsque la haute tension n'est pas suffisamment grande, il est nécessaire de régler le passage de l'étincelle assez finement et qu'en second lieu l'intensité des courants de charge, qui s'équilibrent dans l'étincelle, est si petite que l'étincelle ne développe qu'un très faible pouvoir éclairant.

On pourrait en dire autant d'un autre moyen auxiliaire servant à la recherche de l'état de la tension : l'électroscope. La part de la tension qui se répartit sur l'électroscope dépend également de sa distance au sol, et, de plus, il faut toujours compter avec la possibilité que les feuilles légères restent collées par un hasard quelconque, de sorte que la faible force électrostatique n'est pas en état de provoquer une déviation.

Enfin un autre moyen auxiliaire pour reconnaître l'état de la tension consiste en un tuyau de verre rempli d'huile claire parfaitement dépourvue d'eau, dans lequel nagent des parcelles très fines de charbon, par exemple du papier brûlé. Si l'on approche ce tuyau avec l'une de ses extrémités, fermées par une calotte métallique, d'une partie sous tension, tandis que l'autre calotte est mise à la terre, des courants de charge s'écoulent à la terre en passant par le tuyau et rendent les parcelles de charbon incandescentes. Ce procédé n'est pas tout à fait sans danger en raison de la nécessité de rapprocher l'œil des parties soumises à la haute tension.

Comme on sait, il existe encore un autre groupe d'appareils servant au même but, qui, à l'encontre des précédents, ne reposent pas sur le principe électrostatique, mais sur l'induction électrique. Les lignes de force magnétiques concentriques au conducteur, engendrées par les courants de ligne, parcourent un circuit placé à proximité du conducteur primaire ; ce circuit contient un instrument de mesure sensible ou un téléphone. Ce procédé ne convient que là où des courants considérables circulent dans les fils, et quand ces derniers possèdent une faible intensité, il faut améliorer la liaison magnétique du circuit de mesure avec le circuit primaire en augmentant la perméabilité du circuit magnétique, principe que réalise l'assembleur d'après Diétze, construit par Hartmann et Braun

et dont la forme de pince est bien connue. Ici le circuit de mesure est à proximité immédiate du conducteur, ce qui évidemment n'est plus admissible pour la haute tension.

Si l'on vient à suspendre un tube de Geissler à un fil soumis à une haute tension, de telle manière que le tube ne soit que peu éloigné du sol, il se met à luire fortement ; si, de plus, on approche du conducteur une plaque métallique et que l'on réunisse la plaque à la terre par intercalation d'un téléphone, ce dernier émet un son.

L'utilisation pratique du système avec téléphone présente cependant un côté faible, en ce sens qu'il faut approcher l'oreille du téléphone, de sorte que, en présence des hautes tensions, il faut toujours compter avec le danger auquel l'observateur est exposé lorsqu'il manie l'appareil sans précaution.

Cependant le système à considérer en première ligne, comme indicateur de haute tension, est le tube de Geissler, en intercalant les tubes de vide dans le circuit d'un petit condensateur placé entre les conducteurs et la terre. Les indicateurs de haute tension jusqu'à 5.000 volts sont munis d'un seul condensateur et, pour les tensions supérieures, de deux ou plusieurs condensateurs groupés en série. Le tube de Geissler est construit spécialement à cet effet avec des électrodes solides ; sa suspension est à ressort, de façon qu'il ne puisse pas se briser.

CHAPITRE XXVIII

APPAREILS DE MESURE ET DE CONTROLE

574. Qualités et défauts des appareils de mesure. — Certaines causes d'incertitude sont générales et peuvent affecter tous les appareils ; tels sont les défauts de graduation, les erreurs de lecture (parallaxe), les actions mécaniques (pivotage, variations du ressort, amortissement).

Au point de vue des graduations, l'erreur absolue ne dépasse pas $\frac{2}{1000}$, pour les appareils de graduation maxima ; les erreurs relatives seraient donc bien faibles si les tensions étaient égales sur toute l'étendue du cadran.

Les erreurs de parallaxe sont fortement diminuées par l'emploi d'un miroir placé sous l'aiguille.

Les ressorts antagonistes laissent généralement beaucoup à désirer ; il n'est pas rare de voir l'aiguille dévier du $\frac{1}{190}$ de l'échelle maxima, après une mise en service d'une heure aux $\frac{8}{10}$ de cette échelle. Les appareils, avec vis de rappel, pour remédier au déplacement du zéro, sont d'un emploi recommandable.

Les types de suspension des équipages mobiles actuellement utilisés sont ceux à fil métallique ou non, à ressorts spiraux, à couteaux et ceux à pivots. Les premiers ne permettent pas une approximation supérieure à 0,5 pour 100 de la valeur maxima. L'indication provenant des défauts de pivotage peut atteindre pour les bons appareils étalons $\frac{2}{1000}$ de la déviation totale.

Un grand amortissement donne trop d'importance aux défauts de pivotage ; deux oscillations simples suffisent pour les appareils étalons et de tableau, avec une durée totale d'oscillation de 2 secondes.

Les ampèremètres, voltmètres, wattmètres d'induction, très employés à l'heure actuelle sur les tableaux de distribution, sont très robustes ; mais

leurs indications dépendent de la fréquence et de la forme du courant alternatif et subissent l'influence des champs magnétiques extérieurs, mais pour ces derniers dans une faible mesure. Les variations de température peuvent produire des erreurs de $\frac{2}{1000}$ à $\frac{3}{1000}$ par degré centigrade.

Les transformateurs sur lesquels ils fonctionnent d'habitude doivent avoir les mêmes qualités que ceux des wattmètres.

Quant aux appareils thermiques, ceux de Hartmann et Braun sont de beaucoup les plus connus et les plus répandus. Mais dans tous les thermiques, l'indication des lectures peut revêtir un caractère important, lorsque la chaleur dégagée produit des déformations du support du fil. A vrai dire les valeurs indiquées sur ces instruments sont indépendantes de la forme de l'onde, de la fréquence et des actions extérieures, mais leur fragilité est considérée comme un très grave inconvénient. En outre leur consommation est très élevée; environ 0,2 à 0,3 ampère pour les ampèremètres et 0,2 volt pour les voltmètres, ce qui oblige pour les hautes tensions à employer des transformateurs. Les wattmètres calorifiques, de création récente, possèdent les avantages et les défauts de tous thermiques et ils sont utilisés pour les courants de haute fréquence. Enfin, plus récemment, Duddel a imaginé des appareils thermo-électriques, basés sur l'emploi de couples thermo-électriques, possédant les mêmes avantages que les thermiques. Le coefficient de self de ces appareils est faible et la consommation moindre que celle des thermiques ordinaires.

575. Appareils à cadre mobile et aimant. — Ces appareils sont connus en France sous le nom de Deprez-d'Arsonval. Les aimants permanents doivent permettre de réaliser un champ intense avec une grande stabilité et par suite que le champ démagnétisant soit assez faible. De là l'emploi indiqué de faibles entrefers et la nécessité de munir les aimants de pièces polaires ou d'épanouissements polaires, pour obtenir un flux uniforme. La stabilité est d'autant plus grande que la force coercitive est elle-même plus grande, ce qui donne la faveur aux aciers au tungstène utilisés à l'état trempé.

Ampèremètres. — Dans les ampèremètres, on distingue ceux dont la déviation de l'aiguille se fait dans un rapport connu et ceux dont le rapport est inconnu. Les premiers sont rendus utilisables par un étalonnage; les seconds doivent être gradués pour chaque division de l'échelle par comparaison avec un instrument étalonné. Lorsqu'il s'agit de galvanomètres de torsion (appareils Weston et Deprez-d'Arsonval), J étant le courant cherché et α l'angle de déviation de la petite aiguille aimantée et C un facteur de réduction obtenu par étalonnage, on a :

$$J = C\alpha.$$

Une troisième catégorie est celle des dynamomètres pour laquelle :

$$J = C \sqrt{x}.$$

Pour les ampèremètres, on mesure avec un millivoltmètre à cadre mobile la chute de tension produite par le passage du courant dans une résistance connue, chute qui est comprise entre 0,04 et 0,1 volt. L'influence de la température dépendant du rapport entre la résistance du cadre et la résistance totale de l'appareil, la variation sera d'autant moindre que la résistance en série sera plus grande. On a donc intérêt, pour les mêmes ampères-tours, à disposer de la chute de tension la plus élevée. Selon les constructeurs, divers dispositifs sont employés pour annuler et corriger les erreurs dues à la température. Le procédé Weston, basé sur l'emploi d'un shunt magnétique, est un des meilleurs connus à ce jour. L'action sur le courant du cadre mobile, par influence des champs magnétiques extérieurs, est variable suivant l'orientation du cadre avec le courant. L'influence sur l'aimant est souvent suffisante pour faire varier l'aimantation d'une façon permanente. Ainsi les champs intenses des tableaux de distribution sont suffisants pour désaimanter les aimants, les appareils actuels n'étant pas assez bien étudiés sous ce rapport. Dans les appareils à cadre mobile, la diminution de l'intensité d'aimantation de l'aimant fait retarder l'appareil et l'existence des boîtiers en fonte n'améliore pas sensiblement ce défaut ; ils sont plutôt efficaces contre les actions électrostatiques extérieures.

Shunts. — Dans ces appareils, les couples thermo-électriques produits par les inégalités de température des soudures tendent à augmenter les indications de l'appareil ; l'erreur peut atteindre 1 0/0 pour la pleine charge ; pour diminuer cet inconvénient, le mieux est d'employer, pour les lames des shunts, le manganin dont le couple est négligeable. Ces appareils doivent, dans tous les cas, supporter sans altération le courant maximum, mais beaucoup de shunts ne remplissent pas cette condition.

Le montage des shunts sur les tableaux est très intéressant, et les serrages doivent toujours être très parfaits. Pour des shunts de plusieurs milliers d'ampères, l'inégale répartition des courants peut produire des erreurs atteignant 10 0/0.

On ne peut guère compter, pour l'étalonnage des shunts, sur une erreur relative de moins de $\frac{5}{1000}$, surtout pour les fortes intensités ; il faut prendre des précautions pour être sûr d'une exactitude de 1 0/0 dans la mesure des intensités.

Voltmètres à cadre mobile. — La résistance des circuits variant de 100 à 200 ohms, le coefficient de température est négligeable pour tous les

voltmètres à partir de 30 volts. Les voltmètres sont à tous les points de vue supérieurs aux ampèremètres à shunt.

Le voltmètre électrostatique *Abraham-Villard* qui peut effectuer des mesures jusqu'à 200.000 volts, en courant continu ou alternatif, comprend un piston autour duquel est disposé un plateau métallique de grand diamètre, puis un deuxième plateau métallique isolé dont la distance est variable à volonté. Ce dernier est relié au deuxième pôle et est destiné à exercer sur le piston une force attractive, fonction de la tension à mesurer.

Les voltmètres électrostatiques pour courant à haute tension ont été mis au point par Siemens et Haski ; ils sont basés sur l'attraction de deux électrodes auxquelles est appliquée la tension qu'il s'agit de mesurer. Elle s'exerce au sein d'un bain d'huile.

Pour mesurer les tensions très élevées, on dispose deux voltmètres en série ; ainsi deux voltmètres à 150.000 volts permettent de mesurer des tensions pouvant aller jusqu'à 300.000 volts.

576. Appareils à fer doux sans aimant. — Ces instruments, très employés, ont l'avantage d'être très robustes et de pouvoir servir en courant alternatif. Mais généralement on n'apporte pas assez de soin dans leur construction. Les indications de ces appareils sont faussées par l'hystérésis, les champs magnétiques extérieurs, la fréquence. En courant continu, pour diminuer l'action de l'hystérésis, on a le plus souvent recours à un mobile plutôt lourd (pour les mêmes ampères-tours), disposition qui permet d'ailleurs de faire en courant continu l'étalonnement d'appareils servant en courant alternatif.

Pour avoir des mesures indépendantes de la fréquence, il faut diminuer le coefficient de self de la bobine et, par conséquent, la longueur des lignes de force dans le fer. Il est bon avec ces appareils de tracer les graduations avec le courant même sur lequel ces instruments doivent servir.

Les champs magnétiques extérieurs ont une influence plus grande sur ces appareils que sur ceux à cadre mobile. Pour une distance de 50 centimètres entre l'équipage et un conducteur parcouru par un courant de 1.000 ampères, l'action est encore de 1 0/0. Ces appareils ont généralement un amortissement insuffisant. A cause de l'hystérésis, la précision dans les mesures n'est pas d'un ordre bien élevé. Une erreur relative de 1 à 2 0/0 au $\frac{1}{10}$ de la graduation maxima est admissible ; mais l'erreur absolue ainsi déterminée devra être constante pour toute la partie utile de l'échelle.

577. Wattmètres. — Les wattmètres se divisent en quatre catégories : ceux électrodynamiques, ceux à induction à champ tournant, ceux

électrostatiques et ceux thermiques. Ces appareils diffèrent selon qu'ils sont à torsion, à lecture directe ou enfin à miroir.

Les wattmètres actuellement utilisés sont tous à lecture directe ; ils servent surtout pour les courants alternatifs et doivent présenter une dérivation proportionnelle à la puissance du courant et un amortissement parfait. On évite les actions secondaires dues aux courants de Foucault et à l'effet Kelvin par la suppression de toutes les parties métalliques (boîte, support, etc.), par le fractionnement et le toronnage des circuits.

Les causes d'erreurs sont aussi dues à la self-induction et à la capacité de la partie mobile et de sa résistance en série, aux transformations de mesure et à l'action des champs magnétiques voisins. En ce qui concerne la self, le coefficient de correction sera d'autant plus faible que l'angle de décalage entre la tension et le courant dans le fil fin sera plus petit, c'est-à-dire que le rapport des coefficients de self à la résistance du circuit dérivé aura une valeur moindre. On se trouvera dans de bonnes conditions lorsque le coefficient de self aura une valeur entre 0,003 et 0,005 henry et la résistance, 30 ohms par volt.

Quant à l'effet de la capacité de l'enroulement à fil fin, on l'évite par le fractionnement des résistances (à double enroulement et sans self) mises en série avec la bobine mobile.

Les transformateurs venant ajouter des décalages supplémentaires entre les courants primaire et secondaire, il s'ensuit que particulièrement les transformateurs d'intensité sont de construction délicate (dont l'induction est variable avec l'intensité du courant) et donnent lieu bien souvent à des erreurs graves.

Les actions extérieures causent sur les indications des wattmètres des erreurs importantes.

Les erreurs, pour les wattmètres étalons construits d'une façon rationnelle, atteignent au plus $\frac{1}{2}$ 0/0 (pour les $\frac{8}{10}$ de la graduation maxima).

Pour mesurer l'énergie débitée par un générateur triphasé, c'est-à-dire utilisée par un circuit récepteur triphasé, on se sert de wattmètres. Si les circuits sont également chargés, la puissance moyenne totale est égale à 3 fois la puissance moyenne d'un circuit. Si les trois circuits ont des charges différentes, il est indispensable de faire des lectures sur chacun d'eux.

Lorsque les récepteurs sont montés en étoile et que les trois circuits sont également chargés et ne présentent pas d'induction, on intercale en série dans un des conducteurs de ligne la bobine en gros fil des ampères du wattmètre et l'on met la bobine en fil fin des volts en dérivation sur le conducteur de ligne, d'une part, et sur le centre de l'étoile, d'autre part.

Si W est la quantité d'énergie absorbée indiquée par l'instrument, la puissance moyenne est égale à $3 W$. Lorsque le centre de l'étoile n'est pas à la portée de l'opérateur, la bobine en fil fin du wattmètre doit alors être mise en dérivation sur deux des conducteurs de ligne, et si W_1 représente la lecture faite au wattmètre, la puissance moyenne totale est égale à $2W_1$. En utilisant deux wattmètres dont les bobines en gros fil sont intercalées respectivement sur deux des conducteurs et dont les bobines en fil fin sont reliées au troisième conducteur, le décalage étant de 30° pour chaque wattmètre et les charges se trouvant équilibrées, les indications fournies par les instruments sont identiques et la somme de ces derniers fait connaître la puissance totale.

Lorsque les circuits des récepteurs sont montés en triangle et si la charge sur les trois branches est équilibrée et non inductrice, on procède comme suit : si l'un des côtés du groupage en triangle est facilement accessible et que l'on puisse intercaler la bobine en gros fil du wattmètre, on met en dérivation la bobine en fil fin sur les extrémités du côté du triangle considéré, et la puissance totale, exprimée en watts, s'obtient en multipliant par 3 le nombre lu sur l'instrument. Si, au contraire, la bobine en gros fil ne peut être intercalée que sur l'un des conducteurs, l'intensité du courant est $\sqrt{3}$ fois plus grande et la puissance moyenne totale est égale à 2 fois celle lue sur l'instrument.

Quand les circuits de réception, tout en étant équilibrés au point de vue de la charge, présentent de l'induction, la mesure de la puissance totale absorbée peut s'effectuer en une seule lecture, en la multipliant par 3, à la condition cependant que, dans le cas du montage en étoile, que le centre de cette dernière soit accessible pour la mesure de la tension et que, dans le cas du montage en triangle, que l'un des côtés du triangle soit à la disposition de l'opérateur pour y intercaler la bobine en gros fil pour la mesure de l'intensité. Dans tous les autres cas, il est toujours nécessaire de faire au moins deux lectures, en se servant soit d'un seul wattmètre que l'on installe successivement sur chacun des deux circuits, soit, ce qui est préférable, en utilisant deux instruments disposés comme il a été dit plus haut et sur lesquels les lectures se font simultanément. Si la charge est inductive, les deux indications ne sont plus identiques, mais leur somme fait connaître encore la puissance totale.

Dans le cas d'un système triphasé également chargé et dont le point neutre est inaccessible, on peut créer un point neutre artificiel en montant en étoile trois résistances égales et non inductives sur les trois conducteurs. En plaçant alors la bobine en fil fin du wattmètre en dérivation sur le point neutre artificiel et un des fils de la ligne, la puissance moyenne est égale à $3 W$, que la résistance soit inductive ou non.

On peut aussi faire trois lectures en changeant de branche chaque

fois pour les résistances additives et en prenant la moyenne des résultats obtenus.

Dans la méthode des deux wattmètres, on peut déduire de la comparaison des indications données par les deux instruments, la mesure du déphasage, ainsi que M. Miet l'a démontré. Cette méthode est également applicable au cas de triphasé non équilibré.

Examinons d'abord la question d'un système triphasé équilibré.

Soient OI_a , OI_b , OI_c , les trois vecteurs figurant les intensités sur les trois phases, et de même OE_a , OE_b , OE_c les trois vecteurs de la tension étoilée (fig. 1610).

Si B et C sont les deux phases traversant respectivement les deux circuits série des wattmètres, ces deux instruments mesurent, l'un, le produit de OI_b par la projection γ de la tension composée E_aE_b sur le vecteur I_b , et l'autre, le produit de OI_c par la projection β de la tension composée E_cE_a sur le vecteur I_c .

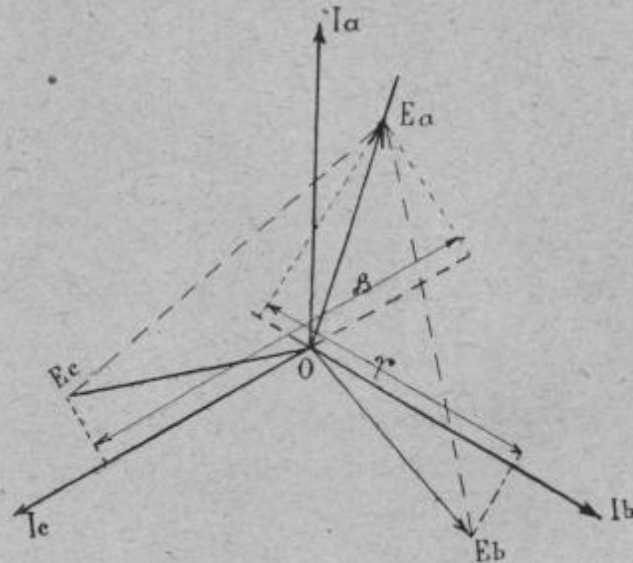


FIG. 1610.

Puisque nous avons $I_a = I_b = I_c$, appelons I la longueur commune et disons que les indications des deux wattmètres sont respectivement $I\beta$ et $I\gamma$.

Nous cherchons la relation qui lie $I\beta$ et $I\gamma$ à l'angle φ .

Appelons E la longueur commune des trois vecteurs OE_a , OE_b , OE_c , on a :

$$\beta = E \cos \varphi + E \cos \left(\frac{\pi}{3} - \varphi \right),$$

$$\gamma = E \cos \varphi + E \cos \left(\frac{\pi}{3} + \varphi \right),$$

ou :

$$\frac{\beta}{E} = \cos \varphi + \cos \frac{\pi}{3} \cos \varphi + \sin \frac{\pi}{3} \sin \varphi,$$

$$\frac{\gamma}{E} = \cos \varphi + \cos \frac{\pi}{3} \cos \varphi - \sin \frac{\pi}{3} \sin \varphi;$$

or,

$$\cos \frac{\pi}{3} = 0,5 \quad \text{et} \quad \sin \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

de là :

$$\frac{\beta}{E} = 1,5 \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi,$$

$$\frac{\gamma}{E} = 1,5 \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi;$$

additionnant, puis soustrayant membre à membre :

$$\frac{\beta + \gamma}{E} = 3 \cos \varphi,$$

$$\frac{\beta - \gamma}{E} = \sqrt{3} \sin \varphi;$$

de là :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\beta - \gamma}{\beta + \gamma} \sqrt{3}.$$

Nous passons maintenant au cas d'un système triphasé non équilibré, et alors I_a , I_b , I_c sont différents.

Nous admettons que le défaut d'équilibre n'est pas tellement accentué que les trois tensions OE_a , OE_b , OE_c soient sensiblement inégales.

Nous aurons encore, comme ci-dessus :

$$\frac{\beta}{E} = 1,5 \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi,$$

$$\frac{\gamma}{E} = 1,5 \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi.$$

Mais ici, les lectures ne sont plus proportionnelles simplement à β et γ , mais à $I_c \beta$ et $I_b \gamma$.

On a :

$$\frac{I_c \beta}{E} = I_c \left(1,5 \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right),$$

$$\frac{I_b \gamma}{E} = I_b \left(1,5 \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right);$$

posons :

$$\frac{I_b}{I_c} = k,$$

et divisons membre à membre :

$$\frac{I_c \beta}{I_b \gamma} = \frac{1}{k} \frac{1,5 \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi}{1,5 \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi}.$$

qu'il reste à résoudre par rapport à φ . Cette équation peut s'écrire :

$$\frac{1,5 \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi}{1,5 \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi} = k \frac{I_c \beta}{I_b \gamma};$$

posons :

$$1,5 \cos \varphi = m, \quad \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi = n.$$

On a :

$$\frac{m+n}{m-n} = k \frac{I_c \beta}{I_b \gamma}.$$

On en tire :

$$\frac{2m}{2n} = \frac{k I_c \beta + I_b \gamma}{k I_c \beta - I_b \gamma}$$

ou :

$$\frac{3 \cos \varphi}{\sqrt{3} \sin \varphi} = \frac{k I_c \beta + I_b \gamma}{k I_c \beta - I_b \gamma},$$

de là, enfin :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k I_c \beta - I_b \gamma}{k I_c \beta + I_b \gamma} \sqrt{3}.$$

Si donc on appelle B et C les deux lectures données par les wattmètres, et k le rapport $\frac{I_b}{I_c}$ des indications que donneront deux ampèremètres qui, exacts ou non, devront simplement être d'accord entre eux, on a, d'une manière générale, que le circuit soit équilibré ou non :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{kB - C}{kB + C} \sqrt{3}.$$

Cette méthode est facilement applicable aux compteurs ou aux doubles wattmètres de tableaux, auxquels il suffira d'ajouter une paire de boutons poussoirs interrupteurs destinés à couper à volonté, pendant un instant, l'une ou l'autre des dérivations alimentant les bobines à fil fin des deux éléments du double wattmètre.

La maison Olivetti, de Milan, construit un appareil wattmètre indicateur et enregistreur à relais établi sur le même principe que celui de l'électrodynamomètre à torsion. L'instrument est constitué essentiellement par une spirale ampèremétrique en série, fixe, et une spirale voltmétrique en dérivation, placée dans le champ produit par la première. Lorsque le courant passe dans la spirale mobile, celle-ci est sollicitée par une force proportionnelle à l'énergie de ce courant même,

qui est contre-balançée par la torsion d'un ressort qui à chaque instant tend à repousser l'équipage mobile à la position du zéro. Ce résultat est obtenu par le fait que l'autre extrémité du ressort est sollicitée par l'action automatique d'un petit moteur électrique, qui est en repos toutes les fois que l'action du courant sur l'équipage mobile fait équilibre à la torsion du ressort. Mais, dès que cette action devient inégale au couple de torsion du ressort, l'armature du petit moteur tend à tourner dans un sens ou dans l'autre, de manière à reconduire toujours l'équipage mobile à la position du zéro.

Cet appareil, à l'aide de connexions convenables, peut aussi servir à mesurer la puissance dans un circuit monophasé ou dans un circuit à courant continu. Avec des connexions spéciales on peut ainsi obtenir la puissance de deux circuits séparés quelconques. Il est intéressant de remarquer qu'aucun des éléments qui constituent l'appareil n'offre de constantes qui puissent varier avec le temps : on obtient ainsi des indications exactes et identiques aussi bien pour les courants alternatifs que pour les courants continus, ce qui permet de faire l'étalonnage à l'aide de courant continu. Enfin, la faible quantité de courant absorbé par les spirales voltmétriques (0,02 ampère) offre le moyen d'insérer directement les spirales sur des circuits à très haut voltage par l'adjonction de grandes résistances dépourvues de self-induction et de coefficient de température, sans qu'il soit nécessaire de recourir aux transformateurs de potentiel qui rendent évidemment les appareils de mesure beaucoup moins exacts.

MM. Chauvin et Arnoux ont cherché à établir un modèle de wattmètre de précision portatif et à lecture directe (*fig. 1611*), en se donnant comme programme : 1° que les déviations de l'aiguille doivent être proportionnelles à la puissance mesurée et rester pratiquement indépendantes de la fréquence ou de la forme des courbes de courant et de tension ; 2° que les indications ne puissent être troublées ni par les variations de température, ni par la présence de conducteurs amenant le courant principal dans le wattmètre, ni par les courants de Foucault pouvant se développer par induction dans les masses métalliques de l'instrument ; 3° qu'enfin l'inductance du cadre mobile doit être aussi faible que possible, de même que l'induction mutuelle entre ce circuit et la bobine ampèremétrique doit être fort réduite et rester pratiquement indépendante des positions relatives des bobines fixes et mobiles. Cet instrument est basé sur les actions électrodynamiques. Un cadre ampèremétrique fixe traversé par le courant principal entoure un cadre mobile recevant un courant proportionnel au voltage.

Le cadre ampèremétrique comprend dans ce modèle deux bobines de forme rectangulaire pouvant être couplées à volonté en série ou en

quantité. Ces deux bobines sont placées de part et d'autre d'une bobine mobile constituée également de deux parties symétriques, montées en série, collées sur une plaque de micanite. L'axe de la bobine mobile soigneusement pivoté est relié mécaniquement à une aiguille horizontale.

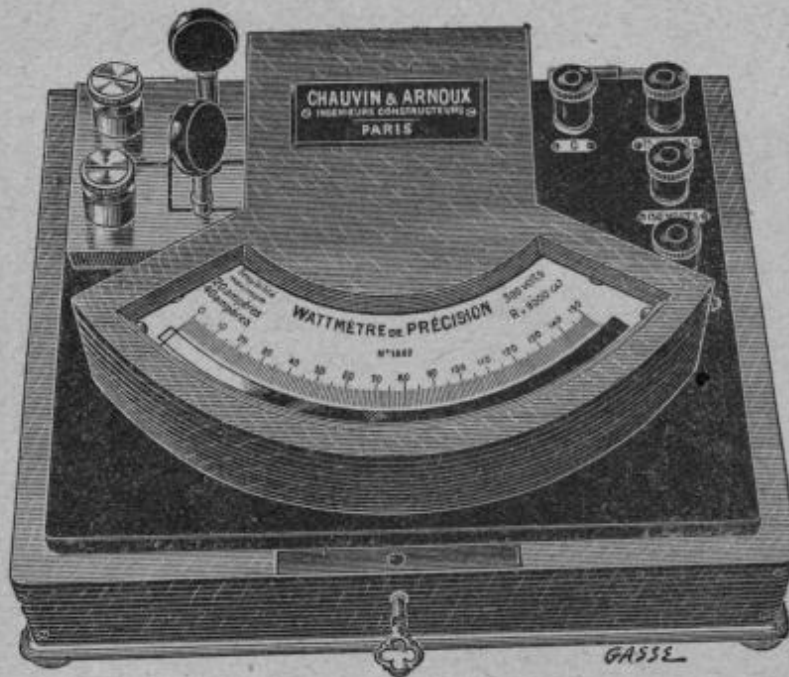


FIG. 1611. — Wattmètre de précision Chauvin et Arnoux.

Cette aiguille, équilibrée par un contrepoids, porte un amortisseur d'oscillation composé d'une plaque de mica très légère se déplaçant dans une chambre à air à faible jeu. L'extrémité de l'aiguille se présentant de champ à la lecture, on peut obtenir des observations très précises, non entachées d'erreurs de parallaxe.

Deux spiraux, agissant en sens inverse afin de bien fixer la position d'équilibre pour toutes les positions de la bobine mobile, permettent d'opposer un couple résistant au couple moteur électrodynamique, couple résistant qui peut être corrigé à l'aide d'une vis.

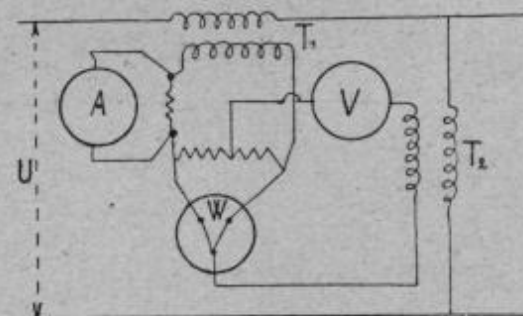


FIG. 1612.

Du côté droit se trouvent les bornes du circuit dérivé, la borne commune 0, et les bornes 30, 75 et 150 volts correspondant avec diverses sensibilités pour les tensions. Du côté gauche est placé le coupleur des bobines ampèremétriques. Dans les wattmètres de petit

calibre, le couplage de ce dernier se réalise au moyen de chevilles ; dans les modèles de grande intensité, on emploie des barrettes et des écrous.

Dans un tableau à haute tension renfermant ampèremètre, voltmètre et wattmètre on peut grouper les appareils de façon à n'employer, selon le schéma représenté par la (fig. 1612), que deux transformateurs, un pour l'intensité (T_1), l'autre pour la tension (T_2).

Wattmètres Weston. — Nous rappellerons d'abord que les appareils du Dr Weston, pour tableaux de distribution, sont avec enveloppe extérieure en fer, pour leur protection contre les champs magnétiques extérieurs, ce qui conduit logiquement à une augmentation du diamètre de la boîte de l'appareil.

Le wattmètre monophasé se compose de deux bobines qu'on peut centrer exactement et d'une façon définitive sur deux montants qui servent en même temps à supporter l'équipage mobile. La masse de ces montants constitués par un alliage spécial est aussi faible que possible, ce qui permet de réduire les courants de Foucault à un point tel qu'ils sont pratiquement négligeables.

La bobine mobile a une grande rigidité et deux petites goupilles assurent la position exacte sur l'axe, après centrage.

L'aiguille est constituée de façon à éviter les phénomènes d'oscillations et de résonances qui se produisent dans certains appareils lorsque la fréquence varie dans les proportions normales en service industriel. Ainsi ils peuvent être soumis à des fréquences variant de 15 à 900 périodes par seconde sans manifester ce phénomène d'oscillations.

Le wattmètre polyphasé est au fond constitué par deux wattmètres monophasés superposés et les détails de construction sont les mêmes.

578. Détermination du $\cos \varphi$. — On peut obtenir la valeur du facteur de puissance d'un circuit de différentes façons que nous allons exposer très succinctement.

Lorsqu'on connaît la f. é. m. eff. et l'une de ses composantes on pose la relation :

$$\cos \varphi = \frac{E_1}{E};$$

E , f. é. m. initiale, et E_1 , f. é. m. induite en phase avec le courant ou f. é. m. résultante. Appelons E_2 la f. é. m. de self-induction, décalée de $\frac{\pi}{2}$ avec le courant I et de $\frac{\pi}{2} + \varphi$ avec la f. é. m. eff. initiale E , R la résistance du circuit. Supposons connues les grandeurs E , E_1 , E_2 et construi-

sons (fig. 1613) un triangle avec des côtés respectivement proportionnels à chacune des valeurs, nous aurons :

$$E_1 = E \cos \varphi \quad \text{et} \quad E_2 = E \sin \varphi.$$

Connaissant la valeur de E *a priori*, il s'agit de déterminer E_1 ou E_2 , et alors on pourra construire le triangle rectangle ABC et trouver la valeur de φ .

Nous savons que :

$$RI = E_1 \sin (\omega t - \varphi).$$

Cela montre que E_1 maximum est égal à RI maximum et que, par déduction, $E_{\text{eff}} = RI_{\text{eff}}$.

Par conséquent si, dans le circuit soumis à la différence de potentiel E_{eff} , on mesure en même temps que I_{eff} la valeur de R , on pourra déterminer

$E_1 = RI_{\text{eff}}$ et construire le triangle ci-dessus, duquel on tirera la valeur de $\cos \varphi$.

La détermination de E_2 peut se faire, au contraire, avec les moyens dont on dispose dans l'industrie d'une façon beaucoup plus précise que la détermination de la résistance du circuit servant par suite au calcul de E_1 .

Il faut, dans ce cas, former un circuit semblable à celui dont on veut obtenir les constantes et fermer ce circuit sur un voltmètre statique, qui mesurera ainsi la f. é. m. eff. d'induction du circuit principal. Cette valeur de E_2 ainsi obtenue sera d'autant plus rigoureuse que le circuit du voltmètre statique épousera davantage la forme du circuit principal. Ayant ainsi la valeur de E_2 , la construction du triangle donnera celle de $\cos \varphi$. Ce moyen peut être employé quand l'appareil récepteur est à proximité du tableau de distribution, tel que l'installation d'un moteur électrique d'un four électrique.

Une autre méthode pour la détermination de E_2 , qui évite l'emploi d'instruments spéciaux, consiste à substituer à l'appareil récepteur un conducteur de résistance à peu près nulle, lequel ferme le circuit sur les appareils de mesure du tableau de distribution qui alimente la dérivation dont on veut connaître le décalage. Le courant passant dans la canalisation ainsi constituée effectuera le même parcours que le courant normal d'alimentation de l'appareil récepteur en observation (moteur, four, etc.). On élève la tension aux bornes de la canalisation jusqu'à ce que le cou-

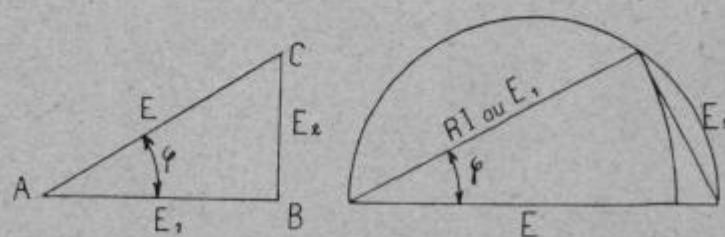


FIG. 1613.

rant atteigne le courant normal de l'appareil récepteur. La résistance du circuit étant nulle, la f. é. m. nécessaire à la production du courant égal au courant normal représentera E_2 . En faisant varier la tension aux bornes et en mesurant en même temps la différence de potentiel aux bornes et le courant dans le circuit, on obtient les valeurs de E_2 correspondant à chaque valeur de I . On peut également faire plusieurs lectures à différentes fréquences et avoir ainsi expérimentalement les valeurs de E_2 correspondant aux valeurs respectives de I et de ω . Connaissant E_2 et E , on détermine $\cos \varphi$ par la construction du triangle comme ci-dessus.

On peut aussi calculer directement la valeur de $\cos \varphi$ par la relation :

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \frac{E_2^2}{E^2}}$$

La détermination du $\cos \varphi$ s'obtient aussi par une construction graphique des courbes de E et de I . A cet effet si, entre deux points du circuit en observation, on dispose une résistance sans self R , on a aux bornes de R une f. é. m. e en phase avec I .

Alors, avec un appareil quelconque, oscillographe ou ondographe, on enregistre e et E au même temps t de la période, et le décalage entre les deux courbes représente exactement celui entre E et I , et l'on en déduit la valeur de $\cos \varphi$. Il faut avoir la précaution de choisir comme résistance sans self une résistance ayant une grande résistivité pour que la valeur de L soit très petite par rapport à celle de R .

Connaissant pour un régime donné la valeur de $\cos \varphi$ pour un circuit, on peut se proposer de calculer, pour ce même circuit, la valeur nouvelle du décalage, soit $\cos \varphi'$ pour un autre régime quelconque. On applique alors la formule :

$$\cos \varphi' = \sqrt{1 - \frac{I'^2 \omega'^2 E^2}{I^2 \omega^2 E'^2} (1 - \cos^2 \varphi)}$$

I , intensité efficace ; E , f. é. m. efficace aux bornes ; I' , intensité efficace, et E' , f. é. m. efficace du courant correspondant à la valeur nouvelle du décalage.

Pour le cas où l'intensité seule varie, on a :

$$\cos \varphi' = \sqrt{1 - \frac{I'^2}{I^2} (1 - \cos^2 \varphi)}$$

Si l'intensité varie en même temps que la tension :

$$\cos \varphi'' = \sqrt{1 - \frac{I'^2 E^2}{I^2 E'^2} (1 - \cos^2 \varphi)}$$

Et si la fréquence seule varie :

$$\cos \varphi'' = \sqrt{1 - \frac{\omega'^2}{\omega^2} (1 - \cos^2 \varphi)},$$

$\omega = 2\pi \sim (\sim, \text{fréquence du courant})$.

Lorsqu'on désire connaître l'intensité maxima I' que l'on peut faire passer dans un circuit sans changer la tension ni la fréquence, auquel cas, $\cos \varphi' = 0$, on tire des formules ci-dessus :

$$I' = \sqrt{\frac{I^2}{1 - \cos^2 \varphi}}.$$

M. Brilinsky estime, en raison de l'approximation souvent assez médiocre des résultats obtenus dans la détermination du décalage par la méthode des deux wattmètres, beaucoup plus simple d'avoir une table comme celle ci-après donnant le $\cos \varphi$ en fonction des deux wattmètres. Pour des approximations plus précises, on peut les obtenir immédiatement par interpolation, en se servant de la troisième colonne de la table. Quant à la dernière colonne, elle donne les valeurs de $\sin \varphi$, de façon qu'on puisse calculer immédiatement le courant actif et le courant réactif.

$\frac{W_1}{W_2}$	$\cos \varphi$	$\Delta (\cos \varphi) \text{ pour } \Delta \left(\frac{W_1}{W_2} \right) = 0,01$	$\sin \varphi$
1	1		0
0,9	0,996	0,0004	0,090
0,8	0,982	0,0014	0,189
0,7	0,956	0,0026	0,292
0,6	0,917	0,0039	0,398
0,5	0,866	0,0051	0,500
0,4	0,803	0,0063	0,596
0,3	0,734	0,0072	0,682
0,2	0,655	0,0076	0,756
0,1	0,577	0,0078	0,817
0	0,500	0,0077	0,866
- 1	0,427	0,0073	0,904
- 0,2	0,359	0,0068	0,934
- 0,3	0,297	0,0062	0,955
- 0,4	0,241	0,0056	0,971
- 0,5	0,190	0,0051	0,982
- 0,6	0,143	0,0047	0,990
- 0,7	0,102	0,0041	0,995
- 0,8	0,064	0,0038	0,998
- 0,9	0,0304	0,00336	0,999
- 0,95	0,0148	0,00312	1
- 1	0	0,00296	

En créant un déphasage connu entre la tension et le courant dans la bobine à fil fin d'un wattmètre, celui-ci peut servir à déterminer le facteur de puissance d'un système monophasé.

579. Électrodynamomètres. — Électromètres. — Comme pour les wattmètres, ce sont les électrodynamomètres à lecture directe qui ont maintenant la faveur des électriciens. Ils servent de voltmètres et d'ampèremètres. Les voltmètres, à partir de 100 volts, ont leurs indications sensiblement indépendantes de la température et de la fréquence. Les ampèremètres, dont la bobine mobile ne peut supporter le courant total, ont cette bobine mobile en dérivation sur le circuit fixe.

Les indications de ces instruments sont faussées par les champs extérieurs ; dans le cas d'emploi pour les courants continus, il faut faire deux lectures en inversant le sens du courant.

Les électromètres, consommant peu de courant, sont employés pour les hautes tensions, mais leur construction est délicate. Les indications peuvent varier sous l'influence des champs électrostatiques et des étincelles se produisent souvent entre l'aiguille et les plateaux. On recommande d'intercaler des résistances liquides sur le trajet des conducteurs, mais elles ne doivent pas avoir une valeur trop grande.

Ces appareils indiquent les valeurs efficaces, mais leur emploi est limité par la tension maxima de l'onde. On se trouve ainsi amené pour les hautes tensions à employer des appareils volumineux ou à se servir de réducteurs de potentiel. Au lieu d'utiliser ces réducteurs qui absorbent de l'énergie, on peut se servir de capacités mises en série, l'électromètre étant branché en dérivation sur une des capacités.

Il ne faut pas compter pour les électromètres à haute tension sur une exactitude de plus de 2 à 3 0/0 ; ceux à basse tension peuvent être exacts à 1 0/0.

580. Phasemètres. Fréquencemètres. Perméamètres. — Le seul moyen d'avoir exactement la différence de phase entre deux courants est d'employer une méthode oscillographique. A part les cas rares de courants sinusoïdaux, la différence de phase entre les deux maxima est différente de celle des deux passages à zéro, ce qui implique que les phasemètres industriels ne peuvent servir qu'à titre de renseignement.

Les oscillographes sont des plus précieux pour l'étude des courants électriques variables, mais ils sont encore d'un maniement délicat et, en particulier, le système optique ne permet pas d'avoir une bonne image photographique des courbes. Quant à l'ondographe Hospitalier, il a son emploi pour l'inscription de phénomènes périodiques identiques.

L'oscillographe *Blondel* se construit sous deux formes : le modèle à fer doux et le modèle bifilaire. Le galvanomètre à fer doux se compose de deux équipages placés chacun au centre d'une paire de bobines parcourues par le courant étudié. L'appareil permet d'obtenir simultanément et avec leurs phases respectives, deux courbes : différence de potentiel et intensité, différence de potentiel primaire et secondaire d'un transformateur, etc. Le galvanomètre est disposé entre les pôles d'un fort aimant en U. Le tout est placé dans un tube de verre rempli d'huile pour amortir les oscillations.

Le synchronoscope se compose d'un miroir oscillant autour d'un axe horizontal et le miroir est actionné par une came montée sur l'axe d'un moteur synchrone. Un obturateur électrique, en relation avec la came, supprime l'image correspondant à la course de retour au zéro du miroir. L'appareil est disposé pour permettre la photographie instantanée de la courbe du courant.

En combinant l'emploi d'un oscillographe, d'une bobine de self réglable et de condensateurs industriels, on peut déterminer l'équation de la courbe du courant : rang, amplitude et phase de tous les harmoniques.

Tous les électriciens reconnaissent l'utilité d'un appareil précis pour la mesure des déphasages, en particulier pour la conduite des moteurs synchrones. Ceux utilisés à ce jour se classent en appareils mesurant directement l'angle de décalage φ entre la f. é. m. et le courant du phasemètre, en appareils mesurant une fonction de cet angle ($\sin \varphi$, $\cos \varphi$, ou $\tan \varphi$) ou indicateurs de facteurs de puissance, en appareils mesurant la puissance dévattée $EI \sin \varphi$, et enfin en appareils donnant la composante dévattée du courant $I \sin \varphi$.

Il existe dans la classe des phasemètres de nombreux appareils dits oscillographes et ondographes, mais ce sont plutôt des appareils de laboratoire que des instruments de pratique industrielle.

Prenons un phasemètre du type Tuma, comportant un système inducteur F et F_1 parcouru par un courant en phase avec le courant principal et à l'intérieur duquel se trouvent montés, sur un axe horizontal mobile, deux enroulements E et E_1 à 90° l'un de l'autre et alimentés, le premier par un courant en phase avec la f. é. m. de la ligne, le second par un courant décalé de $\frac{\pi}{2}$ sur le premier. Dans ces conditions, si α représente l'angle de l'un des cadres avec la direction des lignes de force inductrices, les couples moyens exercés sur le système mobile s'écriront :

$$\text{Action de } FF_1 \text{ sur } E = C_1 = K \sin \alpha \cos \varphi.$$

$$\text{Action de } FF_1 \text{ sur } E_1 = C_2 = K \cos \alpha \sin \varphi.$$

Sous l'effet de ces couples, l'armature se déplacera jusqu'à une position d'équilibre déterminée par l'égalité :

$$C_1 = C_2,$$

autrement dit par :

$$K \sin \alpha \cos \varphi = K \cos \alpha \sin \varphi \quad \text{ou} \quad \tan \alpha = \tan \varphi.$$

Une aiguille solidaire se déplaçant sur un cadre divisé en degrés et en minutes permettra donc, par une orientation initiale convenable, de lire immédiatement l'angle φ .

Les phasemètres de Korda, de Heiss, de Rossi, Arno, etc., sont des appareils d'induction, basés sur la composition de flux d'égale amplitude émanés de deux bobines concentriques formant entre elles un angle réglable. On prend donc un système inducteur constitué par deux enroulements parcourus par des courants respectivement en phase avec les fonctions périodiques dont on doit mesurer le décalage, puis une armature mobile portant un miroir qui réfléchira sur un écran un point lumineux décrivant le flux résultant. L'opération consistera uniquement à déplacer l'une des deux bobines inductrices jusqu'à la réalisation sur l'écran d'une image circulaire, puis à prendre le supplément de l'angle correspondant.

M. Janet a imaginé un phasemètre électrolytique très simple, par lequel sont inscrites les ondes des fonctions périodiques sur un tambour. La distance mesurée de centre à centre de chacune des lignes ainsi tracées exprime le déphasage.

Les appareils indicateurs de facteurs de puissance Puluj, Morland, Claude, Raylagh, Tuma, etc., reposent sur la composition de mouvements harmoniques de même fréquence, de même amplitude agissant sous un angle quelconque.

Dans le cas particulier où cet angle prend la valeur $\frac{\pi}{2}$, le mouvement résultant devient, comme on sait, circulaire et uniforme. Si les amplitudes sont inégales, la courbe figurative du mouvement est elliptique, et les axes de l'ellipse acquièrent la valeur des amplitudes.

Si enfin la différence de phase s'écarte de $\frac{\pi}{2}$, cette dernière contingence n'est plus satisfaite; les axes de l'ellipse ainsi décrite ne coïncident plus en grandeur ni en direction avec les composantes.

Parmi les types dynamomètres, il faut citer les appareils Siemens, Arno, Ferraris qui reposent sur l'emploi d'un électrodynamomètre dans lequel deux bobines fixes sont parcourues par des courants respectivement en phase avec la f. é. m. et le courant principal, et la substitution

au système mobile d'un enroulement fermé sur lui-même et suspendu dans le plan des deux premiers. Avec l'appareil Siemens, l'on détermine la valeur de $\cos \varphi$, et dans celui d'Arno, celle de $\tan \varphi$; quant à l'appareil Ferraris, il fournit la valeur de $\sin \varphi$.

M. Breitsfield a suggéré une méthode dont l'originalité réside dans l'emploi d'un wattmètre ordinaire pour mesurer le facteur de puissance d'un système triphasé. La bobine série étant placée en série sur une des lignes principales, la bobine dérivation porte une connexion fixe sur cette ligne, et l'on effectue deux mesures en reliant la seconde extrémité restée libre, successivement aux deux pôles (fig. 1614).

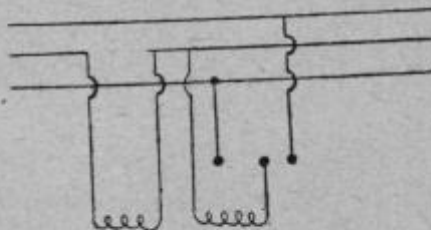


FIG. 1614.

Dans le premier cas on a une déviation :

$$d_1 = EI \cos (\varphi - 30^\circ).$$

Dans le deuxième cas :

$$d_2 = EI \cos (\varphi + 30^\circ).$$

D'où :

$$d_1 - d_2 = 2EI \sin \varphi \sin 30^\circ \quad \text{et} \quad d_1 + d_2 = 2EI \cos \varphi \cos 30^\circ.$$

On en tire :

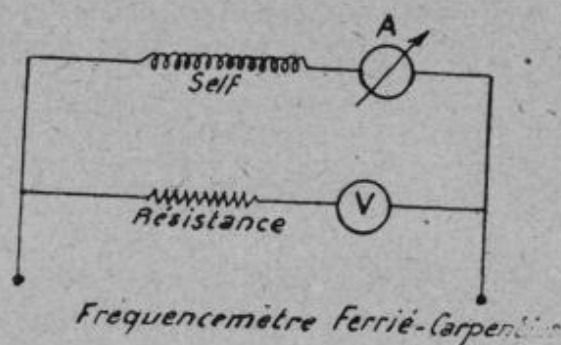
$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2}.$$

Il faut convenir que bien peu des méthodes que nous venons de décrire constituent des procédés véritablement industriels. La mesure de la composante déwattée du courant constituant dans bien des cas une indication suffisante, on se trouve alors en présence d'appareils plus simples, et se présentant sous une forme plus maniable.

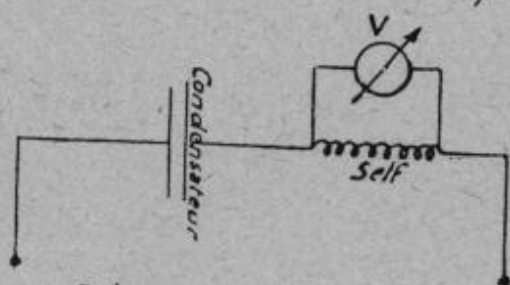
Le dynamomètre Siemens n'indique la puissance $EI \cos \varphi$ qu'autant que le courant principal alimente une bobine et qu'un courant proportionnel et en phase avec la f. é. m. alimente l'autre.

Par contre, si ce dernier est en quadrature avec la f. é. m., l'instrument indiquera $EI \sin \varphi$, la puissance déwattée. La réalisation du courant sera des plus simples ; il suffira d'intercaler en série avec la bobine à fil fin, soit un condensateur, soit une réactance. Dans l'appareil Debrowolski, un compteur d'induction fonctionnant normalement à $\cos \varphi = 1$, le flux

shunt étant en quadrature avec le flux série, la résultante est un champ rotatif. Le couple développé sur un disque métallique placé dans ce champ donne la valeur de $EI \sin \varphi$.



Fréquencemètre Ferrié-Carpentier



Fréquencemètre Martienssen

FIG. 1615.

on étudie la fréquence, l'un comprend une résistance sans self et un ampèremètre à courant alternatif, l'autre une self et un ampèremètre semblable au premier.

Les deux ampèremètres sont disposés de telle façon qu'on peut utiliser pour la mesure le point de croisement de leurs aiguilles. Un réseau de courbes de fréquence est tracé sur le cadran de l'appareil.

Soient alors : e la tension efficace aux bornes des circuits dérivés, i_1 l'intensité efficace dans le premier circuit, i_2 l'intensité efficace dans le second, R_1 la résistance ohmique du premier courant dont la self-induction est négligeable, R_2 la résistance presque négligeable du second circuit et L_2 le coefficient de la self-induction qui est établie de façon que ce coefficient reste constant quand e varie, on a :

$$e = R_1 i_1 = i_2 \sqrt{R_2^2 + L_2^2 \omega^2};$$

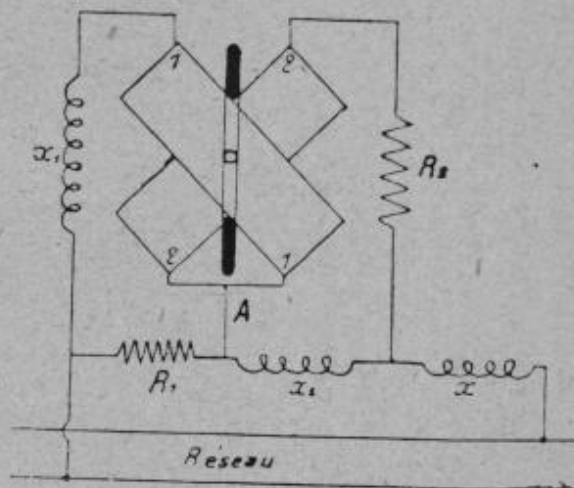


FIG. 1616. — Schéma des connexions du fréquences-mètre électromagnétique de Weston.

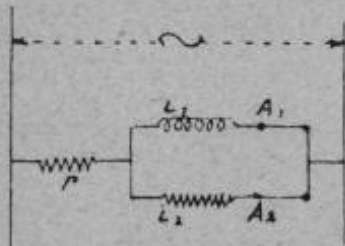
où :

$$\frac{i_1}{i_2} = f(\omega)$$

et :

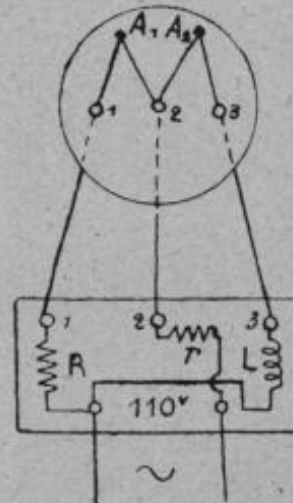
$$\omega = F(i_1, i_2).$$

Il est donc possible de tracer sur le cadran des courbes de fréquence qui



A₁ et A₂ milliampères thermiques

FIG. 1617. — Schéma du montage de fréquence Ferrié-Carpentier.



*R résistance inductive.
L self induction.*

FIG. 1618. — Schéma des connexions du frérencemètre Ferrié-Carpentier.

sont parcourues par le point de croisement des aiguilles qui mesurent i_1 et i_2 quand e varie.

M. H. Smith a imaginé un appareil pour déceler les harmoniques d'un courant alternatif et pour mesurer des inductances. Les harmoniques d'un courant alternatif peuvent être décelés en couplant au circuit en essai, au moyen d'un transformateur, un circuit comprenant une inductance L et une capacité C (fig. 1619) ; on fait varier ces grandeurs jusqu'à ce que la fréquence

naturelle du circuit soit la même que celle de n'importe quel harmonique qu'on désire déceler. L'harmonique est décelé par un

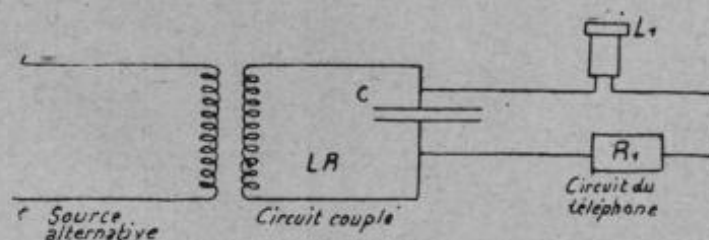


FIG. 1619.

téléphone L_1 placé aux bornes de la capacité. La fréquence de l'harmonique n est donnée par la formule :

$$n = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Pour mesurer des inductances inférieures à un millihenry on opère par substitution ; on accorde d'abord le circuit couplé pour L et C ; on ajuste

dans le circuit l'inductance x à déterminer et l'on fait alors varier la capacité jusqu'à une valeur C_1 pour que l'accord subsiste : on a donc immédiatement :

$$LC = (L + x) C_1,$$

formule d'où l'on peut déduire x .

Le fréquencesmètre Westinghouse est construit de manière à donner une indication continue et exacte de la fréquence du réseau. Il comprend deux électro-aimants de voltmètres identiques qui tendent à faire tourner dans deux directions opposées un disque en aluminium dont l'axe, monté sur rubis, porte l'aiguille. La résistance additionnelle de l'une des bobines est inductive et ces bobines sont disposées de telle sorte que si l'axe tourne dans une direction, le couple de la bobine produisant ce mouvement décroît, tandis que celui de l'autre augmente. Pour une fréquence déterminée, l'axe prend une position d'équilibre stable quand les deux couples sont égaux. Les lectures sont garanties à ± 1 0/0 près lorsque le courant suit une loi sinusoïdale.

Le PERMÉAMÈTRE PICOU est disposé pour éviter les erreurs qui résultent des joints magnétiques entre l'échantillon étudié et la culasse de fer destinée à fermer le circuit magnétique.

La mesure du champ magnétisant \mathcal{B} se fait en observant l'élongation d'un galvanomètre balistique et la détermination d'une courbe complète de l'induction \mathcal{B} en fonction de la force magnétisante \mathcal{H} peut être faite très rapidement et avec la plus grande précision. Le commutateur tournant est amovible et la bobine magnétisante de l'échantillon est construite de telle sorte que le champ magnétisant est de 1 gauss pour 5 milliampères.

Le PERMÉAMÈTRE CARPENTIER est basé sur la constance du facteur démagnétisant, mais afin d'éviter tout calcul et pour réduire les erreurs au minimum, il renferme des bobines de compensation disposées de telle sorte que le simple renversement du courant magnétisant provoque dans un galvanomètre balistique une élongation exactement proportionnelle au champ \mathcal{H} cherché. A l'aide d'un commutateur, le galvanomètre balistique peut être placé dans le circuit d'une autre bobine de façon à obtenir, par un second renversement, la mesure directe de l'induction \mathcal{B} . Avec un galvanomètre gradué jusqu'à 22.000 gauss, on peut pousser les mesures jusqu'à un champ magnétisant $\mathcal{B} =$ à 1.100.

L'HYSTÉRÉSIMÈTRE BLONDEL-CARPENTIER est destiné à la comparaison de l'échantillon essayé avec un autre d'hystérésis connue, le rapport des torsions donnant le rapport des pertes par hystérésis. Il mesure l'hystérésis tournante ; les coefficients sont plus élevés de 25 0/0 environ que

ceux des appareils qui mesurent l'hystérésis alternative. L'approximation des mesures atteint 5 0/0.

Le *perméamètre Esplein-Armagnat* est destiné à la mesure des pertes dans le fer par la méthode du wattmètre. Il se compose d'un ensemble de bobinages constituant un transformateur dont on forme le circuit magnétique par des faisceaux des lames de fer à étudier. Ces bobinages comprennent un enroulement magnétisant et un enroulement secondaire qui sert à alimenter les voltmètres et le circuit à fil fin du wattmètre. En outre, une bobine d'induction mutuelle, placée sur l'appareil, permet de corriger, une fois pour toutes, les erreurs que produisent les flux extérieurs au fer. Ce dispositif réduit au minimum les corrections de la méthode du wattmètre.

L'*ondemètre Ferrié-Carpentier* est un appareil à lecture directe selon le principe appliqué dans l'ohmètre et le fréquencemètre Ferrié-Carpentier. Le courant (fig. 1620) de haute fréquence se partage entre deux circuits dérivés, dont l'un comprend un thermique en série avec une self et l'autre un deuxième thermique en série avec une résistance inductive. Un interrupteur permet de couper le circuit dérivé comprenant la self, de sorte qu'il ne reste au circuit que la dérivation sans induction qui permet de mesurer le courant dans l'antenne et de régler la résonance.

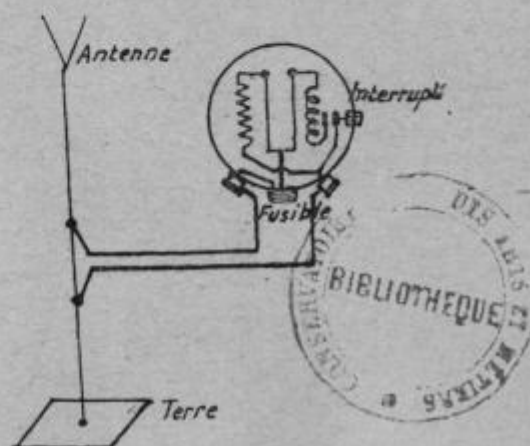


FIG. 1620. — Schéma du montage de l'ondemètre (Ferrié-Carpentier).

581. Transformateurs de potentiels et d'intensité. — Grâce à ces appareils, des courants d'une intensité quelconque peuvent être mesurés avec exactitude à l'aide d'instruments de mesure de faibles dimensions ; on peut employer des ampèremètres et des wattmètres sur les circuits de tension très élevée, et enfin, avec des appareils d'une seule dimension et d'un seul calibre, on peut mesurer des tensions de courants et des puissances de grandeurs quelconques en modifiant convenablement les enroulements des transformateurs, ce qui facilite l'étalonnage et la vérification de ces appareils de mesure.

On insère le circuit primaire dans la ligne dont on veut mesurer le courant, et le circuit secondaire est relié aux bornes de l'instrument de mesure par des conducteurs de faible résistance ; les lectures de l'instrument sont fonction du courant traversant la ligne, et bien qu'il n'y ait pas de rapport constant entre le courant et l'indication de l'appareil, chacune

de ces indications correspond bien à un courant déterminé et un seul. Dans les transformateurs bien proportionnés, le rapport du courant primaire au courant secondaire est presque constant pour toutes les charges entre les limites voulues pour la construction, de sorte qu'il n'est pas nécessaire d'essayer l'instrument avec son propre transformateur, sauf le

cas où il s'agit d'effectuer des mesures de haute précision.

Plus la force magnétomotrice à vide est faible par rapport à la force magnétomotrice totale, plus le facteur de puissance à vide est faible, plus la proportionnalité est constante. On doit donner au circuit secondaire très peu de résistance et très peu de réactance et constituer le courant magnétique avec beaucoup de fer de très bonne qualité et laminé aussi finement que possible.

Pour les transformateurs d'intensité, appelés plus communément *réducteurs*, et qui servent non seulement à la commande des relais de disjonction, mais encore à celle des ampèremètres, compteurs et wattmètres, on n'a pas besoin, jusqu'à 20.000 volts, de plonger leurs enroulements dans l'huile, et l'on a adopté un type à air dans lequel l'enroulement primaire se réduit à un très petit nombre de spires soigneusement isolées de la masse du noyau magnétique et de l'enroulement secondaire.

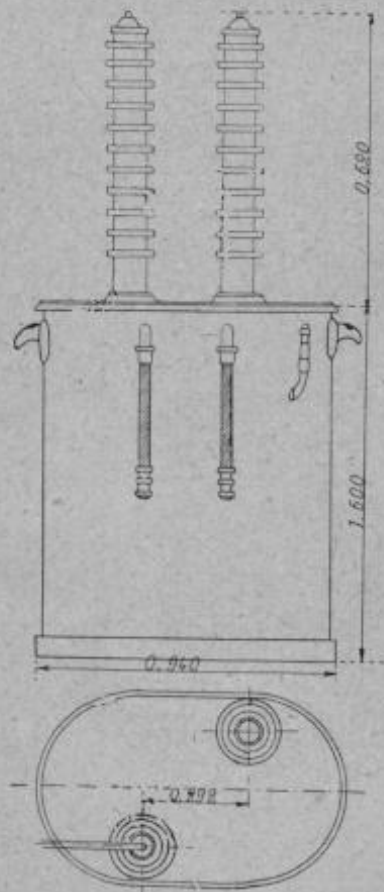


FIG. 1621. — Transformateur de potentiel 55.000/110. (C^{ie} Thomson-Houston).

En général, on attache des pattes au noyau magnétique, et ce sont ces pattes qui servent à suspendre le transformateur. Il ne faut pas perdre de vue que cet appareil doit toujours être placé dans un endroit facilement accessible et qu'il faut en outre le raccorder aux circuits de l'interrupteur d'une manière telle que son remplacement puisse se faire en quelques minutes.

Au-dessus de 20.000 volts, les enroulements des transformateurs d'intensité sont ordinairement immergés dans l'huile, et il faut alors ménager pour ces appareils des espaces suffisamment grands, ce qui oblige le plus souvent à les mettre en arrière des interrupteurs et à même le sol, la sortie du primaire se faisant au voisinage de l'entrée.

Pour les transformateurs de potentiel, l'immersion dans l'huile s'im-

pose dès le voltage de 1.000 volts, car l'enroulement primaire de ces appareils est forcément très volumineux, et il serait bien difficile de leur assurer un isolement suffisant si on les suspendait à une charpente par l'intermédiaire de leur noyau magnétique.

Ils ont, en général, la forme rectangulaire des petits transformateurs monophasés de faible puissance, avec les porcelaines ordinaires d'entrée ou de sortie des circuits.

Certains constructeurs ont eu l'idée heureuse d'adapter sur les couvercles de ces appareils les fusibles de protection dont leurs enroulements primaires doivent être munis : si cette précaution n'existe pas, il faut en effet établir derrière l'interrupteur une petite canalisation monophasée aboutissant aux deux fusibles, ce qui complique un peu les circuits de haute tension.

Plus encore que les transformateurs d'intensité, les transformateurs de potentiel doivent être accessibles et placés dans des endroits d'où il soit facile de les enlever et où le remplacement de leurs fusibles soit aisé.

Ohmètres. — Nous indiquerons les appareils suivants : voltmètre-ohmètre à lecture directe Da et Dutilh, l'ohmètre

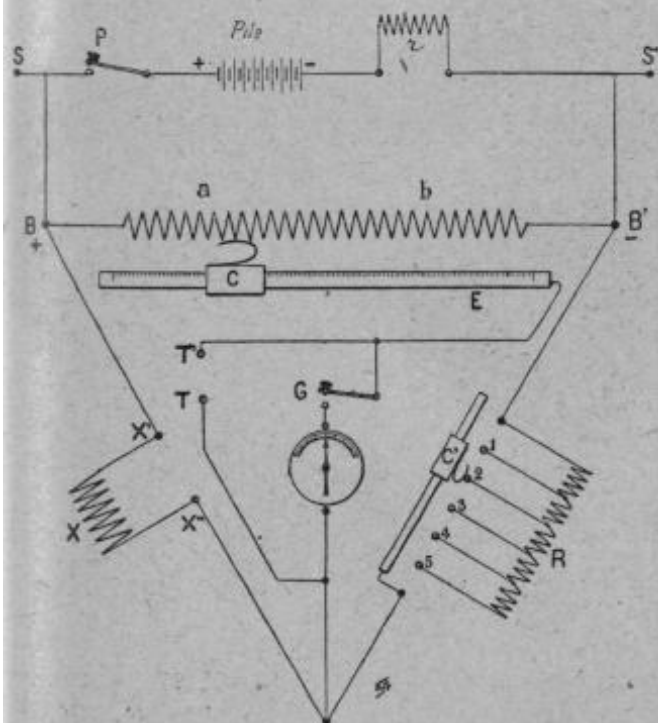


FIG. 1622. — Ohmètre à pont, Chauvin et Arnoux.

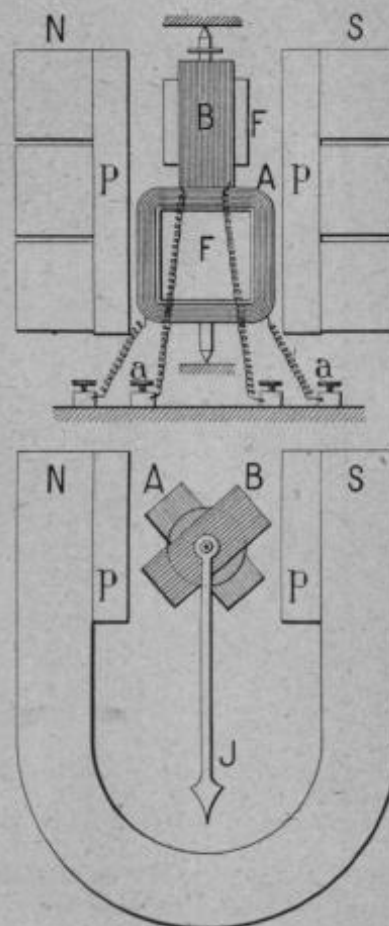


FIG. 1623. — Ohmètre J. Carpentier.

compensé à cadran Chauvin et Arnoux, l'ohmmètre Ferrié-Carpentier,

le mégohmètre Chauvin et Arnoux, l'ohmètre universel Geoffroy et

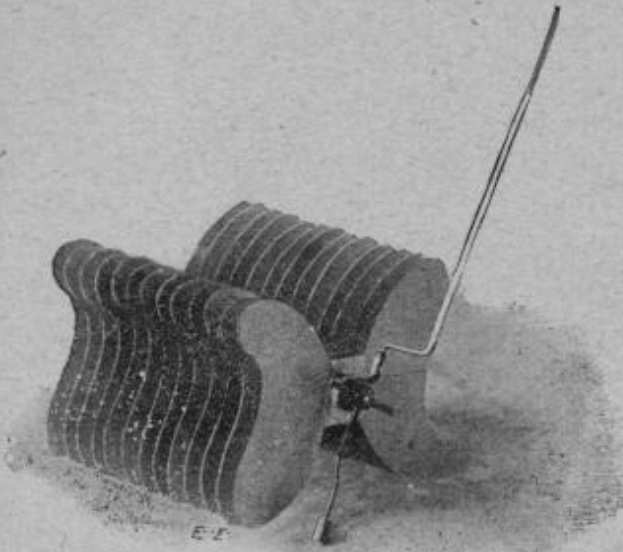


FIG. 1624. — Armature mobile de l'ohmètre, système Cox.

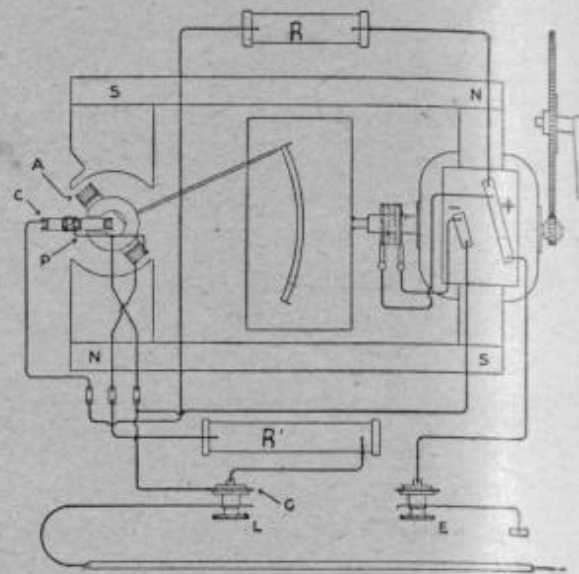


FIG. 1625. — Ohmètre Evershed et Vignoles

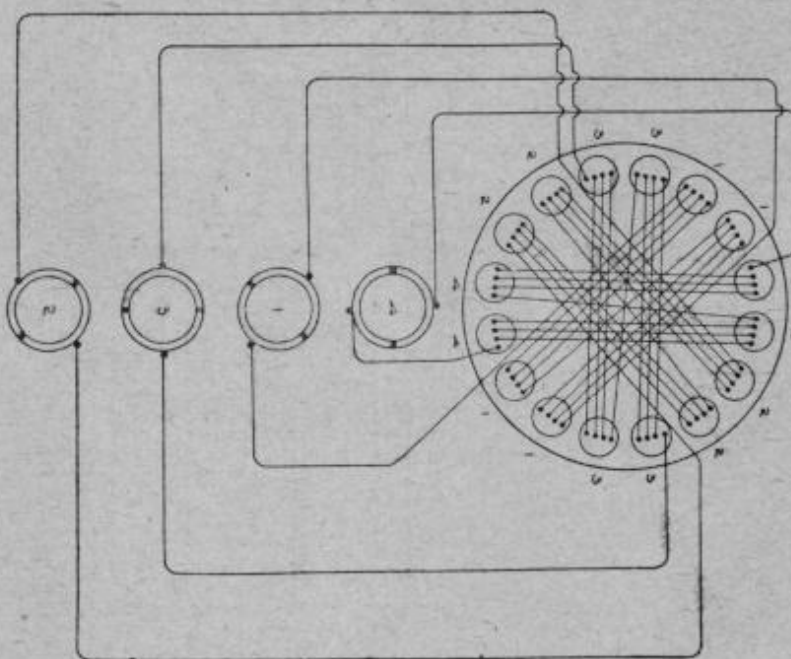


FIG. 1626. — Connexions des bobines de l'induit de la magnéto de l'ohmètre Evershed et Vignoles

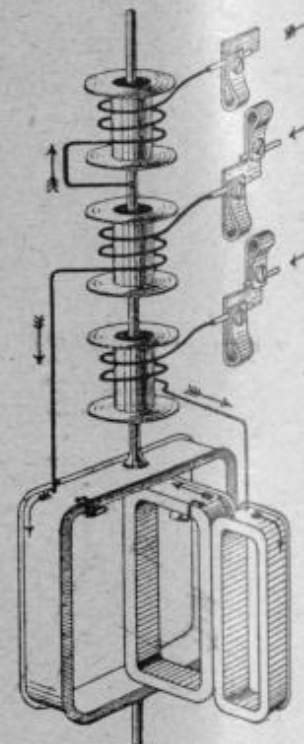


FIG. 1627. — Connexion de l'équipage de l'ohmètre Evershad et Vignoles.

Delore, l'ohmètre à pont Chauvin et Arnoux, l'ohmètre Everthed et Vignoles et l'ohmètre électrostatique Gox.

On peut, à l'aide de ces appareils, mesurer les résistances comprises

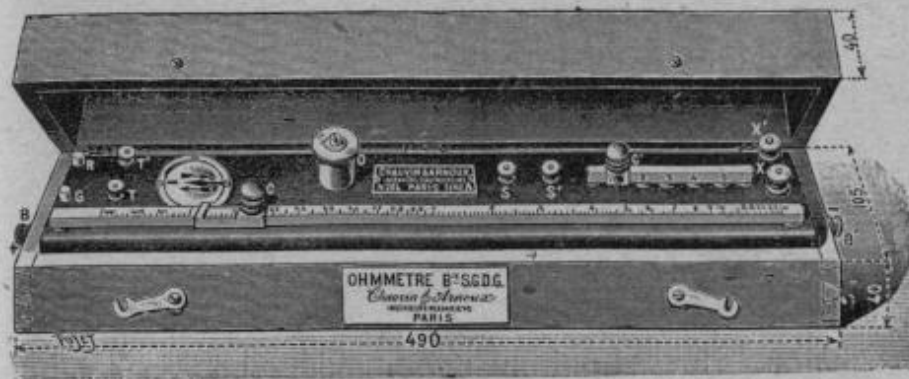


FIG. 1628. — Ohmètre portatif 20 mégohms. (C^os Chauvin-Arnoux.)

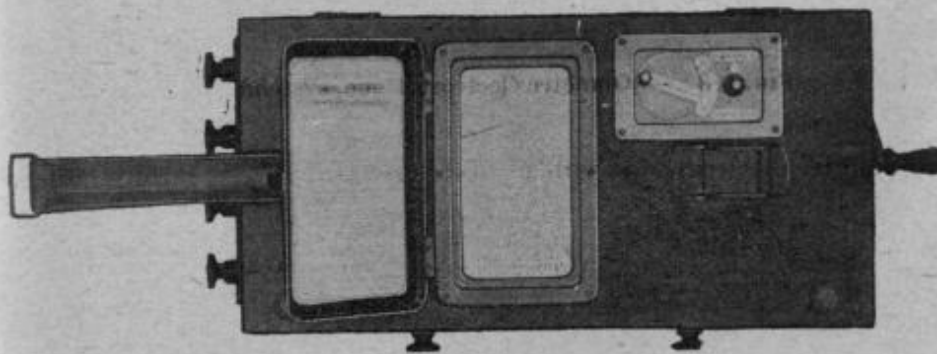


FIG. 1629. — Boîte de l'ohmètre Megger.

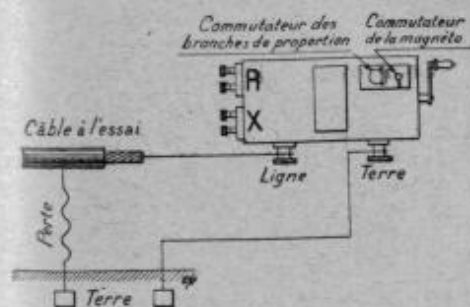


FIG. 1630. — Connexions des conducteurs du circuit dont on veut mesurer l'isolement. (Ohmètre Megger.)

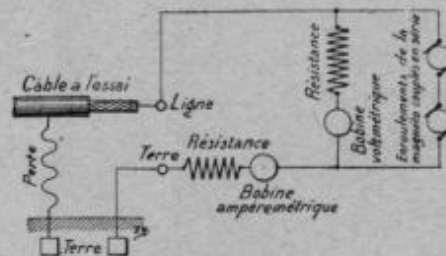


FIG. 1631. — Connexions intérieures de l'ohmètre Megger.

entre 0,1 ohm et 10 mégohms et l'on peut apprécier sans erreur sensible

de 0,02 ohms jusqu'à 50 mégohms. La mesure des tensions comprises

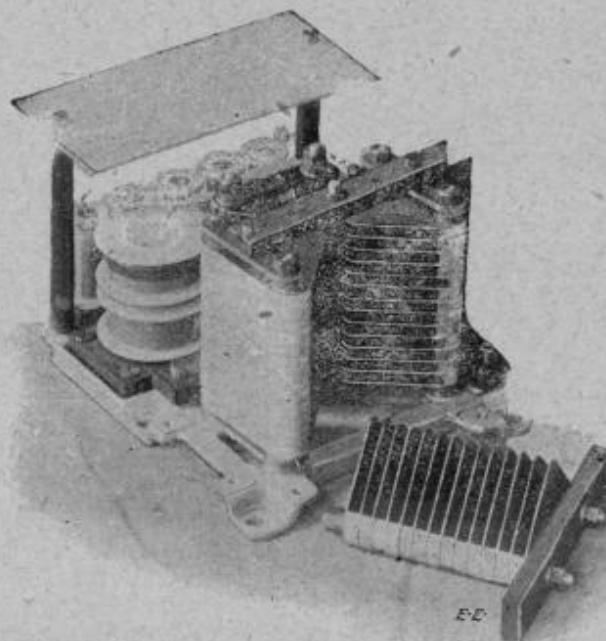


FIG. 1632. — Ohmètre électrostatique, système Cox.

entre quelques centièmes de volt et 500 volts et celle des faibles courants.

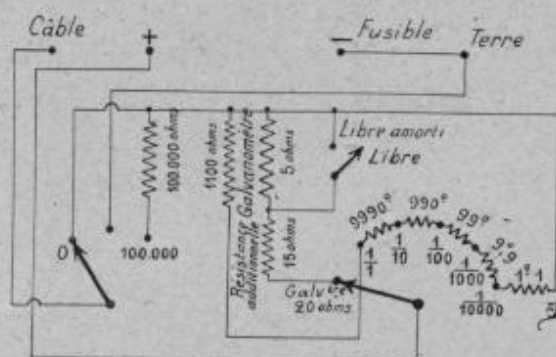


FIG. 1633. — Ohmètre universel, Geoffroy et Delore.

jusqu'à 0,4 ampère, peuvent être opérées très facilement au moyen du même appareil.

II. — COMPTEURS D'ÉNERGIE ET LIMITATEURS DE DÉBIT

582. Types de compteurs d'énergie. — On peut les classer : 1° en compteurs-moteurs (compteurs magnétoélectriques, compteurs dynamo-électriques et compteurs d'induction ou à champ tournant) ; 2° compteurs

à servo-moteurs (compteurs à balanciers et compteurs oscillants ; 3° compteurs électrolytiques ou électro-chimiques.

Les compteurs doivent être exacts dans les limites de la charge entre $1/20$ et $5/4$ de leur charge maximum ; ils doivent démarrer pour une charge très faible ($1/200$ de la pleine charge) et ils ne doivent consommer qu'une faible puissance.

Ces appareils, quant aux causes pouvant affecter leurs indications, se comportent comme les wattmètres.

Mais, pour ces instruments, il est assez difficile d'avoir faible le rapport du coefficient de self à la résistance du circuit dérivé. On constate par suite, dans leur marche, des erreurs variables avec le décalage du réseau.

Les compteurs doivent non seulement être éloignés les uns des autres, mais encore de tout conducteur parcouru par des courants intenses. Les erreurs pour les compteurs sont assez importantes, aussi ne peut-on demander au courant constant qu'une précision de 1 à 2 0/0 et seulement à partir de $1/10$ de la puissance totale du compteur.

En régime variable, sur les réseaux de traction et de transport de force, la mesure exacte de l'énergie est très aléatoire ; il n'est pas rare de constater des erreurs de 10 à 20 0/0, erreurs variables d'un instant à l'autre avec le sens des décalages du courant dans le réseau.

Les compteurs d'énergie et de quantité s'emploient souvent indistinctement dans les réseaux d'éclairage.

Les compteurs moteurs à frein électromagnétique sont les plus nombreux actuellement.

Quelques types de compteurs de ce genre peuvent marcher indifféremment sur courant continu et sur courant alternatif ; d'autres ne sont applicables qu'au courant continu ou au courant alternatif.

Les différents modes de taxation utilisés aujourd'hui dans les centrales ont donné naissance à des appareils appropriés aux tarifications en usage, tels que les compteurs à double tarif, les compteurs à dépassement. Ces derniers répondent à une forme de contrat de vente qui devient très fréquent pour les marchés importants. Il y a enfin des compteurs spéciaux applicables aux batteries d'accumulateurs.

Les compteurs à dépassement, utilisés dans la vente à forfait de l'énergie électrique, se construisent de nos jours de telle sorte que leurs indications sont absolument indépendantes des variations de tension, circonstance qui favorise leur diffusion dans les centrales hydroélectriques. Un bon appareil de ce genre pour courants triphasés est celui construit par la Compagnie continentale pour la fabrication des compteurs. Il peut être réglé très facilement par l'exploitant pour correspondre à des forfaits différents, c'est-à-dire à des points de dépassement différents. Cette facilité de réglage permet à l'exploitant de n'avoir qu'un seul type

de compteur à dépassement pour les différents abonnés : les variations d'intensité correspondant aux différentes consommations sont obtenues avec des transformateurs d'intensité, et le compteur à dépassement est toujours le même, quel que soit l'abonné ; seul, le point de dépassement est à régler suivant la valeur du forfait. On peut, en outre, adapter sur ces compteurs un dispositif de change-tarif qui permet de faire toutes les combinaisons qui intéressent la clientèle des grands réseaux d'électricité.

Le compteur à dépassement de la C^{ie} pour la fabrication des compteurs, spécialement intéressant pour les grosses puissances, est composé d'un

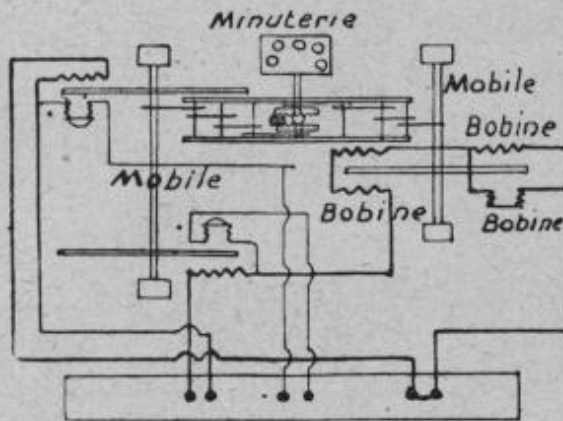


FIG. 1634. — Schéma de compteur à dépassement.

compteur ordinaire cosinus de cette Compagnie et d'un mobile à vitesse constante à champ tournant (fig. 1634). Le travail est absorbé par un frein électro-magnétique pouvant se déplacer sur deux glissières perpendiculairement au socle du compteur. On peut ainsi, en enfonçant plus ou moins ce frein, faire varier le nombre de tours du mobile, de façon à lui faire donner la vitesse correspondant à celle du forfait. Entre le compteur et le mobile à vitesse constante est interposé un mouvement différentiel dont le satellite commande la minuterie par l'intermédiaire d'un rochet qui actionne celle-ci, quand il y a déplacement, mais qui glisse lorsqu'il n'y a pas déplacement. Un dispositif spécial de cliquet empêche d'ailleurs la minuterie de tourner en sens inverse, et cette dernière ne commence à enregistrer que lorsque le compteur dépasse la vitesse du forfait qui est celle du mobile à vitesse constante.

La constante du réglage est la même que celle du compteur, soit C , et la vitesse se calcule par la formule de réglage :

$$W = C \times \frac{N}{T},$$

W nombre de watts du forfait, N le nombre de tours de disque pendant le temps T .

M. Armagnat a constitué un compteur pour la mesure du glissement des moteurs asynchrones, par la réunion de deux compteurs de tours à vis tangente, dans lesquels, lorsque les compteurs sont au repos, les rouages

sont éloignés chacun de leurs vis tangentes respectives, tandis qu'ils sont mis en prise simultanément, lorsqu'on presse sur un bouton spécial.

On peut mesurer : 1° la vitesse angulaire d'un moteur quelconque ; 2° la fréquence d'un courant alternatif et 3° la mesure du glissement d'un moteur asynchrone. Cet instrument est construit par MM. Da et Duthil.

Le besoin du compteur pour les petits et moyens abonnés, avec les mêmes conditions qu'autrefois, existe toujours, mais la vente en gros de puissances importantes à des industriels, en vue d'applications mécaniques, à des Compagnies de traction, ou même à des exploitants de secteurs qui la revendent au détail, exige que ces appareils satisfassent à d'autres conditions.

D'une façon générale, on demande aux compteurs ordinaires qu'ils fonctionnent sans surveillance assidue, qu'ils tiennent peu de place, et qu'ils dépensent le moins possible d'énergie, surtout à vide. Pour répondre aux meilleures conditions de marche, il faut qu'ils soient bien clos, exacts surtout aux faibles charges (sous ce rapport, les compteurs oscillants et ceux du genre O.K. sont particulièrement recommandables), susceptibles d'un bon démarrage, soustraits aux influences des champs magnétiques et à celle de la température dans l'appareil même, et enfin qu'ils aient une minuterie soignée.

Quant aux compteurs pour fortes puissances ou compteurs d'usines, ils exigent plus de perfection dans leur construction ; en particulier, ils doivent pouvoir intégrer très rapidement des charges variables, et être disposés pour recevoir d'une façon rapide les appareils nécessaires à leur étalonnage.

583. Étalonnage et contrôle des compteurs. — Le syndicat des Usines d'Électricité exige que les compteurs satisfassent aux conditions suivantes : démarrage au $1/100$ du débit maximum ; limite d'erreur tolérée, $\pm 5\ 0/0$, limite qui doit être respectée à partir de $1/20$ du débit maximum. Dans le cas du courant alternatif, cette limite doit être imposée pour toutes les valeurs du facteur de puissance supérieure à 0,2 : pour une variation de la tension de $\pm 10\ 0/0$; pour une variation de la fréquence de $\pm 6\ 0/0$. La limite d'erreur de $5\ 0/0$ doit subsister pour toutes les températures comprises entre 0° et 30° . Enfin, dans le cas de compteurs à fils multiples, l'écart maximum entre les ponts ne doit pas dépasser $5\ 0/0$.

Avec une bonne surveillance, la proportion des arrêts n'atteint pas $2\ 0/0$ par an, et les marches à vide sont rares.

Lorsque l'opération de l'étalonnage est faite sous charge constante, et s'il s'agit d'un compteur d'énergie, il suffit de mesurer la puissance au moyen d'un wattmètre et de relever l'indication après un tour de disque ;

on fait débiter le compteur sur des lampes ou des résistances transportables.

Quelquefois, on procède à l'étalonnage des compteurs à l'aide d'un courant transportable, étalonné avec beaucoup de soins au laboratoire, et dont les indications ne sont pas sujettes à varier. Dans le cas de compteurs d'énergie, l'appareil oscillant Aron, avec shunts et, pour les compteurs à quantité, l'appareil O. K. muni de shunts convenables, sont particulièrement indiqués pour ce mode d'étalonnage.

M. Fabry pense qu'on serait en possession d'une méthode plus simple et plus générale en utilisant le principe des wattmètres thermiques ⁽¹⁾.

Le compteur étalon Isaria, de création récente, a son système enregistreur qui peut être embrayé ou débrayé avec l'axe, en appuyant sur un bouton. Ainsi on peut brancher ce compteur en série sans embrayer le système enregistreur avec le compteur à examiner et le mettre en route sous charge, puis on compte un nombre de rotations déterminées sur l'appareil à contrôler, on l'embraye quand on commence à compter et en appuyant sur le bouton enregistreur du compteur-étalon avec l'induit ; on le débraye de la même façon une fois l'observation terminée.

Comme le compteur se met instantanément en mouvement et s'arrête de même, on peut lire à 1/100 de rotation près le nombre de tours du compteur-étalon pendant le nombre de tours observés de l'appareil à examiner, et comparer de suite par kilowatt-heure les compteurs à l'aide des rotations indiquées sur ceux-ci.

Les conditions que doivent remplir les compteurs sont définies par l'arrêté ci-après du 2 juin 1909.

Les compteurs servant à mesurer les quantités d'énergie électrique livrées au public par les concessionnaires ou permissionnaires de distributions publiques d'énergie électrique soumises aux clauses et conditions des cahiers des charges types en date des 17 mai et 20 août 1908, devront

⁽¹⁾ M. R. Franz, professeur à l'École des Monteurs électriciens de Cologne, indique la formule élémentaire ci-après pour l'étalonnage des compteurs.

Soient : K la constante du moteur ou nombre de watts-heures qui doivent passer dans l'appareil pour un tour complet, n le nombre de tours de l'appareil pendant le temps de l'observation, ω les watts mesurés au wattmètre et t la durée de l'opération en secondes, on a :

$$Kn = \frac{t\omega}{3.600}$$

Cette égalité n'existe pas si l'appareil est inexact ; alors on trouve :

$$\frac{Kn}{\omega t : 3.600} = \frac{1}{x} \quad \text{ou} \quad \frac{Kn \times 3.600}{\omega t} = x.$$

La différence de x par rapport à l'unité représente l'erreur de l'instrument ; si par exemple $x = 0,97$, c'est que les indications fournies par le compteur sont erronées de 0,03 ou 3 0/0 en moins.

satisfaisant, par application de l'article 16 desdits cahiers des charges, aux conditions ci-après énumérées :

ARTICLE PREMIER. — *Définition du type.* — Le type de compteur est défini par ses dessins de construction.

Sont considérés comme de même type les compteurs de calibres différents, construits sur les mêmes dessins et dont les différences ne portent que sur les bobinages qui restent, d'ailleurs, semblablement placés.

Le type peut comporter l'emploi d'appareils accessoires, tels que transformateurs, etc. ; ces accessoires forment partie intégrante du compteur.

Chaque type de compteur porte un nom ; si le même nom s'applique à plusieurs calibres du même type, chaque type porte, en outre, un numéro de série figurant sur les plaques des appareils mis en série.

ART. 2. — *Constitution du dossier de demande d'approbation.* — Le dossier de demande d'approbation contient les pièces suivantes :

1° Les dessins d'exécution à des échelles suffisantes pour en permettre la lecture facile ;

2° Une note descriptive exposant le principe du compteur, décrivant son mécanisme et son fonctionnement, indiquant la manière dont il est paré, dans la mesure du possible, aux différentes causes d'erreur. Cette note doit en outre :

a) Indiquer le détail des bobinages que peut recevoir le type et les calibres correspondants ;

b) Donner la durée de révolution du mobile le plus rapide qui soit nettement visible sur le mécanisme ou sur la minuterie, et la valeur de l'énergie correspondant à un tour exact de ce mobile pour chaque calibre ;

c) Un certificat d'essai délivré par le laboratoire central d'électricité de Paris ou par les laboratoires agréés par le ministre, après avis du Comité d'électricité, donnant les résultats des essais faits sur un compteur du type et portant sur les points énumérés à l'article 3 ci-après.

Le dossier est fourni en trois exemplaires : un en original, pour lequel les dessins sont en calque sur toile, les autres exemplaires pouvant être de simples copies. Les dessins originaux portent une estampille de l'établissement qui a fait l'essai, pour certifier la conformité de ces dessins à l'appareil soumis aux essais.

Les appareils accessoires sont toujours essayés avec le compteur proprement dit correspondant ; toutefois, si ce dernier a été approuvé antérieurement, les essais qui n'intéressent pas l'appareil accessoire n'ont pas à être recommencés ; mais la note descriptive mentionne le type de compteur et la date de son approbation. Une expédition en copie du compteur proprement dit est simplement ajoutée au dossier, mais elle

doit porter le certificat de conformité de l'appareil essayé. Le dessin de l'appareil accessoire est produit en original.

Les pièces sont du format 21 sur 31 centimètres ; les plans sont ramenés à ce même format, par pliage d'abord en parallèle, puis en travers. Le titre est inscrit sur la face apparente du plan replié.

ART. 3. — *Détail des essais.* — Les essais portent au moins sur les points suivants :

1° Essais aux trois régimes : de pleine charge nominale, de demi-charge et du vingtième de charge. Ces essais sont faits dans les conditions suivantes :

- a) Température arbitraire entre les limites 10° et 25° C. ;
- b) Tension arbitraire entre 0,9 et 1 : dix fois la tension nominale ;
- c) Facteurs de puissance arbitraire entre 1 et 0,5 pour l'essai en plein débit ; à demi-charge, un essai pour chacune des valeurs, 1 et 0,5 approximativement ;

Sur les compteurs de 5 hectowatts et au-dessous, un essai au régime de 20 watts est substitué à l'essai au vingtième de charge ;

2° Essais au régime de demi-charge avec des écarts en plus et en moins d'un vingtième sur la valeur nominale de la fréquence ;

3° Essais en surcharge d'un cinquième de la puissance maxima normale ;

4° Épreuve sur la marche à vide ;

5° Essais donnant le régime minimum qui assure un démarrage certain ;

6° Valeur des consommations internes dans chaque circuit ;

7° Essais de court-circuit d'une intensité égale à dix fois le courant maximum normal, limité dans sa durée d'application par le jeu d'un fusible fondant sous un courant double du maximum normal, essai répété cinq fois.

ART. 4. — *Résultats à obtenir.* — Les résultats à obtenir et les tolérances sont fixés comme il suit :

- 1° Essai à pleine charge nominale : erreur relative : $\pm 3\ 0/0$;
- 2° Essai à demi-charge : erreur relative : $\pm 3\ 0/0$;
- 3° Essai au vingtième de charge : erreur relative : $\pm 5\ 0/0$;
- 4° Dans le cas où le compteur comporte un appareil accessoire, cette dernière limite seule est portée à : $\pm 7\ 0/0$;
- 5° Essai au régime de 20 watts : erreur absolue : ± 2 watts ;
- 6° Compteurs à courants alternatifs essayés en demi-charge aux fréquences de 0,95 et 1,05 fois la normale : l'erreur relative ne doit pas différer d'une unité en plus ou en moins de celle obtenue à la fréquence normale ;
- 7° Essai en surcharge d'un cinquième ; le compteur ne doit subir au-

cune détérioration par l'application de cette surcharge pendant une demi-heure ;

8° Essais de démarrage ; les limites supérieures de démarrage franc sont :

a) Pour compteurs de 5 hectowatts et au-dessous : 2 0/0 de pleine charge ;

b) Pour compteurs supérieurs à 5 hectowatts : 1 0/0 de pleine charge ;

9° Consommations internes ; les limites supérieures sont :

a) Dans le fil de dérivation ; sur un courant alternatif :

1,5 watt par 100 volts ;

Et sur un courant continu :

4 watts par 100 volts de tension nominale ;

b) Dans les fils principaux :

Pour compteurs ampère-heuremètres : 0,5 volt à pleine charge ;

Pour compteurs watt-heuremètres supérieurs à 5 hectowatts et au-dessous : 1,5 volt à pleine charge ;

Pour compteurs watt-heuremètres supérieurs à 5 hectowatts : 1,0 volt à pleine charge ;

10° Essais de courts-circuits. — Après l'application des courts-circuits, la valeur de l'erreur relative à demi-charge ne doit pas avoir varié de plus d'une unité.

Nota important. — L'inobservation de l'une quelconque des conditions ci-dessus indiquées entraîne le rejet de la demande d'approbation sans autre examen.

ART. 5. — *Instruction de la demande.* — Le dossier est déposé soit au ministère des Travaux publics (secrétariat du Comité d'électricité), soit entre les mains de l'ingénieur en chef du contrôle des distributions électriques du département. Après avoir vérifié que le dossier présenté satisfait aux conditions prescrites par l'article 2 ci-dessus, le secrétariat ou l'ingénieur en chef donne reçu et le transmet pour examen au Comité d'électricité. L'examen du Comité porte, en outre des conditions stipulées à l'article précédent, sur tous les points qu'il juge utile, et notamment sur les suivants :

Nature de l'isolation ; étanchéité de la fermeture ; facilité d'entretien ; possibilité de vérifier rapidement l'étalonnage sans ouvrir l'appareil ; nature des rouages enregistreurs.

ART. 6. — *Forme de l'approbation.* — L'approbation est donnée, s'il y a lieu, après avis du Comité d'électricité, par un arrêté ministériel qui est inséré au *Journal officiel*.

584. Rôle des limiteurs de débit. — Le compteur constitue une entrave sérieuse pour la diffusion des applications de l'électricité chez

le petit consommateur, et particulièrement chez le petit consommateur rural ; en effet, le compteur est onéreux, et comme achat et comme entretien, surtout dans les installations qui n'ont qu'un petit nombre de lampes et dans lesquelles le taux de l'amortissement de l'appareil ajouté à la facture mensuelle de l'abonné peut monter jusqu'à 50 0/0 de cette facture.

D'autre part, pour l'entreprise, les dépenses d'achat des compteurs peuvent atteindre le quart ou le tiers du prix total de l'installation.

Bien conçu, le limiteur de courant permet de concilier les intérêts du consommateur et offre le moyen de vulgariser l'emploi du courant, vulgarisation dont dépend la prospérité des centrales rurales. Cet appareil, qui est le critérium du tarif à forfait, doit, en limitant le courant à la quantité stipulée, éviter le risque d'une consommation plus grande que celle qui est fixée à l'avance, tout en laissant à l'abonné la liberté de distribuer sa quantité de lumière déterminée selon les besoins ; il doit, en outre, être sensible aux plus petites surcharges, produire la rupture du courant instantanément, offrir une faible résistance ohmique, enfin, joindre à la modicité de son prix une construction robuste et précise.

Les appareils limiteurs employés peuvent se diviser, selon le principe sur lequel ils sont basés, en appareils électromagnétiques et en appareils thermiques, mais ces derniers, en raison de certains inconvénients, n'ont obtenu que peu de succès.

Les premiers consistent, en principe, dans un électro-aimant en série avec l'installation de l'abonné dont l'armature mobile est reliée mécaniquement avec un levier oscillant ; celui-ci porte un contact qui appuie normalement sur une butée et ferme ainsi le circuit d'alimentation. Quand l'intensité en circulation est supérieure à celle qui est réglée par le moyen d'une vis permettant de donner différentes hauteurs à l'armature, celle-ci est attirée, et, dans son mouvement, elle bute contre le levier ; sous cette impulsion, le circuit est coupé. Les interruptions de courant se font ordinairement en employant l'une des trois méthodes suivantes : par extinction totale, par réduction de lumière avec intercalation d'une résistance, par production d'oscillations dans la lumière qui la rendent inutilisable ; ce dernier mode offre l'avantage de ne pas faire appel au concours de l'abonné pour rétablir le circuit ; il opère de lui-même.

585. Types de limiteurs de débit. — Le basculeur *Estrade* (*fig. 1635*) est schématiquement représenté par la figure ci-jointe. Il se compose essentiellement d'un électro-aimant E qui tend à attirer une pièce P fixée à un fléau F, et qui peut osciller autour d'un axe A monté sur un support fixe S. Ce fléau porte à son extrémité une pointe qui plonge

normalement dans une cuvette à mercure C et sert en même temps de conducteur au courant. Celui-ci arrive aux bornes B. Un ressort R contrebalance l'attraction de l'électro, tant que le courant maximum qu'on s'est fixé n'est pas atteint. Lorsqu'on dépasse le maximum de courant, l'électro E attire la pièce oscillante, ce qui relève la pointe du fléau F et rompt le contact dans la cuvette C.

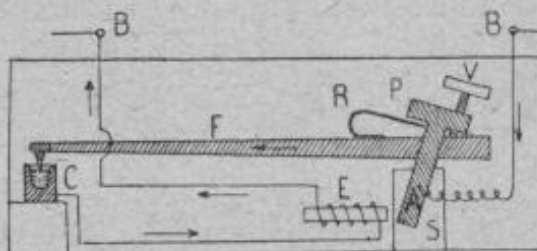


FIG. 1635.

Le contact étant rompu, l'électro se désexcite, ce qui fait retomber le fléau et rétablit le contact. Le courant repasse alors, réexcite l'électro, qui rompt à nouveau le courant. On a ainsi une succession de ruptures et d'ouvertures du circuit qui rend partiquement impossible toute utilisation du courant. Dans le cas d'éclairage électrique, les lampes s'éteignent puis se rallument, pour s'éteindre à nouveau, ainsi de suite, et cela indéfiniment, tant qu'on ne ramène pas le courant à la valeur fixée. Les abonnés qui dépassent leur forfait, par inadvertance ou indécatesse, sont immédiatement et automatiquement rappelés à la stricte observation de leur contrat. Les oscillations de l'appareil sont d'autant plus rapides que la surcharge est plus forte.

Cet appareil est très sensible. Le réglage se fait au moyen d'une seule vis V. En la manœuvrant, on produit un double effet : on déplace le

centre de gravité du balancier, et l'on rapproche l'armature de l'électro. L'axe d'oscillation est situé en dessous du centre de gravité d'où équilibre instable et rupture brusque.

Le limiteur du Dr Paul Meyer, de Berlin, se compose (fig. 1636) d'une bobine d'électro-aimant a qui est parcourue par le courant de consommation. Dès que le courant monte au delà d'une certaine mesure, l'armature en fer b, qui, à l'état de repos, appuie sur deux petits godets à mercure d enfermés hermétiquement dans un tube c, est attirée, et le circuit est interrompu ; alors le client ne reçoit plus de courant. Le flux de force engendré par l'électro-aimant disparaît, et la tige de fer referme à nou-

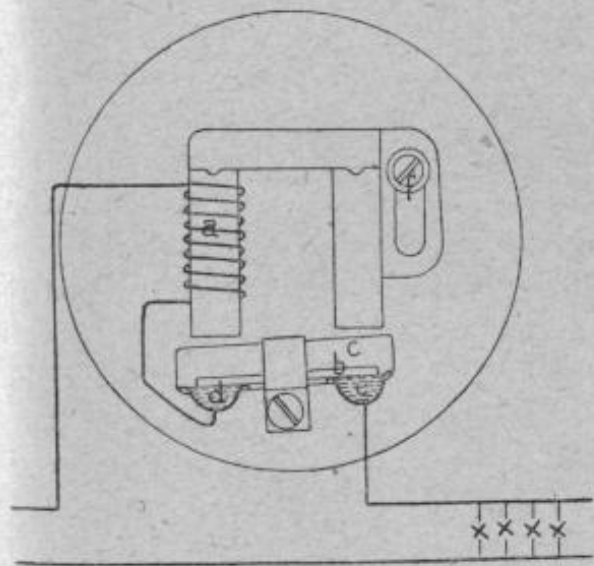


FIG. 1636.

ture d'enfermés hermétiquement dans un tube c, est attirée, et le circuit est interrompu ; alors le client ne reçoit plus de courant. Le flux de force engendré par l'électro-aimant disparaît, et la tige de fer referme à nou-

veau le circuit. Si l'intensité est restée la même qu'auparavant, le jeu se répète et oblige le consommateur à retirer les appareils d'utilisation, lampes ou autres qui sont en trop, après quoi l'appareil reprend sa position de repos. Lorsqu'un consommateur désire augmenter sa consommation

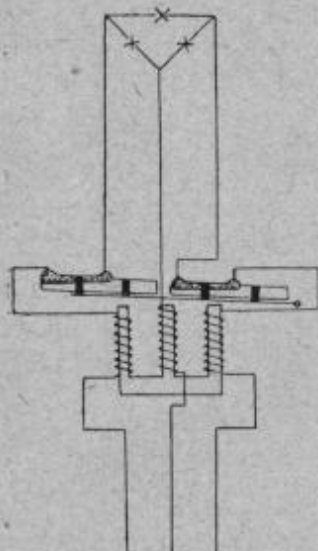


FIG. 1637.

après avoir été abonné au début pour un plus petit nombre de lampes, il suffit de défaire la vis *f* et de relever l'électro-aimant jusqu'à une certaine hauteur, après quoi la vis est de nouveau mise en place et le couvercle de la boîte de l'appareil est replombé. Le limiteur Meyer fonctionne aussi bien avec du courant continu qu'avec du courant alternatif.

On a construit des appareils tripolaires (fig. 1637) pour les réseaux à courant triphasé; leur but est de couper toute l'installation dès que la charge d'une phase quelconque dépasse la quantité prévue par le forfait.

Le limiteur « Electro-Cervera » est à fonctionnement oscillatoire. Une des particularités les plus remarquables de son mécanisme, très étudié, est une interruption spéciale dont le but est de couper définitivement le circuit quand, intentionnellement ou non, on le soumet à un courant dangereux. Il joue le même rôle en cas de court-circuit, ce qui est un avantage indiscutable pour la complète sécurité de l'installation.

Le limiteur de « l'A. E. G. » est aussi à fonctionnement oscillatoire. Il

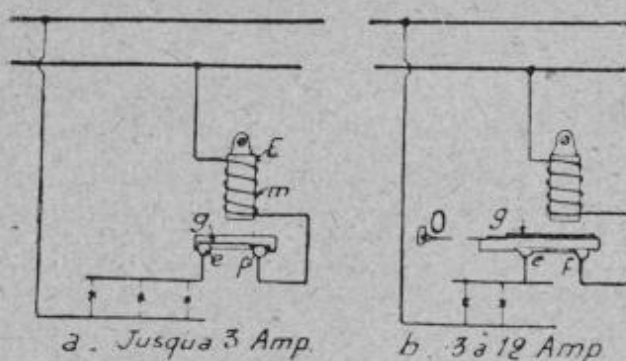


FIG. 1638. — Schéma de montage d'un limiteur de courant associé à un compteur de dépassement.

comprend essentiellement un commutateur, un électro et un balancier à spirale; le commutateur à fourche et la bobine sont connectés en série et reçoivent le courant total. Quand la valeur de celui-ci s'élève au-dessus de la valeur forfaitaire, le processus d'éclipses qui en est la conséquence se poursuit

tant que le courant n'est pas descendu à sa valeur normale. La durée d'oscillation du pendule est calculée de façon qu'il y ait nettement extinction.

Le limiteur « Peloux » (fig. 1639) fonctionne dès qu'il y a dépassement à 2 ou 3 0/0 et il commence à avertir l'abonné de ce fait en produisant de

faibles variations dans la lumière. Ensuite le courant est totalement interrompu pendant un certain temps et rétabli à nouveau.

Les étincelles aux contacts principaux sont très diminuées par une résistance en dérivation et l'appareil est insensible aux variations de température.

Le réglage pour les diverses intensités se fait par une vis placée sous l'armature en fer, destinée à être attirée par l'électro lorsqu'il y a dépassement. Une autre vis permet de faire le réglage pour les interruptions automatiques.

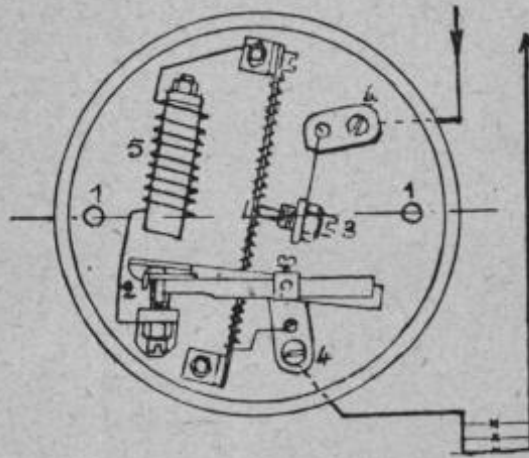


FIG. 1639.

Limiteur Halfeld. — L'appareil se compose d'un tube de verre Q en forme de V renversé contenant une quantité de mercure suffisante pour remplir l'une des branches (fig. 1640). Cette branche du tube est entourée d'une bobine P de grande résistance ; le tout est emprisonné dans une matière formant isolant calorifique, laquelle est versée à l'intérieur d'un récipient en tôle métallique. Par suite de l'élévation de température (80° C.), due au passage du courant dans la résistance P (la consommation de celle-ci étant de 5 watts), le mercure distille lentement dans l'autre branche du tube Q. Si l'on relie les bornes du limiteur d'intensité R à deux fils de platine T et U, soudés au chalumeau au tube Q, on voit que la bobine du limiteur R se trouve être en court-circuit et que, par suite,

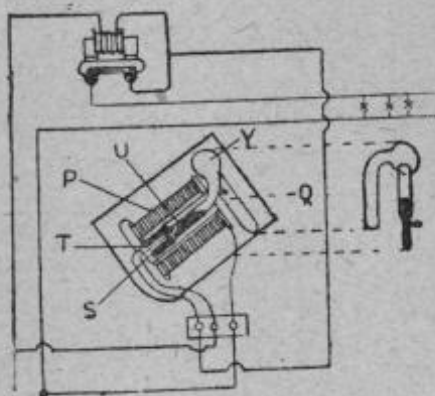


FIG. 1640.

ce dernier ne peut fonctionner tant qu'il y a du mercure dans la branche du tube Q placée à l'intérieur de la résistance P. Lorsque le mercure a presque totalement distillé, c'est-à-dire lorsqu'il ne recouvre plus le fil U, le court-circuit cesse et le limiteur d'intensité est de nouveau prêt à fonctionner. La résistance P est reliée au réseau à l'une de ses extrémités par l'intermédiaire du fil de platine S ; l'autre extrémité est, par contre,

reliée directement et constamment à ce même réseau ; par suite, la distillation du mercure continuant, la connexion S-T est aussi interrompue, ce qui met la résistance P hors circuit. A ce moment, la presque totalité du mercure se trouve dans la seconde branche du tube Q. Pour que le

mercure passe de nouveau dans la première branche, c'est-à-dire pour que le limiteur soit de nouveau mis en court-circuit, l'abonné doit faire tourner l'ensemble de l'appareil de 75° environ dans le plan de la figure et en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Limiteur Pizulli et Ferrari. — Cet appareil, en fonctionnant sur plusieurs réseaux italiens, est caractérisé par son appellation de « raccour-

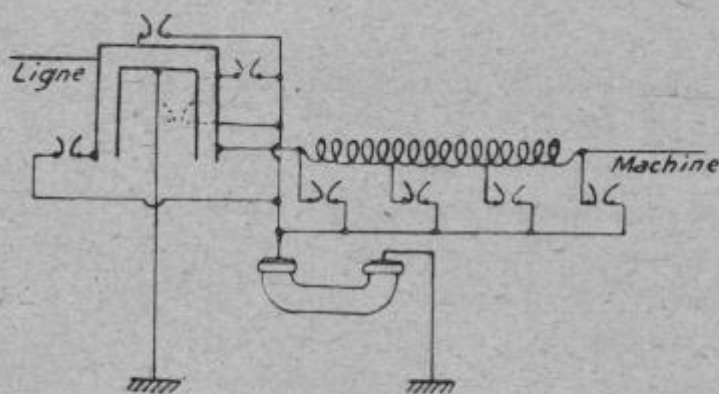


FIG. 1641. — Schéma du limiteur Pizulli-Ferrari.

cisseur d'ondes avec déchargeur multiple » dont la (fig. 1641) donne le schéma de montage (où on distingue les bobines de self, les éclateurs ainsi que la capacité auxiliaire que ce dispositif comporte).

L'appareil a une self-induction et une capacité beaucoup plus grandes que celles de la ligne et on l'installe en série avec elle, de manière que sur l'appareil même, toute une onde vienne à se raccourcir. Il est complété par plusieurs éclateurs.

Limiteur de courant thermique. — Ce type de limiteur ⁽¹⁾ est basé sur la dilatation d'une barrette métallique AB (fig. 1642), dilatation produite par la chaleur qui lui est communiquée par le passage du courant dans un fil isolé enroulé autour d'elle. Par suite de l'allongement de la barrette le support flexible A est déplacé et le levier coudé ACD prend la

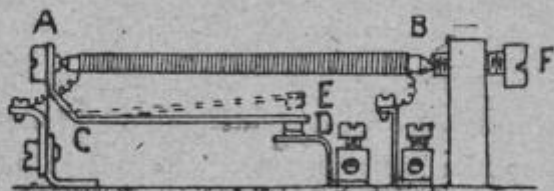


FIG. 1642.

position ACE, ouvrant le circuit en D. Le courant ne passant plus dans le fil entourant la barrette, celle-ci se refroidit et le ressort-support A ramène ACE dans sa position primitive.

L'appareil est enfermé dans une boîte en fonte étanche de 125 millimètres de diamètre, ce qui permet de le placer à l'extérieur; il est muni d'un dispositif de plombage le mettant à l'abri de la fraude.

⁽¹⁾ Construit par l'Appareillage électro-industriel, 24, rue de la Part-Dieu, à Lyon.

Comme appareils utilisant la dilatation d'un fil sous l'action du courant, nous citerons celui construit par la maison Siemens-Schuckert et celui de la Schiersteiner Metallwerk de Berlin.

Les indicateurs de dépense maxima donnent la plus grande valeur du courant consommé par l'abonné, depuis la dernière lecture et remise au zéro de l'appareil. Ils sont utilisés pour l'application du tarif de Wright.

CHAPITRE XXIX

TURBINES A VAPEUR

586. Rôle des turbines à vapeur⁽¹⁾. — Les turbines à vapeur, qui ont pris maintenant une très grande place dans les installations industrielles, principalement pour l'actionnement des machines électriques, jouent dans les questions de houille blanche un rôle important comme machines de secours à vapeur adjointes aux turbines hydrauliques. Dans les centrales à vapeur, elles ont presque détrôné les machines à piston pour l'entraînement des génératrices d'électricité ; d'ailleurs elles s'imposent dans les cas de régimes de marche constant et à pleine charge, où leur rendement industriel est très élevé.

La principale raison du succès de la turbine à vapeur est le remplacement du mouvement alternatif par un mouvement rotatif ; de là résultent à la fois une diminution d'encombrement, une amélioration du rendement mécanique, une constance du couple moteur et enfin une réduction du graissage et de l'entretien. D'autre part, elle permet de construire couramment des unités de 15.000 kilowatts, puissances considérables que la machine à piston ne peut atteindre que difficilement et en tous cas dans des conditions fort dispendieuses. En outre, au point de vue thermique, on peut pousser aussi loin qu'on veut la détente de la vapeur et, de plus, on y utilise bien mieux la surchauffe que dans la machine à piston, car la vapeur se trouve moins réduite par la condensation à l'ad-

⁽¹⁾ HISTORIQUE. — Déjà, en 1629, Branca avait proposé une turbine à vapeur, genre de Laval. En 1827, Réal et Pichon prirent un brevet français pour une turbine à action à étages multiples, et Wilson, en 1848, fit breveter un dispositif où la vapeur était utilisée sur une seule roue, de la même façon qu'une turbine à étages multiples. En 1853, Tournaire présenta à l'Académie des Sciences de Paris, un mémoire sur une turbine à réaction à étages multiples. En 1883, de Laval fit breveter et construire sa première turbine à vapeur et entraînait avec celle-ci une essoreuse. La turbine Ferranti, correspondant au brevet anglais de 1895, peut être considérée comme un des prototypes des turbines à action avec vitesses étagées. La turbine à réaction à éléments multiples doit son véritable développement à C.-A. Parsons (1884). La turbine à action à étages multiples a été appréciée à sa juste valeur, en particulier par Zoelly (1904). M. Rateau s'est également occupé de ce système en utilisant des principes d'exécution absolument différents de ceux de Réal et Pichon (1898).

mission. La turbine à vapeur permet de supprimer les lourds massifs de fondation, l'emploi direct de l'eau de condensation sans entraînement d'huile et enfin d'utiliser un vide très élevé, condition excellente pour le rendement thermique de la machine.

Mais, par contre, la turbine à vapeur exige une vitesse de rotation excessive. La vitesse que prend la vapeur s'écoulant librement, et pour une pression de 12 atmosphères, atteint environ 1.200 mètres par seconde. Ceci conduit théoriquement à une vitesse périphérique de la roue égale à la moitié de cette valeur pour que la vapeur quitte les aubages mobiles sans vitesse ; en tenant compte des pertes par frottement, la vitesse périphérique, dans une turbine à action, peut s'abaisser à 300 mètres, chiffre encore considérable. Toutes les dispositions adoptées devaient donc tendre à diminuer la vitesse de rotation, et c'est à Parsons que revient le mérite d'avoir introduit, à partir de l'année 1884, les premières turbines utilisables.

On construit de nos jours de très grosses unités. Ainsi la South Street Station de la Narraganset Electric Lighting Co de Providence (États-Unis) possède un groupe turbo-alternateur de 45.000 kilowatts, puissance obtenue par le groupement en cross-compound d'une turbine à haute pression et d'une turbine à basse pression. L'alternateur monté sur l'arbre de la turbine à haute pression tourne à 1.800 tours et celui de la turbine à basse pression à 1.200 tours-minute.

La grande usine à vapeur de Windsor (E.-U.) comporte des unités de 30.000 kilowatts alimentées chacune par quatre chaudières ; celles-ci représentent deux batteries distinctes de deux générateurs, disposées face à face de part et d'autre de l'allée centrale desservant la salle de chauffe.

587. Classification des turbines à vapeur. — On divise les turbines à vapeur, selon le mode d'action de la vapeur, en deux grandes classes, savoir : les *turbines à action ou à impulsion* et les *turbines à réaction*. D'autres types participent de ces deux systèmes, de façon à grouper les avantages inhérents à chacun d'eux en un système mixte, à l'effet d'éliminer les défauts que l'un et l'autre présentent. Suivant la direction de la vapeur par rapport à l'axe de la turbine, celle-ci peut être radiale ou axiale, et enfin celle radiale peut être centrifuge ou centripète ; suivant le mode d'injection de la vapeur, qui se fait sur tout ou partie seulement de la surface du récepteur, la turbine est dite à injection totale ou à injection partielle. Par rapport au nombre des éléments, les turbines sont simples ou à éléments multiples. Enfin si le fluide ne remplit pas complètement les canaux de l'aubage de sortie, la turbine est à libre déviation. Les définitions ci-avant montrent que le principe sur lequel reposent les

turbines à vapeur est exactement le même que celui des turbines hydrauliques ; elles sont toutes constituées par deux organes ou séries d'organes principaux : le ou les distributeurs (partie fixe) et la ou les roues (partie mobile).

Toutes les turbines à vapeur modernes, s'accouplant directement à l'appareil qu'elles doivent entraîner, possèdent un certain nombre de distributeurs et de roues motrices placés à la suite les uns des autres et au travers desquels passe le courant de vapeur en faisant expansion et cédant son énergie. Dans les turbines fonctionnant à réaction, la trans-

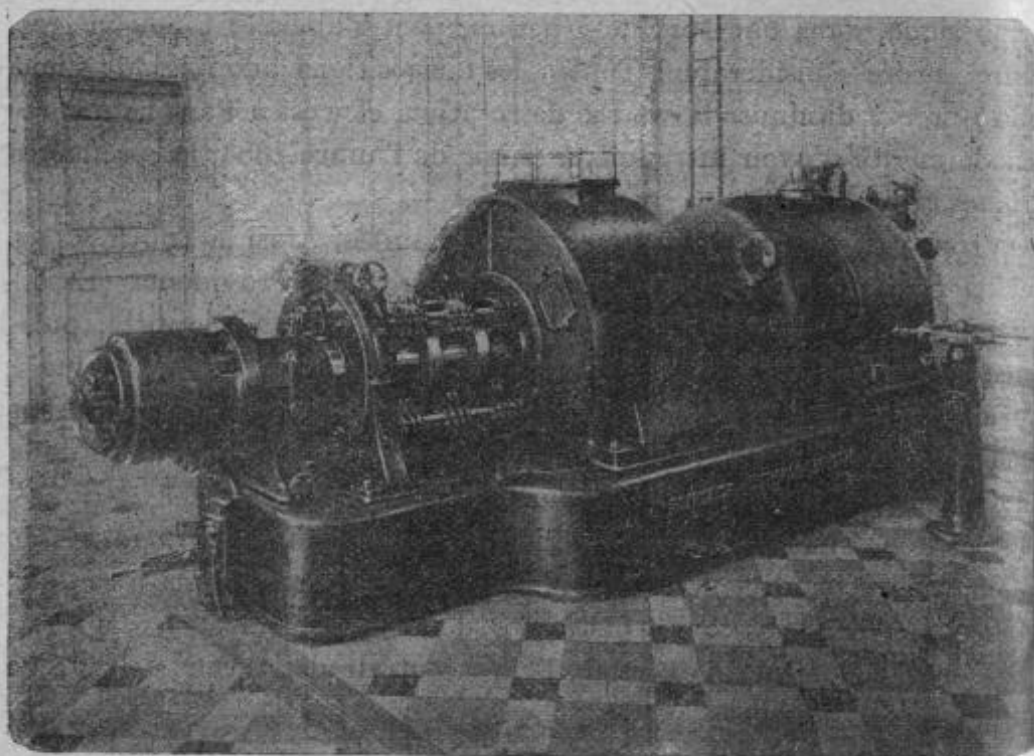


FIG. 1643. — Groupe turbo-dynamo de 300 kw., 1.800 t. m., 250 volts.
(Usine à gaz de la Villette).

formation de pression en vitesse ou force vive a lieu aussi bien dans les roues motrices que dans les appareils ou roues distributrices, au lieu que dans les turbines d'action, la transformation de pression en force vive ne se fait seulement que sur les roues distributrices.

Parmi les turbines à action ou à pression constante, il faut distinguer les turbines à une seule détente (turbine de Laval), celles à une seule détente à vitesses étagées (turbines Elektra, Curtiss) et enfin celles à chutes de pression fractionnées ou à étages de pression (turbines Rateau, Zoëly, Riedler Strumpf).

Dans les turbines à action simple, le jet de vapeur sortant de chaque distributeur agit sur une seule roue.

Avec la turbine à action pure, l'on est obligé, pour assurer sans difficulté l'étanchéité des divers éléments, d'employer un arbre relativement mince, et comme il doit être tenu compte des fléchissements de ce der-

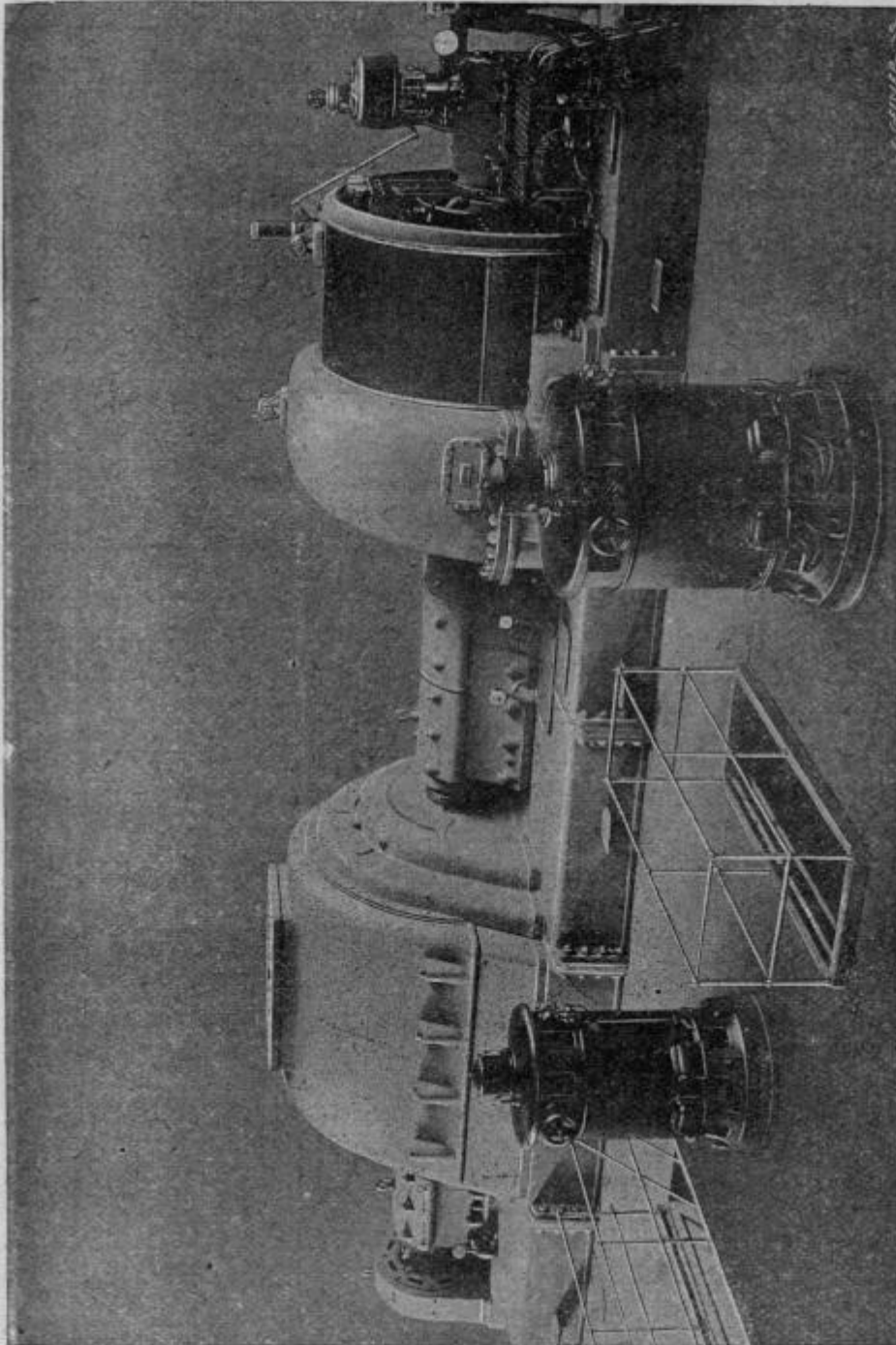


Fig. 1644. — Turbo-alternateur de 15.000 K. V. A., à 1.250 tours.
(Société Alsacienne de Constructions mécaniques).

nier, la turbine ne peut travailler que si on laisse un jeu considérable entre les parois des compartiments et l'arbre ; la vapeur qui, pour cette raison, s'échappe d'un compartiment dans l'autre, représente une perte qu'il est impossible d'éviter. Ce système d'axe donne, d'autre part, lieu

à une perte appréciable d'énergie de la vapeur sous forme de frottement dû au mouvement des diverses roues en forme de disques dans l'espace de vapeur.

Les turbines à réaction n'offrent pas la variété des turbines à action. Toutes les turbines de cette classe se cantonnent dans le type Parsons, légèrement varié quant aux dispositions constructives, suivant les firmes qui utilisent les licences des brevets de cet ingénieur (Brown-Boveri, Compagnie Électro-Mécanique, Brush, Westinghouse, Willans).

Dans ces sortes de turbines, la vitesse du jet de vapeur est absorbée successivement par plusieurs roues motrices, entre lesquelles se trouvent des appareils directeurs lui donnant seulement la direction nouvelle convenable.

Au point de vue constructif, les vitesses d'écoulement relativement faibles permettent de remplacer les roues de grand diamètre par un tam-tour continu hérissé d'ailettes et de composer aussi le système mobile d'un organe unique très simple et très robuste.

On démontre, pour les turbines parfaites : 1° qu'à rendement maximum égal, la vitesse de la turbine à réaction doit être égale à environ 1,4 fois celle de la turbine d'action ; 2° qu'à vitesse périphérique égale, la turbine d'action exige moitié du nombre des éléments que comporterait la turbine à réaction, mais que les vitesses de vapeur sont doubles dans le premier genre ; 3° qu'à nombre égal d'éléments, la vitesse périphérique de la turbine à action est 1,4 fois plus faible et la vitesse de la vapeur 1,4 fois plus grande que dans la turbine à degré de réaction égal à $1/2$.

Il importe, d'autre part, pour l'utilisation pratique, à notre point de vue, de réduire la vitesse de rotation au minimum sans augmenter la consommation.

Le tableau ci-dessous indique les vitesses de turbines les plus usitées par divers constructeurs.

PUISSANCE en kilowatts	BREGUET PARSONS BATEAU	CURTIS	DE LAVAL (BREGUET)	BIEDLER STUMPF	GERLIKON
3	»	»	30.000	»	»
50	»	»	16.000	3.500	3.500
100	»	»	13.000	3.000	3.000
200	3.000	»	»	2.300	2.500
350	3.000	»	10.000	2.000	2.000
500	2.500-3.000	1.800	»	2.000	2.000
1.000	1.500	1.300	»	1.500	1.200
1.500	1.200	»	»	1.000	»
4.000	1.000	750	»	750	»

Pour obtenir une hauteur convenable des premiers aubages à haute pression, il est nécessaire de réduire le diamètre du tambour dans cette partie de la turbine ; cette hauteur d'aube doit, d'autre part, être suffi-

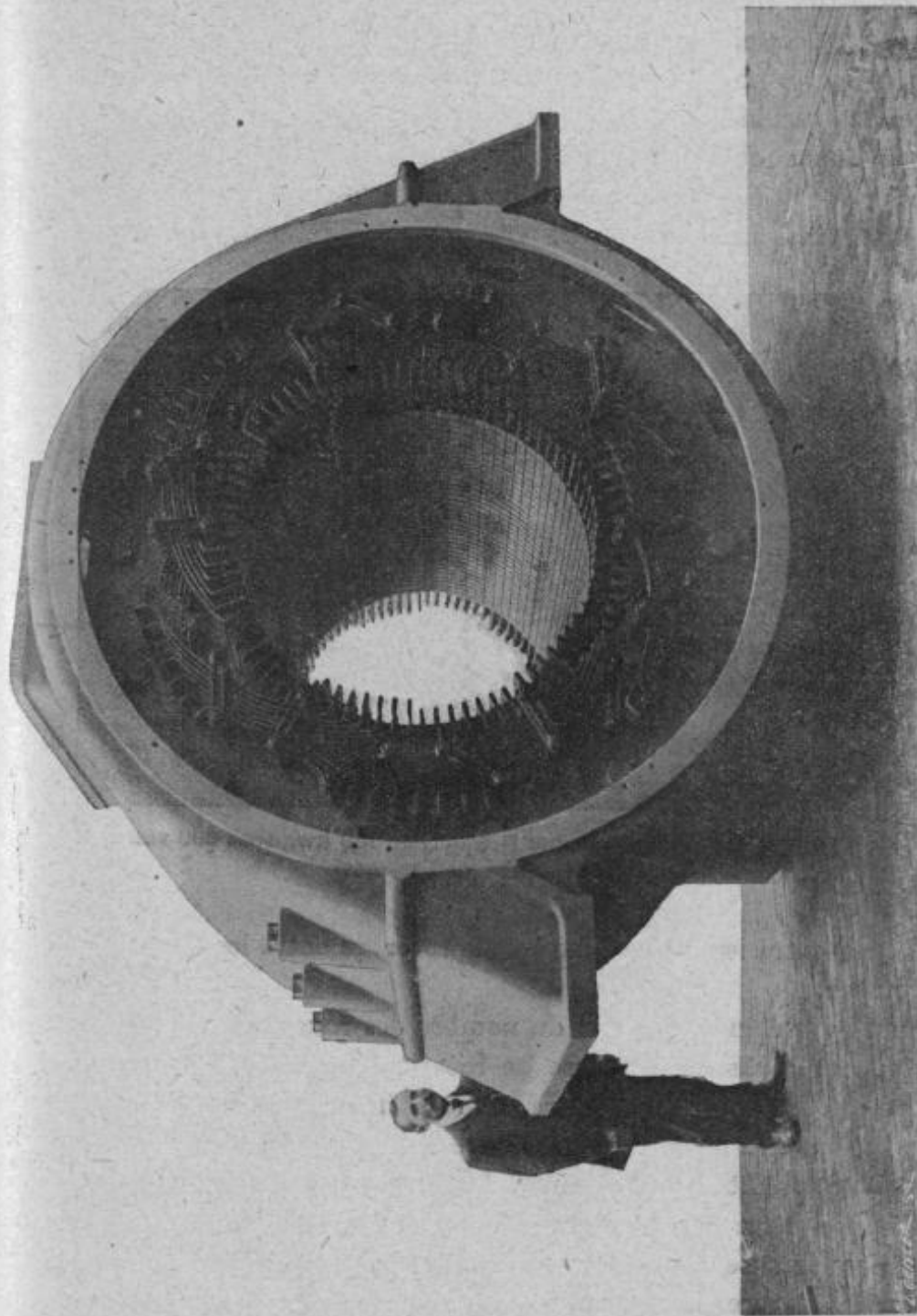


FIG. 1645. — Stator d'un turbo-alternateur de 6.000 kw., 1.500 tours. (Société Alsacienne de Constructions mécaniques.)

sante pour qu'il s'établisse un rapport convenable entre la surface utile des aubages et le jeu laissé dans le sens radial entre les parties fixes et tournantes, ce qui nécessite pour une puissance donnée une augmenta-

tion du nombre des roues des ailettes et détermine par conséquent une longueur relativement grande de la partie à haute pression de la turbine.

Dans le cas des turbines à action, le distributeur étant le siège de la perte de charge, le jeu entre ce distributeur et l'organe mobile constitue une fuite qu'il importe de limiter. Au contraire, le récepteur ne provoquant aucune perte de charge, reste soumis à la même pression sur ses deux faces et le jeu, par rapport à l'organe fixe, peut être grand à volonté.

Avec les turbines à réaction, la perte de charge se produisant seulement dans le disque mobile, le jeu peut être quelconque entre l'aubage fixe et le rotor, mais doit être réduit au minimum entre le disque mobile et le stator.

Les turbines mixtes exigent, pour les mêmes motifs, des jeux faibles

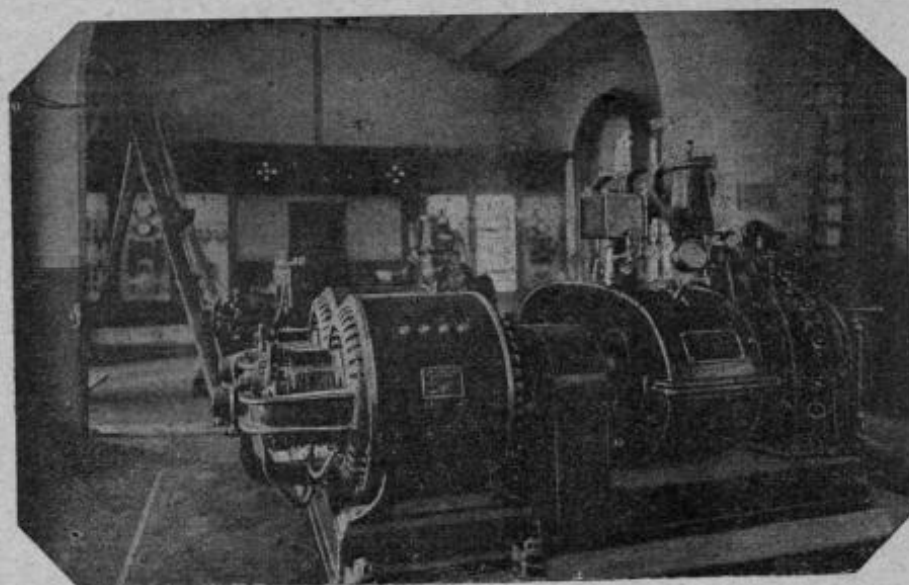


FIG. 1646. — Turbo-dynamo Bréguet, de 150 kw., sous 500 volts.
(C^{ie} Houillère de Bessèges).

aussi bien entre les disques fixes et le rotor qu'entre les disques mobiles et le stator.

Dans les turbines, le choix du nombre des roues est déterminé par la puissance à réaliser, la vitesse de rotation, la chute de pression et le rendement. Plus on veut un rendement élevé, plus il faut prévoir de roues. On prend généralement quatre à huit roues dans les turbines à 3.000 tours-minute ; une dizaine à 1.500 tours-minute ; une vingtaine à 750 tours-minute ; en plus grand nombre dans les turbines marines où les hélices imposent une vitesse de rotation faible. Dans la répartition des chutes de pression, ou mieux de chaleur, on fait au premier distributeur une chute beaucoup plus grande, de façon à confiner la pression et la température élevées dans la boîte d'arrivée de vapeur.

Pour réunir les avantages des turbines à action et à réaction, en supprimant leurs inconvénients, il suffit d'abaisser le nombre de tours de la

turbine de Laval et pour cela diminuer la vitesse du fluide moteur, et dans la turbine Parsons, de supprimer la première partie des roues, tout en conservant la partie à basse pression. Nous entrons ainsi dans la classe des turbines mixtes dont les types sont déjà nombreux (turbines A.E.G., Melms et Pfemniger, Barbezat).

En faisant fonctionner un certain nombre de roues par impulsion avec une ou plusieurs chutes de vitesse à chaque étage de pression, ces roues étant suivies d'une section dite à basse pression où la vapeur agit par réaction, on obtient des turbines plus courtes suivant l'axe que celles des types ci-dessus, ce qui offre l'avantage d'avoir moins à craindre de déformations du rotor et par suite diminuer l'entrefer. On peut, aussi, par l'adoption du système à réaction pour l'extrémité basse pression faire usage du rotor à tambour donnant lieu à un plus grand rendement. Par suite de ces avantages la turbine mixte s'est répandue assez rapidement et paraît destinée à un grand avenir.

588. Théorie élémentaire de la turbine à vapeur. — La machine à vapeur à piston utilise la tension statique de la vapeur : dans la turbine, au contraire, on utilise la pression dynamique exercée par cette vapeur sur la partie mobile de la machine, la roue à aubes, et crée ainsi un couple moteur sur cette roue.

La pression dynamique se produit toujours lorsqu'une masse est obligée de modifier son état de mouvement. Un tel changement de vitesse a lieu, par exemple, si la vapeur s'écoule d'un réservoir où elle est sous une pression plus grande que celle qui régit au dehors. Si la quantité de vapeur qui s'écoule par seconde d'un réservoir où elle est sous une pression plus grande que celle qui régit au dehors pèse un poids G kilogrammes, la vitesse d'écoulement étant w mètres par seconde, il est nécessaire d'amener par seconde la masse $\frac{G}{g}$ à la vitesse w , et la pres-

sion exercée par la vapeur est $P = \frac{G}{g} w$, à

laquelle correspond une pression égale et opposée exercée sur le réservoir (réaction). Si le réservoir est relié d'une façon convenable à une roue mobile, cette réaction peut être utilisée et produire du travail ; ce système est à proprement parler une turbine à réaction, et la (fig. 1647) en est une représentation schéma-

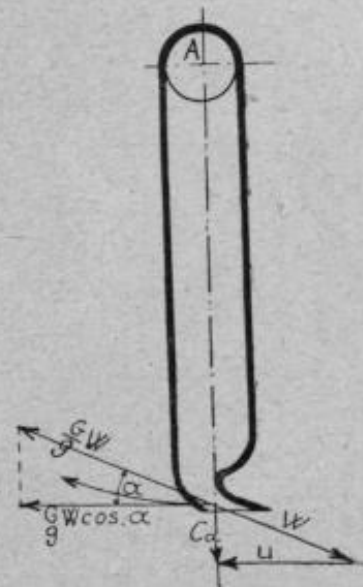


FIG. 1647.

tique : la vapeur est introduite en A, c'est-à-dire au point où la vitesse

est la plus faible. Si toute la circonférence de la roue porte des ouvertures, la direction de la vapeur doit faire un angle α avec la tangente à la roue; la pression à la circonférence est alors :

$$\frac{G}{g} w \cos \alpha.$$

Si la vitesse à la circonférence est égale à w mètres par seconde, la vitesse absolue à la sortie est égale à c_a , et par suite, la perte à la sortie est égale à $\frac{G}{g} \frac{c_a^2}{2}$. Cette perte croît avec l'angle α et devient un minimum pour $u = w \cos \alpha$, ou, pour α très petit, $u = w$. Cette valeur correspond donc au maximum de rendement.

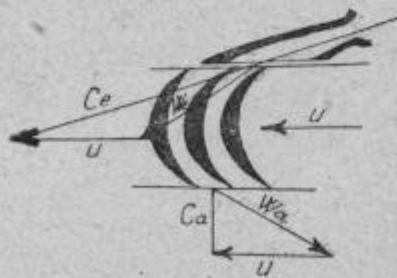


FIG. 1648.

La (fig. 1648) montre la turbine d'action; dans ce cas, le réservoir de vapeur sous pression est fixe; la vapeur qui s'échappe rencontre une surface courbe (aube) et change de direction sans modifier sa vitesse ni sa pression; elle exerce par suite une pression sur les aubes dans la direction du mou-

vement de ces dernières, proportionnelle à la masse qui s'écoule par seconde et à la composante de la vitesse de la vapeur mesurée dans cette direction. La (fig. 1649) représente le diagramme des vitesses; la vitesse absolue de sortie est c_e , somme géométrique de w_e et u . Il est facile de voir qu'ici aussi une diminution de l'angle α abaisse la perte à la sortie; pour un très petit angle, $\cos \alpha = 1$, et par suite, le rendement est maximum si :



FIG. 1649.

$$u = \frac{c_e}{2} = w_e = w_a.$$

Il existe donc entre la turbine de réaction et la turbine d'action la différence fondamentale suivante : dans la première, la vapeur possède à son entrée dans la roue mobile une pression plus grande qu'à sa sortie, laquelle différence de pression est utilisée à accroître la vitesse relative de la vapeur à l'intérieur de l'aubage; dans la turbine d'action, au contraire, la pression et la vitesse relative de la vapeur, pendant son passage dans la roue mobile, restent constantes.

La différence est très importante en pratique, car la roue de la turbine

à réaction sépare des espaces où règnent des pressions différentes qui doivent être parfaitement étanches par rapport aux parties fixes de la machine, de façon que la vapeur soit obligée de passer par la roue à aubes. Dans le cas de la turbine d'action, la vapeur n'a pas tendance à passer autour de la roue et il est possible, par suite, de ménager des jeux importants entre les parties fixes et mobiles.

Le rapport le plus favorable entre la vitesse de la vapeur, w dans le cas de la turbine de réaction et c , dans le cas de la turbine d'action et la vitesse de la roue est égal à 1 dans le premier cas et à 2 dans le second.

Il n'existe pas à proprement parler de turbine entièrement à réaction ; en général une partie de la chute de pression s'effectue dans une roue à aubes directrices, fixe, la moitié en général (Parsons) ; l'autre moitié de la chute de pression est effectuée dans la roue mobile ; la vitesse la plus favorable de cette dernière est alors égale aux trois quarts de la vitesse de la vapeur.

La détente de la vapeur, et par suite l'augmentation de sa vitesse d'écoulement, s'effectue dans un ajutage, qui peut être un tube droit, mais qui peut aussi avoir la forme d'une roue à aubes, fixe ou mobile. Le travail communiqué à la particule de vapeur de poids G , de volume Gv_1 , sous pression p_1 , à son entrée dans l'ajutage, est :

$$A_1 = Gp_1v_1;$$

le travail fourni à la sortie par la même quantité de vapeur est :

$$A_2 = Gp_2v_2,$$

et le travail devenu libre à l'intérieur de l'ajutage par l'augmentation de volume de v_1 à v_2 a pour expression :

$$A_{1,2} = G \int_1^2 p dv,$$

et le travail dû à l'accélération de la quantité de vapeur considérée est enfin :

$$A = G \left(p_1v_1 + \int_1^2 p dv - p_2v_2 \right) = \int_1^2 v dp.$$

Si la relation entre p et v est donnée, cette expression peut être représentée par la surface hachurée du diagramme de la (*fig. 1650*), dans laquelle les ordonnées représentent les pressions spécifiques de la vapeur en

kilogrammes : mètre carré et les abscisses des volumes spécifiques en mètres cubes : kilogramme ; la surface représente le travail en kilogrammètres par kilogramme de vapeur.

Le diagramme montre que, pour une même chute de pression, pour une pression basse correspond une plus grande quantité d'énergie que pour une pression élevée, ce qui explique que l'amélioration du vide au condenseur augmente le rendement de l'appareil et diminue la consommation de vapeur par cheval.

Le diagramme est dessiné à l'échelle, pour la détente adiabatique de

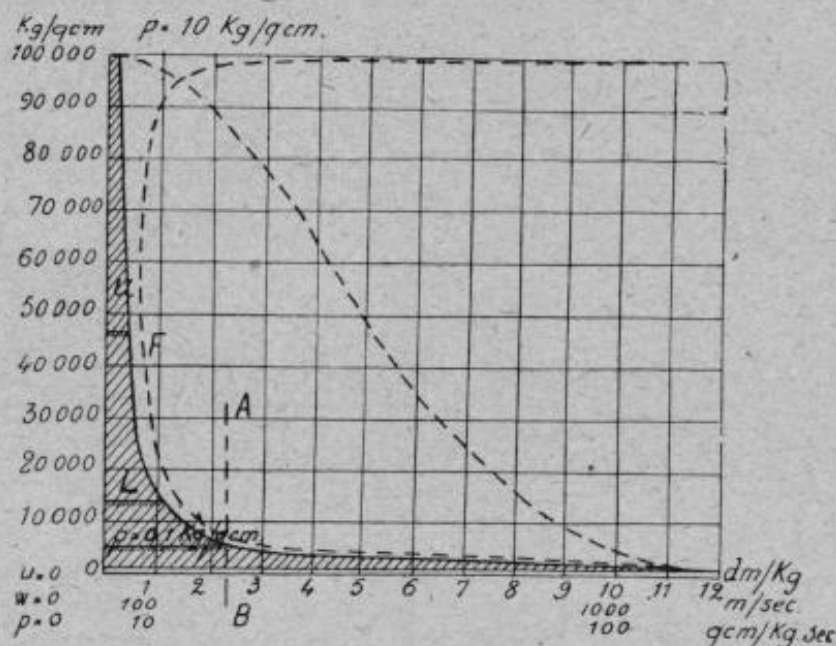


FIG. 1650.

la vapeur, c'est-à-dire dans le cas où la détente s'effectue sans qu'il y ait échange de chaleur entre la vapeur et les parois, ce qui est à peu près le cas de la turbine. La pression initiale $p_1 = 10^{\text{atm}} = 100.000$ kilogrammes par mètre carré et la pression au condenseur $p_2 = 0^{\text{atm}},1 = 1.000$ kilogrammes par mètre carré. L'aire de la partie hachurée est égale à 7 centimètres carrés et chaque centimètre carré correspond à 10.000 kilogrammètres par kilogramme ; le travail disponible par kilogramme de vapeur est donc égal à 70.000 kilogrammètres. Cette quantité de travail doit être égale à :

$$\frac{1 \text{ kg}}{g} \frac{w^2}{2},$$

ou :

$$w = \sqrt{2g \cdot 70000} = 1.107^{\text{m}} \text{ par seconde.}$$

La courbe w donne la vitesse de la vapeur dans l'ajutage pour toutes les valeurs de p ; entre 10 atmosphères et 5 atmosphères, par exemple,

la vitesse est égale à 500 mètres par seconde ; comme le volume de 1 kilogramme de vapeur à 5 atmosphères est égal à $v = 0^{\text{m}^3},36$, la section de l'ajutage devra être par kilogramme de vapeur :

$$F = \frac{v}{w} = \frac{0,36}{500} = 0^{\text{m}^2},00072.$$

Les valeurs de F sont également données dans le diagramme (courbe F) ; on voit que l'ajutage doit d'abord être rétréci et ensuite élargi, le minimum de section correspondant à la pression $p_m = 0,57p_1$.

Dans le cas de la turbine la plus simple, la vitesse de la roue mobile devrait être égale à 1.170 mètres pour la turbine d'action et à 585 mètres pour la turbine de réaction ; mais il est impossible d'aller aussi loin à cause de la fatigue exagérée imposée à la matière par la force centrifuge et la vitesse de 400 mètres est le maximum admissible. Le rendement de la turbine de réaction est alors de 56 0/0 et celui de la turbine d'action est 90 0/0. Mais ces valeurs doivent encore être fortement diminuées pour tenir compte des pertes par frottement de la vapeur. Dans tous les cas, la turbine d'action doit donner de meilleurs résultats que la turbine de réaction.

L'emploi d'une seule roue conduit à un nombre de tours considérable pour les diamètres de roues utilisables en pratique ; de Laval faisait tourner une roue de 250^{mm} de diamètre à plus de 30.000 tours par minute.

Il est possible d'augmenter le diamètre de la roue pour diminuer le nombre de tours ; une roue de 2^m,500 de diamètre tournerait à 3.000 tours environ. Un calcul simple montre que cette roue fonctionnant à injection totale pourrait fournir sur son arbre 1.200 chevaux environ ; le frottement de la roue tournant dans la vapeur absorbe environ 50 chevaux, ce qui est peu important dans le cas d'une injection totale, mais ce qui serait inadmissible pour une admission partielle ayant pour but de diminuer la puissance disponible sur l'arbre de la turbine.

A cette vitesse de 400 mètres par seconde, le métal de la roue travaille à 2.000 kilogrammes par centimètre carré ; il est donc nécessaire d'employer un acier au nickel qui coûte très cher.

La diminution du nombre de tours, ainsi que celle de la vitesse à la circonférence, est possible de deux manières : l'une repose sur la diminution de la vitesse de la vapeur par le partage de la chute de pression dans plusieurs systèmes de roues montées en série, l'autre sur l'utilisation de la vitesse de la vapeur à sa sortie de la première roue en lui faisant traverser une ou plusieurs roues fixes et mobiles.

Dans la (fig. 1650) on a partagé toute la surface hachurée en quatre

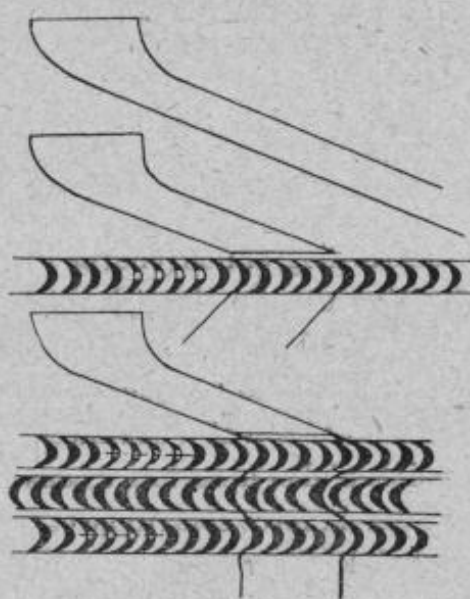


FIG. 1651.

parties égales à $\frac{L}{4}$; la vitesse correspondante de la vapeur est :

$$w = \sqrt{2g \frac{L}{4}} = \frac{1}{2} \sqrt{2gL};$$

elle est ainsi égale à la moitié de la première; la vitesse de la roue est diminuée dans la même proportion.

Le fonctionnement du deuxième système est montré par la (fig. 1651); le diagramme de la (fig. 1652) représente les vitesses de la vapeur et de la roue. La vapeur quitte la première

roue avec une vitesse absolue considérable; elle est conduite par une roue fixe directrice, sans modification de vitesse et de pression (sauf les pertes), sur une deuxième roue mobile; et le diagramme ci-avant montre que le rendement devient maximum pour une vitesse absolue à la sortie c_a minimum et :

$$u = \frac{c_{e1} \cos \alpha}{4}$$

dans le cas des deux roues, ou

$$u = \frac{c_{e1} \cos \alpha}{2n}$$

pour n roues.

On voit qu'il serait possible de diminuer considérablement le nombre de tours en augmentant le nombre de roues mobiles et fixes, mais on est limité rapidement par les pertes considérables occasionnées par le frottement de la vapeur sur les aubes, de sorte que le nombre de roues dépasse rarement trois.

Turbines à réaction. — Appelons h la quantité de chaleur qui devient disponible par suite de la détente de la pression p_1 à la pression p' (fig. 1653) h' la chaleur transformée en énergie cinétique par suite de la détente de p' à p_2 . Ainsi la chute de pression p_1 à p_2 est divisée en deux parties dont l'une se transforme en vitesse dans les

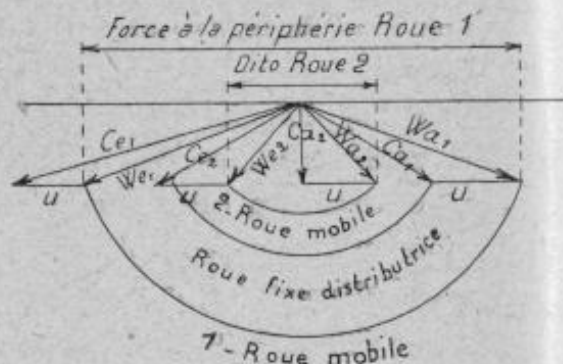


FIG. 1652.

directrices, l'autre dans les aubes mobiles. Pour les valeurs de h et h' on a :

$$A \left(\frac{b_1'^2}{2g} - \frac{b_0'^2}{2g} \right) = h'$$

et :

$$A \left(\frac{a_0'^2}{2g} - \frac{a_1'^2}{2g} \right) = h.$$

Le degré de réaction représenté par $\frac{h'}{h+h'}$ est généralement égal à $1/2$.

Pour une série de roues et de distributeurs le rayon et la largeur radiale ne varient pas ; il faut donc que les composantes axiales des vitesses absolues ou relatives à chacun des joints soient proportionnelles au volume spécifique du fluide en ces points. La nécessité de l'injection totale conduit pour les premières couronnes à des diamètres très petits pour les turbines de faible puissance, à moins de réduire les vitesses en multipliant outre mesure le nombre de cascades.

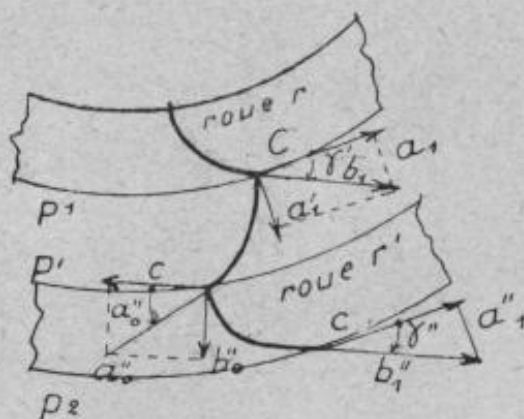


FIG. 1653.

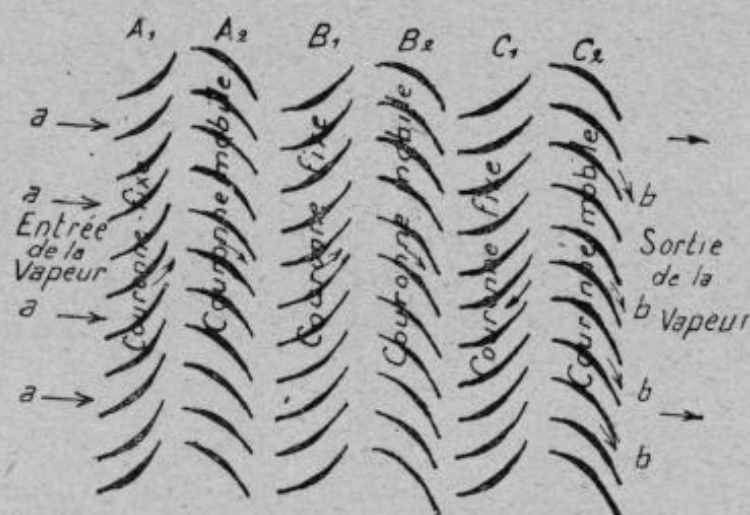
589. Turbines Parsons. — Aujourd'hui les vitesses des turbines Parsons sont comprises entre 750 et 1.000 tours par minute, suivant leurs applications et leur puissance.

Ce genre de turbine est du type à réaction : la chute totale de la vapeur est divisée en plusieurs chutes partielles, dont chacune est utilisée par réaction comme il va être expliqué.

La machine se compose d'une série de turbines élémentaires constituées par une succession de couronnes fixes et de couronnes mobiles.

Après son admission dans la turbine, la vapeur passe tout d'abord dans la première couronne d'aubes directrices (*fig. 1654*), qui lui donnent une direction bien déterminée ; en outre, et par suite du rétrécissement des canaux d'écoulement, la vapeur se détend en acquérant une certaine vitesse. Elle vient ensuite frapper la première couronne d'aubes mobiles en y abandonnant une partie de son énergie cinétique. Dans cette phase de fonctionnement, la vapeur agit donc par action. Par suite de la variation de section du courant d'écoulement dans les aubes mobiles, la vapeur continue à s'y détendre et à augmenter de vitesse. En outre, en quittant la roue, elle exerce sur celle-ci un certain effort. Dans cette

deuxième phase de fonctionnement, la vapeur agit donc par réaction. Au sortir de la première roue mobile, la vapeur entre dans la deuxième couronne d'aubes fixes, dans laquelle elle continue à se détendre et à augmenter de vitesse. A la sortie de cette couronne, la vapeur vient frapper la seconde roue mobile avec une vitesse résultant à la fois de la vitesse de sortie de la première couronne mobile et de l'augmentation de vitesse provenant de la deuxième couronne d'aubes directrices. Elle abandonne encore, dans cette seconde roue mobile, une partie de son énergie. Ce phénomène se reproduit identiquement dans toutes les couronnes fixes et dans toutes les roues mobiles jusqu'à ce que la vapeur soit complètement détendue ; elle s'échappe



Sens de rotation des couronnes mobiles

FIG. 1654.

alors à l'autre extrémité de la turbine, soit à l'air libre, soit au condenseur.

Cette succession de couronnes fixes et de disques mobiles a pour but de réduire la vitesse angulaire de la turbine tout en permettant d'obtenir des puissances très élevées.

Parsons a combiné à la fois les étages de pression et les étages de vitesse en plaçant dans chaque étage de pression plusieurs roues au lieu d'une seule. Ces étages, grâce à l'interposition d'aubages directeurs successifs appropriés, sont parcourus par de la vapeur dont la pression reste la même dans tout le parcours d'un même étage de pression, et plusieurs étages de vitesse ainsi constitués sont disposés les uns derrière les autres en étages de pression. Le but des couronnes directrices est de donner au jet de vapeur une direction *ad hoc* en lui imprimant une certaine vitesse.

Dans ce but, on donne aux aubages directeurs la forme indiquée dans la (fig. 1655). Comme on peut le voir sur cette figure, la section d'écoulement comprise entre deux aubages voisins va en se rétrécissant de façon à ce que la vapeur ait une vitesse de sortie plus grande qu'à l'entrée, et par suite la pression qui règne à la sortie de chaque couronne d'aubages directeurs est plus faible qu'à l'entrée (fig. 1656).

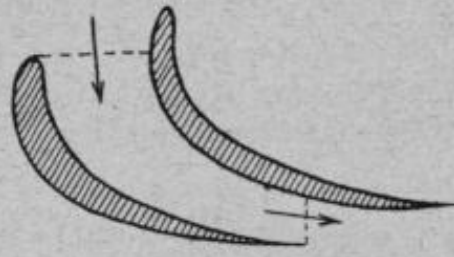


FIG. 1655.

La (fig. 1657) qui représente une aube réceptrice montre que la vapeur, obligée de suivre la surface courbe de l'aube, exerce sur elle une poussée qui met la roue en mouvement. Cette poussée ne résulte donc pas uniquement de la pression de la vapeur, mais bien de la diminution de

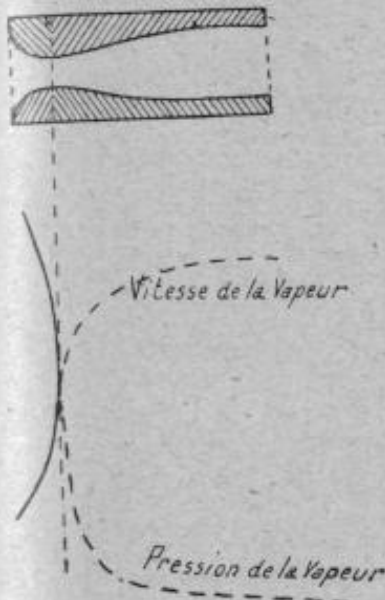


FIG. 1656.

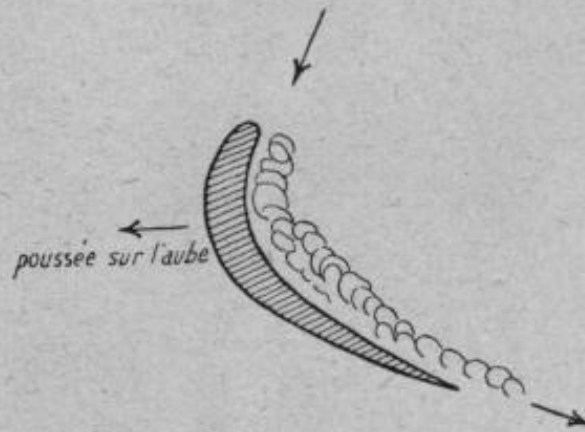


FIG. 1657.

force vive due à la trajectoire curviligne suivie par le jet de vapeur.

Si l'on n'avait à faire qu'à une turbine à action, il n'y aurait lieu d'utiliser dans les roues mobiles que la force vive de la vapeur, sans faire intervenir de variation de pression. On serait donc conduit à ce que la section d'écoulement comprise entre deux aubes réceptrices voisines fût constante ainsi que le représente la (fig. 1658).

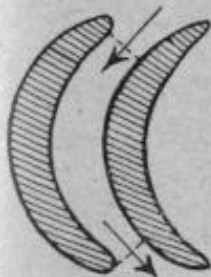


FIG. 1658.

Or la turbine Parsons n'étant pas uniquement une turbine à action les aubages récepteurs ont une forme analogue à celle des aubes distributrices, de telle façon que la section de sortie soit inférieure à la section d'entrée. D'après la (fig. 1659) on voit que ce genre de machine se compose essentiellement de : un cylindre fixe portant les aubes distributrices ; un arbre sur lequel se trouvent calées les roues qui portent les

aubes réceptrices et enfin d'un appareil d'admission et d'un mécanisme de distribution.

Le cylindre est constitué par deux parties qui sont assemblées au moyen de boulons et avec interposition de plombagine suivant un plan horizontal. La partie inférieure du cylindre est venue de fonte avec le bâti même de la turbine. Quant à la partie supérieure, qui forme couvercle, on peut l'enlever très facilement pour la visite de la turbine, car cette manœuvre nécessite à peine 20 minutes pour une turbine de 800 chevaux. Les paliers, qui sont d'une seule pièce, sont également venus de fonte avec le cylindre. C'est sur la surface interne de ce cylindre que se trouvent disposées les aubes directrices.

L'arbre moteur porte des disques, sur la périphérie desquels se trouvent

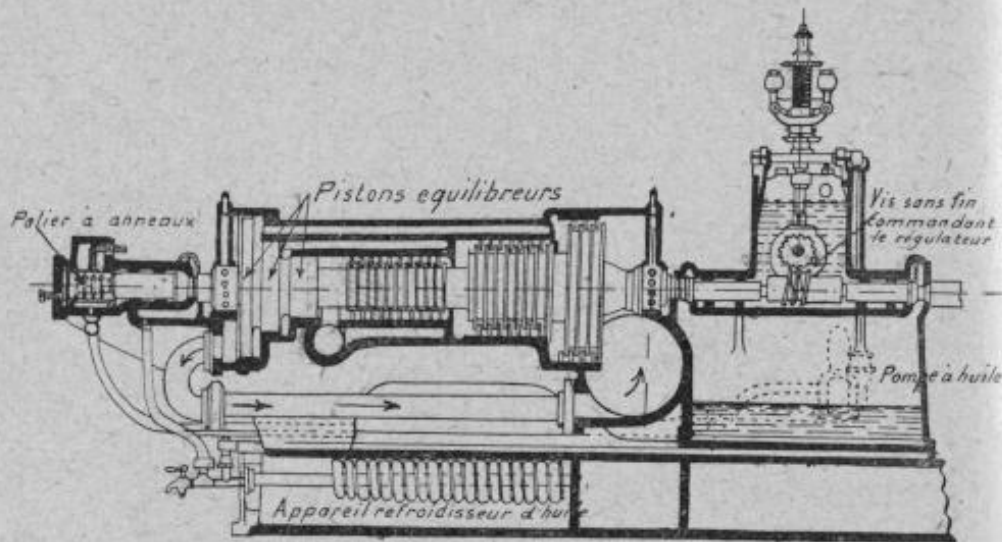


FIG. 1659. — Turbine Parsons-Westinghouse.

disposées les aubes motrices ou réceptrices. La position de l'arbre moteur dans le cylindre est telle que les couronnes d'aubes motrices qui se trouvent sur la périphérie viennent s'intercaler entre les couronnes d'aubes directrices fixes en laissant entre elles un jeu, mais de telle sorte qu'à chaque couronne d'aubes directrices succède une couronne d'aubes motrices, et à chaque couronne d'aubes motrices une couronne d'aubes directrices.

La vapeur admise traverse une soupape, puis se rend dans un espace circulaire par où elle pénètre à l'intérieur de la turbine.

Dès son entrée dans la turbine, la vapeur rencontre une première couronne directrice fixe qui lui imprime la direction voulue pour qu'elle agisse utilement sur les aubes du premier disque mobile. Au sortir de ce disque, la vapeur se rend dans une deuxième couronne directrice, puis sur le second disque mobile, et ainsi de suite. La vapeur suit donc, à l'in-

térieur de la turbine, un parcours sinueux dont la direction est parallèle à l'axe de rotation.

La vapeur se détendant depuis son entrée jusqu'à sa sortie, de couronnes en couronnes, le volume de vapeur croît donc progressivement, et il en est de même des sections d'écoulement. Pour faciliter cet accroisse-

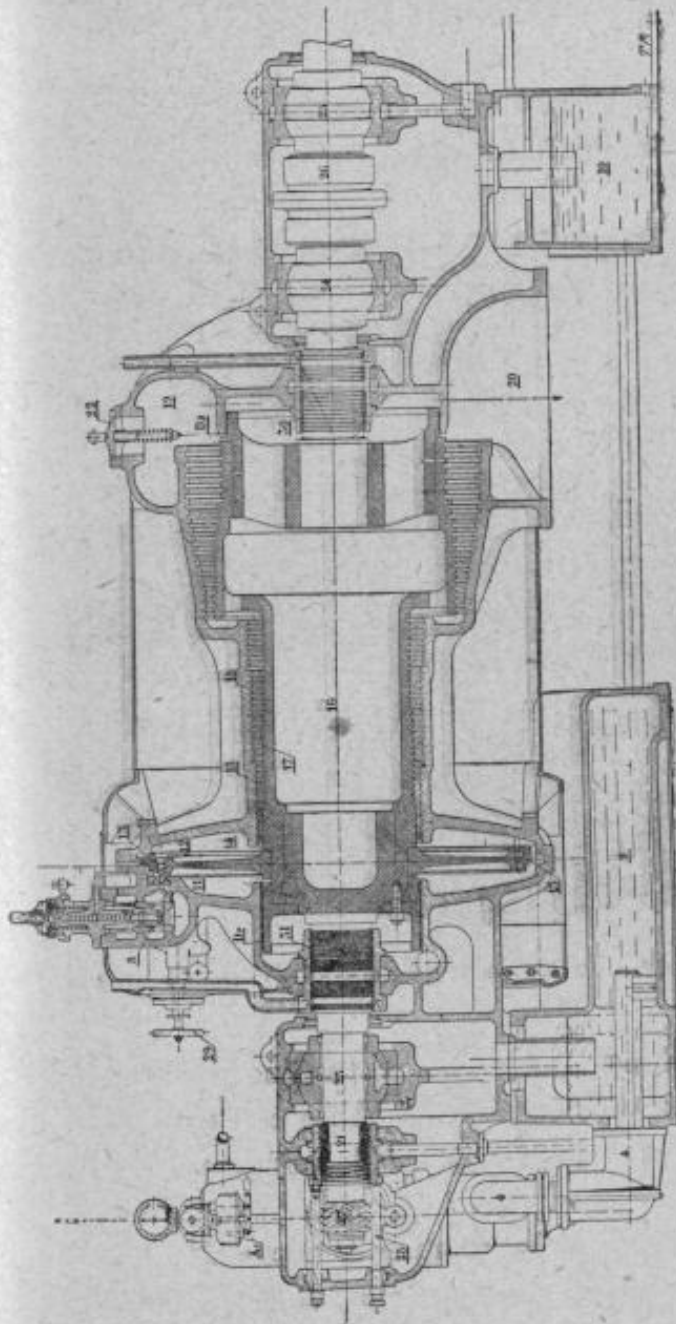


FIG. 165b. — Coupe longitudinale de la turbine combinée, système Brown-Boveri-Parsons.
1, engrenages de commande du régulateur; 2, levier de réenclenchement; 3, volant de manœuvre de la soupape d'arrivée de vapeur; 4, tubulure d'aspiration de la pompe à huile; 5, tubulure de refoulement de la pompe à huile; 6, pointeau de réglage d'arrivée d'huile; 7, chambre d'arrivée de vapeur; 8, bypass automatique; 9, réservoir d'huile avant; 10, réservoir d'huile arrière; 11, tuyères; 12, roue à action; 13, segment des aubes directrices de la roue à action; 14, chambre de la roue à action; 15, corps du cylindre; 16, arbre de la turbine; 17, ailettes de l'arbre (réaction); 18, ailettes du cylindre (réaction); 19, chambre d'échappement; 20, échappement; 21, bagages de réglage du palier de butée; 22, soupape de sûreté; 23, coussinet à rotule n° 1; 24, coussinet à rotule n° 2; 25, coussinet à rotule n° 3; 26, accouplement; 27, vis sans fin de commande du palier de butée de l'arbre du régulateur; 28, tige de réglage du palier de butée; 29, commande du bypass; 30, boîtes étanches arrière; 31, boîtes étanches avant.

ment de section, les disques mobiles sont disposés en gradins de diamètre croissant, les disques de faible diamètre se trouvant du côté de l'admission.

En outre, et pendant son passage dans la turbine, la vapeur exerce une poussée provenant de ce que, à l'entrée de chaque couronne, la pres-

sion de la vapeur est plus élevée qu'à la sortie. Cette poussée est équilibrée par des pistons compensateurs, dont les surfaces différentes correspondent aux surfaces latérales à équilibrer et qui reçoivent l'action de la vapeur. Pour permettre cette compensation, la face de chaque piston, du côté des roues mobiles, est reliée par un conduit à la chambre séparant deux séries de disques de diamètres différents.

La différence de pression, et par suite la poussée axiale, est de ce chef insignifiante.

Les aubes sont en bronze spécial forgé et calculées de façon à ce qu'elles travaillent avec un coefficient de sécurité de 15 à 20. D'ailleurs, étant donné

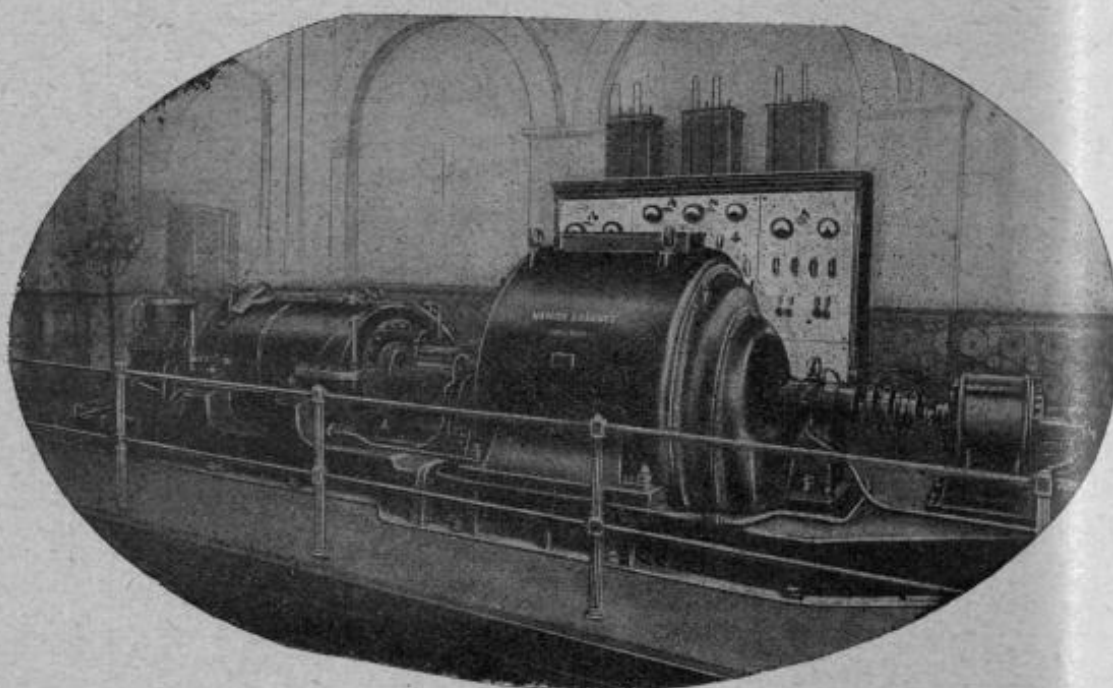


FIG. 1631. — Turbo-alternateur de 300 chevaux Bréguet. (Usine de Grenade.)

le nombre considérable d'aubes qui, pour une turbine de 300 kilowatts par exemple, sont d'environ 16.000 aubes mobiles contre 15.000 aubes fixes, chacune d'elles supporte une pression ne dépassant pas, en général, 50 grammes.

Les aubes sont encastrées dans des rainures à queue d'hironde pratiquées sur le cylindre pour les aubes directrices, et sur l'arbre pour les aubes réceptrices. Ces aubes sont maintenues à l'écartement voulu au moyen de pièces spéciales matées dans les rainures.

La distance séparant une couronne d'aubes directrices d'une couronne d'aubes motrices est de 3 à 4 millimètres environ pour les dernières aubes ; d'ailleurs l'expérience a montré que ce jeu n'a pas d'influence très sensible sur les consommations de vapeur.

Quant aux jeux entre le rotor et le stator, ils sont variables suivant la pression, le débit de la vapeur et la longueur des aubes.

La pression qui s'exerce sur les surfaces des pistons, différant suivant les étages, ceux-ci doivent former joint étanche avec le cylindre.

On arrive à ce résultat en creusant sur leur périphérie ainsi qu'à la surface interne du cylindre des cannelures annulaires laissant entre elles un jeu qui est comblé par de la vapeur. C'est cette vapeur qui, formant écran, permet d'obtenir l'étanchéité désirée sans avoir recours à des frottements de pièces métalliques les unes sur les autres.

Il est indispensable d'obtenir une étanchéité parfaite aux endroits où

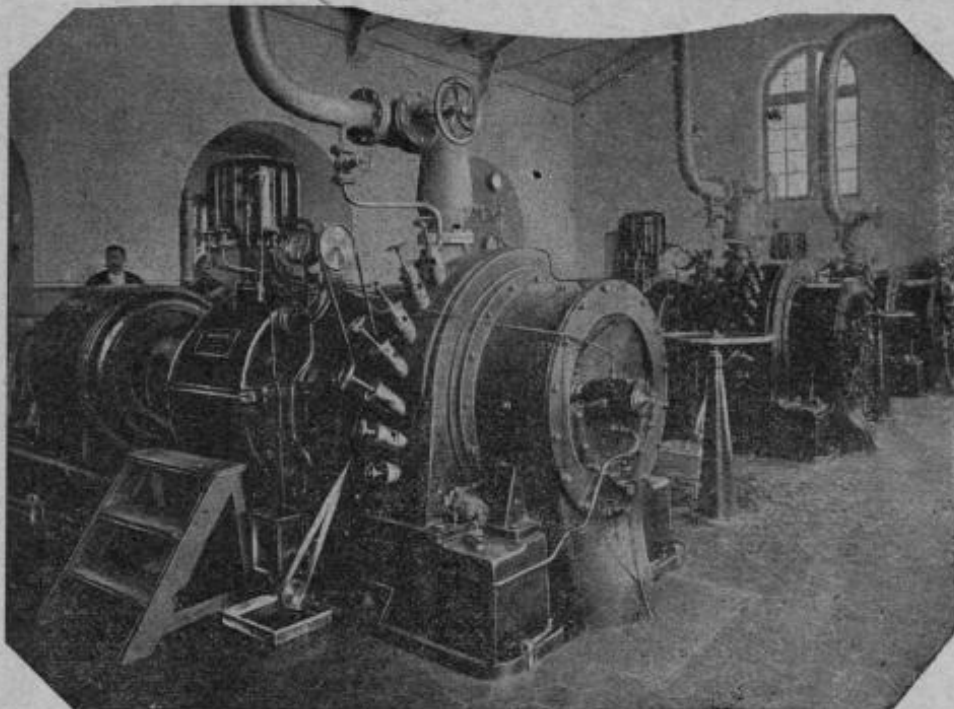


FIG. 1662. — Turbo-dynamo Bréguet de 600 kw., sous 500 volts.

l'arbre sort du cylindre. Si la turbine marche à condensation, le vide règne aux sorties de l'arbre hors du cylindre ; la pression de l'air hors du cylindre étant alors notablement plus élevée qu'à l'intérieur, l'air extérieur tendrait donc à rentrer à l'intérieur de la turbine et à affaiblir le vide au condenseur. On obtient dans ce cas l'étanchéité par un dispositif de cannelures analogue à celui pour les pistons compensateurs et on envoie, par un conduit, un filet de vapeur dans ces cannelures. La vapeur tendant à s'échapper par côté forme écran.

Comme on peut s'en rendre compte, l'emploi de ces joints supprime les presse-étoupes ; en outre, il n'existe pas d'organes frottants en contact avec la vapeur, ce qui est un avantage considérable.

L'arbre de la turbine est porté par des coussinets et des paliers qui sont extérieurs au cylindre en fonte.

Dans les turbines de moyenne et de petite puissances, ces coussinets sont constitués par un certain nombre de douilles enfilées les unes sur les autres. Entre ces douilles et entre la douille intérieure et l'arbre se trouve de l'huile sous pression. Cette huile permet une certaine mobilité au rotor de la turbine, facilitant ainsi son centrage autour de l'axe passant par le centre de gravité.

Dans les grosses turbines, l'arbre tourne dans des coussinets en métal anti-friction disposés dans un siège sphérique, ce qui leur donne une certaine liberté toujours en vue du centrage du rotor.

Les turbines Brown-Boveri-Parsons possèdent aujourd'hui une distribution à huile très simple représentée par les (*fig. 1663* et *1664*). Les transmissions à levier de l'ancienne distribution ont été supprimées et remplacées par une conduite à huile sous pression, qui réunit l'appareil distributeur représenté sur la (*fig. 1663*) et la valve d'admission dessinée sur la (*fig. 1664*). Les deux parties essentielles de la régulation sont donc reliées uniquement par un tuyau, à l'exclusion de tringles, leviers ou axes de transmission.

L'appareil de distribution forme un ensemble indépendant renfermé dans une boîte en deux parties A, solidement assujettie sur le couvercle du palier de butée et recouverte par une enveloppe en deux parties C. L'arbre D du régulateur reçoit son mouvement de l'arbre de la turbine par une transmission à vis sans fin ; il tourne dans les paliers F et G dont le dernier sert en même temps de palier de butée.

L'arbre du régulateur porte le régulateur de sûreté H et le régulateur principal J. Ce dernier commande un manchon K qui tourne dans un cylindre fixe L et peut se déplacer le long de l'arbre D ; la position de ce manchon est déterminée par celle des poids du régulateur à ressort. Le cylindre L est entouré par une enveloppe M, portant à sa partie inférieure un canal annulaire relié au piston servo-moteur O par une bride N et un tuyau T. Le piston O est relié à la soupape d'admission Q par la tige de soupape P.

L'huile sous pression arrive à la pompe à huile R par le tuyau S sous le piston O, puis passe par la conduite T et la bride N dans la chambre M du régulateur.

Le cylindre L est muni d'une fente qui relie son intérieur au canal annulaire, et dont la section dépend de la position du manchon K. L'huile qui s'écoule par cette fente passe par le cylindre L dans la chambre M et arrive par le régulateur ; elle en lubrifie les axes et les articulations ainsi que les paliers de l'arbre D, et retourne au réservoir à huile.

La vapeur arrive par la bride U et pénètre par la vanne principale W dans le filtre S¹, d'où elle se rend dans la turbine par la valve d'admission Q. La levée de la valve d'admission correspondant aux différentes

charges de la turbine est produite par la pression de l'huile sous le piston O. Cette pression est réglée par le régulateur. L'huile tend à soulever le piston, tandis qu'un ressort agit sur lui en sens inverse, et, finalement, il prend une position d'équilibre intermédiaire. Lors de la marche à vide, la pression de l'huile sous le piston est minima ; elle est maxima pour la pleine charge.

Si la charge vient à décroître, le nombre de tours augmente avant que le régulateur ait commencé à agir. Par suite, les poids du régulateur se déplacent vers l'extérieur et tirent vers le bas le manchon K ; la section libre de la fente de la boîte L augmente ; le débit d'huile étant constant, la pression diminue dans la conduite T qui aboutit sous le piston O. L'action du ressort devient prépondérante et le piston descend jusqu'à ce que les actions de l'huile et du ressort s'équilibrent de nouveau ; la valve d'admission laisse alors passer la quantité de vapeur correspondant à la charge de la turbine.

La charge vient-elle à augmenter, le nombre de tours diminue ; les poids du régulateur se rapprochent de l'axe, le manchon K s'élève, la section de passage de l'huile dans la boîte L diminue, la pression de l'huile augmente et le piston O s'élève. La valve d'admission laisse passer la quantité de vapeur correspondante.

Pour rendre la régulation aussi sensible que possible, on imprime à la tige de soupape P, à la valve d'admission et au piston O, un mouvement oscillatoire continu. L'arête du manchon M qui règle l'ouverture de passage de l'huile a en développement la forme d'une sinusoïde, de sorte qu'à chaque tour de l'arbre du régulateur, la section libre de la fente de la boîte L augmente et diminue alternativement ; la pression de l'huile croît et décroît, et la vitesse du courant d'huile augmente et diminue, ce qui produit une levée et une descente de piston. Ces petites pulsations se succèdent à intervalles si rapprochées (300 à 700 par minute) qu'elles n'influencent presque pas la pression de la vapeur.

Le manchon K du régulateur a donc deux actions distinctes : une action régulatrice principale par son déplacement le long de l'arbre du régulateur, et une action secondaire, oscillatoire, par suite du mouvement de rotation de son arête ; cette dernière action augmente la sensibilité du régulateur.

Pour empêcher que le régulateur n'agisse plus qu'il n'est nécessaire sous l'action de ses masses, la tige de soupape est munie d'un dispositif de sûreté breveté. Le piston est garni à sa partie supérieure d'un cône, qui se déplace dans une boîte cylindrique placée dans la chambre de soupape. Si l'action du régulateur tend à être trop considérable et que, par exemple, le piston se soulève un peu trop, il se produit entre le cône et la boîte cylindrique une ouverture par où peut sortir l'excès de l'huile,

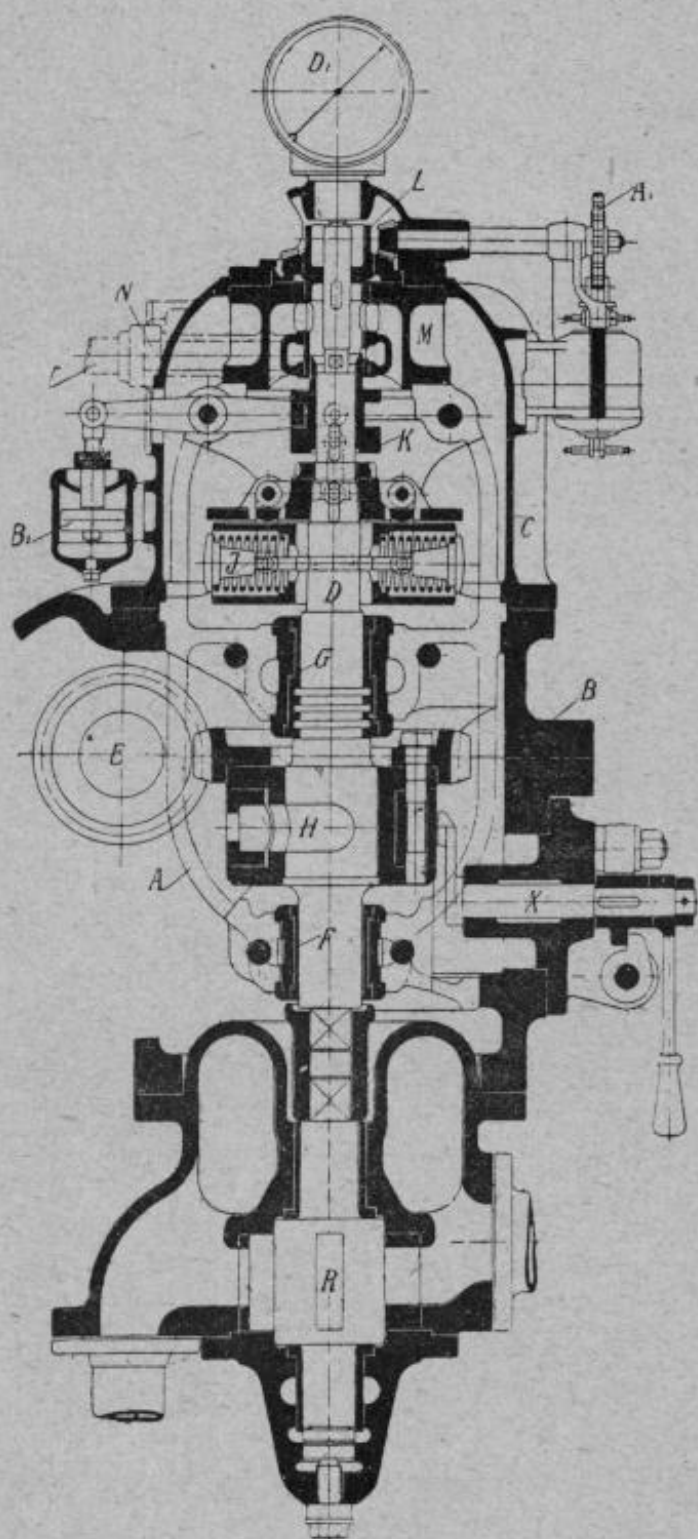


FIG. 1663.

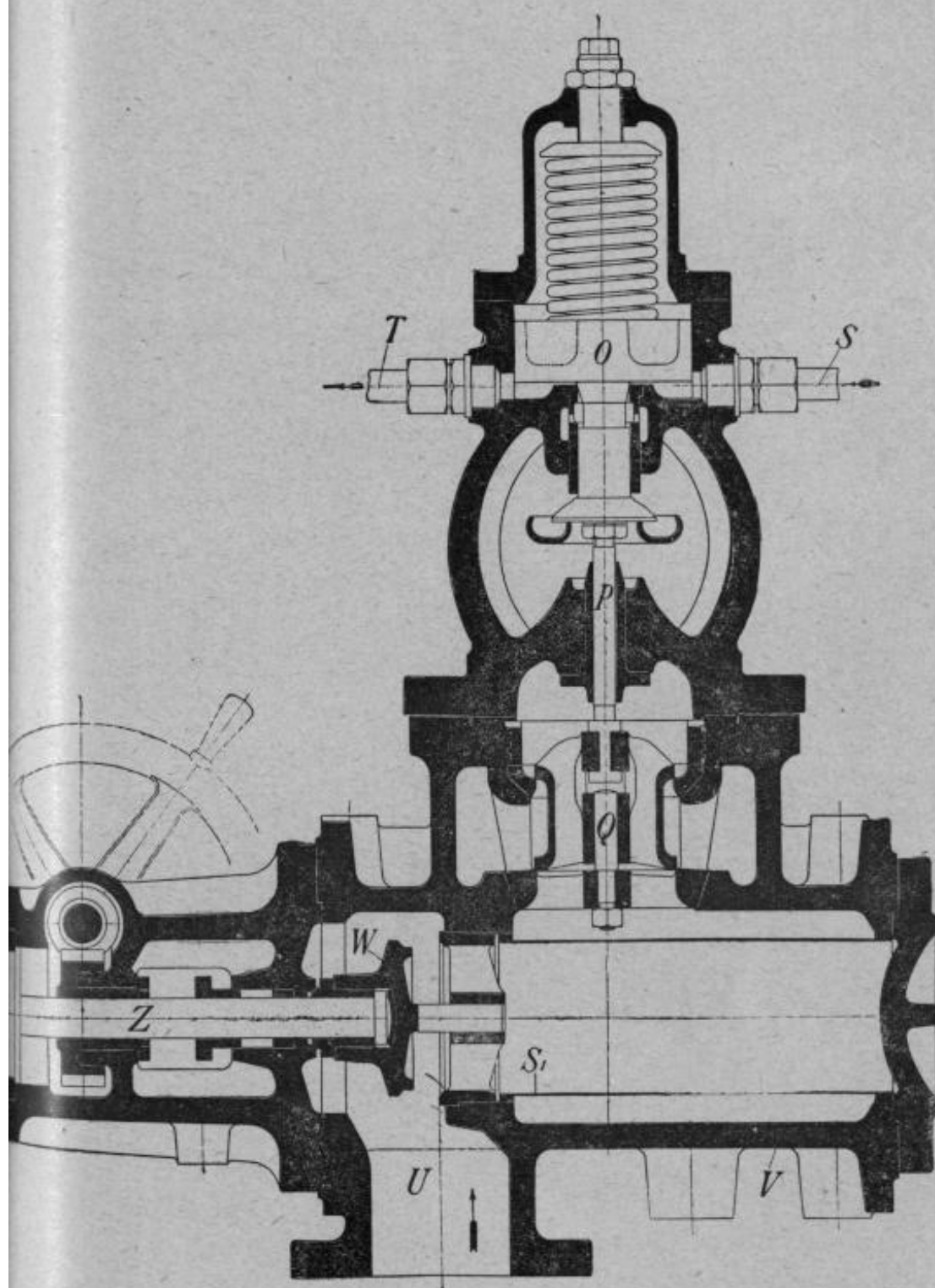


FIG. 1664.

et, la pression diminuant, le piston tend à revenir à sa position moyenne. Le contraire a lieu en cas d'une action inverse du régulateur.

On peut élever ou abaisser le cylindre L du régulateur à l'aide de la petite roue A_1 , par l'intermédiaire de roues d'angles et vis. On modifie ainsi la section libre de la fente de réglage et par suite la pression de l'huile, ce qui détermine un changement dans la position de la vanne d'admission ; le nombre de tours augmente ou diminue donc, bien que la charge de la turbine ne varie pas. On peut inversement par ce moyen maintenir constant le nombre de tours quand la charge varie. La variation de vitesse que l'on arrive ainsi à obtenir normalement est de $\pm 5\ 0/0$.

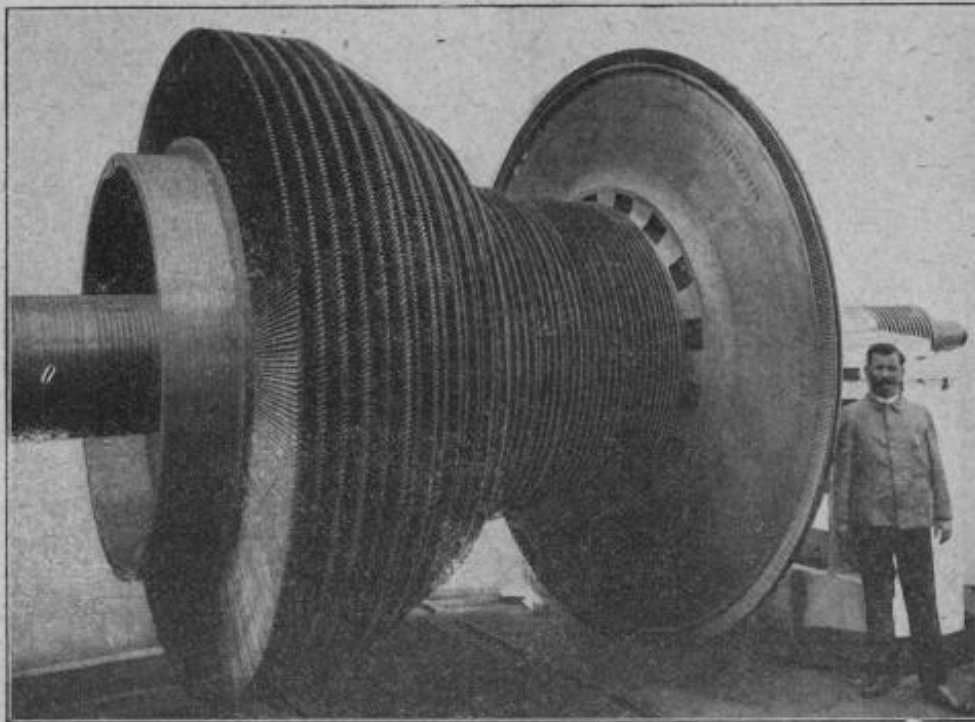


FIG. 1665. — Rotor d'une turbine à vapeur de 30.000 chevaux, Brown-Boveri-Parsons. (C^{te} Électro-Mécanique).

La roue A_1 peut être actionnée soit à la main, soit depuis le tableau de distribution à l'aide d'une commande électrique à distance. Un amortisseur à huile B_1 , réglable, amortit les déplacements brusques du régulateur.

Le régulateur de sûreté H ferme l'admission si l'on dépasse un nombre de tours déterminé. Il manœuvre, par l'intermédiaire d'un arbre X et d'une tringle de transmission, une clef Y qui déclenche un ressort repoussant la vanne principale W et sa tige Z, de façon à fermer complètement l'arrivée de vapeur. Ceci peut s'obtenir indépendamment du régulateur à l'aide d'un levier à main ; on rétablit l'admission à l'aide du volant de manœuvre de la vanne.

L'arbre du régulateur porte à sa partie supérieure un tachymètre indiquant le nombre de tours de la turbine.

Tous les organes de la distribution baignent dans l'huile, ce qui garantit contre tout coincement ou frottement pouvant provoquer

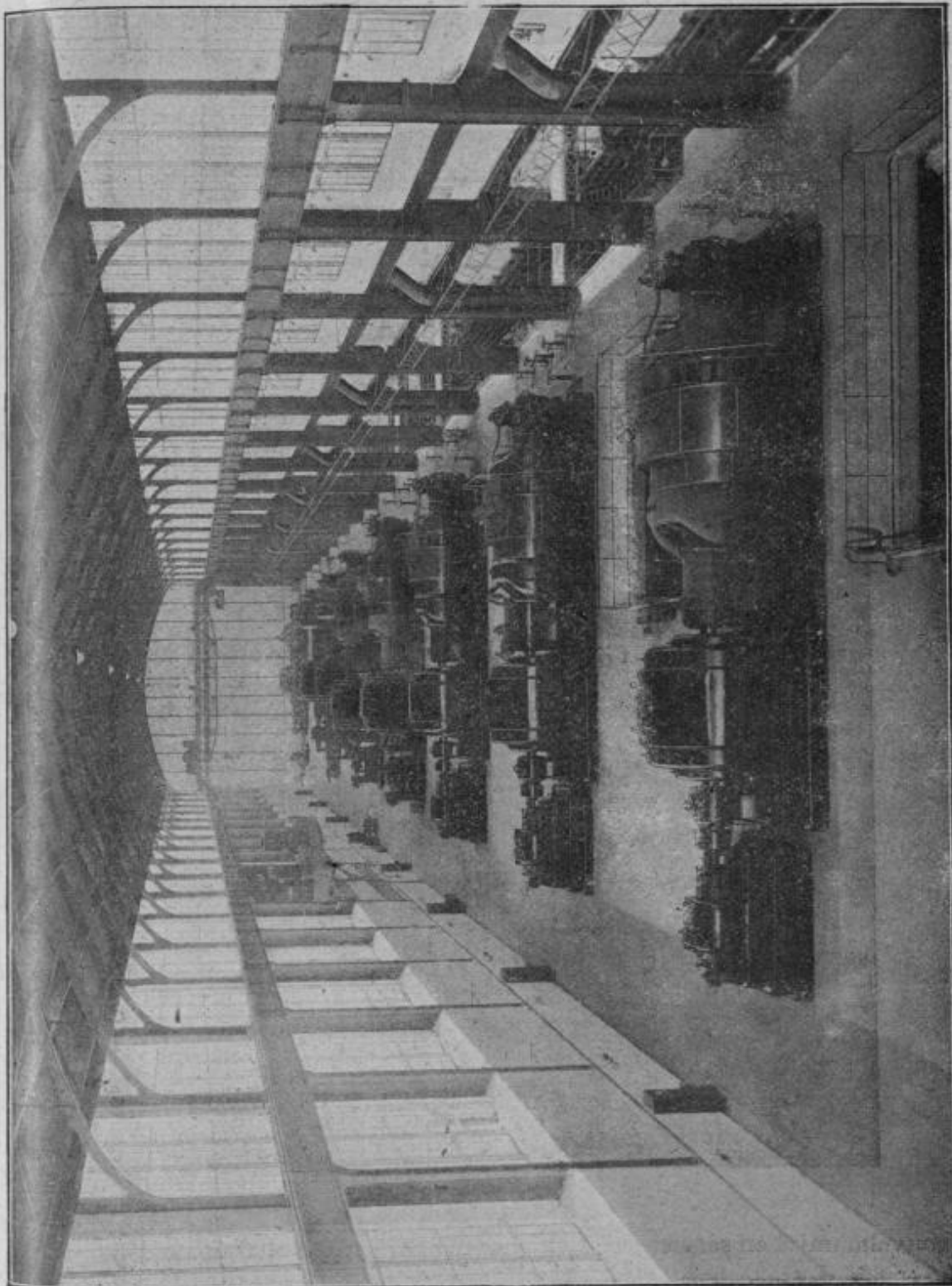


FIG. 1666. — Turbine Brown, Boveri-Parsons de 20.000 chevaux. — Usine Nord à Saint-Ouen, Cte Parisienne d'Électricité.
(Cte Electro-Mécanique).

un arrêt du système, et réduit au minimum l'usure des parties mobiles. Certaines turbines Parsons sont en outre munies d'un by-pass permet-

tant d'envoyer directement de la vapeur dans le second étage du rotor. La vapeur, agissant sur une surface plus grande, provoque une augmentation notable dans la puissance de la turbine.

Ce dispositif est utilisé, ou bien lorsque la consommation de la station centrale augmente trop rapidement pour qu'on puisse mettre une

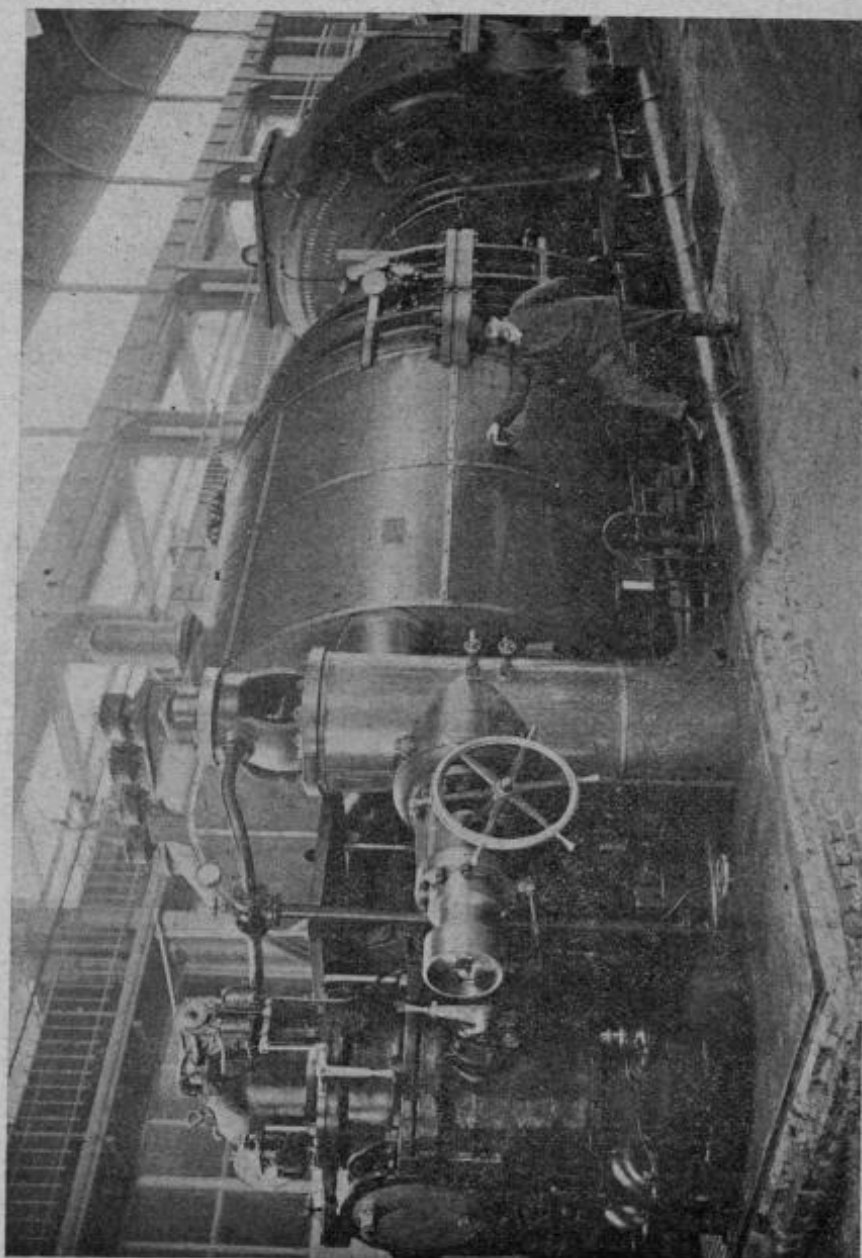


FIG. 1667. — Turbine à vapeur Brown, Boveri-Parsons de 25.000 chevaux. (Cie Electro-Mécanique.)

nouvelle unité en service, ou bien lorsque, par suite de l'arrêt du condenseur, la puissance de la turbine se trouve réduite.

Dans les installations à fortes surcharges, le by-pass peut être muni d'une commande automatique l'ouvrant lorsque la puissance normale de la turbine est dépassée.

Il résulte de ce qui précède que le piston du servo-moteur n'ayant qu'un travail très faible à accomplir, il suit immédiatement les plus faibles variations de vitesse de la turbine.

En outre, le temps employé par la vapeur à parcourir le rotor de la turbine étant excessivement court et les admissions se suivant à des intervalles de $1/3$ à $1/4$ de seconde, chaque modification dans l'admission se fait sentir immédiatement sur la vitesse de la turbine.

La consommation d'huile est très faible ; il résulte, en effet, de nombreux essais, que cette dépense varie de $0^{\text{kg}},3$ à $0^{\text{kg}},1$ par cheval indiqué pour des puissances comprises entre 100 et 1.500 chevaux.

La dépense de graissage se répartit comme suit :

Pour une turbine de 1.000 chevaux, $0^{\text{gr}},122$ par cheval et par heure.

—	—	500	—	0 132	—	—
—	—	100	—	0 180	—	—

Le poids de la turbine Parsons par cheval effectif est d'environ 25 à 15 kilogrammes suivant les dimensions de la machine, alors qu'il atteint 100 à 60 kilogrammes par cheval effectif dans les machines à pistons.

Les pertes dans la turbine Parsons peuvent se décomposer comme suit : pertes à la décharge, 5 0/0 ; fuites de vapeur à travers les aubes, 4 à 8 0/0 ; pertes de vapeur à travers les pistons, 3 à 6 0/0 ; pertes dans les distributeurs et les roues, 20 à 30 0/0. On arrive à un rendement organique de 0,96 à 0,92 et un rendement total de 0,65.

590. Turbines de Laval. — La turbine de Laval est une turbine à action, à roue unique ou à une seule chute de pression, à axe horizontal, à introduction partielle et à libre écoulement. Il n'y a, en effet, aucune surpression entre le distributeur et le récepteur. Elle n'utilise que la force vive de la vapeur qui arrive entièrement détendue sur les aubes de la roue réceptrice. Cette détente qui est complète et qui a pour but de donner à la vapeur sa vitesse maxima et par suite sa force vive maxima, s'effectue dans les tuyères de distribution entre la valve d'admission et l'orifice de la tuyère. Il en résulte que le disque portant les aubes réceptrices tourne dans une enceinte de pression uniforme ; il y a donc des deux côtés la même pression et la vapeur n'ayant aucune tendance à contourner les aubes réceptrices, on peut laisser un jeu suffisant entre les parties fixes et les parties mobiles.

Comme nous venons de le dire, la turbine de Laval n'utilise sur sa roue réceptrice que la force vive de la vapeur. Or, la densité du fluide détendu étant très faible, le principal facteur de la force vive est la vitesse.

La vapeur s'écoulant librement et par un ajutage de petite section

acquiert des vitesses considérables que l'on peut d'ailleurs calculer très facilement par la formule empirique de M. Rateau :

$$V = 100 \sqrt{\frac{530}{k}},$$

dans laquelle k représente la consommation théorique de vapeur par cheval effectif et par heure dans une machine à vapeur supposée parfaite.

La valeur de k est fournie par la relation :

$$k = 0,85 + \frac{6,95 - 0,92 \log P}{\log P - \log p},$$

dans laquelle :

P = pression d'amont en kilogrammes par centimètre carré ;

p = pression d'aval en kilogrammes par centimètre carré.

Si donc on laisse la vapeur à la pression de 8 kilogrammes par centimètre carré s'écouler librement dans une enceinte où la pression n'est que de 0,1 kilogramme par centimètre carré, on aura :

$$k = 0,85 + \frac{6,95 - 0,92 \log 8}{\log 8 - \log 0,1} = 4,07$$

et :

$$V = 100 \sqrt{\frac{530}{4,07}} = 1.140 \text{ m : s.}$$

Cette vitesse serait d'ailleurs portée à 1.195 mètres par seconde, dans le cas où la vapeur se détendrait librement de 12 à 0,1 kilogramme par centimètre carré.

Pour supprimer les pertes par choc, on doit donner aux aubes réceptrices la direction de la vitesse d'écoulement de la vapeur et, pour supprimer les pertes par frottement dans les aubes, il faut s'efforcer à ce que la vitesse relative de la vapeur à l'entrée des aubes soit égale à la vitesse relative de la vapeur à la sortie, c'est-à-dire égale et opposée à la vitesse tangentielle du disque.

Étant données les vitesses tangentielles du disque récepteur, on pouvait craindre de graves accidents ; mais M. de Laval a résolu le problème d'une façon ingénieuse par l'emploi d'un arbre flexible.

Appelons f la quantité dont l'arbre fléchit et $\left(m = \frac{P}{g}\right)$.

La vitesse angulaire critique a pour valeur :

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{fm}}.$$

Soient : Q , le poids du rotor de la turbine ; $m = \frac{Q}{g}$; P , la force en kilo-

grammes faisant fléchir l'arbre de 1 centimètre; $f = \frac{1}{100P}$; n , le nombre de tours par minute donnant la vitesse critique, on a :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \sqrt{\frac{1}{fm}} = \sqrt{\frac{100Pg}{Q}}; \quad \text{d'où} \quad n = 300 \sqrt{\frac{P}{g}}$$

En pratique, le nombre de tours par minute correspond à 1,5 à 2 fois la vitesse critique.

Les distributeurs de la turbine de Laval ont une section circulaire et sont disposés symétriquement par rapport à la roue, et seulement d'un côté comme l'indique la (fig. 1668). On emploie des roues ou disques en acier de petit diamètre qui tournent à un très grand nombre de tours qu'on peut réduire à l'aide d'engrenages de $1/3$ à $1/8$ suivant la puissance de la turbine. Pour une machine de 600 HP, le diamètre de la roue est de 1 mètre, la vitesse périphérique moyenne 425 mètres et le nombre de tours 8.000.

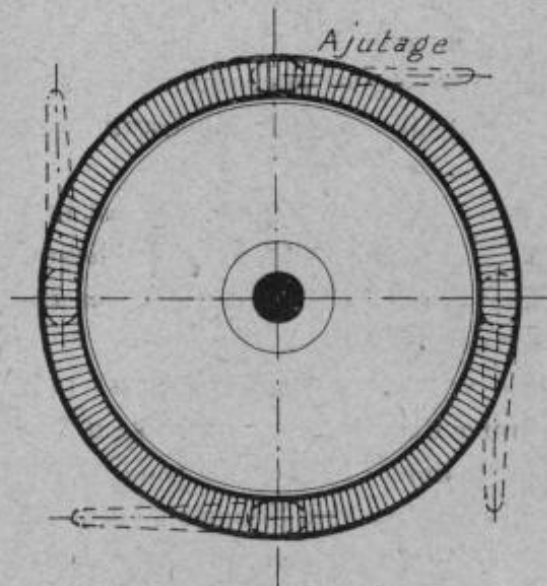


FIG. 1668.

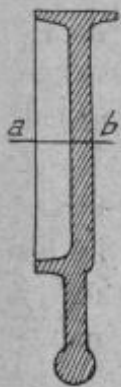
Coupe *ab*

FIG. 1669.

Les roues portent à leur périphérie des encoches où viennent se fixer les aubes dont la forme est indiquée par la (fig. 1669). Elles ont une hauteur de 10 millimètres constante, quel que soit le diamètre de la roue et une longueur fonction du diamètre de la roue; leur distance varie de 8 à 10 millimètres et leur nombre dépend de la puissance de la machine.

Chaque distributeur est muni d'une soupape ou obturateur permettant de faire varier ou de fermer la section minima et par suite, d'effectuer à la main la régulation de la turbine. Automatiquement, la régulation se fait en étranglant plus ou moins la vapeur à l'admission. Le régulateur est monté à une extrémité de l'arbre commandé par la turbine. Dans certaines installations le régulateur gouverne en même temps une soupape d'air qui permet de faire varier le vide dans la chambre où tourne la roue. Dans les types récents on commande automatiquement la soupape de chaque bouche distributrice au moyen d'un petit servo-omteur à vapeur.

Le rendement organique des turbines de Laval est de 0,93 et le rende-

ment relatif de 0,65, soit un rendement total de 0,60. Les pertes se décomposent ainsi : dans le distributeur, 10 0/0 ; dans la roue mobile, 25 0/0 ; à la décharge, 4 0/0 ; ensemble, 39 0/0.

Les pressions d'admission de la vapeur aux turbines sont de 6, 8, 10, 12 et 14 kilogrammes par centimètre carré. Les consommations de vapeur correspondantes respectivement à ces pressions, pour une turbine de 300 HP par exemple, sont de 7,45, 7,05, 6,75, 6,55 et 6,40 kilogrammes avec un vide de 68 0/0 au condenseur. A échappement libre de la vapeur, les consommations s'élèvent dans les mêmes conditions à 20, 18, 16,60, 16 et 15 kilogrammes.

591. Turbine Zoelly. — C'est une turbine à étages multiples à action. Les turbines de 200 à 1.300 chevaux ont dix étages à 3.000 tours ; à 15.000 tours on a 16 étages, et les grandes puissances comportent jusqu'à 20 étages.

La vapeur, après avoir passé par les soupapes de réglage, arrive au premier distributeur où elle se détend de 10 à 7 atmosphères, elle passe ensuite dans une seconde roue motrice et ainsi de suite.

Les tuyères sont réparties en deux secteurs aux extrémités d'un même diamètre et le développement de ces secteurs augmente progressivement d'un compartiment au suivant. Dans cette partie de la turbine, les roues ont le même diamètre et la largeur des canaux dans le sens du rayon ne commence à augmenter que lorsque l'injection est complète. Pour avoir ensuite la section nécessaire, on augmente le diamètre de la seconde série de roues, en même temps que la largeur radiale des aubes.

Les distributeurs sont en deux parties avec des ouvertures pour les aubages. Les roues ou disques, calés à la suite les uns des autres, sont forgés d'une seule pièce avec leur moyeu ; ils sont acier au nickel à 5 0/0. La jante présente une rainure circulaire et une baguette de centrage sur laquelle s'appuie une couronne portant aussi une rainure. La gorge circulaire, formée par les deux rainures, porte les aubes et les blocs d'écartement en acier. Les aubes sont en acier au nickel ; leur rigidité est assurée par un encastrement à queue d'aronde obtenu mécaniquement.

Les aubes de roues motrices sont élargies dans le sens radial (*fig. 1670*) ce qui permet d'adopter des angles de sortie plus petits que ceux d'entrée.

L'enveloppe et les distributeurs sont divisés en deux parties horizontalement.

Les paliers sont montés directement sur la plaque de fondation et ils sont indépendants de l'enveloppe.

Le graissage des paliers a lieu sous pression à l'aide d'une pompe qui refoule l'huile à 1 kilogramme et demi directement sous l'arbre.

La turbine Zoelly, en raison de sa construction très soignée, permet

des vitesses circonférencielles relativement élevées et par conséquent des vitesses de vapeur tolérant un nombre d'étages réduit. On n'emploie que des tuyères ou canaux de distribution parallèles.

Par suite du genre d'étagements, il n'existe pas d'écarts sensibles dans

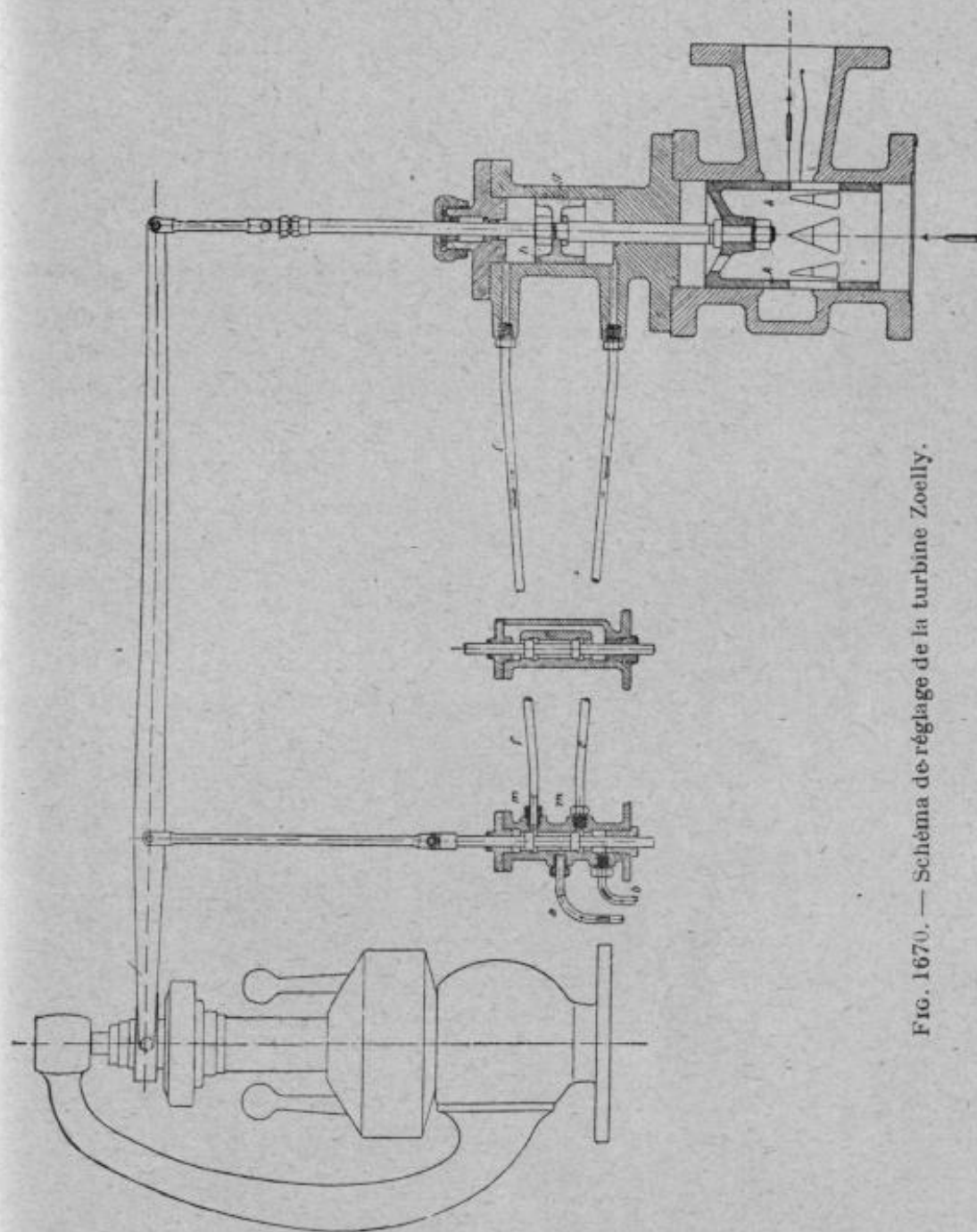


FIG. 1670. — Schéma de réglage de la turbine Zoelly.

les vitesses de la vapeur aussi bien pour la partie à haute pression que pour la partie à basse pression et la vitesse absolue de la vapeur à la sortie des distributeurs est presque toujours inférieure à 350 mètres, de sorte que l'usure des aubes, même en faisant usage de vapeur saturée, est à peu près nulle.

La régulation de la turbine Zoelly a lieu indirectement par l'action d'un servo-moteur. Elle agit par étranglement avec admission continue de vapeur. La (fig. 1670) représente schématiquement l'appareil de régulation. Le levier n placé sous l'influence du régulateur agit sur un petit tiroir distributeur double m qui reçoit de l'huile à 6 ou 7 kilogrammes de la conduite a . Ce distributeur est raccordé par deux conduites e et f au cylindre q dont le piston h commande directement la vanne régulatrice k de la turbine. La conduite b sert de retour d'huile au réservoir ; l'huile sous pression est fournie par une pompe actionnée par la turbine.

Le régulateur obéissant aux variations de charge découvre, par l'intermédiaire du tiroir m , les orifices des conduites f ou e , selon l'accroissement ou la diminution de la charge, de sorte que l'huile sous pression peut arriver au-dessus ou au-dessous du piston h . La vanne régulatrice se trouve donc abaissée si la charge diminue, ou soulevée si la charge augmente. Le levier n étant réuni non seulement au régulateur, mais aussi à la tige du piston h , le tiroir m reviendra toujours à sa position médiane par le réglage de h , position à laquelle les deux conduites e et f sont fermées.

De la disposition avec relais, il résulte qu'à une position déterminée du régulateur correspondra toujours une position bien déterminée de la vanne de réglage. Comme le tiroir m ne comporte que de très faibles mouvements, les plus faibles variations de charge entraînent immédiatement le fonctionnement de la régulation, et le dispositif de relais évite toute action tardive de la régulation.

Le puissant régulateur actionne uniquement le petit tiroir parfaitement équilibré et fonctionnant dans l'huile ; il n'est donc pas influencé par des masses en mouvement qui produisent toujours une réaction.

En passant de la pleine charge à la marche à vide, le nombre de tours n'augmente que de 3 0/0. L'appareil de régulation est muni d'un dispositif permettant de faire varier le nombre de tours normal de la turbine dans une limite de 5 0/0, en plus ou en moins. Ce dispositif se manœuvre soit à la main, soit au tableau de distribution, au moyen d'un petit moteur électrique. La régulation n'étant influencée d'aucune façon par la pression de la vapeur, elle fonctionne également bien avec tous les timbres de chaudières.

En outre du régulateur principal, les turbines possèdent un régulateur de sûreté, qui, par le déclenchement d'un fort ressort, ferme la vanne de vapeur si le nombre de tours dépasse de 8 à 10 0/0 la vitesse normale et arrête automatiquement la turbine. Pour obtenir une surcharge momentanée en marche avec condensation, ou pour obtenir en cas de marche avec échappement à l'air libre à peu près les $3/4$ de la puissance normale, la turbine est munie d'une soupape auxiliaire (by-pass) commandée soit à la main, soit par le régulateur suivant les besoins. Au moyen de cette sou-

pape, on admet directement de la vapeur vive devant un étage de section plus grande.

Au nombre des maisons qui construisent la turbine Zoelly, les principales sont : la société des Établissements Escher Wyss, de Zurich, les Établissements Schneider et C^{ie}, au Creusot, la Société alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort, la firme Siemens-Schuckert-Werke, à Berlin, les Vereinigte Maschinenfabrik Augsburg und Maschinenbaugesellschaft Nuremberg AG, et Mather Plat à Manchester.

RÉSULTATS D'ESSAIS DE TURBINES A VAPEUR ZOELLY

I. — Deux turbines Zoelly de 1.250 kw, 3.000 t : min. de l'usine de Drammen à Christiania. Les deux machines ont été montées à la fin de 1911.

	NUMÉRO DE LA TURBINE			
	550	551		
	PLEINE CHARGE	DEMI-CHARGE	TROIS QUARTS DE CHARGE	PLEINE CHARGE
Puissance utile, en kw, y compris l'excitation. Travail de condensation non compris.....	1.275	656	981	1.271
Pression à l'admission, en kg : cm ²	12,8	12,22	12,24	12,2
Température à l'admission, en degrés C.....	309	244	256,5	275
Vide à l'échappement, en centièmes de la pression de 735 ^{m/m} de mercure.....	96,8	98	97,3	96,6
Consommation de vapeur par kw-h utile.....	5,71	6,71	6,52	5,97

II. — Une turbine Zoelly de 5.000 kw de la centrale Escaut à Amsterdam. Vitesse 1.500 t : min.

	QUART DE CHARGE	DEMI-CHARGE	TROIS QUARTS DE CHARGE	PLEINECHARGE
Puissance utile, en kw, y compris l'excitation, mais non compris la condensation.....	1.184	5.100	4.305	5.418
Pression à l'admission, en kg : cm ²	11,9	12,2	11,8	11,7
Température à l'admission, en degrés C.....	271	292,4	291	309
Vide à l'échappement, en centièmes de la pression de 735 ^{m/m} de mercure.....	98,5	97,5	96,9	96,2
Consommation de vapeur par kw-h utile.....	6,67	5,74	5,6	5,42

**III. — Turbine Zoelly de 10.000 kw de la Société le Triphasé à Asnières.
Vitesse 1.250 t : min.**

	Tiers de charge	Pleine charge
Charge utile, en kw, y compris l'excitation, mais la condensation non comprise	3.678	10.006
Pression à l'admission, en kg : cm ² ...	11,4	10,8
Température à l'admission en degrés C.	297	296,5
Vide à l'échappement, en centièmes de la pression de 735 mm de mercure..	97,2	95,6
Consommation de vapeur par kw-h utile	6,6	5,45

Les turbines de 1.250 et 5.000 kilowatts ont été construites par la Société Escher-Wyss, de Zurich, celle de 10.000 kilowatts par la Société alsacienne de constructions mécaniques à Belfort.

Comme grosse puissance de machine, nous citerons une turbine de 28.000 HP construite par les établissements Escher-Wyss. A 1.000 tours sa puissance est de 22.500 HP effectifs avec une pression d'admission de la vapeur à 10,5 atmosphères, une température de la vapeur devant la soupape d'admission de 300° C. et un vide de 91,5 0/0. La turbine peut développer d'une façon durable 28.000 chevaux et même, pendant un certain laps de temps, 30.000 chevaux.

Cette turbine travaille avec 14 roues mobiles, qui avec l'arbre, forment un rotor d'un poids d'environ 26.000 kilogrammes. Le rotor de la machine électrique est accouplé rigidement à l'arbre de la turbine et pèse 60.000 kilogrammes. Les deux rotors accouplés sont supportés par quatre paliers qui sont refroidis et graissés par environ 600 litres par minute d'huile sous pression.

Pour le démarrage, il est prévu une petite pompe centrifuge à huile, mue par turbine à vapeur. Dès que la machine a atteint le nombre de tours normal, une pompe à roues dentées, commandée depuis l'arbre principal de la turbine, produit l'huile sous pression nécessaire ; la petite pompe centrifuge à vapeur peut alors être arrêtée.

La vapeur utilisée par la turbine est conduite à travers une tubulure de 2^m,40 de diamètre au condenseur par surface placé dans la cuve, dans lequel elle est condensée ; une pompe spéciale aspire l'eau condensée et la refoule dans un réservoir. Les pompes d'alimentation des chaudières aspirent l'eau de ce réservoir et l'introduisent dans les chaudières.

592. Turbine Electra. — La particularité caractéristique de la turbine *Electra*, qui est une turbine à action radiale, c'est que, au lieu de faire passer la vapeur par plusieurs roues par étage de pression, on n'emploie qu'une seule roue, dans laquelle on fait repasser plusieurs fois la vapeur. Ceci s'obtient à l'aide de tuyères spéciales dites *clarinettes*.

La roue à haute pression possède deux jeux de clarinettes permettant à la vapeur de traverser trois fois la roue (*fig. 1671*, côté gauche); la roue à basse pression possède quatre jeux de clarinettes et la vapeur la traverse également trois fois (*fig. 1671*, côté droit). La vapeur à la pression d'admission entoure la première roue; la vapeur à la pression du condenseur entoure la seconde roue, et tout l'intérieur de la turbine est rempli de vapeur à la pression intermédiaire.

A chaque passage, la vitesse de la vapeur diminue, et, par suite, la vitesse tangentielle de la roue, mais aussi le couple moteur augmente proportionnellement au nombre des passages.

L'étanchéité au passage de l'arbre à travers l'enveloppe est assurée par des joints en labyrinthe; la vapeur détendue fuit d'une rainure à l'autre. La pression est réglée de manière à ce qu'il y ait une légère fuite qui s'accuse à l'extérieur; on est ainsi certain d'éviter les rentrées d'air.

La régulation de ces turbines est obtenue au moyen d'un régulateur à force centrifuge, monté directement sur l'arbre, et qui actionne une vanne à double siège donnant admission de la vapeur dans les tuyères. La vitesse ainsi obtenue est sensiblement constante, puisqu'elle ne varie guère que de 2,5 0/0 entre la pleine charge et la marche à vide.

D'ailleurs, lorsque la marche de la turbine doit être sensiblement cons-

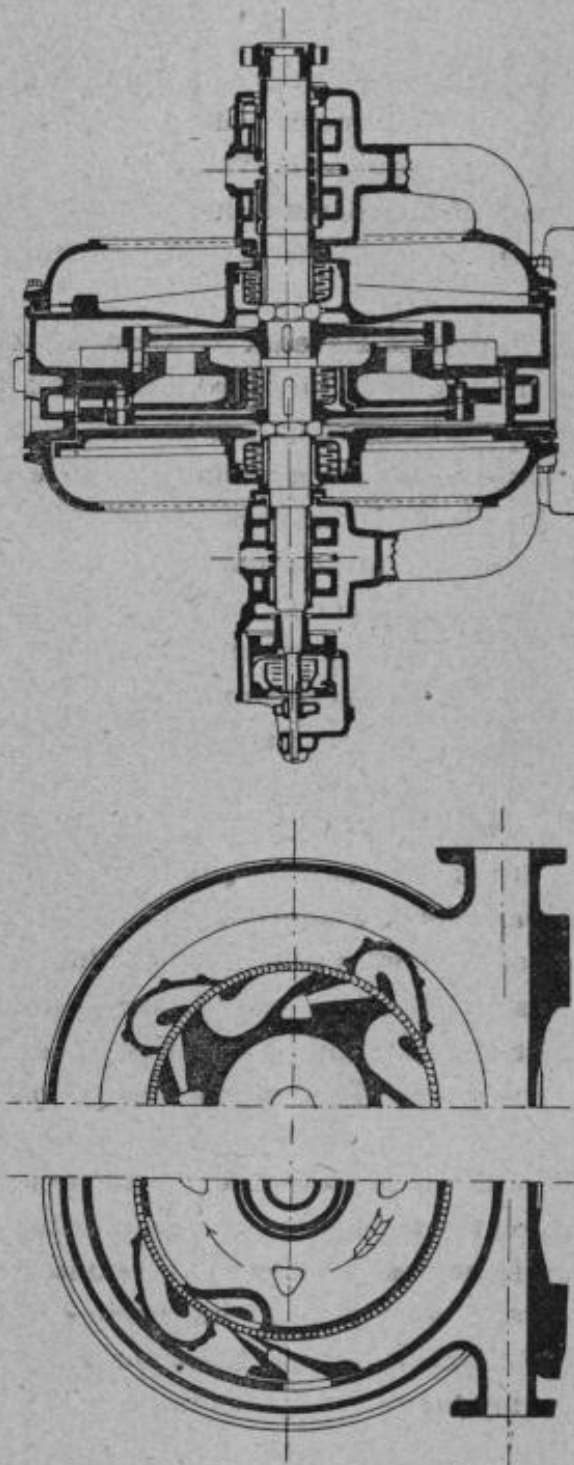


Fig. 1671. — Turbine Elektra.

tante pendant un temps assez long, des languettes de réglage, placées sur des tuyères, permettent de faire varier à la main l'admission de vapeur. On peut ainsi obtenir soit une surcharge, soit une marche réduite dans des conditions économiques. De plus, un dispositif de sécurité ferme totalement l'admission de vapeur si la vitesse devient exagérée, par suite d'avarie au régulateur.

La turbine Électra présente l'intérêt de ne nécessiter que des consommations très réduites de vapeur avec des types de faible puissance. Ce genre de turbine est muni du condenseur rotatif Kolb qui permet d'obtenir des vides très élevés et dont l'encombrement est très réduit.

593. Turbine Rateau. — C'est le prototype des turbines d'action multicellulaires. Dans ce genre de turbine, la chute totale de pression est divisée en différentes chutes moindres dont chacune est utilisée par action. Les diverses roues mobiles, dont le nombre dépend de la puissance et de la vitesse de la partie tournante, se meuvent chacune dans une chambre où la vapeur a une pression, déterminée par le nombre des distributeurs qui précèdent.

Ces derniers occupent une petite portion de la couronne d'aubes des roues dans les premiers couples, et le rapport entre la longueur de la périphérie qu'ils occupent et de la périphérie elle-même va en augmentant, dans le sens du mouvement de la vapeur, jusqu'à prendre la valeur 1 dans les dernières roues.

Les aubes des distributeurs sont en bronze et les aubes qui sont de forte épaisseur sont coulées avec la couronne intérieure.

Les roues mobiles sont formées d'un moyeu en bronze lequel est rivé à un disque en tôle d'acier et sur la périphérie duquel sont rivées une à une les aubes, réunies à la périphérie extérieure par un même ruban de bronze ou d'acier. La dimension axiale des aubes (hauteur) varie de 20 à 25 millimètres suivant le diamètre moyen de la roue. Le jeu entre la partie fixe et la partie tournante, qui appartient à une périphérie de petit diamètre, représente la seule communication entre deux chambres successives et les pertes de vapeur sont réduites à une valeur très petite.

On réalise généralement les turbines avec 4, 6 ou 8 roues pour une vitesse de rotation de 3.000 tours par minute, une dizaine pour 1.500 tours et une vingtaine pour 750 tours.

On fait aussi généralement une très grande chute au premier distributeur, ce qui procure l'avantage de confiner la haute pression dans la boîte d'arrivée de la vapeur et d'abaisser la pression et la température dans le corps de la turbine. Les angles d'injection qui sont de 16 à 20° aux premiers éléments peuvent aller jusqu'à 35° et même 40° au dernier distributeur pour réaliser une section d'écoulement suffisante. Les ailettes sont

fraisées dans la masse pour donner aux aubes exactement le profil voulu. La jante est un peu moins large que l'ailette, ce qui réduit le plus possible le poids à la périphérie.

La régulation se fait par étranglement de la vapeur à l'admission avec une soupape équilibrée, commandée directement ou indirectement avec un servo-moteur à pression d'huile, par un régulateur centrifuge dont on peut faire varier les conditions, pour la mise en parallèle du groupe, au moyen d'un petit volant. Sur la partie inférieure de l'axe du régulateur centrifuge est calé un régulateur de sécurité, qui provoque la fer-

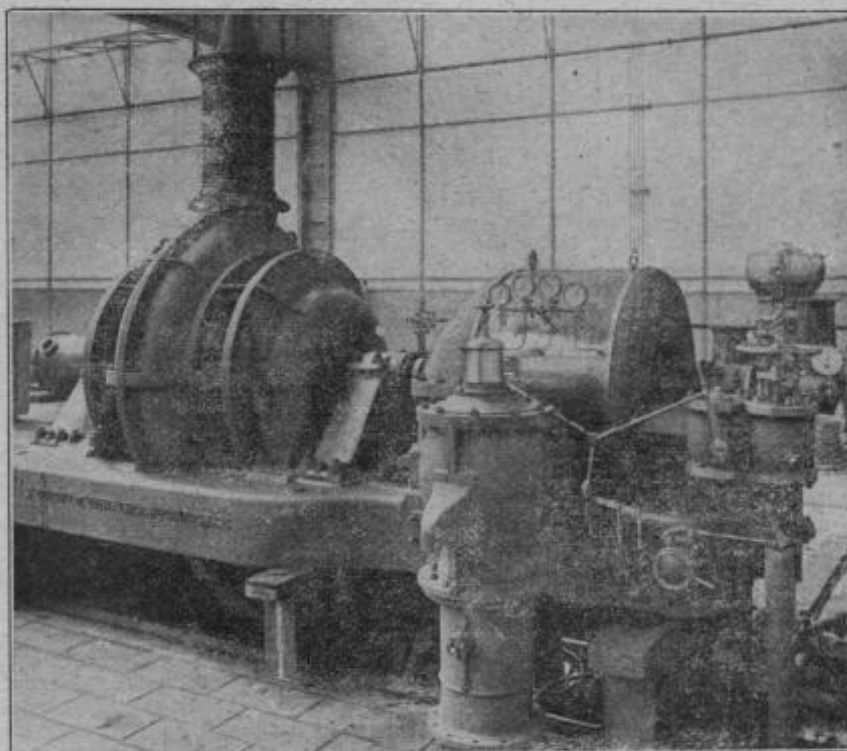


FIG. 1672. — Turbo-soufflante, système Rateau, de la Société générale de Constructions mécaniques.

meture de la soupape d'admission de la vapeur, quand la vitesse dépasse de 15 0/0 la vitesse normale.

La construction de cette turbine est très délicate.

Dans les turbines Rateau, construites par la maison Sautter et Harlé, les groupes à haute et moyenne pression sont dans une première enveloppe cylindrique et le groupe à basse pression dans une seconde enveloppe de même axe que la première : un tuyau conduit la vapeur de décharge de la première enveloppe à l'admission de la deuxième.

Depuis quelques années, les ateliers de construction d'Oerlikon fabriquent les turbines à vapeur à action système Rateau avec perfectionnements apportés par eux. La turbine est formée d'un seul corps cylin-

drique dans lequel se trouvent trois séries de disques : les disques à haute moyenne et basse pression. Les compartiments ou cellules, dans lesquels tournent les disques mobiles, sont formés par des diaphragmes en deux parties constituant des parois rigides et fixes, à la périphérie desquelles sont rivées les ailettes directrices. Les disques tournants sont profilés d'après la forme d'un solide d'égale résistance et sont constitués par des plaques d'acier au nickel laminées d'une seule pièce. Autour du disque pourvu de ses ailettes se trouve un mince bandage d'acier au nickel. Les disques sont essayés à la force centrifuge en les faisant tourner à une vitesse de une fois et demie supérieure à la vitesse normale. L'arbre moteur portant ces disques est à sections étagées.

La vapeur, surchauffée ou non, est injectée dans la turbine par un canal annulaire ménagé dans le fond du cylindre et passe de là dans la turbine par le premier système d'ailettes directrices ménagées dans le fond. Ce premier système est à injection partielle. Après avoir fonctionné dans les cellules du corps à haute pression, la vapeur gagne le corps de pression moyenne, dont ces disques ont un diamètre plus grand. Pour la marche en surcharge de la turbine, on peut, au moyen d'une soupape, injecter de la vapeur fraîche dans le canal annulaire précédant le corps à moyenne pression. La vapeur ayant quitté les derniers disques du corps à pression moyenne atteint le corps à basse pression, de grand diamètre, duquel elle est déchargée au condenseur.

Les turbines à vapeur construites par les ateliers de construction Oerlikon actionnent principalement des alternateurs ou des génératrices.

La turbine Rateau n'a aucune poussée axiale, et la perte par fuites de vapeur ne dépasse pas 3 0/0 dans les grosses unités.

On peut définir comme suit les diverses pertes de la machine :

Pertes dans le distributeur.....	7 0/0
— dans la roue mobile.....	24 0/0
— par fuite de vapeur.....	1 0/0
ENSEMBLE.....	32 0/0

Le rendement relatif est ainsi de 68 0/0 et le rendement total pour des unités de grande puissance, 60 0/0.

Les turbines de 15.000 kilowatts du système Rateau installées aux nouvelles usines de la C^{ie} Parisienne de distribution d'électricité et construites par la Société générale de constructions mécaniques sont disposées comme suit : la vapeur rencontre sur son passage un tamis, puis un séparateur d'eau avec purgeur automatique, ces appareils étant indispensables malgré l'emploi de la surchauffe. La vanne d'arrivée de vapeur étant ouverte, la vapeur pénètre dans le corps de l'obturateur, traverse les clapets et se rend dans un tore d'admission ; ce dernier est ménagé de

fonderie dans le *fond d'admission*. Du tore d'admission la vapeur est précipitée sur les roues par l'intermédiaire de tuyères dans lesquelles se réalise la première détente. Ces dernières sont au nombre de 60. Comme il est nécessaire de redresser le courant de vapeur avant qu'il pénètre dans le deuxième étage de la roue double, on effectue cet arrangement au moyen d'une série spéciale d'aubages fixés dans le stator et constituant le redresseur, lesquels existent sur les trois quarts de la circonférence.

A la sortie de la roue double, l'injection devient totale et il reste à la vapeur à parcourir onze étages de pression comprenant chacun un diaphragme fixe, portant les distributeurs où se fait la détente divisionnaire de l'étage et une roue portant les aubages moteurs. La vapeur sortant de la dernière roue se répand dans le fond; l'échappement et les filets à la sortie de cette dernière sont guidés par une couronne d'aubes fixes à orientation convenable, préparant leur descente au condenseur où un vide de 94 0/0 est assuré.

Le condenseur est relié à la turbine par une pièce formant joint hydraulique dans laquelle viennent se déverser toutes les purges.

La quantité de vapeur à admettre au tore d'admission est réglée à l'aide d'un régulateur centrifuge.

En cas de non-fonctionnement du régulateur, un autre régulateur dit de sécurité agit, qui ferme la vanne d'arrivée de vapeur, lorsque la vitesse de la turbine excède de 15 0/0 la vitesse de régime qui est de 1.255 tours.

Le graissage des organes à lubrifier s'effectue avec de l'huile sous pression qui parcourt un circuit complètement fermé et sert indéfiniment.

La turbine est prévue pour une puissance variant de 2.500 à 15.000 kilowatts, la puissance moyenne la plus souvent réalisée étant de 10.000 kilowatts.

Pour cette dernière marche, la consommation, dans les conditions normales de marche, c'est-à-dire pour une pression de 14 kilogrammes absolus et un vide de 96 0/0, la consommation est de 5^{kg},950 de vapeur par kilowatt-heure, soit 60.000 kilogrammes à l'heure, ce qui correspond à un rendement de 0,65 pour la turbine seule.

594. Turbine Curtis. — C'est une turbine à action où l'amortissement successif de la vitesse, au lieu de se faire sur une seule roue, a lieu sur deux ou trois roues montées sur le même arbre. La vapeur, sortant des ajutages, agit sur la première roue, puis elle est prise à sa sortie dans une couronne d'aubages fixes qui forment autant de canaux, pour la diriger sous l'angle voulu vers les aubes de la deuxième roue et ainsi de suite.

La vapeur se détendant dans le premier distributeur de section rectangulaire jusqu'à une pression qui dépend du rapport entre la section finale maxima et celle minima de ses canaux, elle agit sur la première roue et

se décharge, avec une vitesse absolue encore élevée dans un distributeur que porte le jet de vapeur, sur une seconde roue et ainsi de suite.

Dans les turbines à axe vertical, l'arbre est en deux pièces et s'appuie sur un palier portant tout le poids de la partie tournante. Le graissage de ce support se fait avec de l'huile sous pression. La pompe de circulation de l'huile provoque aussi la circulation dans les deux colliers de guidage placés l'un immédiatement sur la turbine, l'autre sur l'alternateur.

Pour les fortes puissances, on compose la turbine de deux ou trois

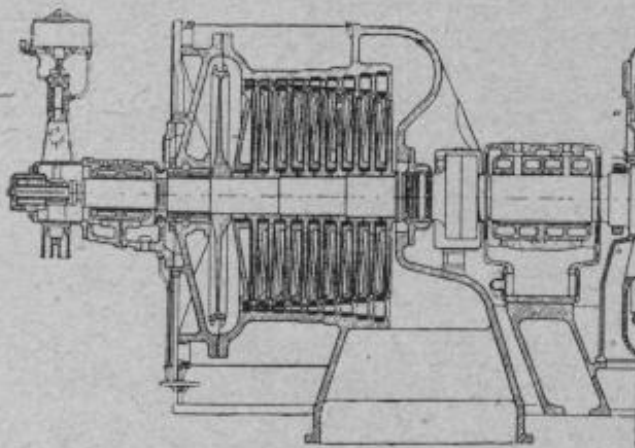


FIG. 1673. — Dispositif de la turbine, système Curtis.

groupes de turbines élémentaires, ayant chacun leurs détenteurs propres et que la vapeur traverse successivement. Sous cette forme la turbine Curtis devient une turbine à échelons de vitesse et à chute de pression fractionnée.

La régulation des turbines Curtis s'obtient en fermant successivement

et complètement les ouvertures du premier distributeur, en commençant par le deuxième à droite. L'aire d'entrée de la première ouverture varie plus ou moins selon la charge. Toutes les aires (moins une) d'entrée dans les canaux distributeurs du premier groupe peuvent être fermées par une soupape, dont la commande est effectuée par un petit servo-moteur à vapeur formé par un cylindre dans lequel se meut un piston dont la tige est liée à la soupape. L'admission de la vapeur est réglée par une petite boîte de distribution commandée par un électro-aimant. Le degré de régularité du régulateur est de 2 0/0 et l'écart de vitesse admis est de 4 0/0.

Comme consommation de vapeur, il faut compter sur 8,5 à 6 kilogrammes par kilowatt-heure pour des puissances de 200 à 2.000 kilowatts.

595. Turbine mixte Melms et Pfenninger. — Dans ce genre de turbine, les inventeurs ont réussi à remplacer la partie à haute pression de la turbine à réaction pure, partie difficile de la turbine de ce système, par une série d'aubages à action, et à en conserver la partie précieuse à basse pression.

Une portion notable de la chute de pression disponible dans la partie à action de la turbine qui est à injection partielle, est utilisée (la pression tombant à peu près à 2 atm. abs.) avant que la vapeur ne passe dans

les aubages à réaction, où a lieu son expansion ultérieure. Ceci permet de donner aux premiers aubages à réaction une hauteur beaucoup plus considérable qu'à ceux d'une turbine à réaction pure de même puissance et d'admettre des jeux beaucoup plus grands dans le sens radial comme dans le sens axial sans nuire au bon rendement de la turbine sous le rapport de la consommation de vapeur. La turbine système Melms et Pfenninger fonctionne pour cette raison avec une sécurité absolue, non seulement à cause de ses avantages constructifs qui vont être exposés plus bas, mais aussi par suite des jeux donnés dans de larges proportions entre les parties fixes et tournantes de la machine.

Dans la partie à action de la turbine qui nous occupe, se produit en moyenne une expansion quintuple de la vapeur, tandis que, dans une turbine à action pure, pour le même nombre de roues à ailettes, l'expansion est environ centuple. D'ailleurs, les difficultés particulières à la turbine à action pure, énoncées précédemment, se font sentir à un moindre degré dans la turbine Melms et Pfenninger où l'étanchéité des divers éléments est assurée principalement au moyen de joints réglables dans le sens de l'axe ; ceci permet de mettre ces jeux en rapport avec les chutes de pression, très faibles du reste, de chaque élément.

En général, l'on a adopté dans la turbine Melms et Pfenninger pour l'arbre une construction en forme de tambour, non seulement pour qu'il soit possible de maintenir le nombre pratique de révolutions au-dessous du nombre critique, mais aussi parce que cette forme d'arbre, par suite de la combinaison des systèmes à action et à réaction, permet d'équilibrer d'une manière très simple la poussée résultant de la partie à réaction de la turbine. Par un choix convenable du degré d'admission dans la partie à action (partie à haute pression) de la turbine, l'on peut donner au diamètre du tambour, suivant lequel sont disposés les aubages à action, une dimension telle que l'espace annulaire compris entre les parties à action et à réaction, où la pression de la vapeur est la même qu'à l'entrée dans la première série directrice, présente une surface suffisamment grande pour que la pression qui s'exerce sur elle puisse faire équilibre à la poussée. Avec cette construction disparaissent les pistons d'équilibre de la turbine à réaction pure, d'où résulte par conséquent un avantage sur cette dernière. Comme, en outre, la pression de la vapeur varie sur tout son parcours à peu près proportionnellement à la charge, l'équilibrage de la poussée au moyen des espaces annulaires mentionnés ci-dessus se trouve assuré pour n'importe quelle charge de la turbine. D'ailleurs, les petites différences de pression pouvant s'établir entre la pression d'équilibre et la poussée sont absorbées par le palier à cannelures qui, en raison du parfait équilibrage, ne nécessite point de grandes dimensions.

Le groupement des parties à action et à réaction de la turbine sur un

même arbre en forme de tambour constitue bien la particularité de la combinaison d'une turbine à action avec une turbine à réaction suivant le système Melms et Pfenninger. Les constructeurs de la turbine ont cependant, pour des cas spéciaux, employé aussi les autres types connus de turbines à action pour les combiner avec la partie à réaction en forme de tambour. C'est ainsi que la (fig. 1674) représente une coupe longitudinale d'une turbine dont la partie à action comporte un groupe de tuyères comme appareil directeur, tandis que la roue motrice est formée par un

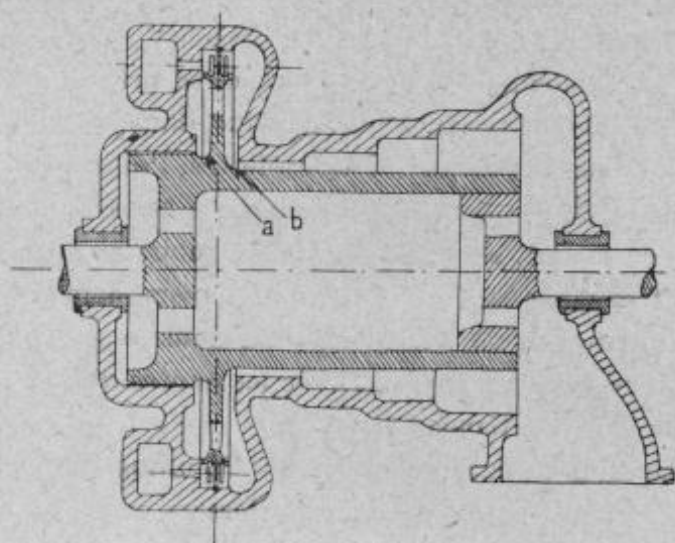


FIG. 1674.

disque relié au tambour et présentant deux étages de vitesse. L'équilibrage de la poussée, au moyen d'un espace annulaire ménagé entre les parties à action et à réaction de la turbine, est rendu possible ici par la différence existant entre les diamètres du tambour en *a* et *b*.

L'arbre de la turbine en forme de tambour est rendu étanche dans la

partie à haute pression au moyen de la construction du joint en labyrinthe. Les excellents résultats des essais sur la consommation de vapeur ont prouvé que les pertes par les chambres du labyrinthe ne jouent pas un rôle important et que ce moyen d'assurer l'étanchéité de l'arbre peut être employé sans crainte.

Il a déjà été rappelé précédemment que la partie de la turbine système Melms et Pfenninger garnie d'aubages a une longueur beaucoup moindre que la partie correspondante d'une turbine à réaction pure. Cette propriété est encore renforcée par cette circonstance que le diamètre du tambour dans la partie à haute pression étant beaucoup plus grand, il est possible de disposer les bourrages de manière à les faire pénétrer dans le corps du tambour, d'où résulte une nouvelle diminution de la longueur de la turbine. La distance entre les points d'appui des deux paliers de la turbine est donc plus courte que celle de la turbine à réaction pure.

Toutes les parties tournantes de la machine forment un ensemble dans lequel toute possibilité de disjonction des différentes pièces constituantes est exclue. Toutes les pièces étant façonnées, on peut obtenir un équilibrage parfait des masses aussi bien au point de vue statique que dynamique. Les bourrages sont du genre à labyrinthe de vapeur, et comme

dans ce mode de construction l'huile ne peut pénétrer à l'intérieur du corps de la turbine, l'eau condensée n'en renferme aucune trace. La dépense de vapeur introduite dans le bourrage ne constitue pas une perte, car c'est la vapeur d'échappement du régulateur qui est employée pour assurer l'étanchéité du bourrage.

L'enveloppe de la turbine est d'ailleurs construite de manière à éviter toute rupture, par suite de dilatations inégales pouvant survenir pendant le travail.

La pompe à huile, servant au graissage sous pression, est commandée par l'arbre de la turbine au moyen d'un engrenage hélicoïdal.

La construction des aubages de la partie à action est telle que chaque élément est séparé de l'élément voisin par un joint dans le genre de ceux à labyrinthe de vapeur. Les aubes sont fixées, d'après un procédé d'une grande simplicité, dans des rainures à section en queue d'aronde pratiquées sur le pourtour du tambour même. Le nombre des roues à action étant restreint par suite du grand diamètre du tambour, la préparation et l'assemblage des aubages pour la partie à action de la turbine ne nécessite pas beaucoup de temps. Quant aux aubages des roues à réaction, ils sont fabriqués en forme de segments, dans des conditions telles que les dimensions des pas et des angles des aubes déterminées par le calcul soient rigoureusement maintenues. Les segments ainsi exécutés forment un corps rigide que l'on fixe également dans des rainures de section convenable.

Le système de réglage de la turbine est basé sur le principe de l'admission intermittente de la vapeur qui est déterminée par le régulateur de la machine ouvrant et fermant alternativement la valve de réglage au moyen d'un servo-moteur. Une variation de la charge détermine un changement du nombre de révolutions qui, à son tour, entraîne une modification de l'action du régulateur à poids sur le servo-moteur ; ce dernier fait à son tour varier l'admission de la vapeur fraîche par l'intermédiaire de la valve de réglage. Les principaux organes du réglage sont :

a) Un régulateur avec un excentrique pour la commande du tiroir de distribution du servo-moteur et un dispositif pour le changement du nombre de tours de la turbine pendant la marche. Ce dernier dispositif peut être aussi commandé à distance par un moteur électrique permettant de faire varier le nombre de révolutions par exemple du tableau de distribution, si c'est nécessaire. Une lucarne vitrée, pratiquée en face du tiroir-distributeur du servo-moteur, permet d'observer aisément les phases du réglage pendant la marche de la turbine.

b) Une valve de réglage, qui est ouverte et fermée alternativement à l'aide d'un piston mû par la vapeur introduite par le tiroir de distribution du servo-moteur détermine l'admission intermittente de la vapeur

dans la turbine. L'échappement de la vapeur travaillant sous le piston est assuré par le tiroir de distribution sous le contrôle du régulateur. Dans certains cas, on construit un second tiroir afin d'augmenter la section de sortie de la vapeur d'échappement et d'obtenir de cette manière un réglage plus parfait même pour de faibles puissances. Le tiroir de distribution est placé directement au-dessus du régulateur, ce qui contribue à raccourcir considérablement la tige d'excentrique, le tout étant entouré d'une enveloppe. Le tiroir de distribution communique avec la valve de réglage simplement au moyen d'un tube ; un second tube à vapeur conduit la vapeur d'échappement de la valve de réglage aux joints du bourrage.

De même que dans les autres systèmes de turbines à vapeur, il est possible, dans la turbine Melms et Pfenninger, de faire rendre à la machine, au moyen d'une soupape de surcharge, la puissance normale même lorsque l'échappement de la vapeur a lieu à air libre. La vapeur fraîche arrivant par la soupape de surcharge ne commence dans ce cas son expansion que dans un groupe plus éloigné d'aubages et permet à la turbine, par suite de la plus grande section qu'elle trouve en cet endroit pour son passage, de rendre sa puissance normale même avec échappement libre de la vapeur ; naturellement, ceci entraîne une augmentation de la consommation de vapeur par unité de puissance.

Dans le cas particulier où la turbine doit être soumise à de grandes variations de charge, on peut donner à la valve de surcharge une construction très simple rendant possible automatiquement les surcharges brusques de la machine. Pour réaliser cette surcharge automatique, on utilise la différence des pressions existant dans les régions entourant la valve de réglage et le premier distributeur pour déterminer l'ouverture de la valve de surcharge. Cette différence de pression grandissant avec l'augmentation de la charge de la machine, il arrive un moment où elle est suffisante pour lever la valve de surcharge ; ceci d'ailleurs n'a pas lieu brusquement, mais peu à peu, au fur et à mesure que la charge augmente.

Ce principe de la surcharge automatique offre un grand avantage sur les autres constructions, où la valve de surcharge est commandée par le régulateur lui-même et, par conséquent, dépend de la variation du nombre de révolutions. C'est surtout dans le cas où la turbine actionne un générateur à courant alternatif avec accouplement en parallèle qu'il est important que le mécanisme de surcharge soit indépendant de la modification du nombre de révolutions.

Pour prévenir l'emballement de la turbine il y a à l'extrémité de l'arbre où se trouve l'engrenage hélicoïdal du régulateur, un régulateur de sûreté de construction spéciale qui arrête automatiquement l'admission de la vapeur, aussitôt que le nombre de révolutions s'élève au-dessus du nombre

normal en plus d'un certain pour cent admis. Le régulateur de sûreté se compose de deux poids tournant avec la machine dont la force centrifuge est équilibrée en marche normale par un ressort ; lorsque la force centrifuge l'emporte sur la tension du ressort par suite d'une certaine augmentation du nombre de tours, les poids du régulateur déterminent le déplacement d'un levier qui ferme alors la soupape d'arrêt principale disposée sous l'enveloppe de la turbine. Ceci a lieu parce qu'un cliquet qui, en marche normale maintient la soupape d'arrêt ouverte en s'opposant à la détente du ressort, se déclenche et permet alors au ressort d'agir et de fermer la soupape.

596. Turbine Eyermann. — Dans ce genre de turbine, les ailettes sont disposées en anneaux concentriques à la surface d'une roue et la vapeur les traverse dans le sens radial. C'est essentiellement une turbine radiale à étages, qui est en même temps une combinaison de la turbine à action à haute pression et de la turbine à réaction à basse pression.

Les déformations de la roue mobile par la force centrifuge des ailettes sont empêchées par l'établissement de contrepoids sur la face arrière de la roue et la poussée axiale de la vapeur sur le palier est compensée par un équilibrage, obtenu par la pression même de la vapeur. La faible pression qui règne dans le corps de la turbine permet une construction très simple et, par suite, sûre, des presse-étoupes et conduit à des pertes par rayonnement et vapeur de joints très faibles. La perte de vapeur servant à obtenir l'équilibrage est très faible (environ 2 0/0 dans les turbines de 1.000 HP) ; elle est d'ailleurs compensée par le fait qu'il n'y a pas ici de dépense de travail de frottement dans un palier de butée et par l'absence des pertes de chaleur par la roue.

Les ailettes de la turbine Eyermann sont en acier au nickel et fraisées à même la masse. Le corps de l'ailette, son pied et son couvercle en une seule pièce, forment les trois côtés du canal donnant passage à la vapeur et la surface interne de l'ailette voisine forme le canal sur le quatrième côté.

La roue mobile en acier Martin-Siemens est munie de rainures annulaires concentriques sur les deux faces ; les rainures d'une des faces sont destinées à recevoir les couronnes d'ailettes ; dans celles de l'autre face sont encastrés, de la même manière, les contrepoids dont il a été question plus haut.

L'arbre flotte, pour ainsi dire, sur une couche d'huile sous pression fournie par une pompe à vis. Une partie de cette huile est utilisée pour le service du servo-moteur de la distribution qui s'effectue, soit par le laminage de la vapeur à l'admission, soit par l'ouverture ou la fermeture des tuyères. Le régulateur a seulement à déplacer une valve se mouvant très facilement et qui est de ce fait très sensible. Pour le cas où il se présen-

terait un emballement, il est prévu un régulateur de sûreté indépendant de tous les autres organes de la turbine, et qui est placé directement sur l'arbre principal.

Cette turbine s'applique pour travail à condensation et aussi pour travail à échappement libre, à contre-pression, avec alimentation à la

fois par de la vapeur vive et par de la vapeur d'échappement, avec prise de vapeur à une pression quelconque.

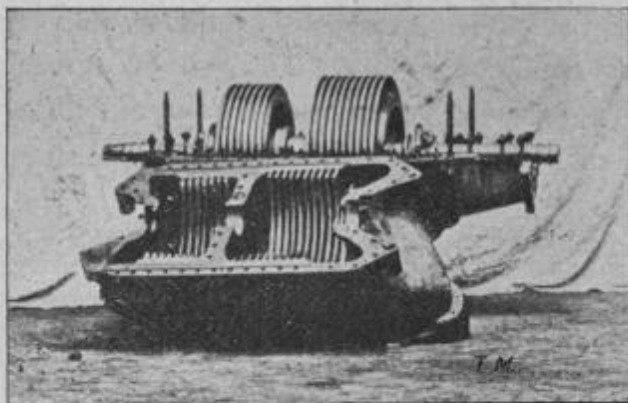


FIG. 1675. — Turbine système Bréguet.

tambour en acier, claveté sur l'arbre. Une couronne d'aubages distributeurs s'intercale entre deux couronnes d'aubages moteurs fixées dans le stator. La détente se produit seulement dans chacune des couronnes fixes, les aubages moteurs étant traversés à pression constante.

597. Régulation des turbines.

— Les régulateurs employés pour les turbines à vapeur sont, à peu de chose près, les mêmes que ceux utilisés pour les machines à piston ; ils n'en diffèrent que par des détails de construction rendus nécessaires par l'obligation de contrôler des vitesses considérables.

Le plus souvent, le régulateur n'agit que par l'intermédiaire d'un servomoteur. Tantôt ce servomoteur est mécanique comme dans les turbines Parsons et Zoelly par exemple, tantôt il est électrique comme dans les turbines Curtis.

Presque tous les constructeurs utilisent un régulateur supplémentaire dont l'unique fonction est de

596 bis. Turbine Bréguet (fig. 1675). — C'est une turbine à roues multiples du type à action et montage en tambour. Les aubages moteurs sont encastés sur les couronnes d'un

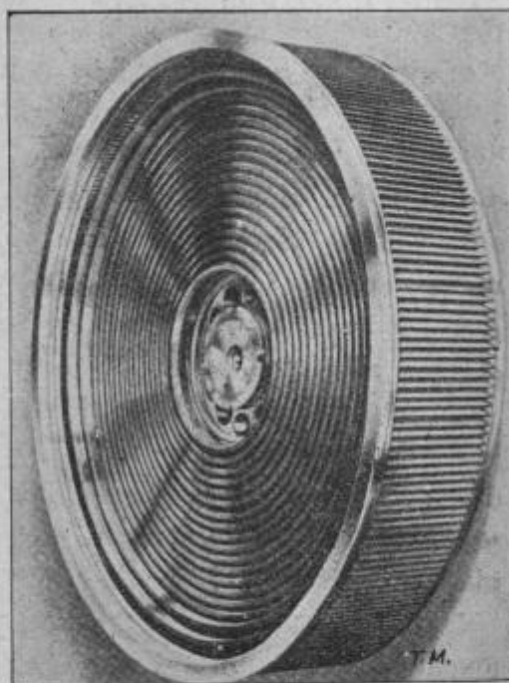


FIG. 1676. — Tuyères et roue double de la turbine Ljansröm.

couper automatiquement l'arrivée de vapeur à la turbine lorsque la vitesse devient par trop considérable. Enfin un dispositif spécial permet d'envoyer de la vapeur vive aux différents étages de la turbine lorsque l'unité est surchargée.

Les types de régulateurs utilisés par les divers constructeurs de turbines ont été décrits dans les paragraphes précédents en même temps que les turbines auxquelles ils s'appliquent.

598. Condenseurs. — L'étude théorique et la pratique s'accordent à démontrer qu'on a le plus grand intérêt à pousser jusqu'à ses dernières limites la détente de la vapeur, et en fait, l'adoption des condenseurs a permis de réduire, dans de très notables proportions, la consommation de vapeur des turbines; aussi cherche-t-on dans les turbines à vapeur à pousser le vide à des valeurs très fortes, supérieures à 95 0/0, en étudiant et en construisant des condenseurs de façon à arriver à ce chiffre. Il y a 1 0/0 d'économie de vapeur, chaque fois que le vide augmente de 3 centimètres de mercure.

Tous les types de condenseurs sont applicables aux turbines, mais les condenseurs ordinaires par mélange sont les plus simples et les plus employés. Les condenseurs par mélange à contre-courant donnent une meilleure utilisation de l'eau d'injection et un vide plus élevé qu'avec le condenseur à mélange ordinaire, avec une plus faible quantité d'eau. Les condenseurs à surface sont plus coûteux, mais ils offrent l'avantage précieux de pouvoir faire un vide presque parfait; or, avec les turbines, pour avoir un bon fonctionnement économique, il faut fournir le vide jusqu'à 0^m,70 ou 0^m,72 de mercure.

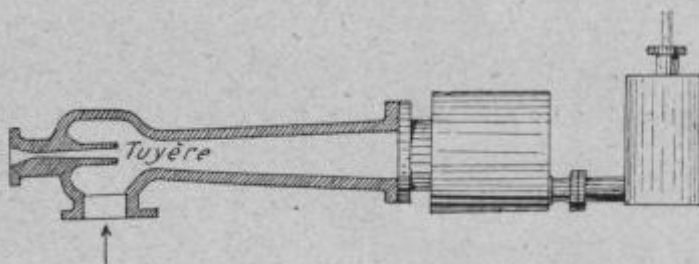


FIG. 677. — Éjecteur de vapeur Parsons.

Si l'on dispose d'une quantité d'eau suffisante, on peut faire usage d'un éjecto-condenseur; on supprime ainsi la pompe à air, puisque le jet d'eau entraîné par la vapeur expulse lui-même l'air qui pénètre dans l'appareil; mais le vide est nécessairement moins bon.

Quand la quantité d'eau de refroidissement pour effectuer la condensation est peu abondante, on se trouve dans l'obligation de se servir de la même eau après l'avoir refroidie dans des tours de hauteur plus ou moins grande, avant chaque passage dans le condenseur. Le fonctionnement des tours de condensation est influencé par de

nombreux facteurs et en particulier par les conditions climatériques ⁽¹⁾.

Une étude plus approfondie de la condensation a eu pour conséquence que, dans beaucoup d'installations récentes de condenseurs à mélange, on a employé deux pompes : une pompe à eau aspirant dans la région la plus chaude du condenseur et une pompe à air aspirant dans la région la plus froide, alors que jusqu'ici on ne faisait usage que d'une seule pompe pour enlever en même temps l'eau et l'air.

Pour un condenseur à surface, on peut n'employer qu'une seule pompe ; mais, comme l'indique M. Maurice Leblanc, cette pompe doit aspirer dans la région la plus froide. A la suite de ses mémorables recherches sur l'obtention de vides élevés, M. Maurice Leblanc a enrichi le domaine industriel d'un nouveau système de pompe à air, qui a donné de remarquables résultats dans des installations déjà nombreuses.

La pompe consiste en une trompe dans laquelle l'eau est lancée au moyen d'une turbine à injection partielle mue par un moteur en sens inverse du mouvement de rotation qu'elle prendrait si on l'abandonnait à elle-même. La partie axiale de cette turbine communique avec un tuyau d'aspiration qui plonge dans un puits ; son enveloppe est en relation avec le condenseur où l'on veut faire le vide par une conduite qui débouche à la partie supérieure. L'amorçage de la trompe se fait soit au moyen d'eau sous pression, soit au moyen d'un éjecteur qui fait le vide dans l'enveloppe et aspire l'eau.

La puissance absorbée par une installation de condensation ne joue qu'un rôle secondaire, même en tenant compte du travail d'alimentation. Pour des turbines de 3.300 kilowatts, il a été constaté que le condenseur à mélange nécessite 1,3 0/0 de la puissance de la turbine. Avec une turbine de 1.400 kilowatts travaillant avec un condenseur à surface, on a trouvé, pour un vide de 96 0/0, que le travail absorbé par l'ensemble de la condensation (pompe à air et pompe de circulation réunies) était de 1,7 0/0 de la puissance de la turbine.

Les établissements Oerlikon emploient des condenseurs à injection applicables aux turbines moyennes.

Les condenseurs à mélange sont appliqués aux grandes et moyennes turbines partout où on n'attache pas de valeur à l'eau de condensation. Ils sont munis d'une pompe à air et d'une pompe centrifuge qui sont toutes deux montées dans le même corps. Les conducteurs à surface sont employés sans exception pour les grandes turbines et pour les turbines

⁽¹⁾ Pour arrêter son choix sur un système de condenseur, il faut connaître la quantité d'eau dont on dispose et la température : pour un condenseur à surface, il y a lieu de tabler sur au moins 50 litres d'eau froide par kilogramme de vapeur à condenser ; un condenseur à mélange demande 30 litres. Dans les installations modernes de condensation à mélange, on réalise l'aspiration séparée de l'air et de l'eau.

moyennes quand l'eau d'alimentation est mauvaise ou coûteuse et qu'il faut se resservir de l'eau condensée. Les pompes appliquées à tous les types de condenseurs sont des pompes rotatives.

Les établissements Brown-Boveri ont employé pour les unités de 20.000 chevaux de l'usine d'électricité de Saint-Denis un condenseur à surface en deux compartiments, de manière à pouvoir mettre une partie du condenseur hors service pendant la marche, procéder à son nettoyage et continuer la marche normale avec l'autre. Ce modèle de condenseur, par sa conception ingénieuse, permet une marche absolument sûre des grosses unités modernes qui tendent de plus en plus à s'imposer dans les stations centrales de production d'énergie électrique.

Les éjecteurs sont les accessoires obligés du condenseur, pour l'extraction de l'air qui y est apporté par la vapeur et par l'eau d'injection, ou qui s'introduit dans les canalisations par des joints insuffisamment étanches.

On sait que ces appareils fonctionnent à l'eau ou à la vapeur ; de nos jours on donne la préférence au dernier mode. Le succès des éjecteurs Westinghouse-Leblanc a été considérable et extrêmement rapide. La trompe est constituée par une petite turbine renversée, à injection partielle effectuant environ 2.500 tours par minute ; elle envoie dans un ajustage divergent, non plus de minces lames d'eau, mais des jets qui cheminent parallèlement, en appuyant leurs bords contre la paroi du diffuseur et emprisonnent l'air dans leurs intervalles. La trompe aspire dans la partie supérieure du condenseur à mélange, au voisinage du point où s'opère la rencontre de la vapeur et de l'eau froide, lieu d'élection pour la prise de gaz (*fig. 1678*).

Dans l'éjecteur Bréguet, dû à M. Delaporte, la vapeur de décharge débouche à la partie supérieure d'une chambre de condensation et elle rencontre des gerbes d'eau très ouvertes, rendues bien homogènes, grâce à une pulvérisation parfaite, produite par des busettes d'injections, qui offrent cette particularité d'imprimer à l'eau un mouvement de giration sans l'adjonction d'aucun organe interne. Leurs axes sont répartis selon les génératrices de deux cônes différents, de manière à assurer le croisement de toutes les veines de vapeur par les gerbes d'eau froide. L'eau accumulée dans le fond du condenseur est extraite par une pompe centrifuge. Un casse-

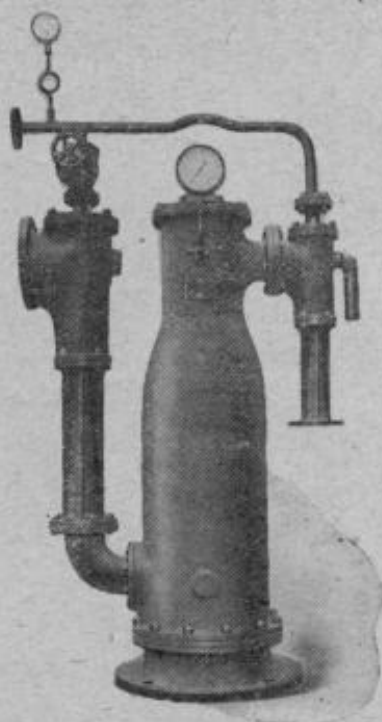


FIG. 1678. — Ejecteur pour condenseur par surface de turbine 6 000 kw. (Énergie de la Seine, à Ivry.)

vide permet une rapide entrée d'air en cas de non-fonctionnement de la pompe.

Le condenseur à mélange Bréguet (*fig. 1679*) comporte : une pompe d'extraction conçue de manière à rendre impossible son désamorçage ; un éjecteur. Ce dernier appareil comprend : un éjecteur d'amont qui puise le

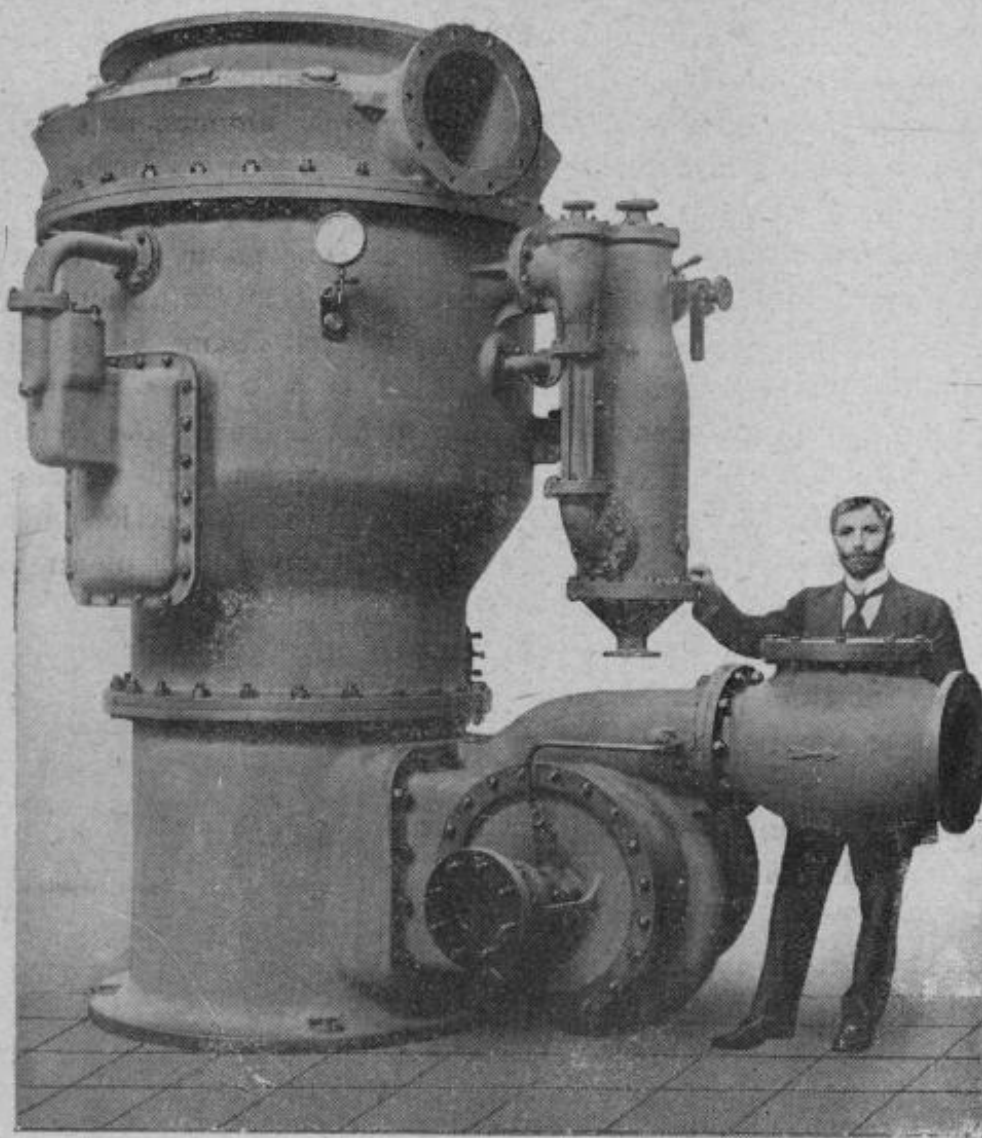


FIG. 1679. — Condenseur par mélange avec éjecteur = 26.000 k. de vapeur-l'heure. (Bréguet).

mélange gazeux dans le condenseur, un condenseur auxiliaire, un éjecteur d'aval rejetant l'air à l'atmosphère tandis que l'eau amenée au condenseur auxiliaire est dirigée sur la pompe d'extraction du condenseur principal.

L'éjecteur constitue donc une pompe à air économique de grande puissance, sans moteur et dépourvue elle-même de tout organe mobile.

La vapeur utilisée par l'éjecteur d'aval, soit les deux tiers de la dépense

totale de l'appareil, est utilisable intégralement pour le réchauffage de l'eau d'alimentation.

L'injecteur donne un vide inférieur au vide théorique de 2 millimètres seulement.

599. Consommation de vapeur. — La dépense de vapeur, rapportée à l'unité de travail produit, est, pour un moteur à vapeur quelconque, d'autant plus faible que le vide au condenseur est plus grand. Si l'on prend comme point de départ un vide de 90 0/0, qu'on peut considérer comme normal, la théorie indique que la consommation de vapeur doit augmenter de 1 à 1,35 0/0 pour chaque centième de vide en plus. Pratiquement l'influence du vide est encore plus marquée sur le rendement

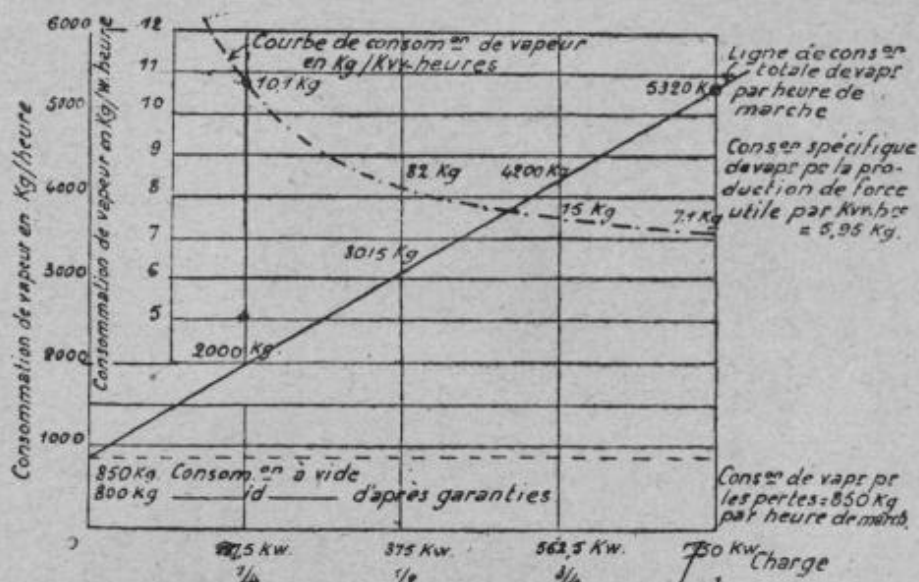


FIG. 1680. — Diagramme de consommation de vapeur pour alternateur de 750 kw., avec vapeur de 12 k. absolus et surchauffe de 300° C.

des turbines à vapeur, et dans certains essais on a relevé une diminution de consommation de 3 0/0 pour chaque centième d'augmentation du vide dans les limites comprises entre 91 et 93 0/0.

La pression de la vapeur n'a pas une grande influence sur la consommation de la turbine, au moins dans les limites entre lesquelles la pression varie habituellement dans les installations récentes. Dans les turbines d'environ 200 kilowatts, la consommation diminue de 1 0/0 pour une augmentation de pression de 1 kilogramme par centimètre carré; pour les machines plus puissantes, cette diminution est comprise entre 1,5 et 2 0/0.

Pour ce qui est de la surchauffe, en pratique la consommation de vapeur, pour des températures de vapeur comprises entre 200 et 240°,

diminue de 10/0 pour une augmentation de surchauffe de 5°,5 ; entre 240 et 280°, une élévation de 6°,5 suffit pour faire diminuer la consommation de 10/0.

Avec les faibles puissances, jusqu'à 500 chevaux environ, les turbines à vapeur sont inférieures aux bonnes machines à pistons quant à la consommation de vapeur.

A partir de 1.000 kilowatts, les turbines prennent nettement l'avantage sur les machines alternatives.

Pour les turbines de 500 kilowatts, la turbine présente la plus faible consommation pour une charge égale à 120 0/0 de la charge normale. Si l'on ajoute aux dépenses de combustible celles fixes par kilowatt-heure, le point d'économie se déplace vers 145 0/0 de la charge normale.

D'une façon générale, il vaut mieux faire travailler les turbines en surcharge que de mettre en service une nouvelle machine travaillant à faible charge.

A l'opposé de la machine à piston, la consommation par kilowatt-heure dans une turbine à vapeur est d'autant plus basse que la charge est plus élevée ; cette consommation atteint donc sa valeur la plus avantageuse à la puissance maxima de la machine.

Pour une turbine Parsons de 5.000 HP, à la charge de 3.000 kilowatts et avec un vide de 90 0/0, les essais ont donné les résultats suivants pour la consommation de vapeur par kilowatt-heure :

a)	à la pression de 10 atmosphères et à 230° de surchauffe...	7 ^k ,64
b)	— — 10 — — 300° — ...	6 86
c)	— — 14 — — 300° — ...	6 50

Ce qui, par comparaison avec une machine à vapeur à piston, revient respectivement à 4^{kg},5 ; 4^{kg},05 et 3^{kg},82 par cheval indiqué.

600. Rendement des turbines à vapeur. Essais. — La puissance P développée par une turbine à vapeur est donnée par l'équation ci-après, en appelant Q la quantité de vapeur en kilogrammes par heure, H la chute adiabatique de chaleur en calories et ρ le rendement effectif, c'est-à-dire le rapport de la puissance effective de la turbine à celle d'une turbine idéale, sans aucune perte :

$$P = \rho \frac{QH}{632} \text{ chevaux effectifs.}$$

Ce rendement effectif peut être considéré comme le produit du rendement indiqué par le rendement mécanique, le rendement indiqué étant le rapport du travail développé à la périphérie de la turbine à celui d'une turbine idéale sans pertes.

Au point de vue de rendement économique de la turbine, la distribution des chutes de chaleur entre les différents étages a une grande importance. Or le réglage agit sur cette distribution de façon très différente. L'étranglement de la vapeur avant son entrée dans la turbine agit sur le travail produit par réduction des deux facteurs dont dépend essentiellement le travail d'une turbine, c'est-à-dire Q et H . Avec le vannage sur l'admission, qui, pratiquement, n'a lieu que sur le premier distributeur, le vide s'améliorant un peu, la chute totale d'énergie calorifique se trouve légèrement augmentée ; mais le bénéfice de cette augmentation est proportionnellement moins sensible que dans le cas du réglage par étranglement. D'autre part, dans les deux procédés, le travail se trouve reporté sur les étages de la turbine à plus haute pression, surtout par le vannage de l'admission. La surchauffe réduit aussi, pour ce mode de réglage, les pertes par frottement dans la turbine, avantage plus appréciable dans ce cas que dans le premier, les pertes par ventilation dans les premiers étages étant augmentées en raison du vannage. La surchauffe est également plus profitable avec le vannage, parce que les premiers étages de la turbine y contribuent pour une bien plus grande part au travail total.

Au point de vue du facteur du rendement indiqué, le réglage par étranglement sur l'admission ne modifie que peu le rendement indiqué des étages à haute pression, tandis que celui des derniers étages est amélioré ; d'où augmentation du rendement indiqué total pour une réduction de charge. Les chutes d'énergie thermique augmentent très fortement dans les premiers étages et diminuent dans les derniers.

Les pertes dans les turbines à vapeur proviennent des fuites de vapeur, des frottements de la vapeur et des tourbillonnements. Les fuites de vapeur, des turbines à roues multiples, peuvent se produire aux distributeurs ou aux récepteurs. Dans les turbines d'action, les fuites ne sont à craindre qu'aux distributeurs, car il n'existe aucune différence de pression entre les deux faces de chaque récepteur. Par contre, les fuites autour des distributeurs peuvent être plus importantes que dans les turbines de réaction. Le frottement de la vapeur, qui donne lieu à un travail perdu dont la valeur est proportionnelle à la densité de la vapeur, au cube de la vitesse angulaire et à la puissance cinquième de la roue mobile, est bien plus considérable conséquemment du côté de l'admission qu'au voisinage de l'échappement. Ceci explique pourquoi les turbines à basse pression ont un aussi bon rendement par rapport aux machines à pistons à basse pression. Enfin les tourbillonnements de vapeur, qui se produisent dans les tuyaux d'injection ou dans le trajet d'une roue à la roue voisine, se traduisent toujours par une perte d'énergie.

Pour déterminer les pertes internes d'une turbine à vapeur, soit

v_0 la vitesse relative de la vapeur à l'entrée de l'aubage et v_1 la vitesse relative à la sortie, nous posons :

$$v_1 = \lambda v_0,$$

λ variant de 0,65 à 0,80.

On peut trouver facilement le rendement interne d'une turbine à simple roue ou de chaque élément d'une turbine à roues multiples.

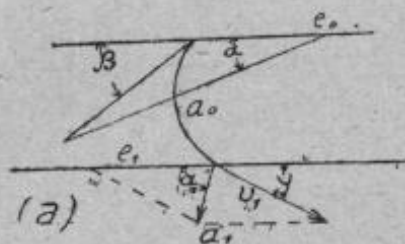


FIG. 1681.

A cet effet appelons α_0 la vitesse absolue de la vapeur à l'entrée de l'aubage, e_0 la vitesse circonférencielle; connaissant l'angle d'injection α , le triangle des vitesses (fig. 1681) détermine la vitesse relative à l'entrée v_0 . A la sortie, la vitesse

relative v_1 aura la direction de l'aubage et sa valeur, si la turbine fonctionne sans aucune réactance sera :

$$v_1 = \lambda v_0.$$

Connaissant la vitesse d'entraînement e_1 ($= e_0$ dans les turbines axiales), on en déduit la vitesse absolue à la sortie a_1 .

Le travail recueilli par l'aubage a pour expression :

$$T = \frac{e_0}{g} (\alpha_0 \cos \alpha - \alpha_1 \cos \alpha_1),$$

par kilogramme de vapeur dépensée.

Si v_0 est la vitesse de la vapeur à la sortie du distributeur, le rendement interne sera (fig. 1682) :

$$\rho = 2 \frac{e_0}{w_0} \left(\frac{\alpha_0}{w_0} \cos \alpha - \frac{\alpha_1}{w_0} \cos \alpha_1 \right).$$

On peut construire les triangles des vitesses en portant sur les côtés, non les vitesses elles-mêmes mais leur rapport à la vitesse de sortie du distributeur v_0 . On voit facilement que :

$$\rho = 2 AB \times dD.$$

En changeant la vitesse relative e_0 de l'aubage, le point D se déplace et l'on peut chercher la valeur de la vitesse e_0 qui donne le rendement maximum.

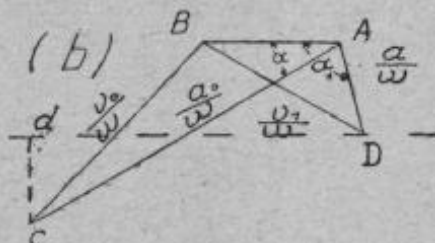


FIG. 1682.

Pratiquement on adopte pour les vitesses tangentielles et d'écoulement des rapports compris entre 0,20 et 0,35.

Stodola donne la formule suivante pour le calcul de la perte due au frottement des disques dans la vapeur :

$$N_0 = (a_1 D^2 + a_2 D L^{1.5}) \left[\left(\frac{c}{100} \right)^3 \gamma \right];$$

N_0 perte de puissance en chevaux, D diamètre moyen des disques en mètres, L longueur des aubes en centimètres, c vitesse circonférencielle en mètres par seconde, γ le poids spécifique de la vapeur détendue en kilogrammes par mètre cube, a_1 coefficient = 1,46 et $a_2 = 0,83$.

La perte par frottement dans les paliers se calcule par les formules habituelles ; appelons N_1 sa valeur. En additionnant N_0 et N_1 on a donc la valeur des pertes externes de la turbine.

Connaissant le rendement effectif ρ de la turbine, la puissance en chevaux est pour une dépense donnée P kilogrammes par seconde.

$$N = \frac{P}{75} \sigma \frac{w^2}{2g},$$

w vitesse à la sortie du distributeur.

La connaissance de P permet de déterminer la section totale des tuyères, c'est-à-dire leur nombre ; pour leur forme on peut se servir du diagramme entropique par la méthode de Koob.

Dans les turbines à vapeur, la perte à l'échappement $\left(U = \frac{V^2}{2g} \right)$, V vitesse absolue de la vapeur et U énergie que représente la vapeur, doit être surveillée très attentivement. Il y a lieu de constituer des disques susceptibles d'admettre des conditions de charge et de vitesse dans des conditions maximum d'efficacité. Ainsi, d'après M. Delaporte, l'emploi de frettes de moyeu dans les disques d'épaisseur variable permet de reculer beaucoup les limites de charge et de vitesse périphérique. Ainsi, selon la (*fig. 1683*), il est additionné sur le moyeu des frettes posées avec un serrage initial convenablement réglé. La figure montre que le métal ajouté étant soumis à une fatigue de 12 à 18 kilogrammes, la charge périphérique que le disque admet sur un rayon égal à 0^m,7 atteint 768 tonnes. L'effort de compression que les frettes exercent sur le moyeu est de 3^{kg},94 par millimètre carré. Des résultats encore meilleurs seraient obtenus par emploi de frettes superposées.

M. Delaporte conseille l'emploi d'un disque, à disposer à la suite du dernier disque de la turbine, dit disque d'échappement, entre les aubes duquel on ne fait passer qu'une partie de la vapeur sortant de la turbine,

de façon à permettre à la vapeur de se détendre jusqu'à la limite inférieure admissible avec le condenseur employé. On peut ainsi récupérer 4 0/0

de la puissance totale de la turbine.

Le rendement total dans les turbines à vapeur est encore de nos jours loin de celui atteint dans les turbines hydrauliques ; il ne dépasse pas 0,65. Il faut compter 6 à 10 0/0 pour les pertes provenant de la vitesse élevée avec laquelle la vapeur quitte la turbine. De plus, on doit compter pour perte dans le distributeur 5 à 10 0/0 et, dans la roue mobile, 20 0/0 (turbines à action). Le rendement à charge réduite, dans les turbines à action à roues multiples, est supérieur à celui dans les turbines à réaction.

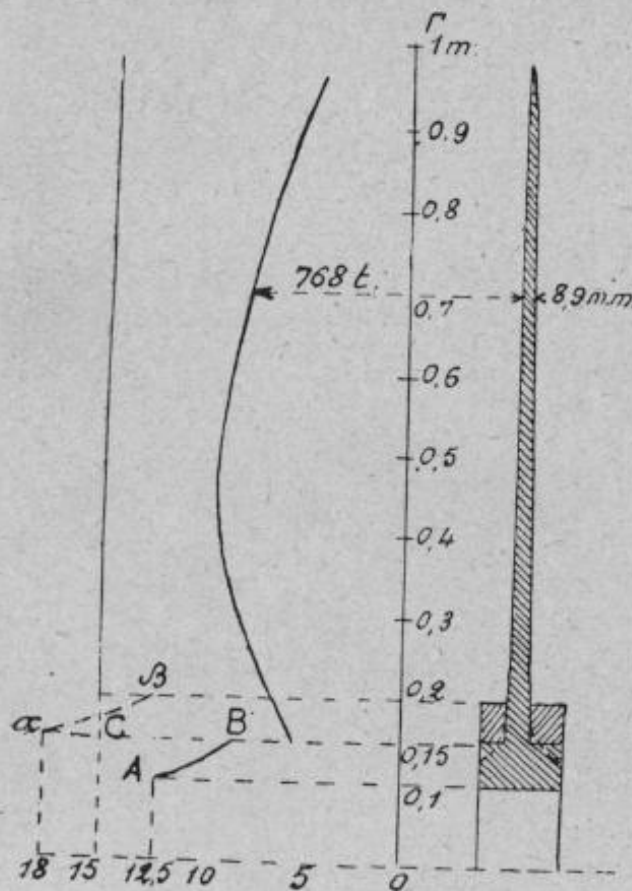


FIG. 1683.

Les essais en usine dont il va être question se font couramment dans une grande maison de construction américaine. Les alternateurs à essayer sont du type à grande vitesse et connectés directement à des turbines à vapeur verticales, sauf pour les petits modèles dont l'axe est horizontal. La plate-forme d'essais est divisée en un certain nombre de massifs ; chacun d'eux est muni des conduites à vapeur nécessaires ainsi que des câbles reliés à un tableau d'où on règle l'excitation et où arrive le courant débité.

Le courant d'excitation provient de groupes moteurs-générateurs branchés sur la canalisation principale à 500 volts. Les générateurs fournissent 110 volts et leur excitation est branchée sur le réseau continu à 500 volts. Le courant se rend d'abord au tableau. Il traverse un interrupteur monopolaire et des rhéostats dont le montage est conforme à celui de la (fig. 1684). Grâce à ce montage, il est possible d'obtenir de très petites variations de voltage.

Pour effectuer la charge on se sert de résistances liquides montées en étoile ; trois larges plaques de fer plongent dans l'eau et on les y enfonce

plus ou moins suivant les indications envoyées du tableau, à l'aide d'une cloche d'appel et de signaux conventionnels.

Les essais sont de deux sortes : les essais commerciaux et les essais spéciaux. Toutes les machines de type courant sont seulement soumises aux premiers, à moins d'exigences particulières venant notamment de la part du gouvernement. Les essais spéciaux se divisent en deux groupes : les essais proprement dits qui consistent par exemple à déterminer les caractéristiques des machines d'un type nouveau, et les essais

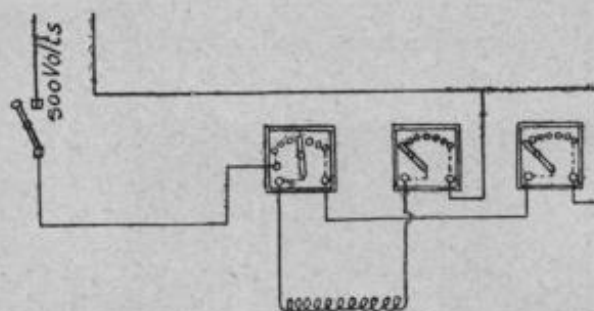


FIG. 1684.

de réception pour celles qui ne sont pas d'un type courant. Il est surtout question ici des essais commerciaux.

Les bobines induites sont essayées à haute tension conformément au tableau ci-après. On entoure chaque bobine d'une feuille de papier d'étain, on applique la tension d'essai entre cette feuille et l'enroulement et on règle la distance entre les pointes de l'éclateur du transformateur d'essai de façon que la tension correspondante soit de 10 0/0 supérieure à celle du voltage d'essai. Si à cause de l'humidité de l'air l'étincelle éclate avant que le voltmètre indique la tension correspondante, on pourra écarter les pointes, mais pas de plus de 0^{mm},25 à la fois, et pourvu que dans ces conditions l'écart des pointes ne corresponde pas à une tension supérieure à 120 0/0 du voltage d'essai indiqué dans le tableau ci-après.

On mesure à froid la résistance de chacune des phases et celle des bobines inductrices. Pour mesurer la chute de tension on se sert de contacts à pointes fixés dans des poignées en bois. Il ne faut employer que des instruments étalonnés récemment et veiller à ce que la déviation d'un appareil de mesure soit aux environs des deux tiers de son échelle. Il est bon de répéter trois fois la mesure d'une résistance, avec différentes intensités de courant. Il faut également noter la température ambiante.

On fait passer dans l'induit un courant de 50 0/0 supérieur à celui de pleine charge pendant une demi-heure ou une heure, l'induit étant court-circuité. Il faut noter le courant dans toutes les phases et maintenir la vitesse à son régime normal ; relever l'intensité et la tension d'excitation, l'intensité induite et la température de deux bobines induites opposées, au commencement et à la fin de l'essai. Si le courant d'excitation n'a pas la valeur qu'il possède ordinairement pour des machines analogues, il faut chercher la raison de ce fait.

Tableau des Tensions à employer pour les essais à haute tension

TENSION NORMALE DE L'ALTERNATEUR (volts)			TENSION ALTERNATIVE A APPLIQUER AUX BOBINES INDUITES PENDANT UNE MINUTE (volts)		
			avant assemblage	après assemblage	après l'essai d'échauffement
800	à	1.200	5.500	4.500	3.500
1.200		2.500	8.000	6.500	5.000
2.500		3.000	9.000	7.500	6.000
3.000		3.500	10.500	9.000	7.000
3.500		4.000	12.000	10.000	8.000
4.000		4.500	13.500	12.000	9.000
4.500		5.000	15.000	13.000	10.000
5.000		6.000	18.000	15.000	12.000
6.000		7.000	21.000	18.000	14.000
7.000		8.000	24.000	20.000	16.000
8.000		9.000	27.000	23.000	18.000
9.000		10.000	30.000	25.000	20.000
10.000		11.000	33.000	28.000	21.000
11.000		12.000	36.000	29.000	22.000
12.000		13.000	39.000	31.000	23.000
13.000		14.000	42.000	33.000	24.000
14.000		15.000	43.000	34.000	25.000
15.000		16.000	44.000	35.000	26.000
16.000		17.000	45.000	36.000	27.000
17.000		18.000	46.000	37.000	28.000
18.000		19.000	47.000	38.000	29.000
19.000		20.000	48.000	39.000	30.000
20.000		21.000	49.000	40.000	32.000
21.000		22.000	50.000	42.000	33.000
22.000		23.000	51.000	43.000	35.000
PUISSANCE CONSOMMÉE DANS LES INDUCTEURS (kilowatts)			TENSION ALTERNATIVE A APPLIQUER AUX BOBINES INDUCTRICES PENDANT UNE MINUTE (volts)		
0	à	500	»	2.000	1.500
500		1.500	»	3.000	2.000

On se sert, pour déterminer la disposition des phases, d'un instrument spécial qui, en réalité, n'est autre chose qu'un petit moteur d'induction. Il est composé d'un enroulement monté sur un noyau de fer et entourant un disque d'aluminium libre de tourner. Sur cet appareil sont situées des bornes numérotées 1, 2, 3 et 4 qui correspondent aux mêmes bornes du tableau de distribution de l'alternateur. L'indicateur de disposition des phases étant connecté, on fait tourner l'alternateur à la vitesse normale, les circuits inducteurs et induits étant ouverts. Si le magnétisme résiduel de l'alternateur ne suffit pas à provoquer la rotation du disque, on peut employer un courant inducteur très faible et on note le sens de rotation du disque. Si les câbles de l'induit ont été réunis au tableau de façon normale, ce sens coïncide avec la direction de la flèche qui est tracée sur le

disque. La force électromotrice appliquée à l'inducteur ne doit pas excéder 300 volts et sa mise en service une minute. Cet essai est très important, car il est essentiel que toutes les machines aient la même disposition de phases les unes par rapport aux autres.

On peut élever la température des inducteurs à 90° C., la machine étant en repos, en faisant passer dans les inducteurs un courant deux fois plus intense que le courant normal. On fait tourner ensuite pendant une heure, l'induit étant ouvert, à une vitesse de 20 0/0 et un courant d'excitation de 20 0/0 supérieurs aux valeurs normales. Il est possible de se rendre compte du courant d'excitation normal soit directement, si l'on dispose de résistances liquides suffisantes, soit par comparaison avec des machines analogues dont le courant d'excitation à circuit ouvert, pour une même tension aux bornes, est le même que pour la machine en essai. Au bout d'une heure, les inducteurs étant ouverts, on continue à faire tourner sans arrêt jusqu'à ce que les bobines inductrices aient une température inférieure à 50°. Cela peut durer une demi-heure; si, au bout de ce temps, la température est encore plus élevée que 50°, on recommence à faire tourner pendant une seconde demi-heure. Excepté pendant la marche à vitesse plus grande que la vitesse normale et pendant le refroidissement, on relève toutes les demi-heures la température de deux bobines inductrices, l'intensité et la tension d'excitation. Il est bon de renouveler cet essai une seconde fois; on peut mettre ainsi en évidence des défauts qui n'auraient pas apparu pendant le premier. On remarquera, pendant cet essai, des inégalités dans le champ magnétique, qui causeront des vibrations. Il en est de même pendant l'essai à grande vitesse.

Pour obtenir la caractéristique à circuit ouvert, on étalonne d'abord le tachymètre de la turbine à l'aide d'une montre et d'un compteur de tours. A la vitesse normale on relève les indications de la tension induite, de la tension et de l'intensité d'excitation et de la vitesse. On peut commencer avec un champ faible et augmenter le courant d'excitation jusqu'à 30 et 35 0/0 au-dessus du courant normal, en relevant les indications mentionnées ci-dessus, puis diminuer le champ jusqu'à zéro. Il suffit de faire dix lectures dans chaque sens. Lorsqu'on augmente le courant d'excitation, il ne faut pas dépasser l'intensité pour laquelle on veut faire une mesure et y revenir ensuite; il est nécessaire de revenir à zéro et de remonter ensuite jusqu'à la valeur voulue; de même, lorsqu'on diminue l'intensité d'excitation, si l'on dépasse la valeur désirée, il faut remonter au maximum et revenir ensuite à l'intensité en question. Au voltage normal on détermine la tension sur les trois phases en faisant au moins 3 lectures pour chacune. Toutes les autres lectures peuvent s'effectuer sur une phase. On peut tracer la courbe qui relie l'intensité d'excitation à la tension aux bornes. On détermine à nouveau les points qui ne

semblent pas se placer sur la courbe. Il faut choisir avec discernement les transformateurs d'instruments, de façon qu'aucun d'eux ne soit soumis à une tension supérieure à 100 % de celle pour laquelle il est construit.

Pour la détermination de la caractéristique en court-circuit, on court-circuite tous les câbles de l'induit et on entraîne le turbo-alternateur à la vitesse normale qu'on maintient constante pendant tout l'essai. On commence avec une excitation faible, de façon à avoir 1/6 environ du courant induit normal. On relève l'intensité induite, l'intensité et la tension d'excitation, puis on augmente l'intensité d'excitation peu à peu, jusqu'à ce que le courant induit dépasse sa valeur normale d'environ 750 %. On fait une dizaine de mesures. Pour le courant normal on relève les indications des ampèremètres dans chacune des phases (on fait trois lectures). On construit la courbe qui relie l'intensité d'excitation à l'intensité induite ; on obtient une ligne droite.

On procède rarement à des essais de huit heures, sauf pour les petites machines, à cause de la dépense d'énergie qu'il exige. Pour avoir un facteur de puissance égal à l'unité, on se sert de résistances liquides pour effectuer la charge. Avant de mettre en route, on mesure la résistance de l'induit pour chaque phase, la résistance totale des inducteurs et on détermine la température. On peut entraîner la turbine au delà de la vitesse normale, le courant d'excitation ayant la valeur ordinaire, et connecter un ampèremètre de 5 ampères entre l'extrémité de l'arbre et le plateau d'accouplement, en notant la déviation si elle existe. Ceci donne une indication sur l'importance des fuites magnétiques.

On entraîne alors le turbo-alternateur à la vitesse et au voltage normaux pendant huit heures, la charge étant maintenue constante. On fait les mesures de températures suivantes au commencement et à la fin de l'essai :

a) Surface du noyau d'induit (en deux places) ; *b*) canaux de ventilation (en deux places) ; *c*) croisillon des inducteurs ; *d*) bagues collectrices (en haut et en bas) ; *e*) cornes polaires (entrée et sortie) ; bobines induites : *f*) en haut (en deux places) ; *g*) en bas (en deux places) ; bobines inductrices : *h*) en haut (en deux places) ; *i*) en bas (en deux places) ; *j*) palier supérieur ; *k*) palier du milieu ; *l*) carcasse ; *m*) salle d'essais (quatre places).

Les températures *a*, *b*, *f*, *g*, *j*, *k*, *l* et *m* doivent être relevées chaque heure en même temps que les intensités et les tensions inductrices et induites. La charge doit être maintenue constante et, pour s'en assurer, on place un ampèremètre dans chaque phase.

Lorsqu'on ne fait pas l'essai de huit heures, on fait un essai de quatre heures à circuit ouvert, la tension aux bornes étant de 100 % supérieure au voltage normal, et un essai en court-circuit de deux heures, le courant induit ayant une intensité de 500 % plus grande que la valeur normale.

On fait des mesures de résistance et de température avant le démarrage et on cherche s'il existe des fuites magnétiques comme dans l'essai précédent. La machine fonctionne pendant quatre heures à la vitesse normale, la tension aux bornes étant de 10 0/0 supérieure à la tension de régime et l'induit étant court-circuité.

On détermine la tension inductrice et induite et le courant d'excitation toutes les heures ainsi que les températures a, b, j, k, l et m chaque demi-heure ; avant d'arrêter on regarde encore s'il n'existe pas un courant entre le sommet de l'arbre et le plateau d'accouplement. Après l'arrêt on détermine aussi rapidement que possible les températures $a, b, c, d, e, h, i, j, k, l$ et m , en ayant soin de protéger les réservoirs des thermomètres avec du coton ; c'est la valeur maxima de leurs indications qu'on retient.

Immédiatement après, on fait tourner pendant deux heures en faisant circuler dans l'induit court-circuité un courant de 50 0/0 supérieur au courant normal, à la vitesse normale, en réglant pour cela le courant d'excitation. Toutes les heures on mesure les intensités induites et inductrices et la tension d'excitation ; toutes les demi-heures on relève les températures a, b, f, g, h, j, k, l et m . Avant l'arrêt, on doit être disposé à effectuer les mesures de résistance et de températures dans le plus bref délai possible.

Après l'arrêt on mesure la résistance à chaud de l'induit, du circuit total d'excitation et séparément des bobines inductrices, puis les températures $a, b, f, g, h, i, j, k, l$ et m .

Pendant l'essai d'échauffement, on doit soigneusement examiner l'induit au point de vue des pertes dans le fer en écoutant les vibrations quand la machine fonctionne à pleine excitation.

On doit surveiller les balais pendant la marche et noter l'état de la surface des bagues collectrices après l'arrêt ; on peut mesurer aussi, à l'aide d'un dynamomètre, la pression des balais sur les bagues.

Immédiatement après l'essai précédent on applique aux inducteurs et à l'induit une tension élevée, conformément au tableau ci-avant. Il est bon de noter le courant absorbé par le transformateur d'essais.

Pour se rendre compte de la régulation, la machine est entraînée à la vitesse nécessaire et excitée suffisamment pour maintenir le voltage normal aux bornes à pleine charge. On note la tension à pleine charge, $3/4$, $1/2$ et $1/4$ de charge, et enfin à vide.

L'obtention de la fréquence a lieu au moyen d'un indicateur de fréquence connecté au secondaire d'un transformateur de tension dont le primaire est relié aux bornes de l'alternateur ; on mesure la vitesse de la turbine au moyen d'un compteur de tours et d'une montre. A la vitesse de régime l'aiguille de l'indicateur reste au zéro.

Pour l'essai à haute tension du circuit d'excitation, on enlève les in-

ducteurs tournants et, avant de démonter complètement la machine, on nettoie soigneusement les bobines inductrices et les bagues collectrices et on les essaie à une tension élevée qu'indique le tableau précité.

L'essai de consommation de vapeur a lieu conformément aux spécifications particulières de temps et de charge imposées aux constructeurs ; on veille à maintenir la charge bien constante, ainsi que la vitesse et à répartir la charge uniformément sur les phases ; on étalonne fréquemment le tachymètre. On note toutes les dix minutes le voltage, l'intensité et la puissance, l'intensité et la tension d'excitation ; de même la pression de la vapeur, celle du vide et la température de la vapeur doivent être maintenues aussi constantes que possible pour la turbine, et on enregistre leurs valeurs toutes les dix minutes. On mesure soigneusement le poids de la vapeur condensée. Il faut veiller à ce que le condenseur soit bien étanche, pour éviter des erreurs. Quand on emploie de l'eau salée, on l'analyse avec du nitrate d'argent, après en avoir prélevé un échantillon additionné d'un peu d'acide azotique.

Si les bobines inductrices sont humides, on les sèche à l'étuve pendant sept ou huit heures à 95° C. sans dépasser 100°. Pour calculer l'intensité d'excitation I à pleine charge, à l'aide de la caractéristique à circuit ouvert et de la caractéristique en court-circuit, on opère ainsi : soient i_1 l'intensité d'excitation au voltage normal, i_2 pour le courant de pleine charge, on a :

$$I = \sqrt{i_1^2 + i_2^2}.$$

Le coefficient de régulation électrique peut s'obtenir à l'aide de la caractéristique à circuit ouvert sur laquelle on peut lire le voltage obtenu quand le courant d'excitation est le courant normal. Pour déterminer le coefficient de régulation du groupe turbo-alternateur, il faut tenir compte de la variation de vitesse pour cent de la turbine.

Quand on fait les essais de rupture à haute tension, toutes les parties de la machine non soumises à l'essai doivent être reliées au sol. Autrement, il pourrait se produire des efforts trop considérables. Quand on effectue ces essais, il est bon d'augmenter peu à peu la tension, de la maintenir à la valeur voulue pendant une minute et de la faire décroître par degrés. Il est préférable, pour régler la tension aux bornes du transformateur d'essais, d'employer des résistances plutôt que des réactances, car celles-ci modifient le rapport de transformation.

Les tachymètres ordinaires ne permettant pas de contrôler des vitesses supérieures à 15.000 tours par minute, il y a donc lieu pour la mesure des vitesses de 30.000 et 40.000 tours qu'atteignent les turbines à vapeur de recourir à des procédés spéciaux. La réduction de la vitesse du tachymètre par vis tangente et engrenage offre parfois des difficultés

de réalisation pratique. Reste donc l'usage des appareils stroboscopiques.

Le dispositif employé est le suivant : sur l'arbre d'un moteur électrique on fixe un disque de carton pourvu de fentes ; un autre disque noir, sur lequel sont tracés des traits blancs correspondant aux fentes du premier, est fixé sur l'arbre de la turbine. On obtient alors une image fixe lorsque se trouvent réalisées les conditions indiquées par la formule de Wagner : $Nz = nZ$; N nombre de tours de la turbine par minute, z le nombre de traits tracés sur le disque fixé sur l'arbre de la turbine, n nombre de tours du moteur électrique ou moteur de couplage et Z le nombre de fentes du disque fixé sur l'arbre de ce dernier.

L'on possède dans le stroboscope un tachymètre d'un prix peu élevé, permettant à l'aide d'une formule simple de mesurer les plus grandes vitesses angulaires.

601. Utilisation de la vapeur d'échappement dans les turbines à vapeur. — En raison de l'énorme débit en volume dont les turbines à vapeur sont capables, ces dernières se prêtent fort bien à l'utilisation de la vapeur d'échappement et, parmi elles, la turbine de Laval, à disque unique, en raison de son haut rendement et de sa capacité variable de débit en volume, convient tout particulièrement à cette application. On sait que, dans cette machine, la vapeur se détend complètement dans des ajutages, avant d'agir. Pendant cette détente, la vapeur transforme l'énergie potentielle due à sa chaleur en énergie cinétique ; elle prend une grande vitesse, et arrive alors sur les aubes du disque, qui utilisent toute la force vive de la vapeur, abandonné finalement sans vitesse et sans pression dans les conduites du condenseur.

Ainsi les turbines de Laval peuvent utiliser les vapeurs perdues d'échappement dans les meilleures conditions et fournir une force motrice gratuite, ou plus exactement, ne coûtant, comme dans les installations hydrauliques, que l'amortissement du matériel et l'entretien.

Et comme, finalement, pour des frais égaux, la force motrice recueillie croît avec le rendement, celui-ci est un facteur important du calcul du prix de revient de l'énergie.

La turbine à vapeur exigeant une alimentation régulière, et en tout cas proportionnelle à sa propre charge, la nécessité d'un procédé de réglage, de compensation, entre la machine à vapeur et la turbine, paraît donc évidente. D'excellents résultats sont donnés par l'accumulateur régénérateur de M. Rateau.

Cet appareil n'est autre chose qu'un grand réservoir cylindrique horizontal, fermé, et rempli d'eau aux deux tiers environ. Ce réservoir est entouré d'une enveloppe calorifuge épaisse.

Les vapeurs d'échappement à utiliser arrivent dans la masse de l'eau, par une tuyauterie intérieure spéciale. Au début de la marche, cette vapeur se condense plus ou moins complètement en échauffant l'eau, jusqu'à ce que celle-ci soit à la température correspondant à la pression de la vapeur, c'est-à-dire sensiblement 100 degrés. Une tuyauterie, partant d'un dôme de prise de vapeur analogue à celui des locomotives, alimente la turbine. Dès qu'on ouvre la vanne de mise en marche de celle-ci, le condenseur provoque une aspiration de vapeur ; la pression tend à baisser dans l'accumulateur et l'eau se met à bouillir, compensant la baisse de pression.

Ainsi, en marche normale, tout afflux de vapeur supérieur à la consommation instantanée de la turbine se condense en élevant la température de l'eau. Au contraire, tout appel de vapeur de la turbine supérieur à la production instantanée de l'échappement évapore de l'eau en abaissant légèrement la température du milieu.

On conçoit facilement que si le volume de l'accumulateur et la quantité d'eau qu'il contient sont convenablement étudiés, la régulation soit très bonne, sans variations importantes de pression.

602. Types d'installations de turbines. — *Usine de Beznau.* — Cette usine (§ 301) offre un exemple remarquable de l'association de turbines à vapeur et de turbines hydrauliques, cette installation ne possédant pas de réserve hydraulique. Dans cette occurrence, il est nécessaire, au moment où se produisent les fluctuations de charge, d'avoir des

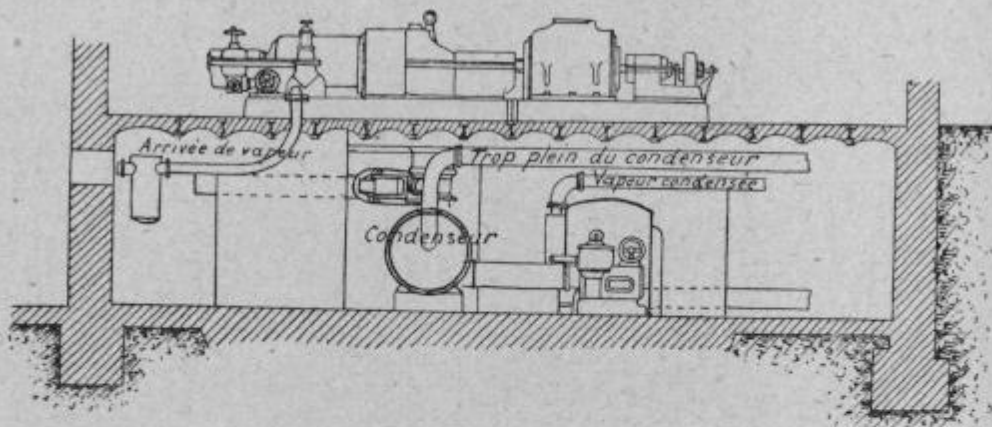


FIG. 1685. — Turbo-alternateur Brown-Boveri-Parsons avec condenseur à surface.

chaudières prêtes rapidement. Celles-ci sont à tirage forcé par ventilateurs tournant à 335 tours, avec moteurs de 35 HP et cheminées en tôle d'acier de 1^m,48 de diamètre et de 15 mètres de hauteur.

Les turbines à vapeur, Brown-Boveri-Parsons, de 2.400 kilowatts chacune, fonctionnent à 12^{kg},3 de pression avec de la vapeur à 367° C., et tournent à 1.500 tours par minute. La consommation de vapeur est la

suivante, dans les conditions ordinaires, et avec un vide de 730 millimètres :

Charge en kilowatts.....	2.490	2.000	1.000
Consommation par kilowatt-heure....	6 ^{kg} ,30	6 ^{kg} ,45	7 ^{kg} ,35

Usines du Littoral méditerranéen. — En raison du caractère essentiellement saisonnier de sa clientèle, la Société « Énergie électrique du Littoral méditerranéen » a dû avoir recours à des usines à vapeur de secours pour faire face à ses besoins exceptionnels pendant l'hiver, surtout aux heures d'éclairage. D'accord avec la Compagnie du gaz de Nice, une puissante station centrale à vapeur fut installée sur les terrains disponibles de l'usine à gaz.

Cette station a été constituée au moyen de groupes turbo-alternateurs types Curtis à axe vertical, d'une puissance d'environ 1.500 HP, tournant à 1.500 tours par minute. Ces turbines, depuis très répandues, ont été les premières de ce type qui aient été installées sur le continent européen.

Elles sont à quatre étages de pression, chaque étage comportant une série de tuyères de détente, deux jeux d'aubes mobiles, portés par une même roue, et un jeu d'aubes fixes placé entre les aubes mobiles. Elles actionnent des alternateurs à deux pôles dont les stators sont bobinés directement pour la tension de 11.000 volts.

Leur emploi a présenté des avantages marqués à divers points de vue : logement, dans l'espace très restreint disponible, d'une puissance relativement très considérable ; machines ne demandant aucune précaution spéciale pour leur mise en route ; machines très élastiques de puissance, pouvant fonctionner à charges réduites dans de bonnes conditions économiques et supporter des surcharges momentanées très considérables ; coût de premier établissement relativement réduit (à Nice il s'est abaissé au-dessous de 500 francs par kilowatt pour tout l'ensemble de l'usine et des constructions).

L'usine comporte trois unités semblables auxquelles la vapeur est fournie par une batterie de sept grandes chaudières multitubulaires de 4.000 kilogrammes à l'heure, munies de surchauffeurs de vapeur. Elles utilisent comme combustible du poussier de coke à très bas prix qui est brûlé sur des grilles soufflées d'un type spécial.

L'ensemble des usines hydrauliques et à vapeur a produit en 1906, pour la distribution d'énergie, près de 22 millions de kilowatts-heures ainsi répartis :

Usine du Var.....	10.730.000 kilowatts-heures	
— du Loup.....	9.430.000	—
— de Nice.....	1.540.000	—

Quant à la puissance maxima absorbée par le réseau, elle s'est élevée, durant une partie du printemps de 1907, jusqu'à 8.000 kilowatts avec des pointes atteignant 8.500 à 9.000 kilowatts.

La quote-part dans ces maxima des usines hydrauliques n'a pas dépassé 5.000 à 5.500 kilowatts.

On peut donc dire que les usines hydrauliques, grâce à l'appoint des machines à vapeur, n'ont à fournir que les six dixièmes de la puissance maxima du réseau ; mais, par contre, elles fournissent plus de 90 0/0 du nombre total de kilowatts-heures annuels, de sorte que l'emploi partiel de la vapeur ne grève que d'une manière insignifiante les frais d'exploitation tout en augmentant beaucoup la sécurité.

Usine de la Common-Wealth Co (Chicago). — Le système et le fonctionnement de cette usine offrent un exemple intéressant d'application des turbines à vapeur. Cette Compagnie fournit de l'énergie (éclairage, force motrice, tramways urbains et interurbains) en courant continu à 115 et 230 volts dans la partie centrale de la ville, du courant alternatif monophasé, à 60 périodes 115 et 230 volts pour l'éclairage et les moteurs jusqu'à 5 HP, et du courant triphasé pour les moteurs plus forts.

L'énergie est transmise à 33 sous-stations appartenant à la Compagnie et 11 sous-stations détenues par diverses compagnies de traction.

La majeure partie de l'énergie est engendrée à 9.000 volts à courant triphasé, 25 périodes, transmis aux sous-stations. Celles pour la distribution du courant continu comprennent des transformateurs et des convertisseurs rotatifs ; celles pour le courant alternatif englobent des modifications de périodes des génératrices qui reçoivent du courant à 9.000 volts 25 périodes et livrent du courant à 60 périodes triphasé, par quatre fils avec 2.200 volts entre chaque fil et le neutre, et 3.800 volts entre fils.

La station de Fisk street comporte des turbines Curtis de 5.000 kilowatts et celle de Quarry street des turbines de 14.000 kilowatts. La vapeur est produite à 14 kilogrammes de pression avec surchauffeurs donnant une augmentation de température de 84°.

Les chaudières sont du type Babcock et Wilcox, de 472 mètres carrés de surface de chauffe, à raison de 1 cheval par 8^m²,69.

Grande Centrale de Buenos-Ayres. — La turbine de 11.200 HP du type Brown-Boveri-Parsons, installée dans cette usine, tourne à 750 tours par minute. Elle est pourvue d'une batterie de condenseurs à surface et travaille avec de la vapeur surchauffée à 300° C., sous une pression effective de 12 kilogrammes par centimètre carré et peut, pendant deux heures, supporter une charge de 12.400 chevaux. La consommation normale de vapeur, avec l'eau de réfrigération à 15° et une charge de 7.500 kilowatts, est garantie à 6^{kg},3 par kilowatt-heure.

La turbine est directement accouplée à deux alternateurs triphasés en

tandem, de 7.500 kilowatts chacun, l'un ayant une fréquence de 25 périodes par seconde avec une tension composée de 12.000 à 13.000 volts (charge électrique 8.350 K. V. A.) ; l'autre une fréquence de 50 périodes par seconde avec une tension composée de 12.500 volts (charge électrique de 8.825 K. V. A.).

La surface totale du condenseur est de 1.300 mètres carrés ; alimenté par de l'eau à 15° C., il peut condenser 50.000 kilogrammes de vapeur à l'heure, avec un vide de 95 0/0 ; si l'eau est à 25° C., on peut encore atteindre un vide de 91 0/0. Le poids du groupe entier, y compris le condenseur, est de 475 tonnes.

A cause de sa grande puissance et aussi pour abaisser le plus possible sa consommation en vapeur, la turbine est divisée en deux cylindres avec palier intermédiaire. Ce dispositif permet d'augmenter le nombre de couronnes du système Parsons et d'atteindre un plus haut rendement. En outre, les températures élevées ne se font sentir que sur le cylindre à haute pression, de dimensions très réduites, en sorte qu'il n'y a pas à redouter de changements de forme sous l'effet des variations de température.

De l'autre côté du cylindre de haute pression est fixée la conduite de vapeur avec la soupape d'arrêt principale ; de là la vapeur se rend par deux tubes à une soupape régulatrice à double siège qui se trouve à la partie supérieure. Le piston de cette soupape est actionné par de l'huile sous pression, empruntée à une distribution centrale, en sorte que la turbine s'arrête automatiquement si le graissage vient à manquer. Le régulateur à ressort qui agit sur le relais annexé à la soupape de réglage se trouve sur le même axe vertical que la pompe à l'huile ; il est fixé sur le palier intermédiaire et commandé par une vis sans fin. Sur le même axe se trouve le régulateur de sûreté qui ferme la distribution, aussitôt que la vitesse s'élève de 15 0/0 au-dessus de la normale. De l'autre côté, et symétriquement par rapport à cet axe, est disposée une deuxième pompe à huile commandée par la même vis sans fin que la première. Les deux pompes puisent l'huile usagée dans des récipients ménagés dans les fondations de la machine et la refoulent à travers un réfrigérant dans le réservoir central à une pression effective de 1,5 atmosphère, d'où elle se répand de nouveau dans les différents paliers.

Les arbres des turbines sont des tambours en acier forgé ; aux extrémités on a disposé des tourillons retenus par des étoiles en acier coulé et une fermeture à baïonnette. Ces étoiles sont pourvues de chambre de chauffe du côté de l'admission de la vapeur pour obtenir un échauffement rapide et uniforme. On compense toujours la pression longitudinale par des pistons avec garniture en labyrinthe ; la seule différence avec l'ancien dispositif consiste en une réduction du piston compensateur du côté de

la basse pression. Les arbres sont maintenus dans leur position par des paliers à cannelures et reliés par un accouplement élastique.

Pour éviter les troubles des vibrations des turbines, relativement aux constructions voisines, on peut faire usage du procédé Prache. La turbine, à cet effet, est posée sur un massif d'une certaine épaisseur, selon la puissance de la machine, en ciment armé sur lequel elle est boulonnée. On fait reposer ce massif sur un autre en ciment ordinaire placé dans le sol, par l'intermédiaire de cales en caoutchouc.

La partie supérieure du bloc de ciment armé est de niveau avec le sol de la chambre des machines, mais il est soigneusement isolé de façon à éviter tout contact avec le sol, sauf par l'intermédiaire des cales en caoutchouc. Ces dernières sont constituées par des cylindres de 10 centimètres de diamètre et de 7^{cm},5 de hauteur quand elles sont comprimées. Elles sont maintenues par des vérins qui permettent de les remplacer quand il est besoin. Une tranchée ménagée tout autour du massif supérieur permet d'ailleurs de les viviter.

603. Dynamos pour turbines à vapeur. — La vulgarisation des turbines à grande vitesse, introduites depuis quelque temps dans l'industrie, a sensiblement modifié les conditions de fonctionnement et, par suite, la construction des dynamos à courant continu.

En effet, les génératrices à courant continu pour turbines à vapeur ne peuvent guère être que des machines à grande réaction, à fréquence élevée et à dépense d'excitation relativement grande.

La limite de la vitesse d'armature peut être fixée aux environs de 75 mètres par seconde et la tension moyenne par section ne peut guère excéder 30 volts.

Le tableau ci-après donne les puissances et vitesses de séries de machines de Brown-Boveri et C^{ie} et de Parsons.

BROWN-BOVERI ET C ^{ie}				PARSONS	
Vitesses de rotation en tours par minute	550 volts en kilowatts	240 volts en kilowatts	120 volts en kilowatts	Vitesses de rotation en tours par minute	en kilowatts
3.500	100	»	»	»	»
3.200	150	100	100	3.200	200
3.000	200	150	150	»	»
2.800	300	200	200	»	»
2.500	400	300	250	2.500	400-600
2.400	500	400	»	2.200	800
1.800	650	500	»	2.000-1.800	1.000
1.500	850	»	»	1.500	1.400
1.250	1.100	»	»	1.100	2.200
1.000	1.500	»	»	»	»

Quoique avec les dynamos la vitesse angulaire peut être choisie à volonté, ce qui permet de se rapprocher du nombre de tours le plus avantageux pour la turbine, il est cependant difficile de dépasser la puissance

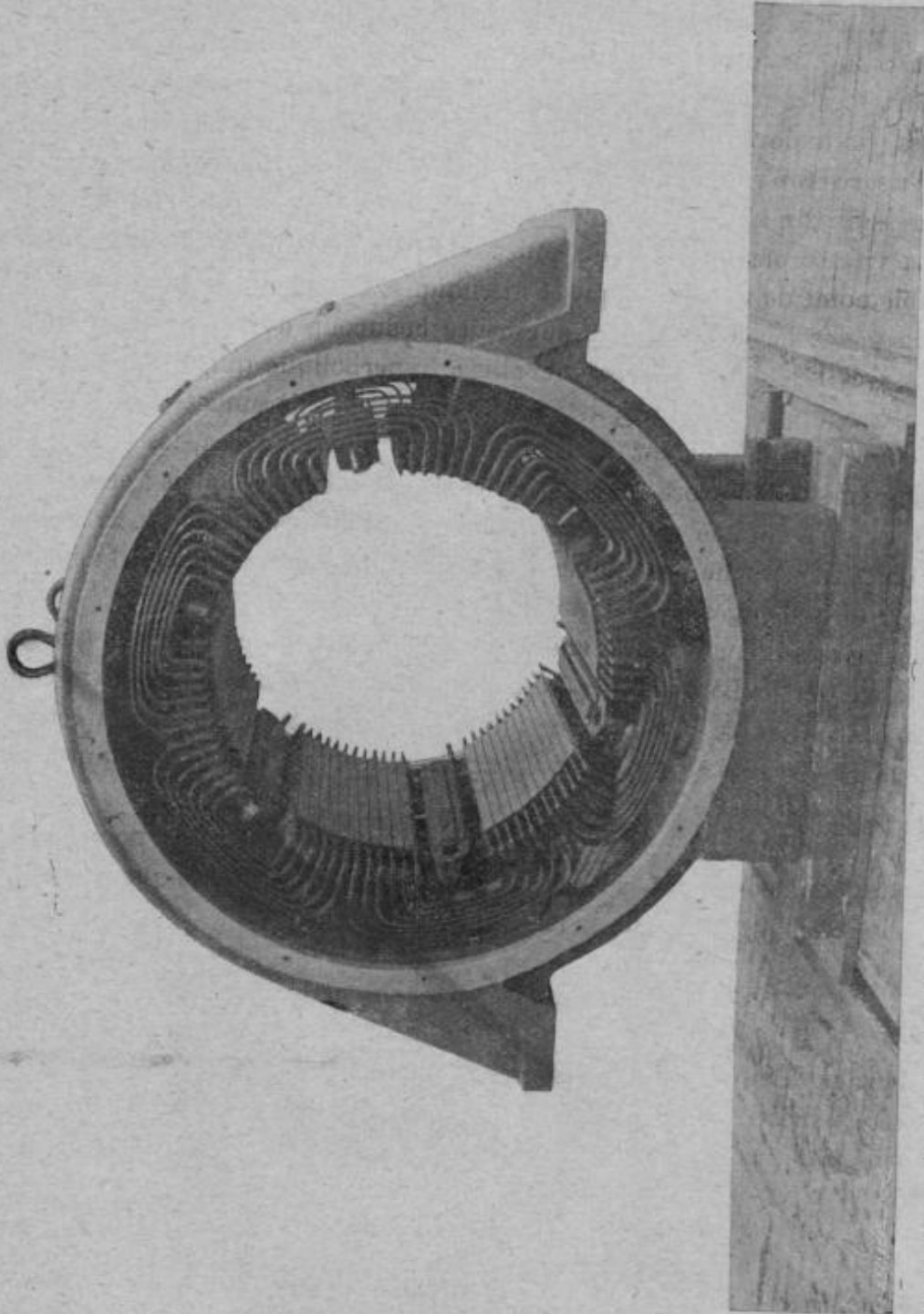


Fig. 1686. — Stator d'un turbo-dynamo de 1.100 kw., 1.500 tours. (Société Alsacienne de Constructions Mécaniques.)

de 2.000 kilowatts, car on est rapidement limité par le fonctionnement du collecteur, bien que tous les artifices connus aient été employés tels que : enroulement de compensation, pôles auxiliaires ou la combinaison de ces deux moyens.

Les constructeurs se sont heurtés à des difficultés d'un ordre tout spécial dans la réalisation d'une commutation satisfaisante et les balais en charbon ne pouvaient plus répondre aux exigences d'une rotation dépassant 15 mètres par seconde. En effet la masse et l'inertie des balais, ainsi que les légères dépressions du collecteur, ont pour corrélation, aux grandes vitesses, de les faire sautiller sur celui-ci, de nuire par conséquent à la régularité des contacts et de créer dans le circuit des résistances supplémentaires. On a alors conseillé l'emploi des balais en graphite ; mais pour éviter l'usure trop rapide du collecteur, il faut se garder d'augmenter par trop la pression des balais sur ce dernier.

La vitesse périphérique du collecteur joue aussi un rôle important au double point de vue électrique et mécanique. Dans le premier cas, et d'une façon générale, la résistance augmente beaucoup avec les valeurs de la vitesse et la courbe affecte une allure hyperbolique qui se relève beaucoup. La chute ohmique, dans le balai particulièrement, est fonction du degré d'échauffement de celui-ci. Dans le second cas, les pertes par frottement sont encore fonction de la pression sur les balais ; elles croissent avec la vitesse et plus rapidement que la résistance électrique de contact. Et pour ne pas exagérer la densité de courant sous les balais, on est arrivé à allonger leurs lignes ainsi que le collecteur.

Les pertes d'énergie provenant des frottements dans l'air ont une importance particulière comme étant proportionnelles à une puissance comprise entre le carré et le cube de la vitesse de rotation. Pour les atténuer, on évite les saillies et l'on donne, de préférence, aux pièces tournantes des formes de solides de révolution.

Si l'on essaye de déterminer la limite mécanique de vitesse pour le fretage des connexions extérieures de l'enroulement, on trouve que la tension dans le métal, résultant de sa rotation seule, est :

$$p = \frac{V^2 p}{98,4} \text{ kilogrammes par centimètre carré,}$$

V étant la vitesse linéaire en mètres et p la densité du métal.

Cette tension est augmentée de l'effort centrifuge des connexions soutenues par le fretage :

$$p_1 = \frac{PV_1^2}{Q \times 98,4 \times 2\pi r_1},$$

P étant le poids de cuivre, Q la section de la calotte qui forme le fretage et r_1 le rayon du centre de gravité du cuivre. V_1 étant sensiblement égal à V et $\frac{P}{Q}$ à peu près constant, on peut écrire :

$$p_1 = \frac{V^2}{98,4} (p + 4).$$

Si le bronze formant la calotte a une résistance de rupture de 6.000 kilogrammes avec 15 à 20 0/0 d'allongement, la vitesse de rupture est :

$$V_r = \sqrt{\frac{6000 \times 98,1}{8,5 + 4}} = 221 \text{ mètres par seconde}$$

et la vitesse *sûre* (calculée avec un coefficient de sécurité = à 8) serait :

$$V_s = \sqrt{\frac{6000 \times 98,1}{8 (8,5 + 4)}} = 77 \text{ mètres par seconde.}$$

Lorsque la tension de la machine atteint 500 volts, il convient d'éviter les courts-circuits entre les porte-balais positifs ou négatifs ou entre ceux-ci et les frettes du collecteur. Pour parer au premier inconvénient, Parsons a divisé le collecteur en deux parties complètement distinctes : l'une réservée aux balais positifs et l'autre aux balais négatifs. La tension moyenne entre lames ne dépasse pas 20 volts.

Pour régler exactement le champ de commutation, on rend variable l'entrefer des pôles de commutation ou bien on monte une résistance en parallèle avec l'enroulement de commutation. Dans le premier cas, l'entrefer est calculé très largement, et à l'essai on ajoute des tôles pour obtenir une marche satisfaisante.

Le deuxième procédé présente l'inconvénient que, dans les variations brusques de charge, la répartition se fait d'une manière inégale entre cette résistance et les bobines de commutation, étant donnée la grande self de ces dernières.

Le choix des tôles doit être fait non pas seulement d'après les qualités magnétiques, mais aussi d'après leur résistance à la rupture et leur dureté (tôles au silicium).

Dans le cas de pôles de commutation, le pas de l'enroulement de l'induit doit être égal à l'arc polaire et des connexions équipotentielles sont à prévoir dès qu'on atteint quatre pôles.

La ventilation se fait exactement comme dans les machines triphasées, dont il est parlé au paragraphe suivant, en tenant compte, en outre, de différents dispositifs adoptés pour obtenir un refroidissement au collecteur.

L'arbre est une partie importante de la machine ; à cause de la grande vitesse de rotation il est soumis à des efforts considérables et il faut tenir compte des phénomènes d'oscillation propre de l'arbre et des masses qu'il a à supporter.

Les dynamos construites par les Établissements Brown, Boveri et Co, pour l'accouplement direct avec les turbines à vapeur ont leurs inducteurs sans pôles saillants et portent leur enroulement réparti sur toute

leur surface, dans des rainures. Cet enroulement donne quatre pôles principaux et quatre pôles commutateurs intermédiaires ; les fils qui le constituent sont fortement maintenus dans ces rainures. L'induit est long et rainé, il porte un bobinage imbriqué pour quatre pôles. Des précautions spéciales ont été également prises pour assurer la fixation des fils de ce bobinage dans leurs rainures. Le collecteur est très long et divisé en trois sections par des frettes supplémentaires. Les balais sont en cuivre.

La réfrigération des masses métalliques de ces dynamos est produite par circulation d'air, au moyen d'un ventilateur calé sur leur arbre et aspirant l'air à-travers l'induit, pour le refouler ensuite dans une cheminée, à travers les conduits de ventilation des pièces polaires, sans que les poussières de cuivre provenant du collecteur puissent venir encrasser les bobines isolées.

Il y a grand intérêt à éviter ces poussières qui sont souvent conductrices et peuvent influencer sur les isollements ; de plus elles sont en général mauvaises conductrices de la chaleur et, comme telles, gênent le refroidissement. Les installations perfectionnées les plus récentes s'accompagnent rationnellement de dispositifs de filtrage d'air.

Les filtres à air se sont répandus d'une façon générale. On n'installe plus guère aujourd'hui de turbo-dynamos où l'air de refroidissement ne soit pas débarrassé des poussières et aspiré dans des canaux fermés par des ventilateurs faisant presque toujours corps avec le rotor ; les filtres à air sont considérés comme un accessoire indispensable dans les centrales à turbines tout au moins.

Les types de filtres usuels sont des filtres secs formés de flanelle tendue sur des cadres généralement en bois, de manière à pouvoir loger de grandes surfaces sous un faible encombrement. Pour éviter que ces appareils prennent feu on en ignifuge les toiles et les cadres, car ils se couvrent facilement de poussières de charbon ou de matières fibreuses que la moindre étincelle peut enflammer, ou une lumière ou même une cigarette allumée. Indépendamment de l'imprégnation, il y a lieu d'enfermer les filtres à air dans des compartiments fermant à clef et éviter que les conduites de vapeur surchauffée ne s'approchent trop près des cadres en bois.

L'air doit être pris directement au dehors sur le côté situé à l'ombre où il n'y a pas de poussière, afin d'obtenir un parcours complètement fermé pour l'air frais arrivant à la machine.

Au cas de commencement d'incendie, il faut pouvoir arrêter immédiatement le courant d'air, en montant, par exemple, sur le chemin parcouru par l'air, des appareils automatiques d'arrêt, en utilisant l'action de la flamme ou de la chaleur pour faire déclencher ou détruire des organes intermédiaires commandant les organes d'arrêt. Il serait bon aussi de

compléter de tels dispositifs par des signaux acoustiques ou optiques avertissant le personnel des machines.

Les filtres doivent en tout cas être nettoyés avec le plus grand soin et éviter tout encrassement, car il est arrivé que des machines ont été détériorées faute d'une quantité d'air suffisante. Il est donc conseillé de munir chaque filtre d'un indicateur de dépression à lecture facile. Lorsque les filtres sont dans un état normal de fonctionnement leur résistance est de 1 à 2 millimètres et quand ils atteignent 5 à 6 millimètres on doit procéder à leur nettoyage.

Le plus souvent, les dynamos portent, sur leur arbre, une petite excitatrice qui facilite leur accouplement en parallèle, en rendant impossible tout renversement de leur polarité. Elles se construisent pour toutes les puissances à partir de 45 kilowatts à 4.000 tours, jusqu'à 1.500 kilowatts à 1.000 tours par minute.

La Compagnie générale électrique de Nancy constitue le collecteur des dynamos actionnées par turbine à vapeur avec des lames en forme d'U, et la ventilation de l'induit fait circuler de l'air dans la partie interne des lames dont les branches de l'U sont tournées vers l'arbre. D'un autre côté la couronne porte-balais est creuse et un ventilateur placé en bout d'arbre y envoie de l'air sous pression ; cet air est injecté sur le collecteur vers les blocs de charbon, à l'aide d'une tuyère qui fait partie du porte-balais.

Au point de vue électrique, les inducteurs à quatre pôles sont munis de pôles auxiliaires et aussi d'enroulements compensateurs, réglés de manière que le champ qu'ils produisent annule exactement la réaction de l'induit.

Les turbo-générateurs à courant continu construits par les ateliers de construction Oerlikon ont une carcasse fixe, en deux parties, munie de pôles radiants, lamellés et rapportés. Des pôles auxiliaires sont uniformément répartis dans les intervalles compris entre deux pôles consécutifs. Ces pôles auxiliaires assurent une bonne commutation sous chaque charge. Les enroulements de ces pôles auxiliaires sont formés d'éléments de bobines fabriqués sur gabarit. L'induit tournant est constitué de tôles lamellées et contient un enroulement à barres réparti dans un nombre égal de rainures et de lames du collecteur. Les bobines sont retenues dans les rainures par des clavettes ou bien elles sont introduites dans les rainures à moitié fermées, tandis que, sur les faces latérales de l'induit, elles sont retenues par un emboîtement cylindrique en alliage de bronze spécial. Le collecteur étant d'assez grande longueur, des garnitures de serrage sont ajustées et posées à froid.

Le mode d'action de ces garnitures de serrage repose sur le fait qu'un certain nombre de blocs, en forme de segments d'anneau et formant clavettes, sont serrés entre un anneau extérieur et le collecteur. La pression

exercée par chaque bloc sur un certain nombre de lamelles du collecteur peut, d'après le mode d'action des clavettes, être réglée à volonté par la manœuvre de la vis. Le pourtour du noyau est encore fretté au moyen de plusieurs couches de fil d'acier. Enfin, les chapeaux des paliers s'appuient sur des surfaces d'appui sphériques.

Dans les dynamos pour turbines à vapeur construites par la Société Alsacienne de constructions mécaniques, l'induit est normalement tournant et l'inducteur fixe. Les tôles, de 5/10 de millimètre d'épaisseur sont isolées entre elles au papier-cellulose et réunies en paquets de trois à quatre centimètres d'épaisseur séparées par des couronnes de ventilation. L'enroulement du rotor est fait sur gabarit ; les bobines sont logées dans des cannelures, où elles sont maintenues contre les effets de la force centrifuge par des cales en bois dur.

Des connexions équipotentiellles, faites à l'arrière de la machine, au-dessus de l'enroulement principal, équilibrent les circuits des différents pôles. Les connexions frontales de l'enroulement sont protégées par une calotte en bronze formant frette.

Pour les machines dont la vitesse dépasse 40 mètres par seconde, le collecteur est maintenu extérieurement par des frettes. La fixation du collecteur est assurée alors par ces frettes et par des pièces mécaniques, placées à chaque extrémité du collecteur, composées d'un moyeu claveté sur l'arbre et d'une série de bras cintrés qui viennent s'appuyer directement sur les frettes extrêmes du collecteur, disposition qui rend possible une dilatation dans le sens radial et une ventilation très efficace par la face interne.

La culasse du stator est en acier coulé et ordinairement d'une seule pièce ; elle est fermée et permet d'assurer une ventilation forcée en même temps qu'une protection complète de la machine. Les tôles sont rapportées sur la culasse. Les pôles auxiliaires de commutation ont leur enroulement parcouru par le courant induit.

Un enroulement de compensation, en série avec les pôles de commutation, est placé dans des cannelures ménagées dans les épanouissements polaires ; il est destiné à empêcher la distorsion du champ inducteur dû à la réaction d'induit.

La ventilation s'opère d'une façon identique à celle que nous expliquons en décrivant les turbo-alternateurs des mêmes constructeurs.

Les dynamos usuelles, c'est-à-dire à circuit fermé, fonctionnant à de très grandes vitesses angulaires comme celles accouplées directement à des turbines à vapeur, présentent des difficultés d'un ordre particulier. Ainsi les connexions latérales de l'enroulement augmentent la longueur de l'arbre, nécessitent un équilibrage difficile, doivent être maintenues énergiquement pour ne pas pouvoir prendre le moindre déplacement qui

détruirait cet équilibre obtenu à grand'peine. Comme elles sont soumises à un effort considérable dû à la force centrifuge, on doit les assujettir avec grand soin, au moyen de robes de métal qui les recouvrent et doivent être isolées.

Certains constructeurs déconseillent l'emploi des connexions équipotentielles, car dans les cas de dissymétrie des flux magnétiques des pôles principaux, ces connexions sont parcourues par des courants qu'il est impossible de contrôler et qui peuvent réagir sur les champs de commutation des pôles auxiliaires sans qu'on en soit averti.

Le collecteur doit avoir une très grande longueur, car le courant ne peut être capté par chaque ligne de frotteurs que sur deux ou trois lames avec les enroulements fermés et, dans ce cas particulier des dynamos à très grande vitesse, la largeur de ces lames est fort réduite.

Ces difficultés de construction, et même de bon fonctionnement, des dynamos à courant continu accouplées directement sur les turbines à vapeur, font que ces machines sont beaucoup plus coûteuses que les alternateurs de même puissance où l'induit est immobile et où l'inducteur tournant est d'une construction relativement aisée vis-à-vis de celle d'un induit à courant continu.

M. A. Meynier a préconisé, pour ces machines spéciales, à grande intensité par rapport à la tension, ou à très grande vitesse pour des tensions moyennes, l'emploi de machines dérivées du disque de Faraday, en divisant le disque en secteurs pour éviter les courants parasites. De cette manière le collecteur n'est plus supprimé, mais tout le courant engendré est utilisé et ne traverse aucune partie inactive de l'induit, contrairement aux machines à enroulement fermé. Les connexions sont totalement supprimées, et l'on peut produire, avec les machines commandées par turbines à vapeur, des tensions dépassant de beaucoup 110 volts.

604. Alternateurs pour turbines à vapeur. — La généralité des alternateurs pour turbines à vapeur appartiennent au type synchrone et le plus souvent à pôles intérieurs. La hauteur radiale du fer induit au-dessus des dents est souvent beaucoup plus grande que dans les machines courantes. Les résistances passives (hystérésis et Foucault) sont notablement plus élevées en charge qu'à vide, à flux égal.

La nécessité de réduire au point de vue mécanique les dimensions des alternateurs-turbines conduit nécessairement à admettre pour ces machines des réactions notablement supérieures à celles des machines normales. Le coefficient d'auto-régulation est par suite très élevé et réciproquement le rapport de l'intensité en court-circuit à l'intensité normale, pour l'excitation en charge, est généralement faible ; rapport qu'il n'est pas rare de voir descendre au-dessous de 1,5.

Le réglage de la tension s'obtient indirectement en agissant, par l'intermédiaire d'un automate, sur le courant d'excitation fourni par une excitatrice ordinaire (régulateurs Thury, Tirrill, Routin) ou en ayant recours à l'un des procédés usuels de compoundage par variation d'excitation due à des phénomènes d'induction mutuelle entre les circuits de l'alternateur et de l'excitation (méthodes Blondel, Boucherot, Danielson). Dans le stator les inductions admises à 50 périodes par seconde sont de l'ordre de 19.000 gauss dans la denture, et 10.000 gauss au-dessus des dents. Les entrefers adoptés varient de 10 à 25 millimètres et parfois davantage ; avec de tels entrefers on a la possibilité d'employer des inducteurs massifs. Pour éviter les déformations électro-magnétiques, importantes dans le cas de variations brusques de charge ou de court-circuit, il faut assujettir très solidement les têtes des bobines des stators.

La construction des inducteurs tournant à grande vitesse exige des soins particuliers. On fait appel soit à des pôles saillants, généralement massifs, soit à des enroulements répartis dans des encoches à la surface d'un noyau cylindrique, constitué, au besoin, par des plaques épaisses. Ce dernier système est le plus répandu. Dans tous les cas, le noyau est divisé transversalement à l'arbre, en un certain nombre d'éléments séparés par des entretoises formant cheminée de ventilation. De plus, les évidements longitudinaux sont ménagés dans le noyau ou dans le corps de l'arbre pour assurer la circulation de l'air et le drainage de la chaleur. La prise de courant du rotor se fait au moyen de bagues en acier fondu, quelquefois chemisées en cuivre, qu'on dispose avantageusement de part et d'autre du rotor.

Les noyaux sont toujours feuilletés et en disques d'une seule pièce. L'effort maximum est toujours au centre près de l'arbre. Ils sont solidement fixés sur l'arbre et on choisit les meilleurs dispositifs préconisés. Au point de vue de l'équilibrage, les paliers à coussinets, très rigidement fixés avec jeu suffisant autour de l'arbre, sont plus indiqués que les paliers à réglage par ressort à glissière.

Les bobinages pour les inducteurs sont généralement exécutés directement sur les armatures et la fixation dans les encoches est simplement obtenue au moyen de coins en métal. Cependant, certains constructeurs, notamment l'A. E. G., ont cherché à profiter des avantages des inducteurs à enroulements répartis, tout en préparant les bobines sur des formes. Le rotor (*fig. 1687*) est constitué par un noyau en acier dans lequel sont pratiquées des rainures uniformément réparties en forme de queues d'aronde dans lesquelles viennent s'engager des dents constituées par des paquets de tôles assemblées par des rivets.

Pour les rotors à pôles saillants, le montage demande de grands soins.

pour tenir compte de la force centrifuge sur les masses individuelles et des attractions magnétiques uniformément réparties sur celles-ci.

La commande des alternateurs à faible fréquence par les turbines à vapeur a nécessité certaines modifications relativement à la mise en court-circuit de ces alternateurs.

Nous avons montré que la réactance de l'enroulement d'induit, pour un alternateur court-circuité à ses bornes, dépend de l'arrangement et du nombre de



FIG. 1637. — Principe de construction des rotors à enroulements gabariés de l'A. E. G.

conducteurs périphériques de l'armature ainsi que de la fréquence du circuit. En particulier, la réactance est proportionnelle au carré du nombre de conducteurs par encoche ; mais dans les turbo-alternateurs le nombre d'encoches est bien diminué comparé aux autres machines. De ce fait, la réactance est moindre dans ce dernier cas, et la valeur du courant de court-circuit est augmentée.

Au point de vue de la réaction d'induit, on a été amené à utiliser des réactances externes placées aussi près que possible des bornes de l'alternateur à protéger ou encore à intercaler à la jonction des trois branches de l'Y, dans le cas d'un enroulement en étoile.

D'une manière presque générale, les alternateurs triphasés sont à pôles tournants, quoiqu'on ait construit des machines à pôles extérieurs bipolaires sous forme de générateurs asynchrones.

Les machines à pôles extérieurs ne se recommandent que pour les faibles et moyennes tensions. Leur prix est moins élevé, les pertes dans le fer n'étant environ que le tiers de celles d'une machine à pôles tournants.

Les générateurs asynchrones sont d'une construction particulièrement simple, avec induit en court-circuit, les barres du rotor étant réunies par un anneau en cuivre emmanché à la presse.

Le courant déwatté à fournir dans le cas d'un alternateur à grande vitesse est relativement faible, ce qui permet d'obtenir un $\cos \varphi$ compris entre 0,92 et 0,98. La mise en parallèle est très simple et instantanée.

Le $\cos \varphi$ d'un générateur asynchrone de 10.000 kilowatts, 750 tours par minute, 25 périodes, 2.200 volts, est, à pleine charge, 0,982, et le rendement, 98,5 0/0.

Ces machines présentent le grand avantage, en cas de court-circuit dans le réseau, de n'introduire ni résonance ni surtension et de fournir à toute charge une tension sinusoïdale. Elles fonctionnent également comme amortisseurs pour les surtensions.

Les générateurs à pôles tournants ont leur partie tournante constituée soit par un cylindre contenant dans des encoches réparties à sa surface

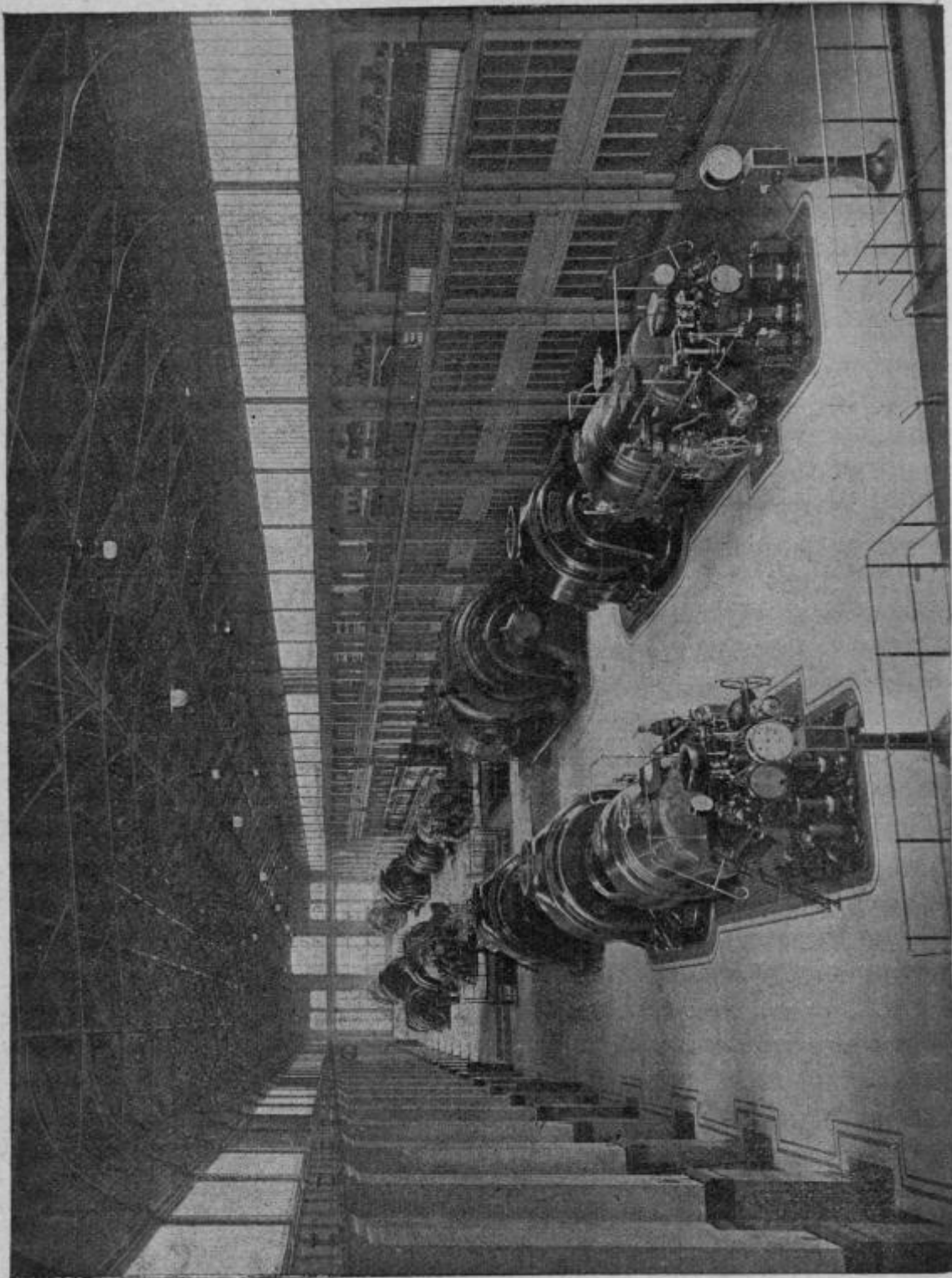


Fig. 1683. — Turbo-alternateurs de 10.000 chevaux et de 25.000 chevaux. (Cie Electro-Mécanique).

l'enroulement d'excitation, soit par un rotor avec pôles rapportés. Pour les machines bipolaires, la première construction paraît être la plus indi-

quée. Pour quatre pôles et plus, il ne paraît pas y avoir de différence sensible entre les deux modes de construction.

La fabrication de turbo-alternateurs bipolaires s'explique par ce fait que, pour des puissances de l'ordre de 1.000 kilowatts, il est plus économique, tant au point de vue du prix de revient que de la consommation de vapeur, de construire des turbines tournant à 3.000 qu'à 1.500 tours.

Dans le cas d'accouplement direct le nombre de tours de la turbine est limité, pour des courants de fréquence de 50 périodes par seconde, à 3.000 tours par minute. On a construit à cette vitesse des unités de 2.000 kilowatts ; comme il est nécessaire de réduire la vitesse à 1.500 tours si l'inducteur doit être exécuté à quatre pôles, on s'efforcera probablement de dépasser encore cette puissance, car l'écart est considérable.

Les générateurs construits par Parsons, à pôles rapportés tournants, ont leurs bobines excitatrices maintenues au noyau par leur partie extérieure à l'aide d'un épanouissement polaire fixé à queue d'aronde. Le pôle et l'épanouissement sont en acier fondu. Dans les machines plus petites bi et tétrapolaires, le noyau, les pôles et les épanouissements sont fondus d'une seule pièce. C'est là un type très général.

Les inducteurs tournants, en forme de cylindre, sont, soit d'une seule pièce en acier fondu, avec encoches et canaux de ventilation fraisés, soit formés de plaques de 20 à 30 millimètres d'épaisseur (tôle à chaudière), espacées les unes des autres de façon à ménager les canaux de ventilation et portant des encoches fraisées ; enfin ils peuvent être constitués par des tôles minces de dynamos pressées les unes contre les autres.

Pour la circulation de l'air deux systèmes sont en présence. L'un consiste à diviser le stator et le rotor en paquets de tôles de 5 à 10 centimètres d'épaisseur séparés par des événements suivant un plan normal à l'arbre ; le refroidissement se fait surtout par convection contre les tôles terminales de chaque élément et la chaleur doit s'évacuer de proche en proche à travers les isolants.

L'autre disposition consiste à faire passer l'air dans des canaux longitudinaux régnant sur la longueur de l'armature ; toutes les tôles présentent ainsi l'une de leurs surfaces à l'action directe du courant d'air et se refroidissent ainsi directement et individuellement.

Le dispositif adopté par Brown-Boveri est aujourd'hui généralement appliqué par tous les constructeurs, à quelques variantes près. Ici on fait arriver symétriquement l'air frais par le socle de la machine aux deux extrémités du stator (*fig. 1689*) où il est aspiré par les ventilateurs portés par le rotor. Une partie de l'air est refoulée dans le stator et baigne les têtes des bobines ; par des chicanes convenablement disposées, il passe

dans les cloisons de ventilation ménagées dans le stator, rafraîchit les tôles sur leur pourtour et s'échappe à la partie supérieure du stator, après avoir traversé l'entrefer.

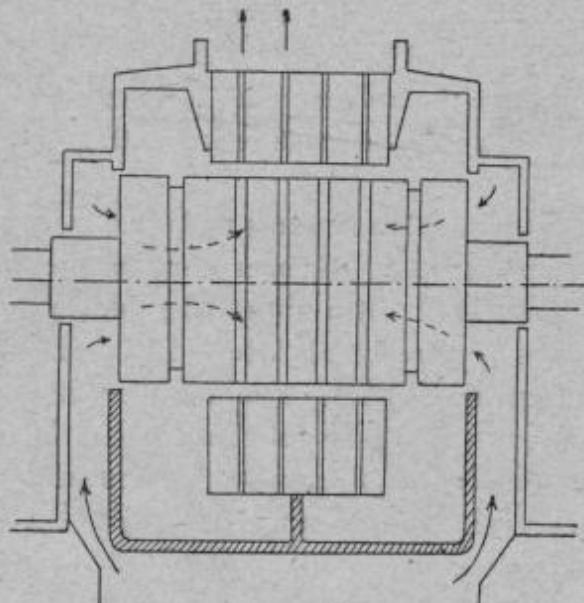


FIG. 1689.

Une autre partie du volume d'air passe à travers des canaux longitudinaux à l'intérieur du rotor et se trouve refoulé par les cloisons du rotor pour rejoindre ensuite les cheminées du stator.

La Compagnie générale électrique de Nancy établit le rotor de ses alternateurs devant être commandés par des turbines à vapeur de la façon suivante. Il est constitué par un cylindre massif en acier doux forgé, de haute perméa-

bilité magnétique, et il est fraisé ou forgé de façon à former un double T dont le noyau est moins long que les pièces polaires. Ces dernières comportent des canaux parallèles à l'axe et des rainures perpendiculaires pour assurer une bonne ventilation.

Les bobines inductrices sont enroulées directement sur le double T avec interposition de boîtes isolantes en deux pièces. L'arbre est en deux pièces et l'ensemble est monté sur coussinets à billes et le courant amené au moyen de bagues reliées au bobinage à travers l'arbre creux.

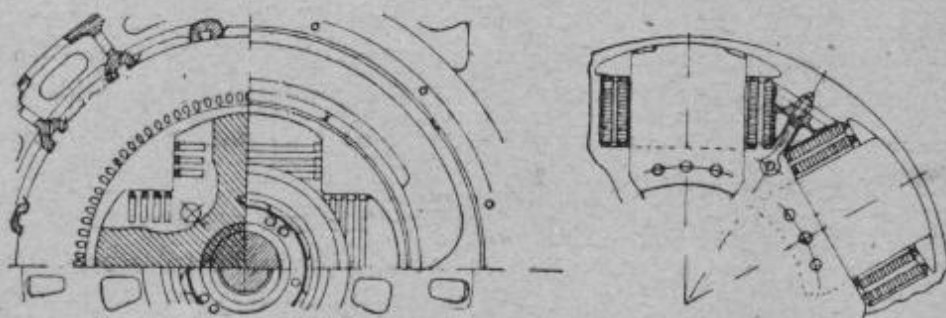


FIG. 1690. — Turbo-alternateur à pôles saillants, avec emploi de tôles pour grande vitesse angulaire.

Les parties évidées du rotor sont fermées, après bobinage, au moyen de plaques en bronze fixées, d'une part, par des boulons traversant le double T en acier, d'autre part, par des clavettes inclinées, qui fixent le bord de la plaque en bronze à la pièce en acier. Le bobinage est ainsi soli-

dement maintenu sur toutes ses faces avec interposition de matière isolante. Il est disposé aussi près que possible du centre du rotor et par suite moins exposé à l'action de la force centrifuge ; de plus, on permet une

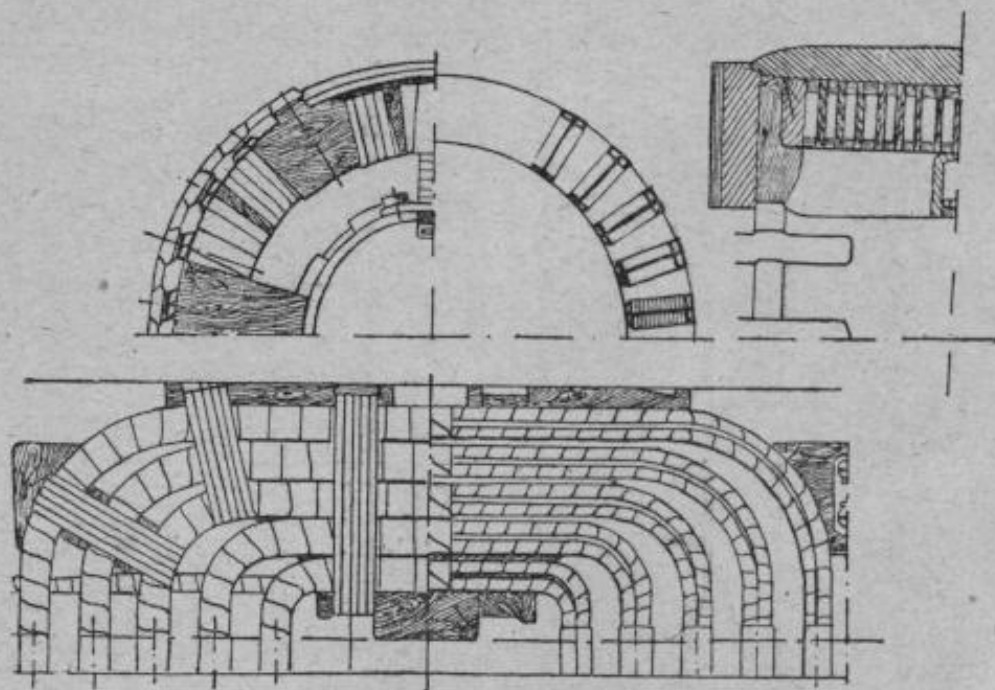


FIG. 1691. — Inducteur cylindrique pour turbo-alternateur.

dilatation libre de l'ensemble dans le sens de la longueur sans coincement possible.

Les ateliers de construction Oerlikon établissent les alternateurs commandés par turbines à vapeur de la façon suivante. L'induit est fixe et l'inducteur tournant. Les tôles du noyau inducteur sont pourvues d'encoches relativement grandes, réparties sur la périphérie. Les bobines, enroulées en spirale sur gabarit, y sont maintenues par des clavettes métalliques. Au milieu de chaque pôle, quelques encoches sont toujours laissées vides, les spires voisines de l'axe magnétique ayant pour inconvénient de provoquer une forme triangulaire du champ.

Les courants produits par l'excitatrice placée en bout d'arbre sont envoyés aux bobines inductrices par deux bagues placées en dehors de l'alternateur.

L'induit est bobiné dans un noyau en tôles lamellées ; la carcasse portant le noyau est en fonte et en deux parties avec le joint

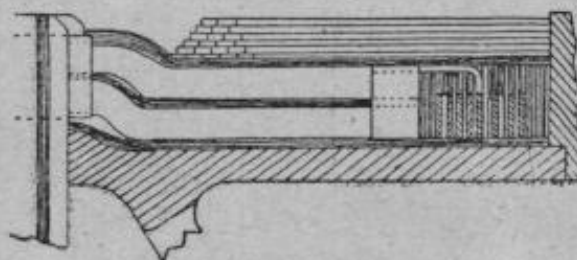


FIG. 1692. — Connexions équipotentielles.

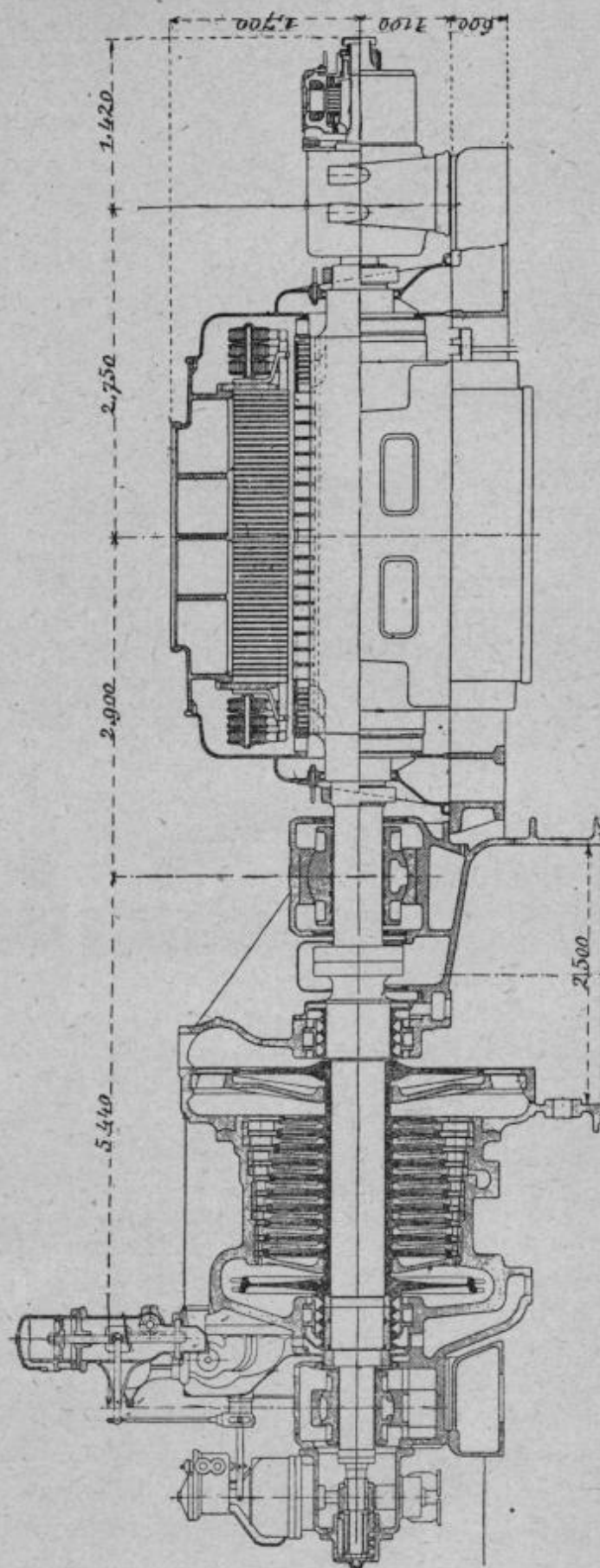


FIG. 1693. — Turbo-alternateur de 20.000 K. V. A.

horizontal. Les deux bouts de l'alternateur sont fermés par des couvercles.

Le dispositif employé pour la ventilation est celui qui permet d'envoyer en même temps, par des chemins différents et indépendants, l'air refroidissant aux diverses parties de l'alternateur.

Deux ventilateurs sont clavetés sur l'arbre aux deux extrémités du rotor ; l'air aspiré est envoyé sous pression dans un réservoir placé sous le bâti et, de là, revient par divers conduits passer dans les canaux de ventilation du stator et arrive refroidir le rotor.

Un soin tout particulier doit être apporté pour disposer les connexions frontales des enroulements répartis dans les encoches. Ces connexions sont fixées le plus souvent à des saillies solidaires de la partie tournante et faites d'une matière non magnétique.

En général, les encoches de l'excitation sont rangées suivant les rayons. Cependant on a construit également des encoches d'un pôle, parallèles entre elles ; il en résulte que les encoches sont de profondeur inégale et contiennent un nombre inégal de conducteurs.

Dans les alternateurs pour turbines à vapeur construits par la Société Alsacienne de constructions mécaniques, jusqu'à la vitesse de 3.000 tours et pour toutes les puissances inférieures à 3.000 kilowatts, le circuit magnétique est constitué par des tôles circulaires munies de cannelures recevant les bobines inductrices. Au-dessus de ces chiffres, le rotor a une disposition massive pour pouvoir réaliser des vitesses tangentielles élevées. Au-dessus de 3.000 tours, les alternateurs fonctionnent normalement au-dessus de leur vitesse critique, tandis que ceux tournant à 1.500 tours fonctionnent au-dessous.

L'enroulement du rotor se fait avec bobines préparées d'avance au gabarit et chaque pôle reçoit plusieurs bobines en série. Les enroulements inducteurs des différents pôles eux-mêmes sont généralement montés en série, et les deux extrémités de l'enroulement sont connectées aux deux bagues d'excitation, situées de part et d'autre du rotor ou parfois d'un seul côté. Entre les têtes des bobines sont placées des cales appropriées pour éviter toute déformation sous la poussée de la force centrifuge. Des frettes en acier au nickel sont placées par-dessus les têtes des bobines, lesquelles reposent d'une part sur les plateaux de serrage, et d'autre part sur deux disques formant en outre ventilateur. Pour les rotors massifs, les cannelures sont fraisées dans la masse du tambour inducteur. Une disposition convenable de l'enroulement le long de l'entrefer et une inclinaison spéciale des cannelures du pas d'une entaille, suivant une portion d'hélice, permettent d'éviter la production d'harmoniques dans les courbes de tension des alternateurs.

Le stator se compose d'une carcasse en fonte grise d'une très grande

rigidité, complètement fermée, et portant à sa partie inférieure une cheminée destinée à la ventilation. Les machines d'une puissance supérieure à 6.000 K. V. A. tournant à 1.500 tours ont une carcasse en deux pièces. A l'intérieur de la carcasse sont disposées les tôles, isolées entre elles au papier, fixées sur la carcasse par des clavettes. Les tôles découpées à l'étampe portent à leur périphérie intérieure les cannelures, ouvertes et fermées suivant le voltage, et destinées à recevoir l'enroulement induit.

L'alternateur est fermé sur les côtés par des flasques ou couvre-enroulements facilement démontables et portant des buses d'aération par lesquelles arrive l'air nécessaire au refroidissement. L'enroulement est formé le plus souvent de bobines faites sur gabarit, maintenues dans les cannelures par des cales en bois dur. Les différentes parties d'un même conducteur sont enfermées dans une forte capote de mica, de sorte que les bobines ainsi constituées forment des éléments rigides, réalisant l'isolement le plus efficace. La fixation des têtes des bobines statoriques est faite au moyen de cales en bois maintenues elles-mêmes en place par des brides et des boulons de fixation en bronze. Les pièces de fixation sont séparées des bobines par un isolement spécialement renforcé.

L'air pour le refroidissement traverse d'abord un filtre, pénètre par les buses d'aspiration à l'intérieur de la carcasse ; alors une partie arrive le long de l'arbre, passe par les événements du rotor, gagne l'entrefer et de là les événements statoriques ; une autre partie passe par des ouvertures pratiquées dans les disques portant les ventilateurs et se rend dans l'espace occupé par les têtes de bobines du rotor, puis sort par les cannelures vides du milieu des pôles et par des encoches ménagées dans les dents du plateau de serrage ; enfin une autre partie, aspirée par les ventilateurs du rotor, est projetée directement sur les têtes de bobines de l'enroulement du stator. Ces trois courants d'air, après avoir ventilé les différentes parties de la machine, se rejoignent dans la carcasse et sont évacués, par la buse d'aération située à la partie inférieure de la carcasse, à l'extérieur de la salle des machines.

Certains constructeurs emploient pour la partie réservée aux encoches une substance non magnétique. D'autres, au contraire, réservent cette substance pour les parties lisses.

Les noyaux à encoches ouvertes sont maintenant presque universellement adoptés ; il peut y avoir deux, quatre ou six conducteurs par encoche.

L'emploi des cales en bois ou en fibre est presque général. Pour réduire la section des cales, il est d'usage d'employer des encoches mi-fermées (*fig. 1694*). Quelquefois on emploie des barres en métal, iso-

lées du noyau. Il serait désirable d'avoir des cales formées d'une combinaison de métal et de fibre isolante, à l'instar du principe du béton armé.

Enroulement. — Les connexions d'extrémité, sont généralement du type à manteau ordinaire, fortement liées ensemble au bout du tambour. Au point de vue de l'isolant on emploie la micanite, ou un composé de leatheroïd, ou papier cuir, et de micanite, le leatheroïd fournissant la résistance mécanique nécessaire et la micanite la rigidité diélectrique.

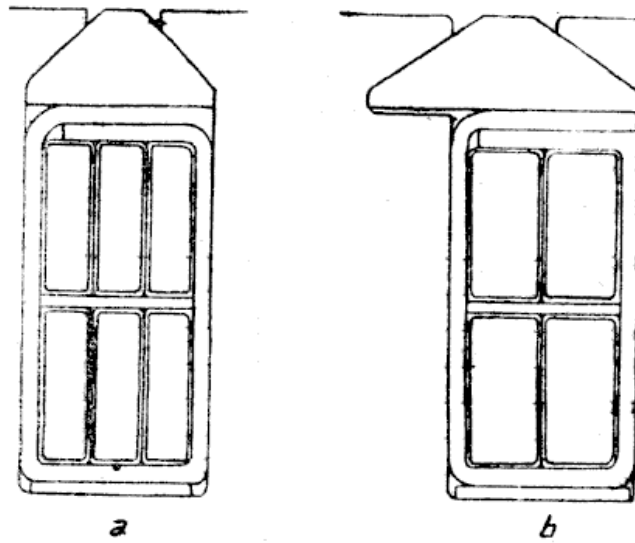


FIG. 1694.

Étant donné le grand entrefer des turbo-générateurs (de 10 à 25 millimètres), les épanouissements polaires peuvent être d'une façon générale complètement massifs. On a cependant remarqué que, pour des entrefers de 10 à 12 millimètres et des encoches largement ouvertes, les épanouissements polaires chauffaient d'une façon inadmissible par suite de l'intensité du flux transversal ; aussi construit-on très souvent les épanouissements polaires en tôles minces.

On s'est efforcé généralement d'obtenir des courbes de tension sinu-

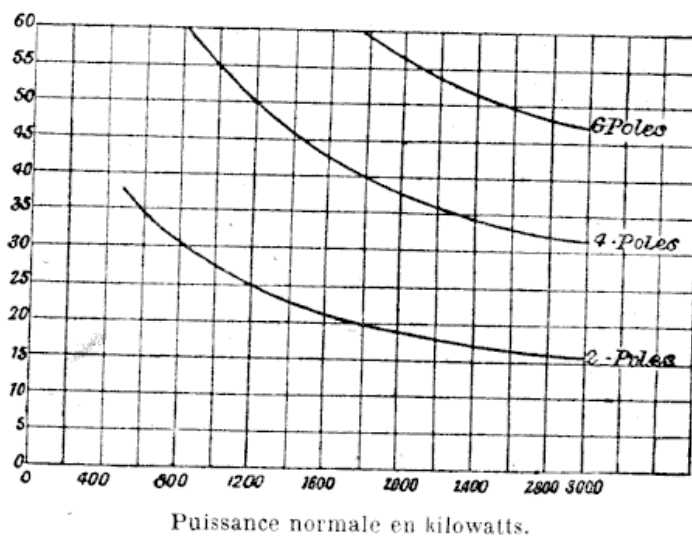


FIG. 1695. — Fréquence correspondant aux différentes puissances des turbines à vapeur (Hobart).

soïdale, ce qu'on réalise en donnant aux épanouissements une forme spéciale. On a eu recours également au procédé qui consiste à répartir les encoches d'une manière uniforme, mais à leur donner des largeurs inégales, les encoches situées au milieu du pôle étant les plus étroites et contenant, par conséquent, le moins de conducteurs.

Étant donnés les canaux de ventilation nombreux des turbo-générateurs, il a été reconnu de toute nécessité, aux endroits où les enroulements

croisent ces canaux, de les protéger contre les détériorations mécaniques produites par le courant d'air.

Si le refroidissement est bon et si l'on emploie des tôles convenables, les constantes électriques et magnétiques peuvent être prises aussi élevées que dans les dynamos à faible vitesse. C'est ainsi qu'on atteint couramment les valeurs suivantes. Pour 50 périodes : induction de 10.000 dans le noyau du stator, de 19.000 dans les dents du stator ; densité de courant dans le cuivre du stator de 3 à 4 et même 5 ampères par millimètre carré ;

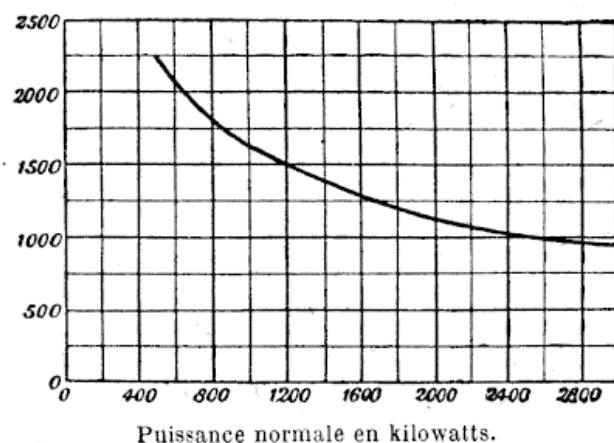


FIG. 1696. — Variations de la vitesse avec la puissance normale des turbines à vapeur (Hobart).

dans le cuivre de l'excitation 2,5 jusqu'à 4,5 et quelquefois jusqu'à 7 ampères.

Par suite des dimensions réduites de l'induit, nécessitées par la force centrifuge, l'emplacement pour les enroulements d'excitation est très limité, de sorte que, même pour un faible nombre d'ampères-conducteurs par centimètre de périphérie, la réaction d'induit reste très impor-

tante. C'est ainsi que des machines bipolaires ont pour un $\cos \varphi$ de 0,8, une élévation de tension d'au moins 20 0/0, quand on passe de la pleine charge à la marche à vide. Il en résulte qu'il faut employer des régulateurs comme le Tirrill ou le Thury, ou encore avoir recours à des excitations spéciales produisant une sorte de compoundage.

Enfin, suivant les constructeurs, différents modes de refroidissement artificiel ont été employés ; ils consistent tous à introduire, à l'aide d'un ventilateur ou d'un aspirateur, l'air du sous-sol dans la salle des machines.

En tout cas l'air doit être soigneusement purgé de toute poussière ; l'expérience a même montré qu'il fallait de temps en temps nettoyer les machines, la poussière déposée nuisant beaucoup au refroidissement.

La construction des alternateurs monophasés doit répondre tout d'abord aux conditions imposées aux turbo-alternateurs triphasés, en tenant compte de ce que, pour une machine déterminée, sa puissance sera en monophasé les $2/3$ de ce qu'elle serait en triphasé.

Il convient de remarquer de plus que les alternateurs monophasés sont destinés le plus souvent à alimenter des réseaux de voies ferrées, par conséquent à produire du courant à 25 et souvent à 15 périodes, ce qui augmente encore les dimensions de la machine pour une puissance déterminée.

Enfin, les alternateurs monophasés, contrairement aux triphasés, pré-

sentent le gros inconvénient, par suite de leur champ de réaction alternatif, d'induire dans les bobines d'excitation un courant de fréquence double du courant de travail ; l'importance de ces courants est telle qu'un fonctionnement régulier est impossible. Les courants de Foucault ont également une importance telle que l'inducteur tout entier doit être feuilleté.

On a remédié au premier inconvénient par des amortisseurs montés sur les épanouissements polaires et constitués par des anneaux en cuivre en court-circuit, dont le montage sur le pôle nécessite des soins tout particuliers. Des épanouissements polaires pleins rempliraient à la rigueur le rôle d'amortisseurs, mais seraient cependant insuffisants, sans compter qu'il en résulterait, dans ces pièces, un échauffement la plupart du temps inadmissible.

Il faut signaler aussi que les machines uni ou homopolaires peuvent fonctionner comme générateurs monophasés à condition de feuilletter tout le bâti et d'employer pour l'excitation du courant alternatif. Pour les faibles fréquences, en particulier, la machine unipolaire présenterait de sérieux avantages.

Turbo-alternateur de 20.000 kilowatts de la station de Chorzew (Haute-Silésie). — La machine est à trois paliers. Le rotor repose du côté de l'excitatrice sur un palier rapporté au socle, alors que du côté turbine, le palier fait corps avec la boîte d'échappement.

Pour le rotor on a conservé le mode de construction habituel. De chaque côté de l'inducteur, des ventilateurs envoient environ 120.000 mètres cubes d'air par heure à travers la dynamo. L'air passe par un filtre disposé au-dessus des condenseurs, est aspiré par un canal et refoulé par un autre canal au-dessus du toit du bâtiment.

Le stator est composé d'un segment inférieur de 120° reposant sur le socle, et sur lequel on monte les deux autres segments supérieurs de 120° qui sont aisément démontables. L'enroulement induit est formé de bandes lamellées isolées à la micanite, au nombre de deux par trou. Les connexions entre les bandes sont rivées, soudées et parfaitement isolées, même à l'endroit des soudures que l'on recouvre de chapes en micanite. Les têtes des bobines sont protégées contre les courts-circuits par le mode d'ancrage ordinaire. On obtient un refroidissement énergétique des enroulements et du noyau par une canalisation spéciale du courant d'air. A l'endroit où le rotor émerge des chapes de protection, ainsi qu'aux joints de ces dernières, de l'air est envoyé par l'intérieur, ce qui empêche des projections d'huile par aspiration sur les enroulements.

L'excitation est fournie par une dynamo directement accouplée, d'une puissance de 75 kilowatts à 220 volts. La tension de l'alternateur peut être réglée de 6.000 à 6.500 volts ; elle est maintenue constante

entre la marche à vide et la pleine charge au moyen d'un régulateur Tirrill.

La partie tournante de la turbine est placée dans la partie fixe du bâti qui est divisée en deux par un plan médian horizontal. Elle se compose d'une roue à plusieurs couronnes d'aubes pour la haute pression et de plusieurs roues à une seule couronne pour la basse pression ; le nombre de ces roues est de 12 ici. Les aubes encastrées sur des disques en fer forgé sont fabriquées, pour la haute pression, en acier au nickel à faible pourcentage, pour la pression moyenne en laiton, et pour la basse pression, en bronze. Les aubes de la dernière rangée ont une longueur de 300 millimètres et un poids de 400 grammes.

L'arbre de la turbine, qui est accouplé d'une façon rigide avec l'inducteur, repose sur des paliers portés par le socle et sur lesquels est vissée la partie avant du bâti de la turbine. Ces paliers portent également la vis sans fin du régulateur et l'engrenage pour la pompe à huile. Le régulateur, d'un modèle spécial, est établi de façon à éviter tous les boulons pour la liaison entre les parties mobiles et à faire supporter les poids par des paliers à gorges très larges. Une distribution bien comprise du graissage assure un service irréprochable.

L'arrivée de vapeur disposée de chaque côté de la turbine, aboutit par un crible aux chambres d'ajutage ; celles-ci se trouvent à la partie supérieure du bâti.

Nous terminons ce paragraphe par les tableaux suivants qui renseignent sur les données principales de quelques types de turbo-générateurs.

SYSTÈME	KILOWATTS	TOURS par minute	PRESSION en kg : cm ²	VIDE en mm	SURCHAUFFE en degrés C.	CONSUMMATION de vapeur en kg : kw-h. pleine charge
De Laval.....	200	»	11,25	698,5	»	10,43
Rateau.....	1.000	1.500	11,6	685	»	9,97
—.....	475	2.500	14,77	670	»	8,98
Zoelly.....	400	3.200	11,25	675	68	8,48
Curtis.....	500	1.800	10,55	725	64	8,50
—.....	1.000	1.500	10,55	720	79	7,66
—.....	2.000	750	11,25	730	134	6,94
—.....	8.000	»	12,94	745	80	5,75
A. E. G. Curtis..	1.000	3.000	12,66	725	122	7,48
—.....	1.000	3.000	12,66	670	70	8,35
Parsons.....	500	»	»	660	68	9,30
—.....	1.000	»	»	660	68	8,62
—.....	3.500	»	13,88	735	60	6,30
Willans-Parsons.	6.000	»	13,36	685	56	7,19

CONSTRUCTEURS	PUISANCE en K. V. A.	VITESSE de rotation ω_m en tours par minute	FRÉQUENCE en périodes par sec.	TENSION en volts	NATURE des courants	STATOR			ENTRÉE en cent.	VITESSE tangentielle du rotor en minutes par sec.	$C = \frac{P \times 10^6}{D a^2 l_{am}}$	RÉACTION linéique en a-cond. par cent.
						DIAMÈTRE EXTÉRIEUR en cent.	DIAMÈTRE INTÉRIEUR D_a en cent.	LONGUEUR l_a totale en cent.				
A. E. G.	2.000	1.500	50	6.000	"	"	117	136,5	"	87	1,1	"
Alsth.	2.000	1.500	50	526	"	170	115	95	2	87	1,06	"
Maison Breguet	535	3.000	50	330	triphasé	99	42,2	62	0,7	66	1,7	"
	630	3.000	50	220	—	99	47	64	0,5	74	1,5	"
	600	3.000	50	4.000	alt. simple	140	59	90	1	89	0,7	"
Brown-Boveri et Cie	290	3.000	50	300	"	"	47	47	1,5	69	0,93	150
	500	3.000	50	300	"	100	54	70	2	78	0,82	"
	600	3.000	50	3.000	"	"	52,6	80	1,3	78	0,90	"
	3.000	1.500	50	3.000	"	"	95	142,5	"	70	1,55	"
Dick Kerr (1905)	3.000	750	25	6.700	triphasé	140	65	115	"	"	"	"
Kolben (1909)	3.200	980	50	3.200	triphasé	196	129,5	112	2,5	65	1,73	234
	900	1.500	50	200	"	143	85	72,5	1,5	64	1,11	"
	970	1.500	50	450	"	128	75	74	1,5	57	1,65	184
	430-500	3.000	50	3.500	diphasé	90	48	72	1,2	72	0,86	"
Hobart	400	1.500	50	3.000	triphasé	121	76	47	0,51	59	0,78	"
Oerlikon	1.500	1.500	25	6.500	triphasé	175	104,4	102	4,2	75	0,9	"
	1.000	1.500	50	5.200	alt. simple	150	87	104	1	67	0,85	112
Siemens-Schuckert-Werke...	1.750	1.260	42	3.000	triphasé	"	123	50	"	78	1,84	"
	1.660	1.500	25	6.300	alt. simple	153	95	115	2	70	1,05	"
Westinghouse	800	3.600	60	440	triphasé	102,7	65	76	2,8	112	0,68	185
	1.000	1.500	25	400	—	170	110	123	6,3	76	0,45	100
	1.500	1.500	25	400	—	169	105	132	3,6	77	0,69	130
	1.800	1.500	50	8.000	—	180	127	106	3,2	95	0,70	135
	2.000	1.500	25	11.000	—	237	121	152	4,7	88	0,60	185
	3.500	1.000	33,33	11.000	—	275	184	122	6	90	0,85	152
	5.500	750	25	13.200	—	282	184	163	6	67	1,3	200

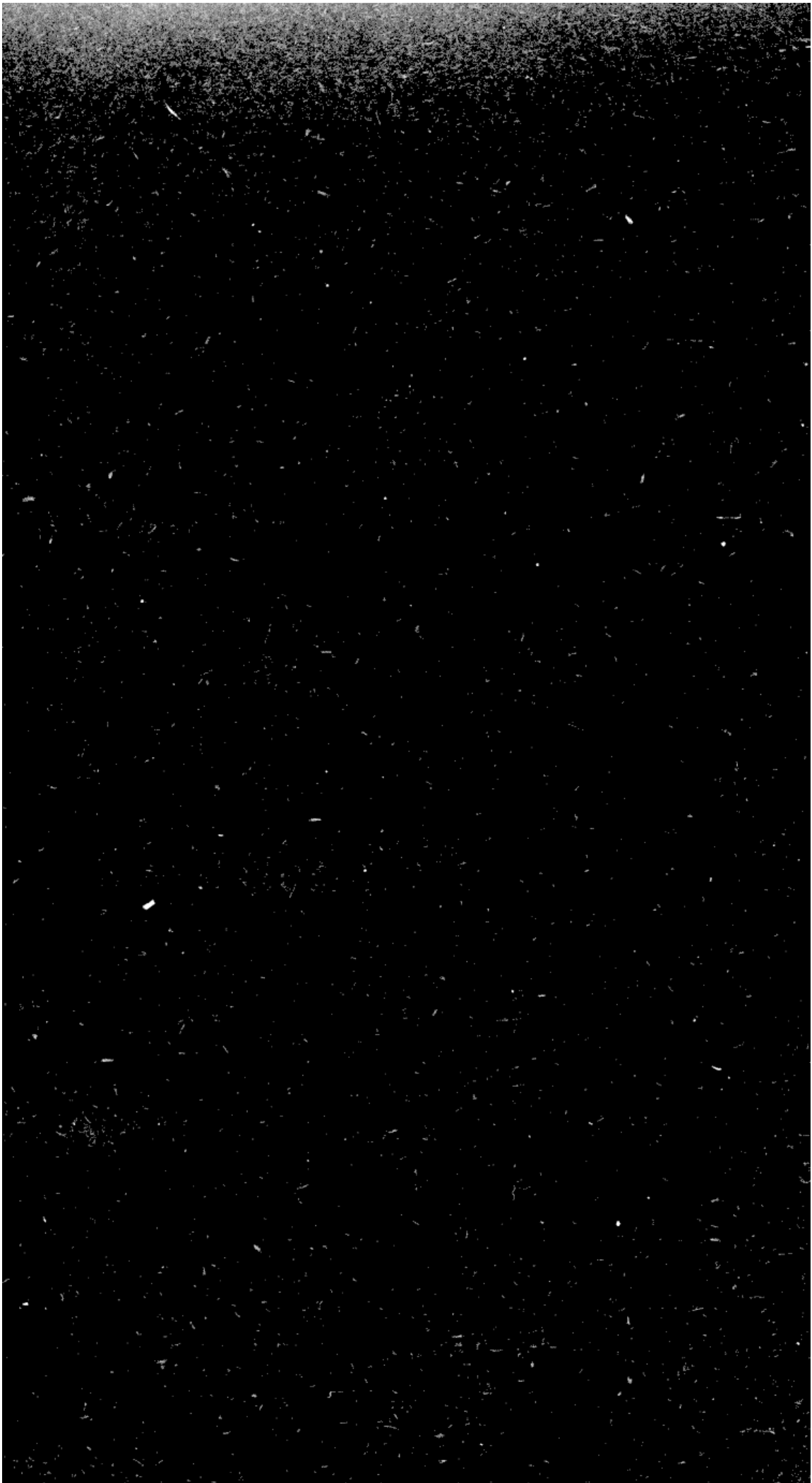


TABLE DES MATIÈRES

TOME III

UTILISATION DE L'ÉNERGIE DES CHUTES D'EAU

PREMIÈRE PARTIE

PRODUCTION ET TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XXI

Machines génératrices

429. Caractères généraux des machines modernes	Pages. 1665
--	----------------

GÉNÉRATRICES A COURANT CONTINU

I. — NOTIONS THÉORIQUES

430. Expression des ampères-tours d'une dynamo	1672
431. Exposé de la commutation	1675
432. Enroulements des induits	1686
433. Puissance limite d'une dynamo	1694
434. Rendement des dynamos. — Pertes d'énergie.....	1696
435. Du refroidissement dans les machines électriques	1699

II. — CONSTRUCTION DES DYNAMOS

436. Établissement des inducteurs	1700
437. Établissement des induits	1704

III. — RÉGULATION DES DYNAMOS

438. Couplage et régulation des dynamos	1711
439. Essais et épreuves des dynamos.....	1713
440. Dynamos homopolaires	1723
441. Calcul élémentaire d'une dynamo. Application américaine	1726

GÉNÉRATRICES A COURANT ALTERNATIF

I. — ALTERNATEURS MONOPHASÉS

442. Généralités sur le courant alternatif	1732
443. Nature des alternateurs simples	1742

	Pages.
444. Valeurs de la force électromotrice.....	1746
445. Excitation des alternateurs	1749
446. Chute de tension dans les alternateurs	1750

II. — ALTERNATEURS TRIPHASÉS

447. Dispositions usuelles adoptées pour l'établissement des alternateurs triphasés.....	1757
448. Harmoniques des courants alternatifs	1760
449. Couplage en parallèle des alternateurs	1765
450. Rendement des alternateurs	1773
451. Méthodes d'essai et tensions d'épreuve	1775
452. Régulation des alternateurs	1782
453. Compoundage des alternateurs	1786
454. Conditions d'installation des alternateurs triphasés.....	1797
455. Descriptions et spécifications d'alternateurs de construction récente	1798

CHAPITRE XXII

Machines réceptrices

I. — MOTEURS A COURANT CONTINU

456. Force contre-électromotrice et couple moteur	1812
457. Régulation du moteur-série.....	1813
458. Régulation du moteur shunt	1816
459. Régulation du moteur compound	1820
460. Démarrage des moteurs à courant continu	1820
461. Considérations sur les procédés permettant de faire varier la vitesse des moteurs à courant continu	1827
462. Freinage électrique.....	1829
463. Rendement et essais des moteurs.....	1830

II. — MOTEURS MONOPHASÉS

464. Moteurs synchrones.....	1834
465. Moteurs asynchrones.....	1835
466. Moteurs à collecteur	1837

III. — MOTEURS TRIPHASÉS

467. Moteurs synchrones.....	1847
------------------------------	------

MOTEURS ASYNCHRONES

468. Conditions de fonctionnement	1850
469. Valeurs de la force électromotrice.....	1857
470. Couple moteur	1858
471. Fuites magnétiques	1860
472. Démarrage des moteurs asynchrones	1863
473. Régulation des moteurs asynchrones	1872
474. Rendement des moteurs asynchrones	1882
475. Spécifications et conditions moyennes de fonctionnement des moteurs asynchrones	1892

CHAPITRE XXIII

Machines transformatrices des courants

476. Systèmes de transformation des courants.....	1897
---	------

I. — MOTEURS GÉNÉRATEURS

477. Fonctionnement des moteurs générateurs	1897
---	------

II. — COMMUTATRICES

	Pages.
478. Fonctionnement des commutatrices	1899
479. Démarrage des commutatrices	1909
480. Synchronisation des commutatrices	1915
481. Couplage en parallèle des commutatrices	1917
482. Rendement des commutatrices	1920
483. Commutatrices en cascade	1921
484. Montage des commutatrices	1927
485. Spécification d'une commutatrice triphasée moderne	1928

III. — SOUS-STATIONS TRANSFORMATRICES

486. Équipement des sous-stations transformatrices	1932
487. Appareils transformateurs et redresseurs du courant alternatif	1936
488. Convertisseurs de fréquence	1938

CHAPITRE XXIV

Transformateurs statiques

489. Puissance d'un transformateur	1945
490. Calcul de la chute de tension dans un transformateur	1948
491. Transformateurs triphasés	1961
492. Rendement et essais des transformateurs	1965
493. Construction des transformateurs	1977
494. Couplage en parallèle des transformateurs	1994
495. Installation et réglage des transformateurs	1996
496. Systèmes de distribution des transformateurs et rayons d'action des sous-stations de transformateurs	2001
497. Types de sous-stations de transformateurs	2004
498. Calcul élémentaire d'un transformateur triphasé (application numérique) ..	2008

DEUXIÈME PARTIE

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A GRANDE DISTANCE

CHAPITRE XXV

Lignes de transport de force à haute tension. — Calcul des réseaux ■

I. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE PAR COURANT TRIPHASÉ

499. Considérations générales sur le transport de l'énergie par courant triphasé .	2013
500. Constantes des lignes aériennes à courant alternatif	2016
501. Choix de la tension	2027
502. Capacité de la ligne	2033
503. Surtensions. — Phénomènes de résonance	2042
504. Chute de tension	2050
505. Courant de charge. — Surélévation de tension	2060
506. Régulation de la tension en ligne	2063

II. — MÉTHODES GRAPHIQUES POUR LE CALCUL DES LIGNES A HAUTE TENSION

507. Méthode de M. Claveleira	2065
Méthodes de M. A. Blondel	2072
508. Lignes de transmission à capacité négligeable	2073
509. Lignes de transmission en tenant compte de la capacité et de la perte tance réparties	2085

	Pages.
510. Exemples d'applications.....	2101
511. Graphique Ferrier	2117
512. Abaques Barris	2120
513. Abaques Herdt	2132
514. Rappel des formules et principes généraux pour le calcul des conducteurs à courant continu	2135
III. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE PAR COURANT CONTINU A HAUTE TENSION	
515. Transport à haut voltage système Thury	2145
516. Transports de force de Saint-Maurice et de Moutiers	2149
517. Réseau de la Metropolitan Electric Supply Company	2151
518. Transport de la Trollhattan à Copenhague	2156
IV. — APPLICATIONS NUMÉRIQUES. — TRANSPORTS DE FORCE A GRANDE DISTANCE	
519. Calcul d'une transmission de puissance par courant continu.....	2159
520. Calcul d'une transmission de puissance par courant alternatif simple.....	2161
521. Calcul des lignes de transport d'énergie par courant triphasé.....	2169
522. Calcul de la ligne de transport d'énergie du haut Rhône à Paris	2178
523. Calcul d'une ligne triphasée à haute tension de 20.000 kilowatts, transpor- tés à 150 kilomètres.....	2184

CHAPITRE XXVI

Lignes de transport de force à haute tension. — Établissement des réseaux

I. — CALCUL DES CONDUCTEURS AÉRIENS

524. Flèches des fils des lignes aériennes	2188
525. Influence du vent, de la neige, de la glace et de la température	2191
526. Application numérique	2201
527. Abaques pour le calcul des lignes aériennes	2204

II. — POSE DES CONDUCTEURS

528. Montage des conducteurs aériens.....	2221
529. Conducteurs en aluminium.....	2238

III. — SUPPORTS DES LIGNES

Poteaux en bois

530. Procédés de conservation des bois	2242
531. Tracés des lignes	2247

Poteaux métalliques

532. Types de poteaux usuels	2257
533. Réception des poteaux métalliques	2270

Poteaux en ciment armé

534. Types de poteaux usuels	2273
535. Poteaux mixtes.....	2282

Calcul des poteaux. — Pose des poteaux

536. Résistance des poteaux.....	2285
537. Abaques Bouchayer et Viallet.....	2300
538. Application numérique	2306
539. Plantation des poteaux.....	2315
540. Entretien et surveillance des lignes	2324
541. Moyens préventifs pour éviter les ruptures des conducteurs aériens	2329

IV. — CANALISATIONS SOUTERRAINES

542. Considérations générales.....	2332
543. Caractéristiques des canalisations souterraines	2334

TABLE DES MATIÈRES

2663e

	Pages.
544. Calcul des câbles armés	2340
545. Pose et essais des câbles armés	2350
546. Protection des lignes souterraines	2359

V. — ISOLEMENT DES LIGNES

547. Défauts d'isolement des lignes aériennes et souterraines.....	2363
--	------

VI. — LIGNES TÉLÉPHONIQUES INDUSTRIELLES

548. Conditions de fonctionnement	2368
549. Construction des lignes téléphoniques.....	2369

CHAPITRE XXVII

Lignes de transport de force à haute tension

I. — INTERRUPTEURS ET COUPE-CIRCUITS

550. Interrupteurs directs.....	2373
551. Relais automatiques	2398
552. Disjoncteurs.....	2412
553. Coupe-circuits	2415
554. Limiteurs de tension	2420
555. Tableaux de distribution	2422

II. — ISOLATEURS

556. Nature et qualité des isolateurs	2436
557. Types d'isolateurs	2441
558. Essais des isolateurs	2456
559. Montage et entretien de isolateurs.....	2463

III. — PARAFOUDRES ET DÉCHARGEURS

560. Nature des décharges atmosphériques	2466
561. Conditions d'établissement des parafoudres.....	2472
562. Examen des types de parafoudres	2474
563. Parafoudres à cornes	2475
564. Parafoudres à intervalles	2481
565. Parafoudres électrolytiques	2491
566. Limiteurs à condensateurs	2497
567. Limiteurs à jets d'eau	2499
568. Limiteurs de tension	2503
569. Montage des parafoudres	2505
570. Essais des parafoudres	2507

IV. — DISPOSITIFS DE PROTECTION EN CAS DE RUPTURE DE CONDUCTEURS AÉRIENS

571. Appareils à fonctionnement automatique	2510
572. Filets protecteurs	2526
573. Indicateurs de tension.....	2530

CHAPITRE XXVIII

Appareils de mesure et de contrôle

574. Qualités et défauts des appareils de mesure.....	2533
575. Appareils à cadre mobile et à aimant	2534
576. Appareils à fer doux sans aimant.....	2536
577. Wattmètres	2536
578. Détermination du $\cos \varphi$	2544
579. Electrodynamomètres. — Électromètres	2548

	Pages.
580. Phasemètres. — Fréquencemètres	2548
581. Transformateurs de potentiel et d'intensité	2555

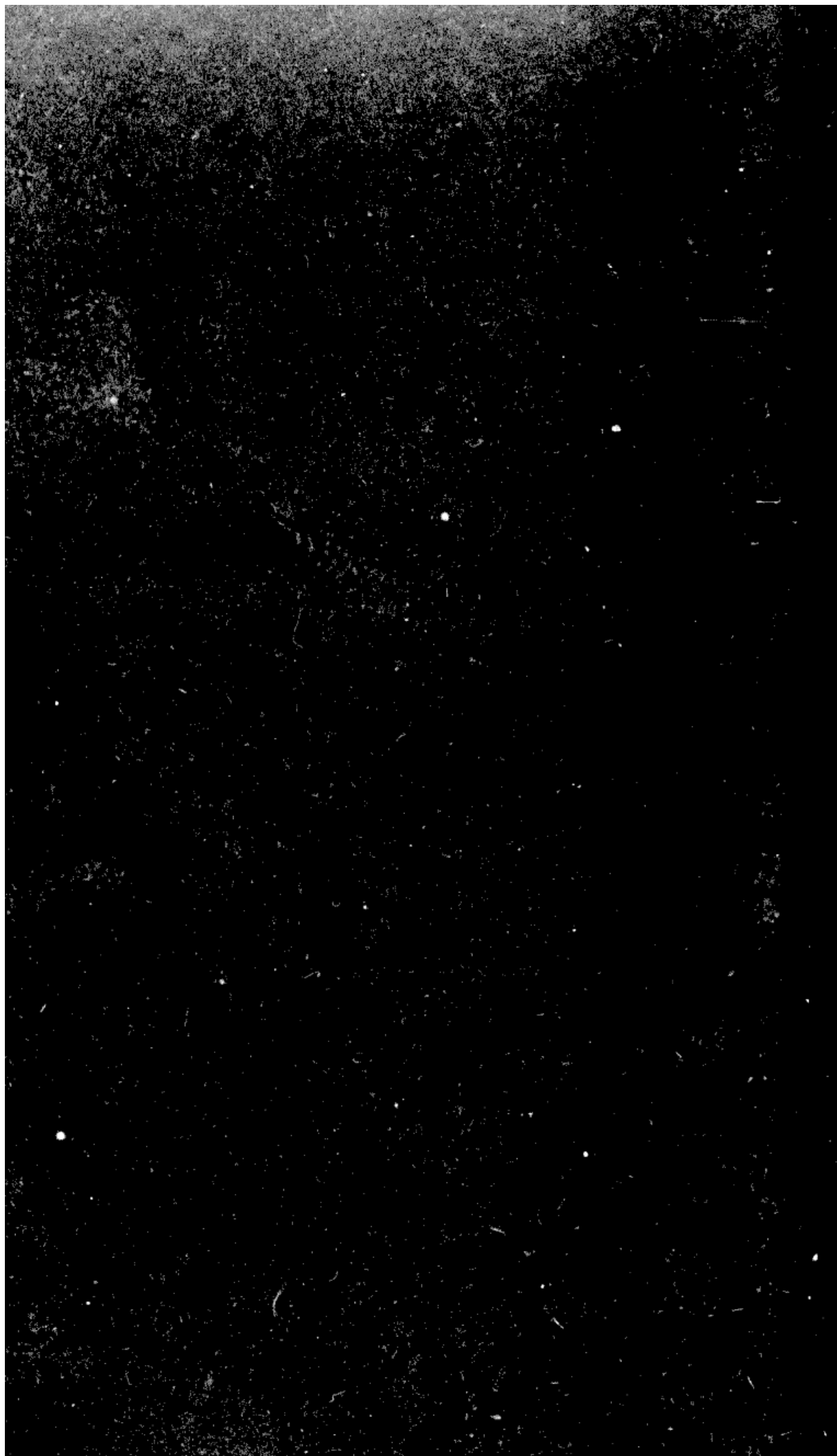
II. — COMPTEURS D'ÉNERGIE ET LIMITATEURS DE DÉBIT

582. Types de compteurs d'énergie	2560
583. Étalonnage et contrôle des compteurs	2563
584. Rôle des limiteurs de débit.....	2567
585. Types de limiteurs de débit.....	2568

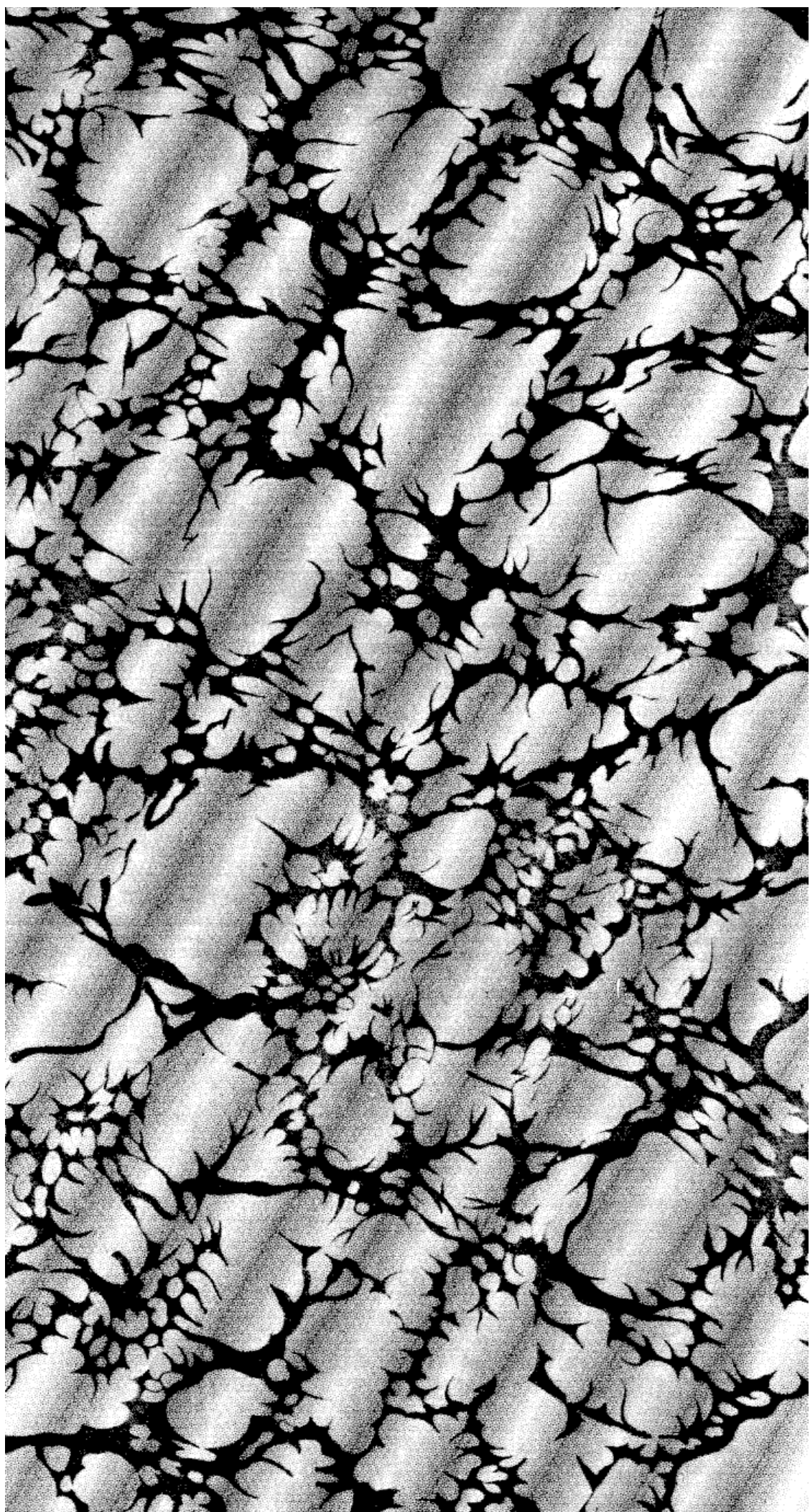
CHAPITRE XXIX

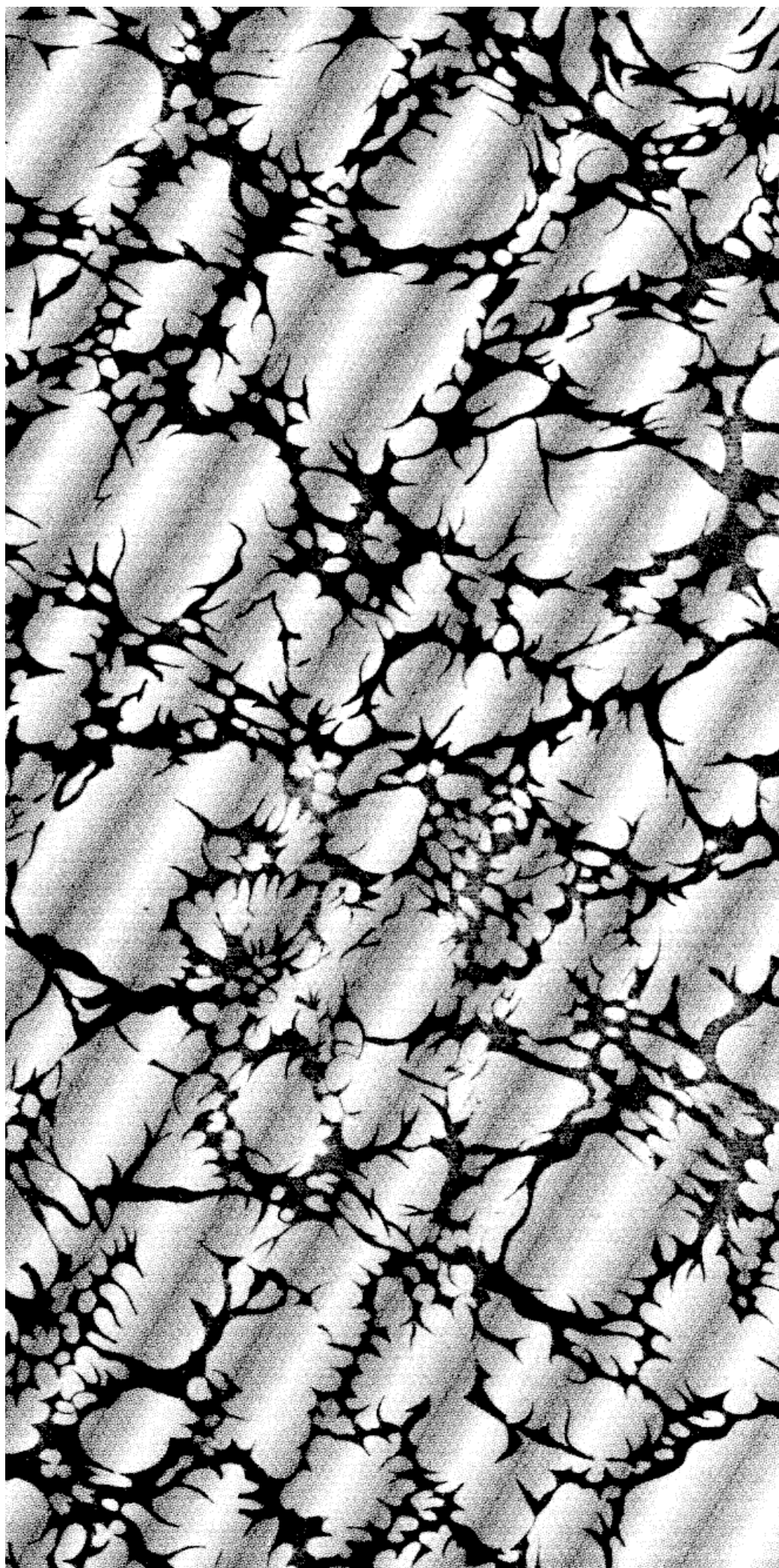
Turbines à vapeur

586. Rôle des turbines à vapeur	2574
587. Classification des turbines à vapeur.....	2575
588. Théorie élémentaire de la turbine à vapeur	2581
589. Turbines Parsons.....	2587
590. Turbine de Laval	2601
591. Turbine Zoëly	2604
592. Turbine Elektra.....	2608
593. Turbine Rateau	2610
594. Turbine Curtis	2613
595. Turbine mixte Melms et Pfenninger	2614
596. Turbine Eyermann.....	2619
596 bis. Turbine Bréguet	2620
597. Régulation des turbines	2620
598. Condenseurs	2621
599. Consommation de vapeur	2625
600. Rendement des turbines	2626
601. Utilisation de la vapeur d'échappement dans les turbines	2637
602. Types d'installations de turbines.....	2638
603. Dynamos pour turbines à vapeur	2642
604. Alternateurs pour turbines à vapeur	2649









Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

