

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Revue technique de l'Exposition universelle de 1900. Texte
Titre	Revue technique de l'exposition universelle de 1900
Numérotation	1, 1900 - 14, 1901
Adresse	Paris : E. Bernard et Cie, 1900-1901
Collation	14 vol. ; in-8
Nombre de volumes	14
Cote	CNAM-BIB 8 Xae 585
Sujet(s)	Exposition universelle (1900 ; Paris)
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8XAE585
LISTE DES VOLUMES	
	1. Première partie. Architecture et construction. Tome I
	2. Deuxième partie. Matériel et procédés généraux de la mécanique. Tome I
	3. Deuxième partie. Matériel et procédés généraux de la mécanique. Tome II
	4. Deuxième partie. Matériel et procédés généraux de la mécanique. Tome III
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	5. Troisième partie. Électricité. Tome I
	6. Quatrième partie. Génie civil. Tome I
	7. Quatrième partie. Génie civil. Tome II
	8. Cinquième partie. Moyens de transport
	9. Sixième partie. Génie rural et industries agricoles et alimentaires. Tome I
	10. Sixième partie. Génie rural et industries agricoles et alimentaires. Tome II
	11. Septième partie. Mines et métallurgie. Tome I
	12. Huitième partie. Industries textiles
	13. Neuvième partie. Industries chimiques et diverses
	14. Dixième partie. Armées de terre et de mer

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	Revue technique de l'exposition universelle de 1900
Volume	5. Troisième partie. Électricité. Tome I
Adresse	Paris : E. Bernard et Cie, 1901
Nombre de vues	336
Cote	CNAM-BIB 8 Xae 585 (5)
Sujet(s)	Exposition universelle (1900 ; Paris) Électricité -- 19e siècle Générateurs de courant continu Alimentations (électricité)
Thématique(s)	Expositions universelles
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	06/10/2010
Date de génération du PDF	06/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/152556516
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8XAE585.5

REVUE TECHNIQUE
DE
L'EXPOSITION UNIVERSELLE
DE 1900

COURBEVOIE
IMPRIMERIE E. BERNARD ET C^{ie}
14, RUE DE LA STATION, 14
BUREAUX A PARIS : 29, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS

80795
8° Zee 585-3
5

Revue Technique DE L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1900

Par un Comité d'Ingénieurs,
d'Architectes, de Professeurs et de Constructeurs

Directeur

CH. JACOMET*

DIRECTEUR-INGÉNIEUR DES POSTES ET TÉLÉGRAPHES
DIRECTEUR
DE L'ÉCOLE PROFESSIONNELLE SUPÉRIEURE
EN RETRAITE

TROISIÈME PARTIE

Electricité

TOME I

PARIS

E. BERNARD & Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS

29, Quai des Grands-Augustins, 29

1901

LES DYNAMOS

ET

LES TRANSFORMATEURS

à

L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1900

PAR

A. FERRAND

INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN

SOUS-INGÉNIEUR DU SERVICE CENTRAL DU MATÉRIEL DE LA Cie P.L.M.

AVANT-PROPOS

La possibilité de construire, d'une façon rationnelle et économique, des dynamos génératrices produisant l'énergie électrique sous ses formes les plus variées, a permis aux applications industrielles de l'électricité de prendre un développement rapide et considérable.

En 1889, l'éclairage électrique, que possédaient quelques villes privilégiées était une innovation pour les expositions universelles de Paris ; depuis, les lampes à arc et à incandescence se sont tellement multipliées que bien rares sont les villes un peu importantes qui ne possèdent pas de station centrale d'éclairage électrique.

La traction électrique était considérée, il y a 10 ans, comme une curiosité, aujourd'hui, elle nous est indispensable ; nous avons pris l'habitude d'aller vite, confortablement et économiquement.

Les Américains, les premiers, ont compris l'avantage considérable que présentait l'emploi de l'électricité pour la traction urbaine ; la transformation a été rapide, et actuellement, en Amérique, ce sont les tramways à traction animale qui deviennent des curiosités. En 1890, il existait de l'autre côté de l'Atlantique 137 lignes à traction électrique

comprenant 1 300 km., en 1892, 6 500 km. étaient exploités et en 1897, les réseaux de tramways électriques couvraient 40 000 km.

Le développement de la traction électrique en Europe s'est aussi accentué mais plus lentement : en 1890 on comptait 70 km. de lignes électriques, en 1898 elles s'étendaient sur 2 250 km. ; depuis deux ans le nombre des tramways électriques a beaucoup augmenté et il semble que nous sommes sortis de la période d'hésitation. La traction électrique, appliquée tout d'abord presque spécialement aux services urbains, a pris un caractère plus général ; il existe maintenant plusieurs chemins de fer d'intérêts locaux desservis par l'électricité ; les grandes Compagnies de chemins de fer se laissent tenter à leur tour par les avantages que présente dans certains cas l'emploi de l'électricité, les Compagnies des chemins de fer de l'Orléans et de l'Ouest nous en montrent dès 1900 des applications à Paris même.

La question si intéressante du transport de l'énergie à distance était à l'étude en 1889, mais en dehors des transmissions d'atelier le transport de l'énergie à de grandes distances était encore à l'état d'expérience ; il fut réalisé réellement d'une façon industrielle par la Société de l'Industrie électrique de Genève, pour le compte de la Société de Acquadesta Ferrari Galliera à Gênes ; ce transport qui a donné et donne encore d'excellents résultats est à courant continu, système série, il fut terminé en 1892 ; d'autres applications du même système furent faites en Suisse et à Paris.

L'exposition électrotechnique de Francfort, en 1891, montra aux ingénieurs la possibilité de construire des moteurs à courants alternatifs démarrant seuls et en charge ; le courant alternatif, après avoir été en disgrédit, puisque à l'Exposition de 1889 les alternateurs faisaient à peu près complètement défaut, devint l'objet des recherches des inventeurs et des constructeurs.

Le courant alternatif se prête facilement aux transformations avec des appareils simples, relativement peu encombrants et n'exigeant aucune surveillance ; il permet la construction de machines génératrices et motrices à des potentiels très élevés ; son emploi pour les transmissions d'énergie à de grandes distances a donné à cette question une solution complète.

Les applications de transport d'énergie sont nombreuses aujourd'hui, surtout dans les pays riches en chutes d'eau ; mais celles-ci ne sont pas toujours employées au transport de l'énergie, l'électrométallurgie nécessite de grandes puissances et trouve leur utilisation sur place.

L'electrométallurgie s'est aussi beaucoup développée, de nouveaux corps ont été découverts et actuellement cette industrie utilise plus de 300 000 ch.-vap.

Les progrès réalisés, l'importance croissante de toutes les industries électriques, ont obligé les constructeurs à apporter tous leurs soins et toute leur intelligence au perfectionnement des machines génératrices et motrices électriques, soit au point de vue du rendement, soit au point de vue mécanique.

En 1889, une machine qui présentait un rendement de 90 0/0 était considérée comme étant d'une construction soignée, bien étudiée ; maintenant, les rendements industriels des dynamos aussi bien de celles à courant continu que de celles à courant alternatif atteignent d'une façon courante 92 et 93 0/0, exception faite naturellement des petites puissances. Cette amélioration du rendement provient d'une meilleure utilisation des matériaux, ce qui permet aussi de diminuer le poids des machines et leur encombrement, avantage précieux dans certaines applications. C'est certainement la possibilité d'obtenir des moteurs cuirassés en acier coulé, présentant une perméabilité équivalente à celle du fer, qui a permis l'extension si rapide de la traction électrique.

A l'Exposition universelle de 1889, certains induits de dynamos étaient encore constitués par du fil de fer enroulé au tour, les machines à induit denté étaient rares, l'emploi des frotteurs en charbon pour les prises de courant sur les collecteurs n'était pas connu et pour éviter les étincelles qui se produisaient aux collecteurs on devait décaler les balais.

Aujourd'hui, les induits en fil de fer ont disparu, l'emploi de dents pour loger les fils ou barres induits est presque général. Les balais munis de frotteurs en charbon ont remplacé les balais métalliques et la construction des dynamos fonctionnant sans étincelle, à calage fixe des balais pour toutes les charges, est courante.

Les machines à courant alternatif n'étaient, pour ainsi dire, pas représentées à l'Exposition de 1889 ; aussi on est étonné de voir l'importance prise en 1900 par ces machines ; on pouvait admirer dans les sections électriques étrangères et françaises de superbes alternateurs dont la puissance quelquefois considérable atteignait 3 000 kilowatts.

Quelques-uns de ces gros alternateurs faisant partie des groupes électriques servaient à l'éclairage et la distribution de l'énergie dans les dépendances de l'Exposition.

Aussi, tant en courant continu qu'en courant alternatif, on tend à construire de grosses unités qui présentent, en effet, l'avantage d'une construction plus robuste et d'un isolement plus facile.

Dans la section française, classe 23, de l'Exposition de 1900, les maisons Grammont de Pont de Chéruy et Breguet de Paris, exposaient, parmi les machines qui figuraient dans les groupes électrogènes, les procédés nouveaux de MM. Hutin et Leblanc et de M. Boucherot, pour le compoundage des alternateurs destinés à maintenir constant le voltage aux bornes quelle que soit la charge, la maison Farcot de Saint-Ouen et l'Allgemeine Electricität-Gesellschaft, présentaient aussi un autre dispositif de MM. Hutin et Leblanc dont les travaux sont bien connus, pour faciliter l'accouplement en parallèle des alternateurs.

Le perfectionnement des transformateurs à courant alternatif a suivi forcément celui des dynamos génératrices et des moteurs, ils sont aujourd'hui d'une construction robuste et pratique se prêtant à tous les voltages, l'absence de parties mobiles permet un isolement parfait et un entretien peu onéreux.

La place importante prise par les courants alternatifs ne doit pas être une raison pour abandonner le courant continu, chacune de ces sortes de courant trouve ses applications et souvent tous les deux peuvent s'utiliser dans une même installation ; par exemple, pour la traction électrique où le courant continu est encore préférable, il est dans certains cas utile pour utiliser une chute d'eau éloignée de faire un transport d'énergie ; ce transport peut être fait avec le courant alternatif à haute tension, celui-ci étant ensuite transformé en courant continu au point d'utilisation.

Cette transformation peut se faire par un moteur générateur et dans ce cas l'emploi d'un moteur synchrone peut être avantageux pour diminuer le décalage du courant primaire par rapport à la tension et améliorer les conditions de la ligne ; lorsque la fréquence s'y prête, l'emploi des commutatrices présente pour la transformation des courants alternatifs en courant continu ou réciproquement, une solution économique et simple. Ces machines, ignorées en 1889, sont aujourd'hui d'un usage courant. Nous citerons aussi comme machine employée à la transformation directe du courant alternatif en courant continu celle dite *panchahuteur* et due à MM. Hutin et Leblanc ; un exemple de cette machine se trouvait dans l'exposition particulière de la maison Postel-Vinay.

Les transformateurs de courant continu en un autre courant continu ont naturellement profité des progrès réalisés dans la construction des dynamos ; parmi ces machines, les survoltateurs rendent de grands services dans les installations comportant des batteries d'accumulateurs.

Disposition générale des machines électriques à l'Exposition universelle de 1900.

Les dynamos et les transformateurs faisaient partie de la classe 23 du groupe V de l'Exposition universelle de 1900. La classe 23, la plus importante de celles qui constituaient le groupe V, occupait à elle seule presque tout le rez-de-chaussée avec ses annexes du Palais de l'électricité.

En voyant le nombre et la variété des machines exposées, il était difficile d'admettre que c'était la première fois que l'électricité se voyait attribuer aux Expositions universelles de Paris un palais spécial. Ce palais, formant la base du Château-d'eau, avait comme largeur celle du Champ-de-Mars, soit 420 m, et sa profondeur était de 80 m.

L'exposition des machines électriques comprenait deux parties distinctes l'une de l'autre, l'exposition française et l'exposition étrangère. Le visiteur entrant dans le palais par le Château-d'eau avait à sa gauche, du côté de l'avenue de La Bourdonnais, la section française, à sa droite, vers l'avenue de Suffren, la section étrangère.

Les groupes électrogènes, situés dans deux véritables usines, dites usine La Bourdonnais et usine Suffren, étaient au nombre de 38, les canalisations électriques des dynamos génératrices aboutissaient à deux vastes tableaux de distribution qui répartissaient d'une part le courant continu, d'autre part le courant alternatif, aux divers réseaux d'utilisation de l'Exposition.

Les tableaux suivants spécifient les machines électriques faisant partie des groupes électrogènes, ils donnent la nature, la tension du courant produit.

SECTION FRANÇAISE (Côté La Bourdonnais)

Noms des Constructeurs		KILOWATTS	NATURE DU COURANT	COURANT PRODUIT	TENSION AUX BORNES	FRÉQUENCE
DES MACHINES A VAPEUR	DES MACHINES ÉLECTRIQUES					
Société Alsacienne de Constructions Mécaniques Crepelle et Garand	Société Alsacienne de Constructions Mécaniques Decauville aîné	675	continu	1 400	500	
Société de Laval d°	Maison Bréguet	675	continu	2 800	250	
Compagnie de Fives-Lille Pignet et Cie	d°	200	continu	700	250	
Garnier et Faure-Beaulieu d°	d°	200	continu	700	250	
Dujardin et Cie Biétrix, Nicolet et Cie	Compagnie de Fives-Lille A. Grammont	675	triphasé	180	2 200	$f=50$
P. et A. Farcot	Etablissements Postel-Vinay	600	triphasé	90	2 200	$f=50$
Weyher et Richemond d°	Société l'Eclairage Electrique d°	225	continu	450	500	
Delaunay-Belleville	P. et A. Farcot Daydé et Pillé	75	continu	150	500	
Société des Anciens Etablissements Cail Dujardin et Cie	Compagnie Générale Electrique de Nancy Société : Electricité et Hydraulique	440	triphasé	95	3 000	$f=50$
S ^{ie} anonyme des Hauts Fourneaux de Maubeuge Société des Industries économiques	Maison Bréguet	190	continu	760	250	
	Compagnie Thomson-Houston Schneider et Cie	480	biphasé	155	2 200	$f=42$
	S ^{ie} anonyme des Hauts Fourneaux de Maubeuge Compagnie Générale Electrique de Nancy	560	continu	2 200	250	
		280	triphasé	52	3 000	$f=50$
		560	triphasé	150	2 200	$f=50$
		700	triphasé	190	2 200	$f=50$
		600	triphasé	65	5 500	$f=25$
		840	triphasé	230	3 000	$f=50$
		280	continu	1 120	250	
		65	continu	260	250	

SECTIONS ÉTRANGÈRES (Côté Suffren)

Noms des Constructeurs		KILOWATTS	NATURE DU COURANT	COURANT PRODUIT		TENSION AUX BORNES	FRÉQUENCE
DES MACHINES À VAPEUR	DES MACHINES ÉLECTRIQUES			COURANT	PRODUIT		
Robey	Robey	280	continu	1 120	250		
Williams et Robinson	Siemens Brothers	1 340	continu	2 630	500		
Galloway	Mather et Patt	280	continu	1 120	250		
Stork	Electrotech. Industrie	300	continu	600	500		
Augsbourg	Helios Elek. Akt. Ges.	1 060	alt. simple	480	2 200	$f=50$	
Maschinenfabrik Augsbourg et Nuremberg	Maschinenfabrik Augsbourg et Nuremberg	750	continu	1 500	500		
Schuckert	Schuckert	850	triphasé	100	5 000	$f=50$	
d°	Siemens et Halske	1 250	triphasé	340	2 200	$f=50$	
Borsig	Lahmeyer	350	continu	650	650		
Maschinenfabrik Augsbourg et Nuremberg	Kolben	790	triphasé	95	5 000	$f=50$	
d°	Bollinekx ; Electricité et Hydraulique (Dulait)	560	triphasé	150	3 000	$f=50$	
Carels frères	Compagnie Industrielle d'Electricité (Pieper)	620	triphasé	170	2 200	$f=42$	
Bollinekx ; Electricité et Hydraulique (Dulait)	Siemens et Halske (Vienne)	560	triphasé	150	2 200	$f=50$	
Van der Kerchove	Ganz et C°	900	continu	1 800	500		
Rhinghoffer	d°	510	triphasé	140	2 200	$f=42$	
Erste Brünner Maschinenfabrik	Ateliers d'Erlikon	675	triphasé	180	2 200	$f=50$	
Lang et C°	d°	230	alt. simple	110	2 200	$f=50$	
Sulzer frères	Société Alioth	500	triphasé	135	2 200	$f=50$	
Escher Wyss	Schuckert	200	continu	400	500		
Mertz	Bacini	700	continu	1 400	500		
Tosi		350	continu	700	500		
d°							

MACHINES DYNAMOS ÉLECTRIQUES, TRANSFORMATEURS

Une description très détaillée de toutes les machines dynamos qui se trouvaient à l'Exposition Universelle de 1900 serait très longue, elle nécessiterait des redites nombreuses, car ces machines ne se distinguaient le plus souvent entre elles que par des détails de construction.

Dans ce chapitre, nous examinerons successivement les parties essentielles des dynamos et des transformateurs électriques en citant comme exemple les machines exposées et nous joindrons à cet examen des descriptions sommaires, des particularités des machines faisant partie des groupes électrogènes et des expositions particulières des divers constructeurs.

DYNAMOS A COURANT CONTINU ET DYNAMOS A COURANT ALTERNATIF.

Les machines dynamos électriques, qu'elles soient à courant continu ou à courant alternatif, qu'elles soient génératrices ou motrices, présentent toutes une partie inductrice et une partie induite.

La partie inductrice est destinée à produire un champ magnétique, c'est la variation de ce champ par rapport aux fils, barres ou bobines disposés sur l'induit qui donne naissance au courant dans les génératrices et c'est la réaction de ce champ sur le courant de l'induit qui constitue le couple dans les moteurs.

Le courant produit par la variation du champ magnétique dans les circuits induits est toujours alternatif; dans les machines à courant continu, le collecteur change la forme du courant, le circuit de l'induit est divisé en sections réunies aux lames du collecteur et chacune de ces sections devient séparément productive ou non productive; dans les machines à courant alternatif, chaque phase est constituée par un certain nombre de sections, agissant toutes en même temps de la même manière.

La variation du champ magnétique dans lequel se trouvent les sections induites s'obtient dans les machines à courant continu par la rotation de l'induit dans le flux inducteur, le courant est recueilli par des balais fixes appuyant sur le collecteur; dans les machines à courant alternatif, l'induit peut aussi être mobile et l'inducteur fixe, le

collecteur est réduit à deux bagues sur lesquelles des frotteurs prennent le courant, dans ces machines l'induit peut être fixe et l'inducteur mobile. Dans ce cas il faut des bagues collectrices, non pour le courant induit, mais pour le courant inducteur ; l'induit est pourvu simplement de barres fixes. Enfin l'induit et l'inducteur peuvent être fixes, la variation du champ magnétique étant obtenue par celle de la résistance du circuit magnétique au moyen d'une pièce mobile en métal magnétique, fer, fonte ou acier ; ce dernier genre est désigné sous le nom de machines à *fer tournant*.

I. — MACHINES A COURANT CONTINU.

Inducteurs. — Lorsque le diamètre de l'induit n'est pas grand, pour des puissances ne dépassant pas 30 ou 40 kilowatts, les pôles inducteurs peuvent être au nombre de deux, la machine est alors dite bi-polaire ; pour de grands diamètres, se restreindre à deux pôles conduirait à des pièces polaires très volumineuses, les réactions d'induit deviendraient élevées, la machine serait lourde ; on réduit le poids et les réactions d'induit en augmentant le nombre des pôles, la machine est alors dite multi-polaire.

Les types d'inducteurs employés sont très nombreux, il semble que chaque constructeur ait voulu créer une disposition qui distingue ses machines de celles des autres ; toutefois, les formes diverses d'inducteurs bi-polaires et multi-polaires peuvent se ramener à deux types principaux, celui pour lequel les bobines magnétisantes sont radiales, c'est-à-dire ont leurs axes concourant sur celui de l'induit, et celui pour lequel les bornes magnétisantes ne sont pas radiales.

Parmi les types à bobines magnétisantes radiales, la Société Siemens et Halske construit des dynamos à pôles et bobines inductrices intérieurs à l'induit, un exemple de ces machines était exposé par la Société Alsacienne de constructions mécaniques, dans un groupe électrogène ; nous décrirons d'ailleurs plus loin cette machine.

Les diverses formes d'inducteurs étaient représentées à l'Exposition Universelle de 1900, on les retrouvera dans les vues et dessins des machines décrites dans ce chapitre.

Les meilleures dispositions d'inducteurs sont celles pour lesquelles les réductances des circuits magnétiques sont faibles, ainsi que les déperditions de flux à l'extérieur de l'induit ; les noyaux inducteurs peuvent être en fer, fonte ou acier, l'emploi du fer forgé élève le prix

des machines et il est préférable de se servir d'acier coulé que l'on peut actuellement obtenir avec une perméabilité plutôt plus grande que celle du fer pour les inductions élevées, mais pour lequel il faut aussi tenir compte des soufflures. La fonte, qui possède une perméabilité beaucoup plus faible, augmente considérablement le poids des machines ; la fabrication de l'acier coulé perméable étant absolument courante aujourd'hui, l'emploi de ce métal est généralement avantageux ; toutefois dans les grandes machines, on construit souvent encore les carcasses en fonte, les pièces polaires et les noyaux des bobines magnétisantes en acier coulé, le bâti est presque toujours en fonte.

Lorsque les induits sont fortement dentés, on emploie quelquefois, pour éviter l'échauffement des pièces polaires sous l'action des courants de Foucault, des tôles minces de fer ou d'acier isolées les unes des autres sur leurs surfaces de contact pour la constitution des pièces polaires.

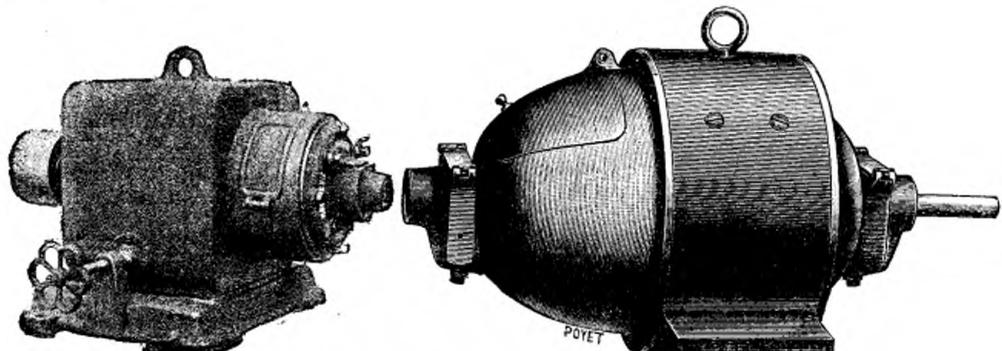


Fig. 1 et 2. — Types de moteurs cuirassés.

Dans les moteurs pour tramways ainsi que dans les moteurs destinés à être exposés à la poussière ou à l'humidité, la carcasse des inducteurs enveloppe l'induit, le collecteur et les balais, ces moteurs sont dits « cuirassés » (fig. 1 et 2).

Bobines inductrices. — Elles sont en général constituées par des enroulements de fil ou lame isolés sur des carcasses enveloppant les noyaux inducteurs ; ces carcasses sont ou bien en matière isolante, carton comprimé, ambrône, etc., ou métalliques, en fer, bronze ou zinc ; elles sont fixées sur les noyaux inducteurs par des vis, boulons ou équerres et leur forme dépend de celle des noyaux. En général, les pôles inducteurs et les bobines sont disposés de façon que l'on puisse établir un joint de la culasse qui les porte dans un plan passant par

l'axe de l'induit, cette disposition permettant de sortir plus facilement l'induit par l'enlèvement de la partie supérieure des inducteurs, elle est aussi plus favorable au transport.

Les fils ou câbles, constituant l'enroulement des bobines magnétisantes sont isolés par deux ou trois couches de coton, ils sont prolongés, si c'est nécessaire, jusqu'aux bornes de prise de courant par des câbles ou lames de plus forte résistance au point de vue mécanique.

Lorsque la bobine est faite avec des lames de cuivre, ces lames sont isolées par un enroulement de toile spéciale.

Pour donner un meilleur aspect aux bobines, une fois l'enroulement achevé, on dispose quelquefois sur celui-ci une couche de cordon qui, en même temps, protège les fils inducteurs, mais qui est un mauvais procédé pour le refroidissement des bobines dont la température ne doit pas, en marche continue, dépasser de plus de 40° à 50° la température ambiante ; au delà, l'isolement pourrait être compromis.

Les bobines inductrices sont quelquefois maintenues par les pièces polaires qui peuvent être en fonte, en acier ou formées par des tôles serrées entre des flasques et boulonnées sur les noyaux inducteurs.

Les dimensions des pièces polaires sont limitées par ce fait qu'il ne faut pas trop rapprocher les pôles de noms contraires si l'on veut éviter des déperditions de flux ; les arêtes des pièces polaires sont arrondies et souvent leurs extrémités sont légèrement relevées de façon que vers celles-ci l'entrefer aille en augmentant, les variations de flux inducteur sont ainsi moins brusques.

Induits. — L'induit d'une machine dynamo-électrique à courant continu est constitué par un noyau magnétique sur lequel se trouvent disposés les fils ou câbles qui doivent produire, sous l'action du flux inducteur, le courant électrique si la machine est génératrice, le couple si elle est motrice.

Le noyau magnétique de l'induit est en général formé par des disques de tôle de fer doux ou d'excellent acier coulé ; ces tôles ont une épaisseur variant de 0,2 à 0,6 mm ; les disques, estampés et recuits, sont empilés les uns sur les autres, ils sont isolés entre eux, soit par du papier gomme laqué, collé sur l'une de leurs faces et ayant une épaisseur de 0,2 à 0,6 mm, soit par du vernis, soit encore par l'oxydation des surfaces en contact ; ces disques sont placés entre des flasques plus épaisses et serrés au moyen de boulons et quelquefois

à la presse hydraulique. Pour les grandes machines, l'emploi de disques d'une seule pièce serait trop coûteux, on se sert de segments de tôle se recouvrant les uns les autres et le serrage se fait par des boulons (fig. 3).

Les induits lisses sont ceux pour lesquels les fils ou câbles sont dis-

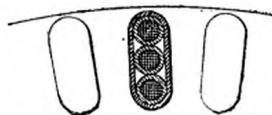


Fig. 4.

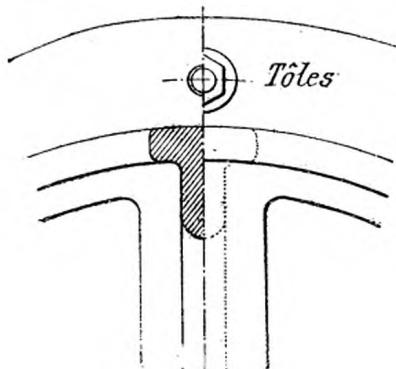


Fig. 3.

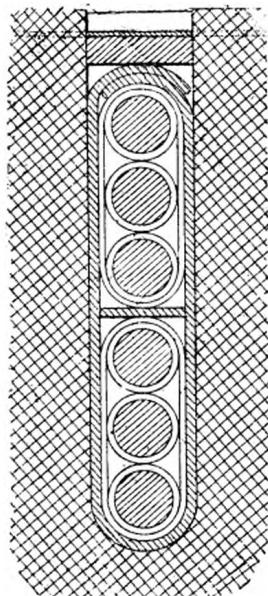


Fig. 5.

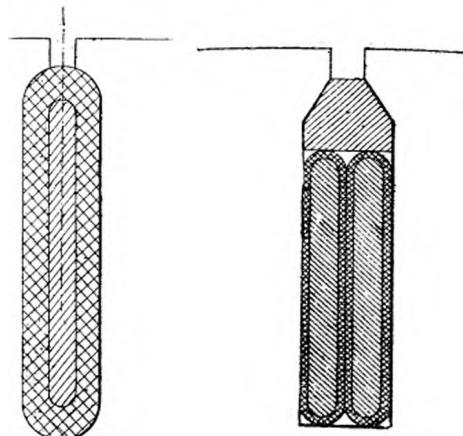


Fig. 6.

Fig. 7.

posés en une ou plusieurs couches à la périphérie de l'induit, les noyaux sont vernis et munis d'une garniture isolante généralement en toile imbibée d'huile de lin, on met ensuite les conducteurs en place ; pour empêcher les déformations qui pourraient être produites par des efforts latéraux et l'action de la force centrifuge, on dispose

des frettés qui maintiennent les conducteurs, ces frettés sont en général formées de fils de laiton ayant moins de 1 mm de diamètre.

Les induits à trous sont ceux pour lesquels les fils ou barres sont disposés dans des tubes de matière isolante placés dans des trous ayant une section circulaire ou ovale et situés près de la périphérie du noyau; les tubes isolants sont généralement en micanite (fig. 4).

Dans les induits dentés, la surface du noyau présente des rainures obtenues à la fraise ou bien encore par des encoches faites dans les disques à l'emporte-pièce.

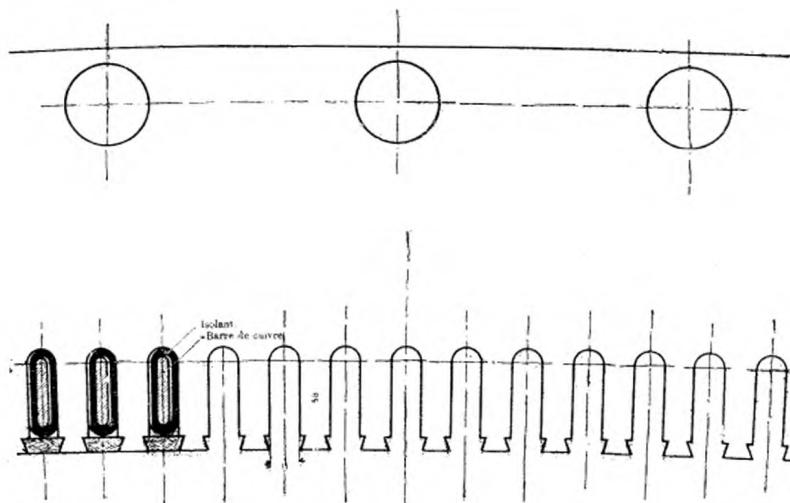


Fig. 8 et 9.

Lorsque les dents ont la forme des fig. 5 et 6, on ménage des rainures circulaires dans le noyau d'induit pour le logement des frettés; dans le cas de la fig. 7, les frettés sont inutiles, on se sert de languettes de bois ou de fibre formant cales que l'on glisse au-dessus des conducteurs.

Dans les rainures des induits dentés on dispose généralement une gaine isolante en forme d'U en carton et mica, les fils ou faisceaux de fils d'une même section sont entourés de toile et les sections ou fils à des potentiels très différents sont séparés par une bande de carton spécial (fig. 8 et 9).

Les induits des dynamos à courant continu sont à *anneau* ou à *tambour*, les induits à *disques* sont abandonnés.

Dans les enroulements à anneau, les fils sont placés sous forme de spires se fermant par l'intérieur du noyau qui est ainsi complètement recouvert de conducteurs ; l'enroulement est réuni en des points équidistants aux lames successives du collecteur.

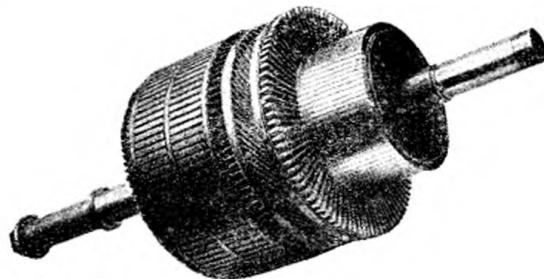


Fig. 10. — Induit en tambour.

Dans les machines bi-polaires, deux balais sont nécessaires au collecteur, dans les machines multi-polaires, il faut en général autant de balais qu'il y a de pôles ; toutefois il existe des dispositions permettant de réduire à deux le nombre des balais, mais c'est au détriment de la

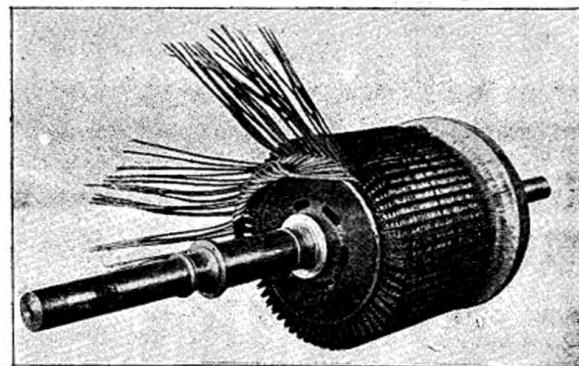


Fig. 11. — Tambour en bobinage.

simplicité de construction des machines et lorsque l'emploi de deux balais est obligatoire, il est préférable de recourir aux enroulements à tambour, dont l'usage devient d'ailleurs prédominant.

Dans les induits à tambour (fig. 10 et 11), l'enroulement d'une section de l'induit se fait suivant les génératrices extérieures du noyau ; chaque conducteur est relié avec un autre conducteur disposé de

façon que les lignes de force du flux inducteur les coupent en sens contraire, en sorte que leurs effets s'ajoutent; avec cet enroulement, la partie intérieure du noyau induit est libre, les tôles peuvent même être prolongées jusqu'à l'axe.

Pour les petites machines, les fils peuvent être enroulés par section sur gabarit avant leur mise en place; lorsque l'importance de la machine le permet, on raccorde les conducteurs actifs de l'induit au moyen de développantes disposées dans des plans perpendiculaires à l'axe du tambour ou par des hélices situées sur des cylindres prolongeant le tambour.

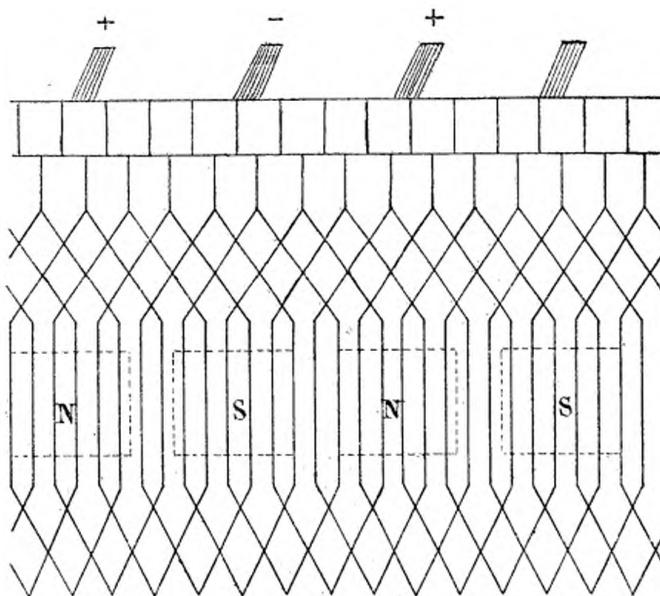


Fig. 12. — Enroulement imbriqué en parallèle.

Les induits multi-polaires à tambour peuvent avoir des enroulements *en boucles* ou *en zigzag*.

Dans l'enroulement en boucles, après avoir réuni un conducteur à un autre situé sous un pôle inducteur de nom contraire à celui du pôle sous lequel se trouve le premier, on revient à un conducteur voisin de celui-ci, d'où la forme en boucles de l'enroulement; tel est l'enroulement Thury (fig. 12). Avec cet enroulement, le nombre des balais doit être égal à celui des pôles, à moins que l'on fasse des connexions entre

les lames du collecteur, les cordes de raccordement sont inégales; elles peuvent devenir égales avec l'enroulement en zigzag.

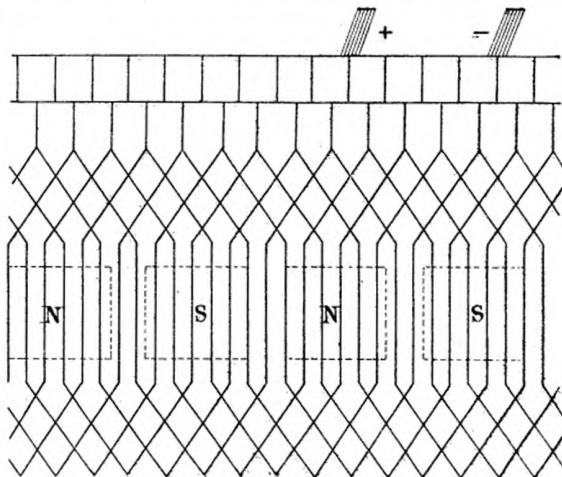


Fig. 43. — Enroulement ondulé en tension.

Ce dernier est progressif; après avoir réuni un conducteur de l'induit à un autre conducteur choisi de telle manière que les effets électriques s'ajoutent, on ne revient pas dans la direction du premier, mais on continue à avancer en passant successivement devant tous les pôles de la machine (fig. 13); il n'y a pas de bobines bien définies, chaque section est composée de conducteurs situés sous des pôles différents; le nombre des balais peut être réduit à deux, le montage est dit en tension et le fil ou câble induit doit être calculé pour la moitié du courant total; le nombre des balais peut aussi être égal à celui des pôles.

Dans les petites machines, les tôles de l'induit peuvent aller jusqu'à l'axe dont il est inutile d'ailleurs de les isoler, l'ensemble des tôles est claveté sur l'arbre et le serrage est fait à l'aide de plateaux et de boulons (fig. 14); pour les machines plus importantes, les induits, généralement à tambour,

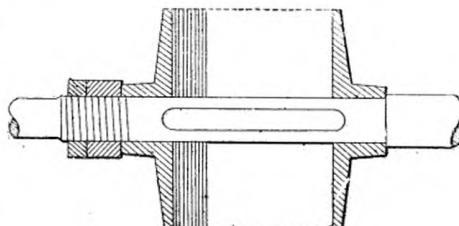


Fig. 14.

sont formés, lorsque les dimensions le permettent, de disques en tôles,

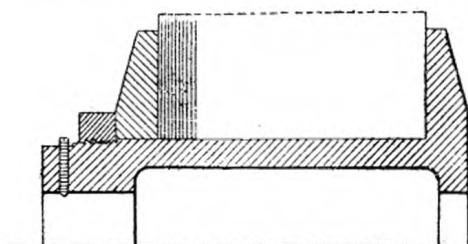


Fig. 15.

ces disques peuvent être placés sur un manchon en fonte, formant tambour, et serrés contre une joue, faisant partie du manchon, par un plateau et un écrou de serrage (fig. 15); lorsque le diamètre de l'induit est trop grand

pour permettre l'emploi d'un écrou de serrage, on peut encore serrer les tôles entre une joue, faisant partie du manchon d'entraînement, et plusieurs segments, remplaçant le plateau précédent, par des boulons isolés traversant les segments, les tôles et la joue du manchon (fig. 16).

Dans d'autres machines, la joue dont il vient d'être question est supprimée, les tôles sont

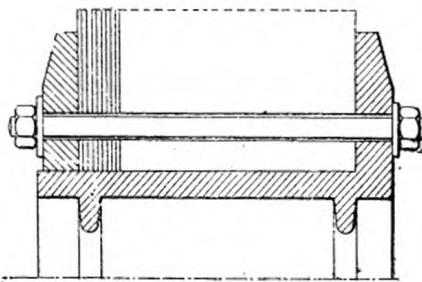


Fig. 16.

serrées entre deux disques en bronze par des boulons, l'entraînement est fait soit par des clavettes logées dans le manchon et dans les tôles, soit par des saillies venues de fonte avec le manchon et pour lesquelles on a réservé un logement dans les tôles de l'induit et dans les disques de serrage.

Quelquefois l'entraînement est fait par un manchon à ailettes, soit directement par les ailettes, soit par des clavettes ou boulons placés dans les disques et les ailettes.

L'usage des manchons à ailettes se prête aux enroulements d'induits à anneau, mais dans ce cas le manchon d'entraînement est en bronze; ces manchons peuvent être en deux parties réunies par des boulons et le noyau induit est serré par des saillies faisant corps avec les ailettes.

Les lanternes d'entraînement d'induit sont parfois disposées pour produire une ventilation artificielle, c'est ce que l'on pouvait remarquer dans diverses machines de l'Exposition dont nous aurons l'occasion de reparler.

Collecteur. — Il est constitué par des lames de bronze ou de cuivre étiré séparées par des bandes minces isolantes en carton comprimé spécial, si la machine est à bas potentiel, en mica ou micanite si le voltage est élevé; ces lames ont une section trapézoïdale, elles sont rangées en forme de cylindre et montées sur un manchon. Pour les petites

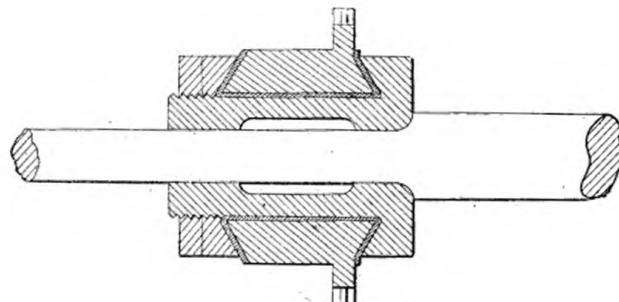


Fig. 47.

machines le serrage est fait par une bague et un écrou, dans les machines de grandes dimensions, la bague et l'écrou sont remplacés par des segments fixés par des vis sur le manchon. L'isolement des lames

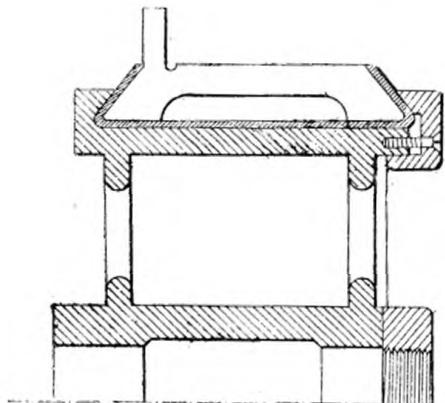


Fig. 48.

par rapport au manchon qui les porte était constitué autrefois par des bagues en fibre ou en ébonite, aujourd'hui cet isolement est fait par du carton comprimé spécial pour les bas voltages, au mica ou à la micanite pour les voltages élevés, quelquefois au carton et au mica, l'épaisseur de cet isolant est d'environ 4 à 5 mm; le nombre des lames

du collecteur est tel que le voltage moyen entre elles ne dépasse pas 30 à 35 volts.

Lorsque les lames du collecteur sont en bronze, elles portent souvent une queue venue de fonte servant à la connexion des fils de l'induit (fig. 17) ; lorsque le collecteur est en cuivre étiré, cette connexion est faite sur la lame même de l'induit soit par soudure soit par des vis (fig. 19), dans d'autres machines on soude des lames de cuivre dans des rainures pratiquées dans des touches du collecteur et ces lames sont connexes aux conducteurs induits (fig. 20) ; lorsque ces lames sont très longues, on assure leur rigidité par des cerclages isolants qui maintiennent leur écartement.

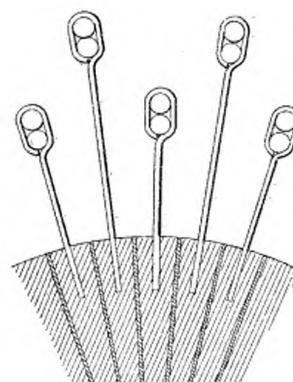
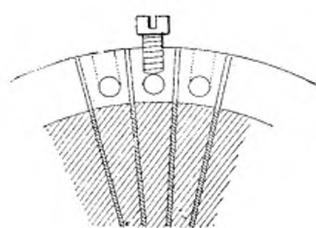
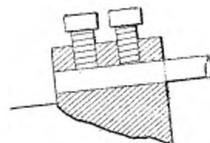


Fig. 49.

Fig. 20.

Dans la machine à courant continu système Lahmeyer, les conducteurs de l'induit sont reliés aux touches du collecteur par des fils d'un alliage très résistant ; cette augmentation de résistance n'a pas d'effet sensible sur le courant total, mais contribue à obtenir un bon fonctionnement sans étincelle.

Pour que la poussière des frotteurs ne pénètre pas à l'intérieur de l'induit, on dispose souvent, sur les fils partant du collecteur, une toile frettée, d'une part, sur l'induit et, d'autre part, sur les raccords du collecteur.

Dans les machines Siemens et Halske, les conducteurs induits, tout en étant isolés les uns des autres, présentent une partie nue à la périphérie de l'induit et servent de collecteur ; on verra une description de ce genre de machine dans ce qui concerne l'exposition de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques de Belfort.

Balais. — Le courant est pris ou amené au collecteur par l'intermédiaire de frotteurs qui peuvent être métalliques ou en charbon.

Les frotteurs ou balais métalliques ne sont plus employés que pour les machines à basse tension et fort débit; l'usage des balais en charbon constitue le moyen le plus simple, le plus pratique de réduire les étincelles au collecteur; grâce à ces derniers balais, on arrive à supprimer totalement le décalage dans les moteurs destinés à la traction, quel que soit le sens de marche.

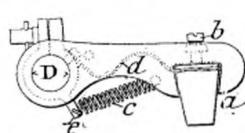


Fig. 21.

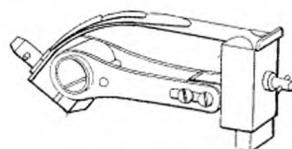


Fig. 22.

Il est souvent nécessaire dans une machine de pouvoir déplacer les balais; à cet effet, ceux-ci sont montés sur un collier porté par le palier de la dynamo et qui peut tourner autour du coussinet au moyen d'un bras, le serrage d'une vis empêche le collier de tourner lorsqu'on a atteint la position convenable; dans les grosses machines, les porte-balais sont fixés à une couronne portée par la carcasse des inducteurs; cette disposition permet de soutenir d'une façon beaucoup plus rigide les tiges des porte-balais; le déplacement de la couronne pour le changement de calage se fait au moyen de vis et roues hélicoïdales qui permettent la mise au point facile.

La maison Sautter Harlé présentait à l'Exposition des machines munies du dispositif consistant à employer, pour supprimer les étincelles aux balais, un pôle auxiliaire au voisinage de la zone neutre pour fournir le flux à la section commutée.

II. — MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS.

Courant alternatif. — Un courant électrique traversant un conducteur A B est alternatif lorsqu'il est représenté en fonction du temps par une courbe analogue à celle de la fig. 23, il est positif ou négatif suivant l'instant considéré.

Les différences de potentiel entre les points A et B (fig. 23), peuvent être représentées par une courbe analogue.

Le temps $A_1 A_2$ mesuré en secondes représente la période; la fréquence est le nombre $\frac{1}{A_1 A_2}$ de périodes par seconde.

Les courants alternatifs que l'on emploie ont des courbes représentatives qui sont approximativement des sinusoïdes.

Deux courants alternatifs sinusoïdaux peuvent différer par la période, par leur valeur maximum, de plus ils peuvent être de même phase ou décalés l'un par rapport à l'autre.

On dit qu'ils sont de même phase lorsque, ayant même période, les deux courbes ont à chaque instant le même signe et par suite se coupent sur l'axe des temps (fig. 24).

Lorsque deux courants alternatifs ne sont pas de même phase, ils sont décalés et une machine électrique produisant dans un certain nombre de circuits des courants alternatifs de même période, mais décalés les uns par rapport aux autres est une dynamo génératrice à courants polyphasés ; dans ces machines, les courants ont aussi la même valeur maxima.

Lorsque le décalage entre deux courants alternatifs est d'un quart de période, ils forment un système *biphasé* (fig. 25) et trois courants sont d'un système *triphasé* lorsqu'ils sont décalés d'un tiers de période (fig. 26).

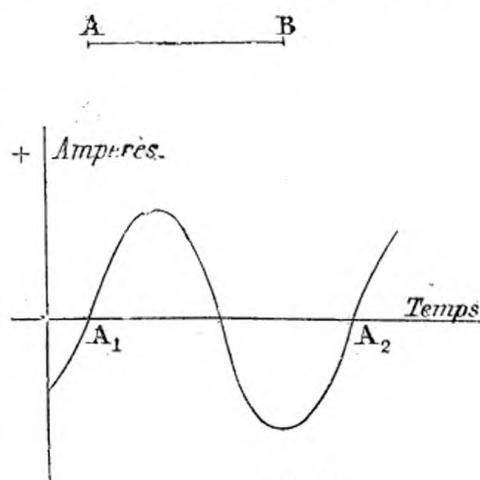


Fig. 23.

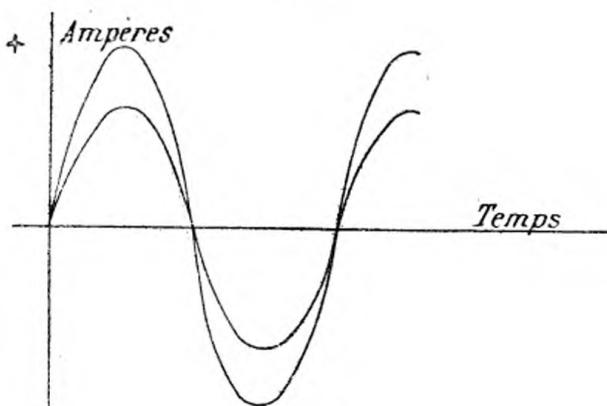


Fig. 24.

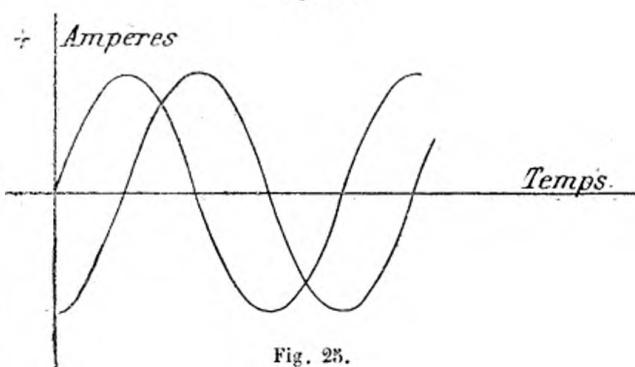


Fig. 25.

On a été amené à étudier et à établir les dynamos à courants polyphasés parce qu'elles peuvent se construire à des voltages très élevés

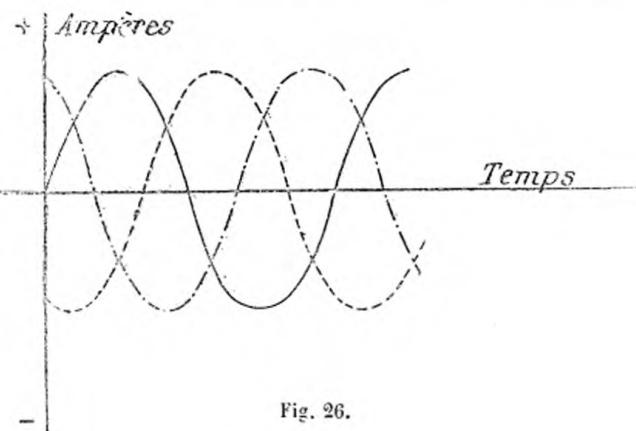


Fig. 26.

et que ces sortes de courants se prêtent avec facilité à la création des champs magnétiques tournants, point de départ de toute une catégorie de moteurs.

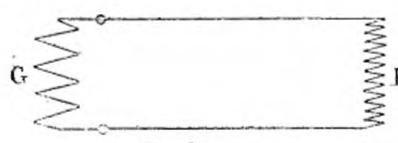


Fig. 27.

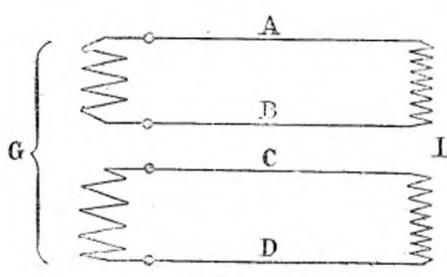


Fig. 28.

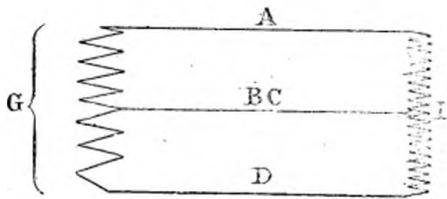


Fig. 29.

Dans les fig. 27 à 31 et 33 à 35, les lettres G représentent les génératrices et L les réceptrices.

Deux bornes suffisent pour les machines à courant alternatif simple (fig. 27), mais il n'en est pas de même des machines à courants polyphasés.

Avec les courants biphasés, on a deux courants alternatifs décalés d'un quart de période, il faudrait quatre bornes (fig. 28), mais on peut identifier les valeurs des potentiels de B et de C tout en laissant les différences de potentiels entre ces lignes et les conducteurs A et D présenter les caractères du système biphasé : la canalisation se réduit à trois fils par la réunion de B et de C en une même ligne (fig. 29).

Dans un système de courants triphasés, on a trois courants décalés d'un tiers de période, il faudrait trois circuits ou 6 fils de ligne et six bornes aux machines (fig. 30).

Deux solutions permettent de ramener à trois le nombre des bornes :

1^o On peut identifier les valeurs des potentiels de B, D, F (fig. 30), tout en conservant pour les différences de potentiel entre la ligne unique BDF ainsi obtenue (fig. 31)

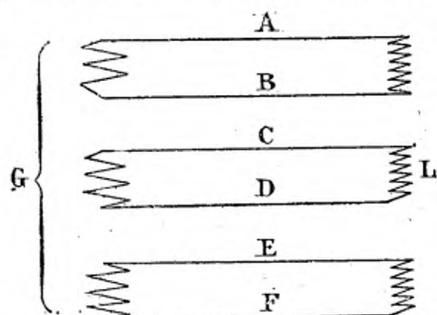


Fig. 30.

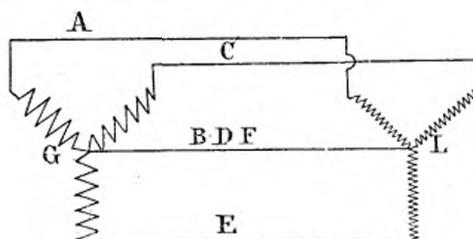


Fig. 31.

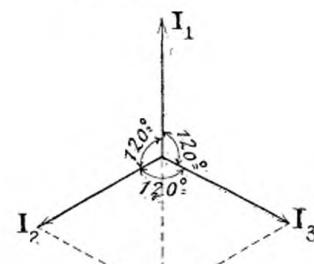


Fig. 32.

et les conducteurs A C E, les mêmes variations que dans le système triphasé à 6 fils ; il reste quatre fils. Un calcul très simple montre que le courant qui passe en BDF est nul si les trois circuits L sont identiques ; ce courant est, en effet, la somme de trois courants sinusoïdaux ayant même valeur maximum et décalés d'un tiers de période. La fig. 32

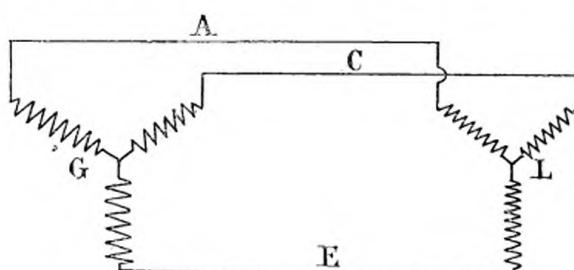


Fig. 33.

montre graphiquement que cette somme est nulle. Le nombre des bornes se réduit à trois par la suppression de BDF ; on a la forme étoilée (fig. 33).

2^o On peut identifier les potentiels (fig. 30) des fils B et C sans modifier

les variations des différences de potentiels A — B et C — D. De même on peut identifier les potentiels de D et E sans changer les différences C — D et E — F, on peut avoir ainsi quatre fils de ligne (fig. 34), mais

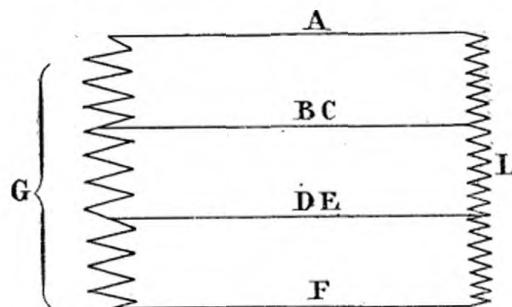


Fig. 34.

un calcul simple démontre que dans ces conditions les potentiels de F deviennent identiques à ceux de A si les trois circuits L sont semblables ; on peut donc réunir A et F on a le système triphasé, avec montage *en triangle* (fig. 35).

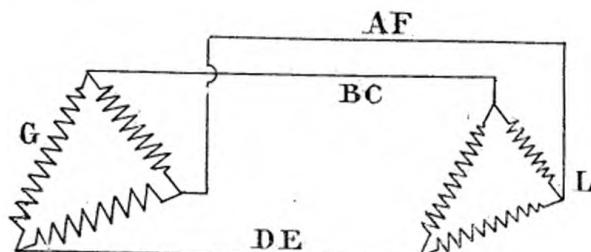


Fig. 35.

Les courants polyphasés nécessitent donc au minimum trois bornes aux machines.

Les courants biphasés conviennent mieux pour l'éclairage, mais cependant les courants triphasés leur sont en général préférés parce qu'ils permettent une économie d'environ 25 % sur le cuivre de la ligne et qu'ils se prêtent très bien à la construction des moteurs.

DYNAMOS GÉNÉRATRICES A COURANTS ALTERNATIFS.

Les machines dynamos à courant continu produiraient du courant alternatif si, au lieu d'employer un collecteur qui conserve aux bornes leur polarité, on se servait pour recueillir le courant de deux bagues isolées montées sur l'arbre de l'induit et réunies à deux points opposés

de l'enroulement de celui-ci ; les dynamos à courants alternatifs n'ont pas de collecteur, la facilité de les construire pour des tensions élevées a rendu leur usage très pratique dans les transports d'énergie et dans les distributions.

Les dynamos à courants alternatifs présentent, comme celles à courant continu, une partie inductrice et une partie induite, elles peuvent se diviser en trois groupes :

- 1^o Les machines à enroulement inducteur fixe et à induit mobile ;
- 2^o Les machines à induit fixe et à enroulement inducteur mobile ;
- 3^o Les machines à induit fixe et à enroulement inducteur fixe.

Nous ne parlons pas des machines à disque qui ne se construisent plus.

Dans les machines du premier groupe, les conducteurs de l'induit sont mobiles, il faut des bagues et des frotteurs pour le courant induit et, bien que ces machines présentent des avantages au point de vue des pertes par hystérésis et courants de Foucault, le supplément de soins à apporter pour l'isolation des conducteurs mobiles à haute tension leur fait, en général, préférer les machines du deuxième type, surtout lorsqu'il s'agit de puissances élevées.

On tend donc de plus en plus à adopter la disposition qui consiste à rendre l'induit fixe et l'inducteur mobile, l'isolation des parties à haute tension peut se faire dans d'excellentes conditions, les bobines inductrices peuvent être alimentées par un courant à basse tension, les conditions de fonctionnement et de sécurité sont préférables et les bagues de prises de courant sont affectées seulement au courant inducteur continu.

Les machines à induit et inducteurs fixes sont aussi dites *à fer tournant*, les variations du flux inducteur nécessaires à la création des courants induits sont obtenues par la rotation d'une couronne de pièces polaires en fer, fonte ou acier; avec ce genre de machine, on peut avoir une bobine inductrice unique, les bagues, les frotteurs sont supprimés, les parties électriques sont fixes, il suffit d'avoir des bornes fixes de prises de courant : la machine présente alors un aspect tout à fait mécanique.

De même que les dynamos à courant continu, les dynamos génératrices à courants alternatifs sont réversibles, mais tandis que les premières ne présentent aucune difficulté pour les démarriages et peuvent tourner à des vitesses diverses, les secondes ont une vitesse unique, leur rotation et celle de la machine qui les alimente sont synchrones ;

pour les démarriages, on doit, par un artifice quelconque, les lancer avant leur accouplement de façon à leur donner la vitesse de synchronisme.

Lorsqu'elles sont employées comme moteurs, ces machines constituent la classe des moteurs *synchrones*.

A côté des moteurs synchrones il existe une autre classe de moteurs dits *asynchrones* dont la construction diffère de celle des dynamos gé-

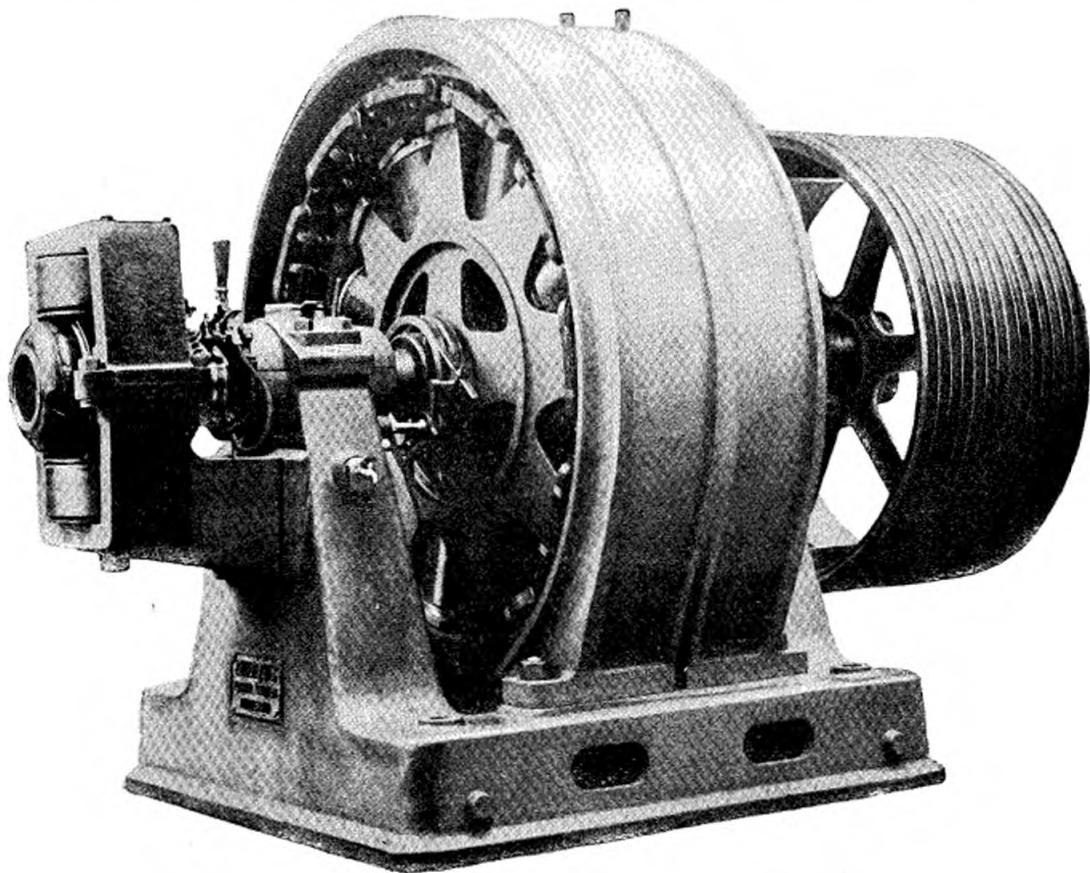


Fig. 36.

nératrices et pour lesquels la vitesse n'est plus liée d'une façon aussi rigoureuse à celle de la machine qui les alimente; ces moteurs peuvent démarrer seuls et en charge.

Inducteurs. — En général, dans les machines des deux premiers groupes, les pôles inducteurs sont constitués par des couronnes de bobines radiales fixées sur une carcasse fixe si l'induit est mobile, sur un

tambour monté sur l'axe si l'induit est fixe ; dans les grosses machines, les noyaux des bobines inductrices sont boulonnés sur de véritables volants.

Dans quelques machines de moyenne importance, il y a une bobine pour deux noyaux inducteurs (fig. 36), dans d'autres, il est fait usage d'une bobine unique d'excitation.

Lorsque l'induit est denté et que la partie pleine des dents n'est pas évasée au voisinage des pôles inducteurs, les pièces polaires doivent être feuillettées, c'est-à-dire formées de tôles juxtaposées mais séparées par une mince couche isolante pour éviter la production des courants de Foucault.

La construction des bobines inductrices ne présente rien de bien particulier, l'enroulement se fait sur des carcasses métalliques en bronze ou en laiton ; les voltages employés pour le courant d'excitation étant toujours faibles, il n'est pas nécessaire de prendre des précautions spéciales d'isolation. Dans un grand nombre de machines exposées, les bobines inductrices étaient formées par l'enroulement en hélice d'une lame de cuivre, l'isolation consistant en une bande de papier fort enroulé avec la lame, le serrage est fait ensuite à la presse ; il en résulte que les bobines sont complètement à métal nu sur leur surface extérieure, cela n'a pas d'inconvénient car le voltage aux bornes de chaque bobine est très faible, environ deux volts.

Souvent le courant nécessaire aux bobines inductrices est fourni par une machine excitatrice calée sur l'arbre même de la génératrice, soit entre les paliers, soit en porte à faux. Dans les machines Ganz, l'excitatrice est commandée par une bielle et une manivelle actionnées par l'arbre de la génératrice ; cette disposition facilite le démontage et le remplacement de l'excitatrice.

Les bagues de prises de courant sont en général constituées par des bagues en bronze ou en laiton, rapportées sur des tambours en fonte montés avec interposition d'isolants sur l'axe de la partie tournante.

Nous ne parlerons pas des dispositifs permettant le redressement du courant induit pour obtenir, par un simple commutateur, le courant continu inducteur ; ils ne sont plus employés, mais le redressement du courant induit au moyen de machines spéciales, dans le but du compoundage des alternateurs, a été étudié par MM. Hutin et Leblanc et par M. Boucherot et nous aurons l'occasion de revenir sur ce sujet intéressant.

Dans les machines à fer tournant, une seule bobine excitatrice est

suffisante, la construction est plus simple, la bobine inductrice est portée par la carcasse sur laquelle est fixé l'enroulement induit; la partie tournante de l'inducteur peut être en fonte ou en acier, elle peut résister à une augmentation considérable de la vitesse normale, mais si la construction de ces machines est plus simple, si les dépenses d'excitation sont un peu plus faibles, leurs dimensions doivent être plus fortes, car les pôles de l'inducteur ne sont pas alternés, les pièces polaires ne se désaimantent pas complètement; il en résulte que, pour une variation de flux donnée, on est obligé d'augmenter le poids de la machine.

Induits. — Comme pour les induits des machines à courant continu, les fils induits des dynamos à courants alternatifs peuvent être placés dans des trous, dans des dents ou simplement posés sur l'induit qui alors est dit lisse; ce dernier mode n'est presque plus employé bien qu'il permette d'avoir une courbe de force électromotrice régulière se rapprochant beaucoup de la sinusoïde. Les induits à disque sans fer qui ont eu une certaine vogue il y a quelques années ne se construisent plus.

Les induits à trous donnent aussi une bonne courbe pour la force électromotrice, les pertes par courants de Foucault sont réduites, mais ils ont une plus forte self-induction.

Les induits dentés donnent pour la courbe de la force électromotrice une forme qui s'écarte d'autant plus de la sinusoïde que les dents sont plus prononcées; de plus les variations d'aimantation dans les dents produisent un ronflement caractéristique rendant très difficile la marche silencieuse de l'alternateur.

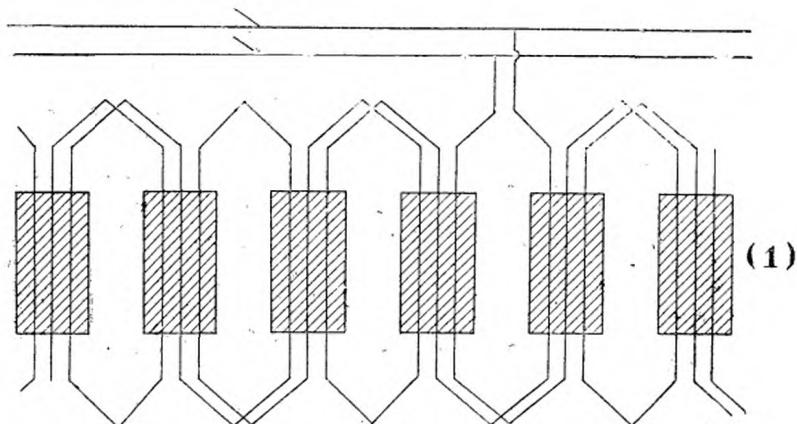


Fig. 37. — Enroulement en bobines ou imbriqué.

Les fils induits peuvent être disposés sur l'induit en forme de bobines; l'enroulement est dit progressif ou en zigzag lorsque les fils ne forment plus de bobines bien définies (fig. 37 à 39).

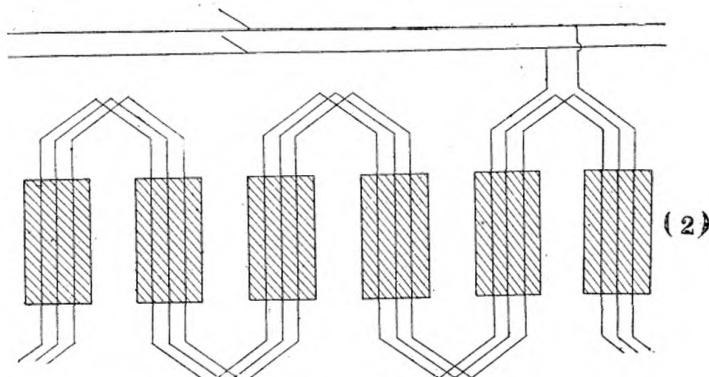


Fig. 38. — Enroulement ondulé ou en zigzag.

Dans les induits à trous ou dentés, les fils d'une même bobine peuvent être disposés dans plusieurs trous ou dents consécutifs afin de mieux utiliser la surface de l'induit et d'obtenir de meilleures condi-

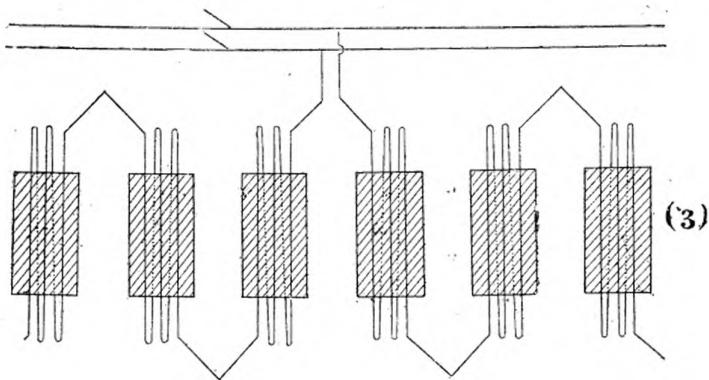


Fig. 39. — Enroulement en anneau.

tions de fonctionnement en ayant des dents ou trous de dimensions plus petites.

Lorsque les pôles inducteurs ne sont pas alternés, les faisceaux de

conducteurs peuvent être en nombre double de celui des pôles : dans les alternateurs monophasés, il peut être égal au nombre des pôles lorsque ceux-ci sont alternés ; dans les machines à courants biphasés ou triphasés, ces nombres sont doublés ou triplés, on a des enroulements distincts convenablement décalés.

Quand l'induit est mobile, la fixation des tôles se fait de la même manière que pour les machines à courant continu ; lorsque l'induit est immobile, les tôles sont serrées par des boulons et placées entre de grandes plaques en fonte formant bâti.

Quelques constructeurs ont adopté des dispositions permettant de faire tourner l'ensemble de l'induit lorsqu'il est nécessaire de visiter les sections ; les maisons Brown et Boveri de Baden, Siemens et Halske, Pieper ont des procédés différents dont nous parlerons dans la description des groupes électrogènes établis par ces constructeurs à l'Exposition Universelle de 1900.

Les alternateurs peuvent se construire pour produire directement des tensions très élevées des lignes primaires sans emploi de transformateurs statiques ; on comprend, dans ces conditions, qu'il est nécessaire de prendre de très grandes précautions d'isolation. L'isolation des faisceaux de conducteurs par rapport aux tôles de l'induit est généralement fait par des tubes en micanite ayant 4 à 5 mm d'épaisseur ; lorsque l'induit est denté, les bobines peuvent être préparées d'avance et ensuite placées dans les dents, mais pour les induits à trous, on est obligé de passer tous les fils les uns après les autres dans les tubes en micanite, l'établissement de l'enroulement est beaucoup plus long et coûteux ; ces tubes sont prolongés d'environ 10 à 20 cm en dehors des trous des deux côtés de l'induit.

Les bornes des induits sont généralement fixées au-dessous de la carcasse portant les tôles en des points difficilement accessibles pour le personnel qui se trouve sur le plancher de l'usine et les bâtis portant et enveloppant les induits ne sont pas isolés ; on diminue ainsi considérablement les dangers toujours à craindre avec les hautes tensions.

Dans les machines à courant continu, la force électromotrice peut être mesurée et calculée assez facilement, elle est proportionnelle à la vitesse de rotation, au nombre de fils induits et au flux de force inducteur ; dans les machines à courants alternatifs, en plus de la valeur, on a à considérer la forme de la courbe représentant la force électromotrice, la forme de cette courbe dépend non seulement de la vitesse et

de la valeur du flux inducteur, mais encore de la distance des pièces polaires et aussi de la largeur de celles-ci et des faisceaux que constituent les conducteurs induits.

Il y a lieu aussi de tenir compte de la self-induction du circuit de l'induit qui a pour effet de produire un décalage de la courbe du courant par rapport à celle de la force électromotrice ; ce décalage a une action démagnétisante sur le flux inducteur, ce qui évidemment modifie la forme de la courbe de la force électromotrice.

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS.

Les moteurs à courants alternatifs peuvent être synchrones ou asynchrones.

Moteurs synchrones.

Les moteurs synchrones sont ceux pour lesquels la vitesse de rotation est invariablement liée à celle des dynamos génératrices. Nous avons dit que les dynamos génératrices à courants alternatifs étaient réversibles et pouvaient être utilisées comme moteurs synchrones. Dans les machines à courant monophasé, l'action est pulsative ; il existe des points morts qui se trouvent supprimés quand on emploie des courants polyphasés.

Les moteurs synchrones monophasés doivent, avant leur mise en charge, être lancés à une vitesse voisine de celle du synchronisme ; ils présentent l'inconvénient de n'avoir pas un couple constant et de pouvoir tomber hors de phase lors d'une brusque surcharge. Les moteurs synchrones polyphasés peuvent, par la combinaison de courants alternatifs décalés, permettre la construction de moteurs synchrones à puissance électrique constante. Les courants venant de la machine génératrice sont admis aux bobines induites, il se produit un champ tournant suffisant dans les petits moteurs pour permettre l'entraînement automatique de la partie mobile.

La construction des moteurs synchrones ne diffère pas de celle des génératrices. Ces machines présentent l'avantage d'avoir un facteur de puissance élevé et une vitesse constante. Surexcités, ils produisent une diminution du décalage du courant d'un réseau par rapport à la force électromotrice.

Moteurs asynchrones.

Les moteurs synchrones ne démarrent pas en charge, ils exigent des circuits à courant continu ; les moteurs asynchrones démarrent en charge et ne sont parcourus que par des courants alternatifs. Leur emploi suppose donc l'addition d'une machine excitatrice.

La vitesse d'un moteur asynchrone est un peu inférieure à celle du synchronisme, elle en diffère d'une quantité appelée *glissement* qui varie de 3 à 5 % suivant la charge et qui peut être augmentée par l'emploi de moyens spéciaux.

Les moteurs asynchrones peuvent être monophasés ou polyphasés. Ils utilisent le couple produit dans un conducteur fermé sur lui-même, par la réaction entre un flux de force magnétique alternatif ou tournant et le courant que ce flux induit dans le conducteur. Au démarrage il est toujours fait usage de flux tournants.

Dans les moteurs asynchrones, le circuit qui donne naissance au flux inducteur est traversé par un flux de force magnétique variable, il est le siège d'une force électromotrice induite ; nous continuerons néanmoins à l'appeler inducteur. Souvent on se sert pour désigner les parties fixes et mobiles d'un moteur asynchrone des mots *stator* et *rotor* pour ne pas nommer inducteur un circuit dans lequel il existe une force électromotrice induite.

Les moteurs asynchrones à courant monophasé se composent d'un inducteur enroulé en anneau ou en tambour parcouru par les courants alternatifs. L'induit est généralement à enroulement en tambour et en court-circuit. Le courant inducteur ne produisant pas de flux tournant, le démarrage s'obtient en créant un tel flux au moyen d'un deuxième enroulement disposé sur l'inducteur et dans lequel on envoie au début un courant décalé par rapport à celui qui circule dans le premier enroulement ; ce courant décalé s'obtient à l'aide d'une bobine de self ou d'un condensateur. La vitesse de régime étant atteinte, on coupe le circuit de l'enroulement auxiliaire et la rotation est maintenue par les réactions qui existent entre le flux alternatif inducteur et le courant induit.

Dans ces moteurs, l'induit et l'inducteur sont formés de tôles isolées les unes des autres par du papier, les conducteurs sont logés dans des rainures ou des trous pratiqués dans ces tôles.

Dans les moteurs asynchrones à courants polyphasés, le flux tournant est obtenu en disposant convenablement, sur un système

inducteur, des bobines parcourues par des courants alternatifs décalés entre eux. L'induit peut être constitué simplement par un cylindre plein monté sur un arbre; mais, dans ces conditions l'effet utile est faible car une grande partie des courants induits est inutilisée, une forte proportion de l'énergie est dissipée en chaleur. Afin de diminuer ces pertes, on dirige les courants induits en constituant le noyau en tôles minces isolées et en disposant à sa périphérie, suivant les génératrices du cylindre, des conducteurs isolés et noyés dans le fer. Les extrémités de ces conducteurs débordant sur les joues du noyau peuvent être réunies entre elles par deux cercles métalliques. On réalise ainsi l'enroulement dit *en cage d'écureuil* employé seulement dans les petits moteurs (fig. 40). On peut encore réunir les conducteurs à la façon des barres d'un induit à courant continu ou polyphasé. On constitue alors de véritables enroulements dont les extrémités peuvent être réunies à des bagues isolées placées sur l'arbre. C'est le dispositif employé généralement pour les gros moteurs. Il permet d'introduire, au moyen des bagues, des résistances dans l'induit à la mise en marche. Ces résistances servent à limiter le courant de démarrage lorsque, l'armature mobile étant fixe, la vitesse du flux tournant par rapport à l'induit a sa plus grande valeur (fig. 41).

Le système inducteur est formé par une couronne composée de tôles minces juxtaposées et isolées entre elles entourant l'induit lorsque celui-ci lui est intérieur ou réciproquement. Les fils ou câbles constituant les bobines sont

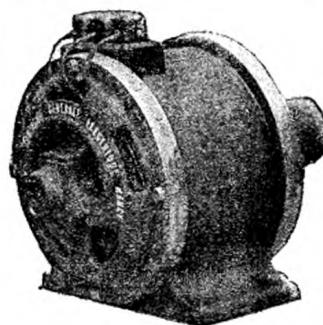


Fig. 40. — Moteur asynchrone de la Compagnie générale électrique.

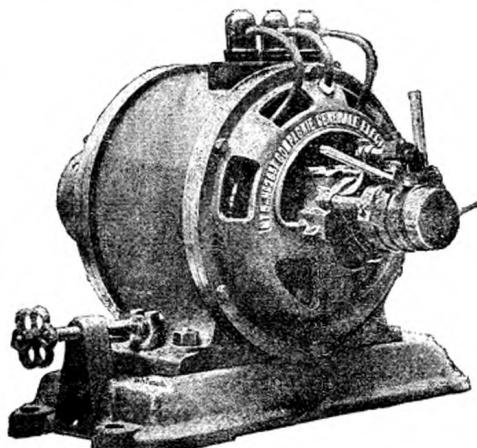


Fig. 41.

placés dans des rainures suivant les procédés ordinaires. L'emploi de bobines placées sur des pôles saillants rend inégal le couple moteur par suite de la variation de la perméabilité du circuit magnétique pendant une révolution du flux tournant.

La construction des moteurs à champ tournant ne présente pas de grandes difficultés. Les conditions de bon fonctionnement de ces moteurs ont amené tous les constructeurs à adopter un type à peu près uniforme. La nécessité d'avoir un entrefer aussi petit que possible pour éviter les fuites et diminuer la résistance du circuit magnétique a fait employer les enroulements noyés dans le fer. Les surfaces en regard l'une de l'autre sont ainsi entièrement métalliques et plus faciles à ajuster. Les paliers doivent faire l'objet de soins particuliers pour éviter le grippement du noyau contre la partie fixe par suite de l'usure des coussinets.

Les seules différences sensibles que l'on rencontre dans la construction de ces moteurs résident dans les procédés de démarrage, pour les gros moteurs seulement, car le démarrage des induits en cage d'écuréuil s'opère sans précautions spéciales. La théorie montre que le couple au démarrage de ces moteurs croît par l'introduction d'une résistance dans l'induit. Beaucoup de constructeurs utilisent cette propriété en introduisant ces résistances, constituées par des rhéostats liquides ou métalliques au moyen de bagues isolées fixées sur l'arbre. Certains placent ces résistances sur l'induit même et les mettent en court-circuit une fois la machine en marche au moyen d'un collier glissant sur l'arbre.

M. Boucherot dispose ces résistances sur l'induit, qui peut être alors une cage d'écuréuil ordinaire. Mais un artifice de construction des inducteurs permet de n'utiliser ces résistances qu'au moment du démarrage. On verra plus loin la description de ce dispositif dans l'article consacré à la maison Bréguet. On y trouvera également une disposition d'induit à double cage d'écuréuil, pouvant démarrer sans résistance et due aussi à M. Boucherot. M. Goerges, ingénieur de la maison Siemens et Halske, constitue l'induit par deux enroulements légèrement différents. Un contact glissant permet de mettre ces enroulements en opposition, à la mise en marche, et en quantité lorsque la vitesse de régime est atteinte.

Un autre artifice de démarrage consiste dans l'emploi d'un auto-transformateur. C'est une simple bobine de self-induction dont on relie les deux extrémités à la distribution, l'inducteur du moteur étant relié au milieu de la bobine et à une de ses extrémités. Le courant au dé-

marrage est ainsi doublé dans le moteur sans que cette augmentation se fasse sentir sur le réseau. Le moteur une fois en marche, on le met directement sur le réseau en supprimant la bobine.

On peut encore alimenter les inducteurs du moteur au moyen d'un transformateur ou en mettant en série avec eux une bobine de self qui tient lieu de la résistance de démarrage des moteurs à courant continu.

Enfin dans les moteurs de puissance moyenne, on peut se contenter d'un embrayage mécanique qui permet de démarrer à vide.

La vitesse d'un moteur polyphasé est sensiblement constante quelle que soit la charge. Elle dépend de la fréquence du courant qui l'alimente. On peut obtenir des variations de vitesse dans le rapport 1, 2, 3 en modifiant le couplage des pôles inducteurs. Pour obtenir des variations graduées de vitesse il faut introduire dans l'induit des résistances variables. Si l'on ne veut pas se servir de ce procédé qui conduit à d'importantes pertes d'énergie par l'effet Joule, on emploie alors des moyens mécaniques tels que poulies coniques, trains d'engrenages, etc.

TRANSFORMATEURS.

Il faut comprendre dans cette désignation tous les appareils dont le but est d'introduire une modification dans la nature des courants, que cette modification porte sur leur forme ou sur leur tension. On peut distinguer par conséquent : 1^o Les transformateurs de tension, 2^o les transformateurs de courant, 3^o les transformateurs de phases.

1^o *Transformateurs de tension.*

(a) *Courant continu.* — Le système de transformation le plus généralement employé consiste dans l'emploi de moteurs génératrices, le moteur étant actionné par le courant primaire, le générateur donnant le courant secondaire à la tension voulue. Les deux induits sont ordinairement fixés sur le même arbre, parfois même, ils sont bobinés sur un même noyau toujours avec deux collecteurs ; un bon isolement est plus difficile à obtenir dans ces conditions.

Parmi les transformateurs de tension à courant continu nous citerons les survoltateurs employés dans les installations comportant des batteries d'accumulateurs ; ces appareils permettent la suppression des réducteurs destinés à faire varier le nombre des éléments d'une batterie

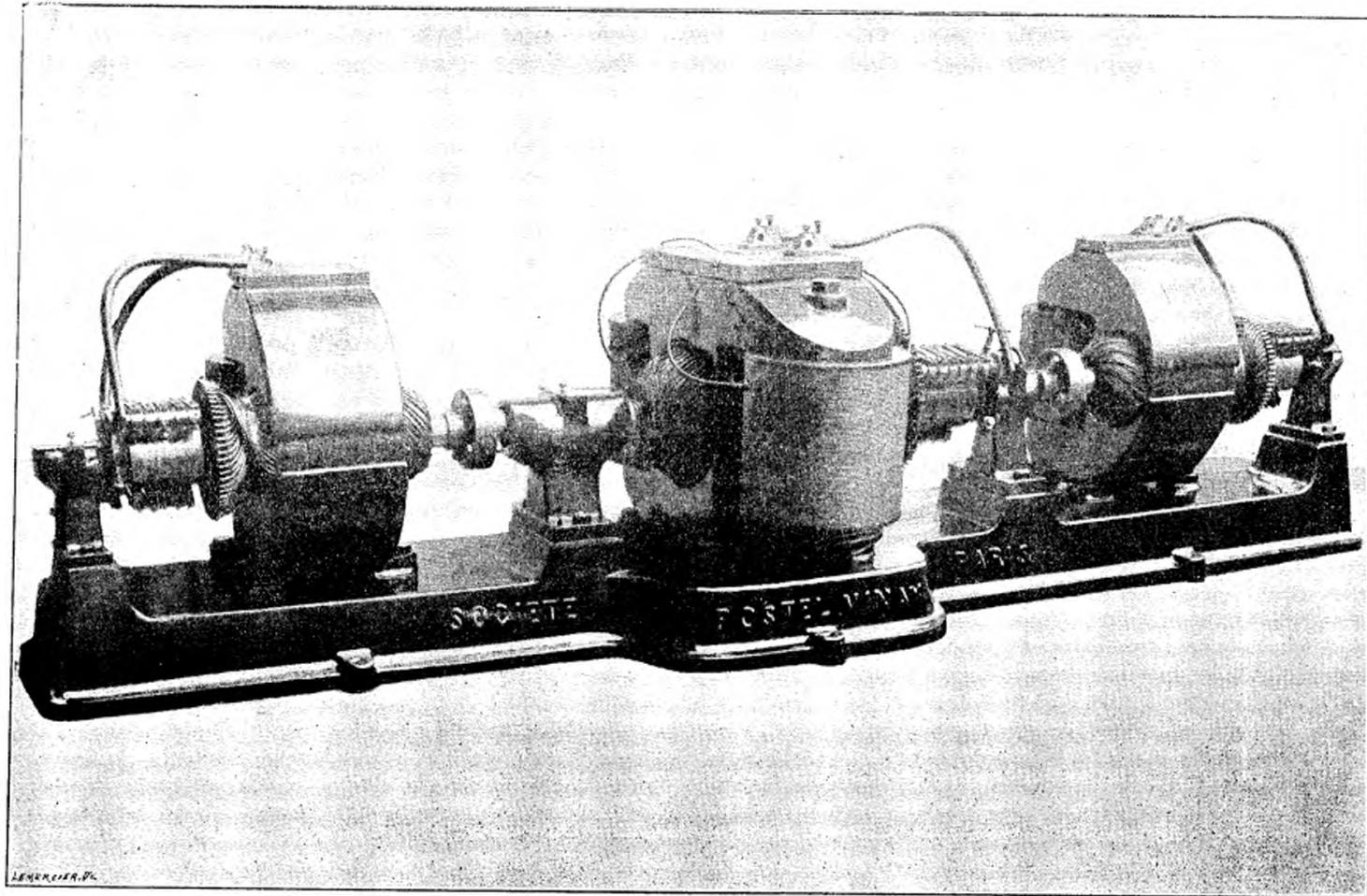


Fig. 42. — Groupe survoltEUR pour distribution à trois fils.

d'accumulateurs mise en parallèle avec une source d'électricité donnant une tension constante.

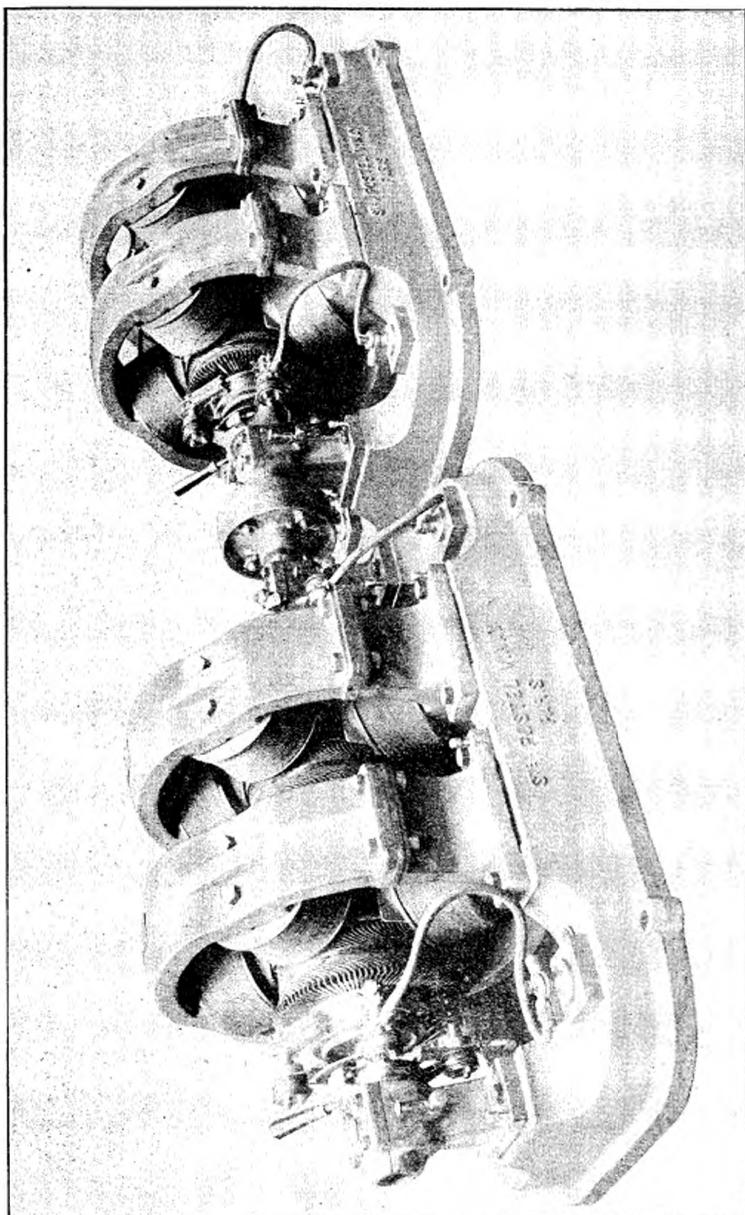


Fig. 43. — Égalisateur à quatre induits.

Le procédé consiste à intercaler dans le circuit de la batterie l'induit d'une dynamo génératrice à courant continu formant le secondaire d'un

transformateur dont le primaire est un moteur monté en dérivation sur la source à tension constante ; en agissant sur l'excitation de la génératrice, on peut remédier aux variations de la tension de la batterie provenant des divers états de charge ou de décharge des éléments.

Dans le cas où la batterie est employée comme tampon, dans une installation de tramways, par exemple, on excite la génératrice en série ; il en résulte que le survoltage dû à la génératrice du transformateur, dépend de la valeur et du sens du courant qui traverse la batterie ; il apporte le supplément de tension à la décharge et il s'ajoute à la source d'électricité à la charge.

Les survoltateurs sont aussi employés pour compenser les chutes de tension dans les feeders d'alimentation des réseaux de distribution (fig. 42 et 43).

Enfin, une application intéressante des transformateurs de tension à courant continu réside dans l'emploi de machines égalisatrices dans les réseaux de distribution dits à plusieurs fils.

(b) *Courant alternatif.* — La construction et l'emploi des transformateurs de tension pour un courant alternatif a pris un grand développement durant ces dernières années. C'est à eux, que l'on doit la réalisation des transports d'énergie à longue distance et à haute tension qui étaient absolument inconnus il y a à peine vingt ans.

Un transformateur pour courant alternatif simple se compose essentiellement de deux circuits enroulés sur un même noyau de fer. Dans l'un de ces circuits, le primaire, on envoie le courant à transformer ; dans l'autre, le secondaire, on recueille le courant à la tension convenable d'utilisation. Le rapport de transformation de l'appareil, c'est-à-dire le rapport entre les tensions primaire et secondaire est égal sensiblement au rapport du nombre de spires des deux enroulements. Ces appareils sont réversibles, ils peuvent servir à éléver la tension ou à la diminuer. On en voit immédiatement l'emploi dans les transports de force que l'on a intérêt à faire à très haut voltage pour éviter les pertes d'énergie en ligne et l'emploi de gros conducteurs. A l'usine génératrice, la tension des machines est élevée par un premier transformateur fonctionnant comme « survoltateur ». A l'usine réceptrice, cette tension est abaissée par un transformateur semblable, mais fonctionnant en sens inverse jusqu'à une valeur convenable pour la distribution. Comme la quantité d'énergie en jeu est la même dans les deux circuits d'un transformateur, aux pertes près, les intensités dans chacun d'eux

sont inversement proportionnelles aux tensions. Le circuit présentant un petit nombre de spires, c'est-à-dire à bas voltage, sera par suite à grande section de cuivre, celui ayant un grand nombre de spires sera au contraire enroulé avec du fil fin.

Pour éviter autant que possible la dispersion du flux à travers l'air, on a été conduit à exécuter les enroulements des transformateurs sur des circuits magnétiques fermés. Ces circuits magnétiques sont constitués par des lames de tôles isolées entre elles comme dans les induits de dynamos. Les circuits primaire et secondaire sont enroulés sur le moyeu de tôles. Ils sont, ou superposés, l'isolement est alors moins facile, mais les pertes de flux sont diminuées, ou bien accolés à côté l'un de l'autre; les bobines primaire et secondaire sont alors divisées en un certain nombre de sections qu'on alterne entre elles. Ce dernier procédé facilite l'isolement, mais augmente les fuites magnétiques.

L'isolement doit se faire très soigneusement, étant données les tensions extrêmement élevées que peuvent avoir à supporter les enroulements. On arrive aujourd'hui à fabriquer couramment des appareils industriels pouvant supporter 30 000 volts. Nous citerons plus loin un transformateur construit par la Société l'Eclairage Electrique pouvant donner 100 000 volts. Les isolants ordinairement employés sont le coton et la toile paraffinés, l'amiante, le prespahn et le mica ou ses succédanés. L'appareil entier doit être soigneusement isolé du sol par des isolateurs en porcelaine.

La section des conducteurs à basse tension est souvent assez considérable pour nécessiter l'emploi de lames ou de véritables barres de cuivre dans ces enroulements.

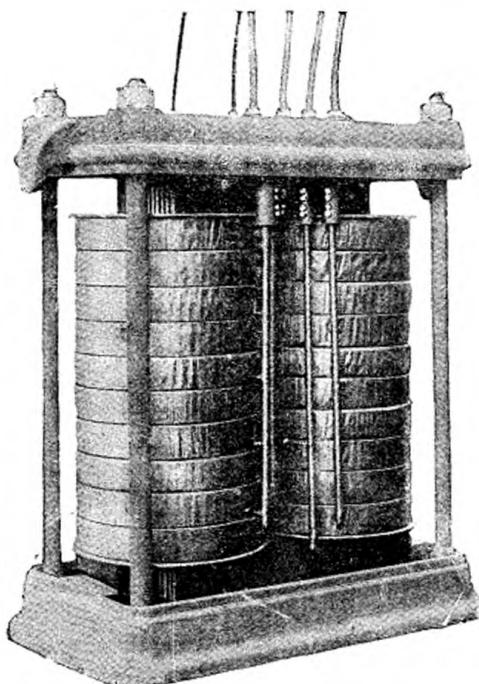


Fig. 43 bis. — Transformateur pour courant alternatif.

Ces transformateurs peuvent s'appliquer également au cas des courants polyphasés. On combine alors les circuits magnétiques correspondant aux diverses phases de façon à réduire au minimum le poids de fer entrant dans l'appareil. Ainsi dans un transformateur triphasé, les trois noyaux correspondant aux trois phases peuvent être réunis à deux culasses communes (fig. 44).

Le grand avantage de ces transformateurs vient de ce qu'ils n'ont aucune pièce mobile. L'appareil peut donc être abandonné à lui-même sans surveillance et presque sans entretien.

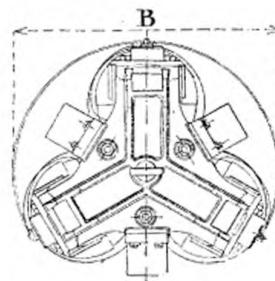
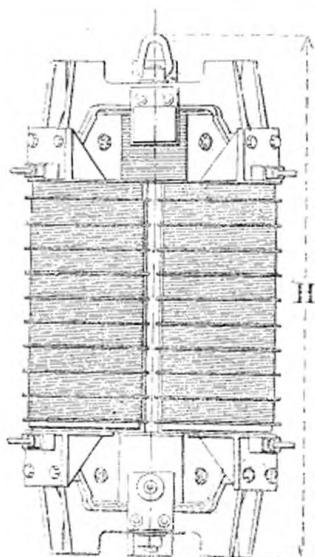


Fig. 44. — Transformateur Lahmeyer.

2^e Transformateurs de courant

La transformation en courant continu du courant alternatif soit simple, soit polyphasé, présente plus d'intérêt que la transformation inverse. Si l'énergie électrique est plus commode à produire et à transporter à de grandes distances sous la forme de courant alternatif, le courant continu est plus commode pour certaines applications et indispensable pour d'autres. Aussi ne faut-il pas s'étonner si la plupart des systèmes que nous allons citer ont été surtout étudiés en vue de la production de courant continu.

(a) *Moteurs générateurs.* — Un moteur synchrone ou asynchrone entraîne par accouplement direct une génératrice à courant continu. Ce système permet d'obtenir une tension continue dans un rapport quelconque avec la tension alternative sans communication électrique entre les induits des deux machines. On évite ainsi un transformateur pour abaisser la tension du courant primaire (fig. 45 et 46).

(b) *Commutatrices*. — Sur un induit de dynamo à courant continu possédant un collecteur et placé dans un champ inducteur convenable on fait des prises de courant équidistantes communiquant à des bagues isolées montées sur l'arbre. Ce nombre de prises varie suivant le nom-

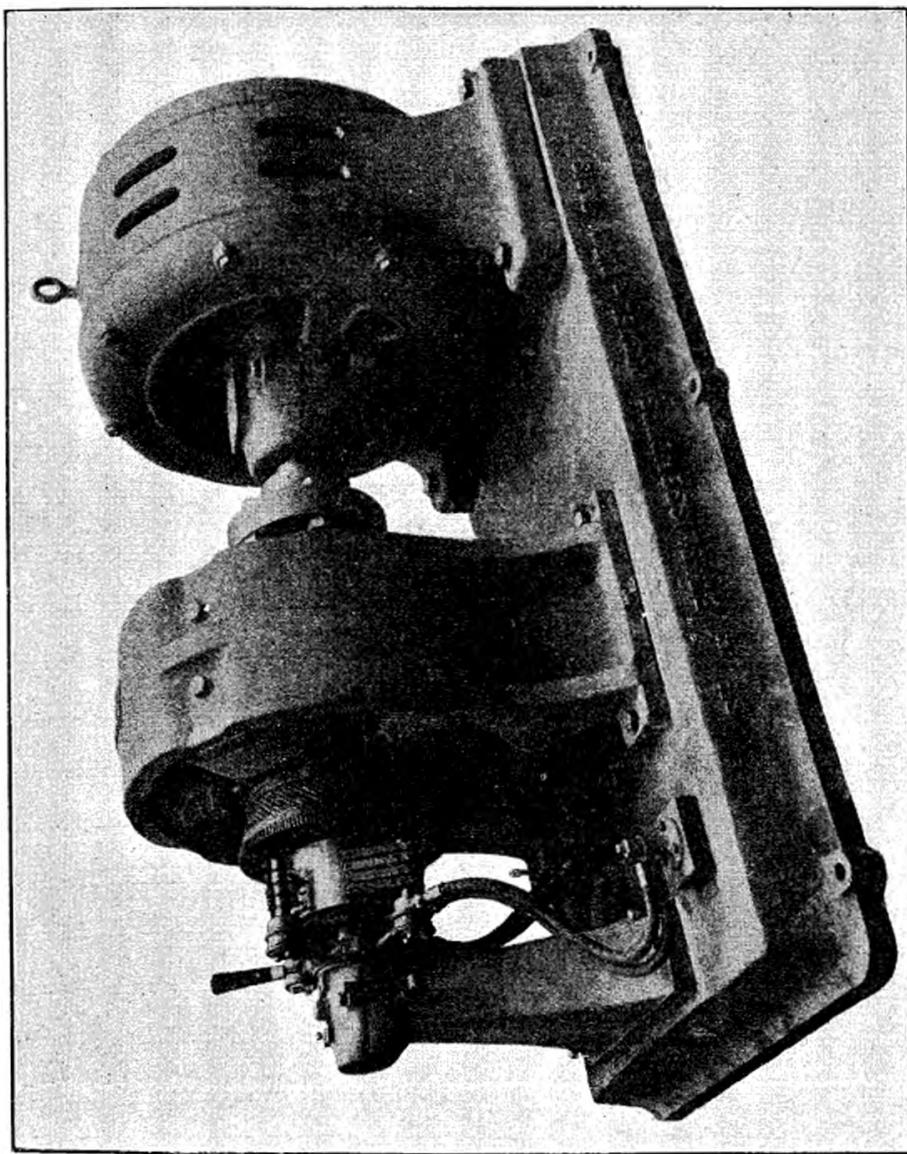


Fig. 45. — Groupe moteur générateur triphasé continu.

bre de phases du courant primaire; il est de trois, par exemple, pour du courant triphasé; en faisant communiquer ces bagues avec un réseau à courant polyphasé, la machine tourne comme moteur synchrone et on peut recueillir du courant continu sur les balais du collecteur redresseur. La tension du courant recueilli est ici liée à celle du courant

primaire. Il faut employer un transformateur si la tension de celui-ci est trop élevée. Mais le rendement d'une commutatrice, combinée avec un transformateur est encore meilleur que celui d'un moteur générateur.

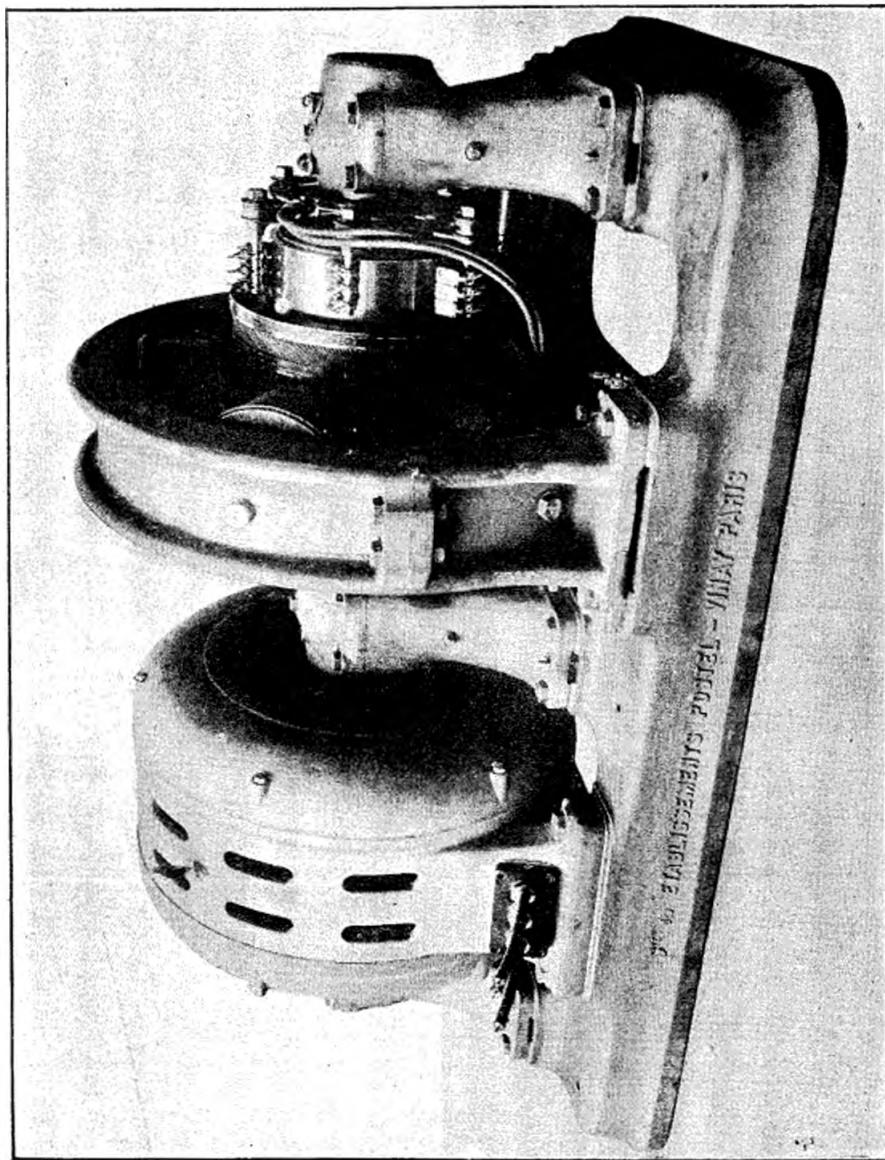


Fig. 46. — Transformateur rotatif.

L'emploi des commutatrices s'est fort développé dans ces dernières années, principalement dans l'application à la traction.

(c) *Redresseurs de courants.* — Nous ne citerons, parmi ces appareils, que le « panchahuteur » de MM. Hutin et Leblanc dont un mo-

dèle de 100 kilowatts figurait à l'exposition particulière de la maison Postel-Vinay.

Voici le principe de cet appareil : pour une tension primaire efficace donnée, la tension aux bornes secondaires d'un transformateur à courant alternatif est sensiblement proportionnelle au nombre de spires de l'enroulement secondaire.

Si dans un transformateur, on peut faire varier le nombre de spires de l'enroulement secondaire suivant une loi sinusoïdale, de façon à ce que ce nombre augmente lorsque la tension primaire diminue et inversement on conçoit qu'il soit possible d'obtenir une tension sensiblement constante aux bornes du secondaire. En pratique, l'enroulement secondaire se compose d'une série de bobines dont les nombres de spires varient de l'une à l'autre suivant une loi sinusoïdale. Ce sera, par exemple, 0, 7, 13, 17, 20, 17, etc., dans le cas de vingt bobines. Chacune de ces bobines est reliée à une lame de collecteur ordinaire et à une bague isolée montée sur un arbre commun qui est entraîné par un moteur synchrone. Les balais qui frottent sur le collecteur viennent ainsi successivement en communication avec les diverses bobines et on peut recueillir sur le collecteur le courant continu produit par l'appareil.

L'emploi de courants polyphasés dont la puissance est constante permet de constituer la partie mobile par l'induit du moteur synchrone, le collecteur et les bagues. Si l'on avait à transformer du courant monophasé, il faudrait employer un volant pour parer à la variation du couple moteur.

L'appareil est réversible : il peut servir à transformer du courant continu en courant alternatif, mono ou polyphasé, suivant la disposition du transformateur.

3^e Transformateurs de phases.

(a) *Transformateur Scott.* — Il sert à passer d'un système triphasé, avantageux par l'économie de cuivre qu'il procure dans les canalisations, à un système diphasé plus commode à employer dans une distribution d'éclairage. Le dispositif est, du reste, réversible. Les courants triphasés sont envoyés dans deux enroulements AO, BC par les trois points ABC

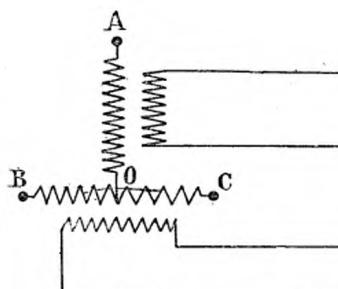


Fig. 47.

(fig. 47). Ces deux enroulements servent de primaires à deux bobines. Une construction graphique simple montre que l'on recueille dans ces deux bobines deux courants décalés de 90° .

(b) *Transformateurs de courant monophasé en biphasé.* — Ces dispositifs permettent d'obtenir les champs tournants nécessaires à l'alimentation des moteurs asynchrones quand on n'a à sa disposition que du courant alternatif.

Un dispositif dû à Ferraris consiste à employer pour produire le champ tournant, le courant alternatif de la distribution et le courant que celui-ci induit dans un transformateur. Ces deux courants sont décalés d'un peu moins de 180° et suffisent pour donner naissance à un champ tournant.

MM. Hutin et Leblanc divisent le courant monophasé en deux circuits contenant, l'un une self, l'autre une capacité, de façon à obtenir entre les deux courants dérivés un décalage suffisant.

EXPOSITION FRANÇAISE

Société anonyme des hauts fourneaux de Maubeuge.

Cette société exposait un groupe électrogène construit entièrement dans ses ateliers et composé d'une dynamo à courant continu et d'une machine à vapeur monocylindrique de 500 chevaux.

Le système inducteur de la dynamo est formé d'une série de douze pièces en acier coulé, en forme d'U, dont les branches dirigées vers l'axe de la machine constituent les noyaux polaires. Ces pièces sont venues de fonte avec deux flasques circulaires en acier ; chacune des flasques est divisée en deux demi-couronnes et l'ensemble de l'inducteur se compose de deux parties assemblées suivant le diamètre horizontal. Tous les noyaux sont recouverts d'une bobine, mais les enroulements sont tels que les noyaux appartenant à une même pièce en U sont de polarités différentes, tandis que les noyaux de deux pièces voisines ont la même polarité ; la machine est donc à douze pôles. Cette disposition a été adoptée dans le but de réduire la réaction d'induit.

L'induit, du genre Pacinotti, présente 288 entailles presque fermées dans chacune desquelles sont logés trois câbles souples. Le moyeu en

fonte qui supporte les tôles de l'induit est fou sur l'arbre et son entraînement s'obtient au moyen d'un joint Zoedel. Le courant est recueilli sur un collecteur à 288 lames par des balais en charbon ; les 12 tiges porte-balais sont fixées à une étoile à 12 branches qu'une vis tangente permet de faire tourner pour le décalage.

Société des établissements Postel-Vinay.

Cette société exposait deux génératrices l'une à courants triphasés de 1 000 kw., construite pour la Société française Thomson-Houston, l'autre à courant continu de 350 kw.

GÉNÉRATRICE A COURANTS TRIPHASÉS (*Pl. 2*).

La génératrice à courants triphasés est à inducteur mobile et induit fixe. L'inducteur est calé sur l'arbre d'une machine à vapeur fournie par la Société de Constructions mécaniques (anciens établissements Cail) ; il est formé d'une roue en fonte à huit rayons sur la circonference de laquelle est boulonnée une couronne en acier de grande perméabilité magnétique. Cette couronne porte 40 pôles radiaux en tôle de fer. Le bobinage est formé d'une lame de cuivre enroulée sur champ et dont les spires sont isolées entre elles par de la toile huilée. L'isolation entre les bobines et la masse du pôle est obtenu au moyen d'un manchon de mica et de joues en carton.

Les tôles constituant l'induit sont fixées sur une carcasse en fonte par des assemblages en queue d'aronde et maintenues au moyen de boulons entre deux flasques démontables, ces tôles forment sept paquets entre lesquels sont ménagés six canaux de ventilation. Les enroulements induits sont logés dans des encoches rectangulaires et maintenus au moyen de cales en bois. L'induit peut se déplacer parallèlement à l'axe de la machine de façon à découvrir l'inducteur.

Le courant d'excitation est amené aux inducteurs par deux bagues en fonte sur lesquelles appuient deux frotteurs en charbon. Il est fourni à la tension de 125 v. par une dynamo de 20 kw., actionnée par un moteur pilon à grande vitesse, Boulte Larbodiére. Le débit de l'excitatrice varie de 120 à 163 a. suivant que le décalage entre la tension et le courant varie de 0 à 25°. La tension du courant de la génératrice atteint 5 500 v.

GÉNÉRATRICE A COURANT CONTINU (*Pl. 3*).

La génératrice à courant continu, actionnée par une machine à vapeur Garnier, Faure Beaulieu, marchant à 90 tours par minute, possède deux enroulements inducteurs, l'un série, l'autre shunt. Ce dernier était seul utilisé à l'Exposition, il avait été modifié de façon à ne faire donner à la machine que 460 v. environ au lieu de 550 v., tension pour laquelle elle avait été construite.

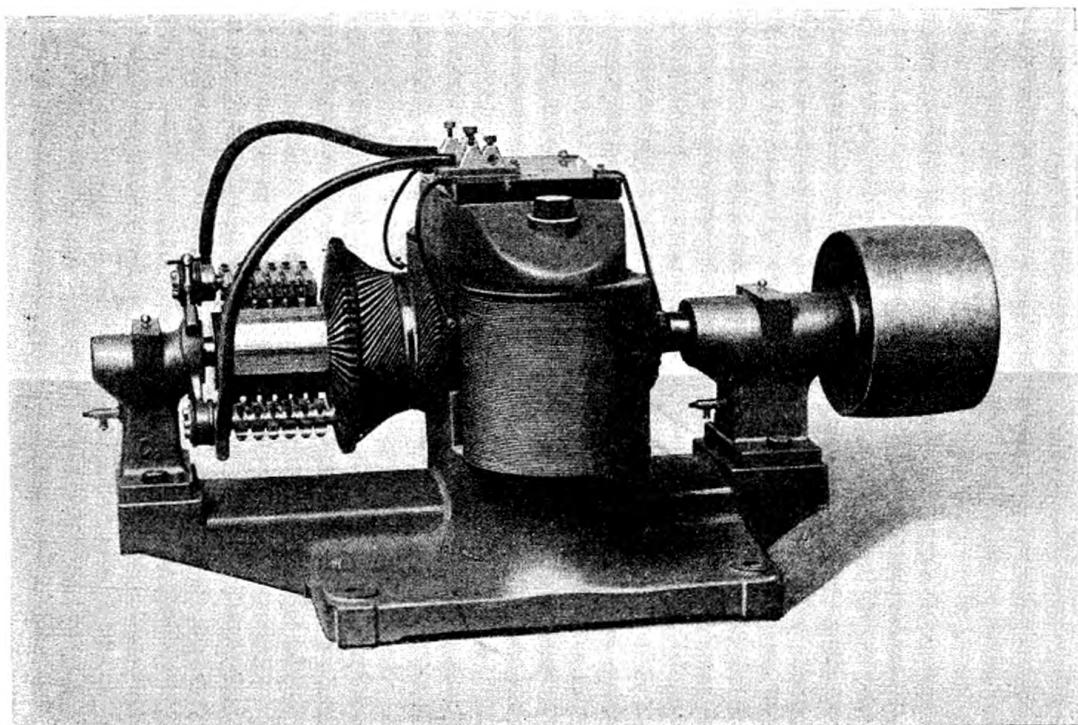


Fig. 48. — Dynamo Postel-Vinay à courant continu.

L'induit monté sur l'arbre de la machine à vapeur est formé de tôles isolées au vernis. Des encoches rectangulaires reçoivent les conducteurs qui sont maintenus au moyen de cales en bois. Le collecteur est en cuivre étiré, il est isolé au mica.

Les balais sont en charbon graphitique ; les porte-balais sont montés sur une couronne mobile concentrique à l'arbre maintenue par des consoles fixées à la culasse des inducteurs et ayant un aspect très mécanique.

Les huit pôles inducteurs, en acier coulé, sont portés par une culasse

circulaire, également en acier, formée de deux pièces réunies suivant le plan diamétral horizontal. Les bobines inductrices sont isolées des noyaux au moyen de carton et de toile vernis. Les bobines de l'enroulement shunt sont enroulées avec du fil isolé au coton ; les bobines de l'enroulement série sont constituées par des lames de cuivre isolées à la toile.

La Société Postel-Vinay avait exposé de nombreux appareils à la classe 23, dans son stand particulier et dans celui de la Compagnie française Thomson-Houston (fig. 48).

On pouvait remarquer dans ce dernier un transformateur de tension de 110 kw. à circulation d'air, ayant un rapport de réduction de $\frac{5\,000}{340}$ et destiné à la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest. Le courant d'air fourni par un souffleur, actionné électriquement ou de toute autre façon, circule dans des espaces ménagés entre la carcasse du transformateur et les bobines ; la puissance absorbée par le souffleur ne dépasse pas les $\frac{25}{1\,000}$ de celle de l'appareil et le refroidissement obtenu est très efficace.

Société Alsacienne de Constructions mécaniques de Belfort.

Planche 4, figures 1 à 4.

La Société Alsacienne exposait une génératrice à courant continu de 750 kw. semblable aux génératrices qu'elle a fournies au secteur de la Compagnie parisienne de l'air comprimé pour son usine du quai Jemmapes. L'induit de ces dynamos est calé à une extrémité de l'arbre d'une machine à vapeur Corliss à deux cylindres du type vertical. L'autre extrémité de l'arbre porte un volant de 5^m,7 de diamètre, pesant 31 t. Les paliers, au nombre de six, sont refroidis par une circulation d'eau.

Ces génératrices peuvent débiter 1 500 a. sous 300 v. ou 1 200 a. sous 600 v. à la vitesse de 70 tours par minute. L'induit est un anneau Gramme ; son diamètre extérieur est de 3^m,81, son diamètre intérieur de 3^m,42 et son épaisseur suivant l'axe de 50 cm. Les tôles qui le constituent sont enfilées sur 39 tiges d'acier recouvertes d'un isolant et fixées parallèlement à l'axe aux extrémités des bras d'une étoile en fonte calée sur l'arbre. Les tôles sont isolées entre elles par du papier gomme-laqué.

L'enroulement est formé de barres de cuivres rectangulaires de 60 mm² de section. Sur la surface extérieure de l'anneau on a placé des barres repliées en forme d'U dont les deux bras sont dirigés suivant le rayon. Des tiges rectilignes placées à l'intérieur de l'anneau réunissent les extrémités des deux bras de deux U consécutifs. Les joints sont rivés et soudés. On obtient ainsi un enroulement en anneau formé de 2 268 spires. Les barres sont isolées entre elles avec un papier spécial. La surface des barres extérieures est laissée nue ; elle constitue le collecteur.

Les pôles inducteurs, au nombre de 12, sont placés à l'intérieur de l'anneau, ils sont en fer forgé et boulonnés sur une culasse en acier fixée au bâti de la machine à vapeur ; l'enroulement des bobines est fait sur une carcasse en tôle.

Le courant est recueilli sur les barres de l'induit formant collecteur par douze rangées de balais métalliques pressés sur le collecteur par des ressorts à lame. Les douze tiges portant les balais sont fixées aux douze bras d'une étoile en fonte pouvant recevoir un mouvement de rotation autour de l'axe de la machine pour permettre le décalage des balais. Un dispositif spécial permet de régler la pression simultanément sur les douze rangées de balais et, au besoin, de les soulever pour les isoler du collecteur.

Société Gramme.

La Société Gramme exposait une série de génératrices à courant continu d'une puissance variant de 1/2 cheval à 54 chevaux (fig. 49).

On connaît la forme presque classique de ces machines : elles sont du type supérieur à deux pôles. Les inducteurs, le socle, un des paliers et le support du second sont d'une seule pièce en acier moulé. Il suffit pour démonter la machine, d'enlever ce second palier. Les bobines inductrices enroulées sur une carcasse, sont simplement enfilées sur les noyaux. L'induit est bobiné en anneau. Ces machines sont d'une construction très robuste. Elles ont fait leurs preuves dans les diverses applications auxquelles elles ont été employées : lumière, transport de force, électro-chimie.

Le même modèle de machine a été avantageusement employé par la Société Gramme pour des moteurs de puissances diverses.

A côté de ces machines, cette société exposait trois génératrices plus puissantes de 60, 125 et 200 kw. Les deux premières ont quatre pôles, la dernière 6. La culasse et les noyaux inducteurs de ces machines sont

en acier coulé, ils reposent sur un bâti en fonte. Les induits sont bobinés en tambour (fig. 50).

On pouvait remarquer aussi une machine pour éclairage à arc, à intensité constante et voltage variable. Ces machines peuvent fournir un courant de 10 a. sous un voltage atteignant 2 000 v. Leur excitatrice est enroulée sur le prolongement de l'arbre (fig. 51).

La Société Gramme exposait encore deux alternateurs, l'un mono-

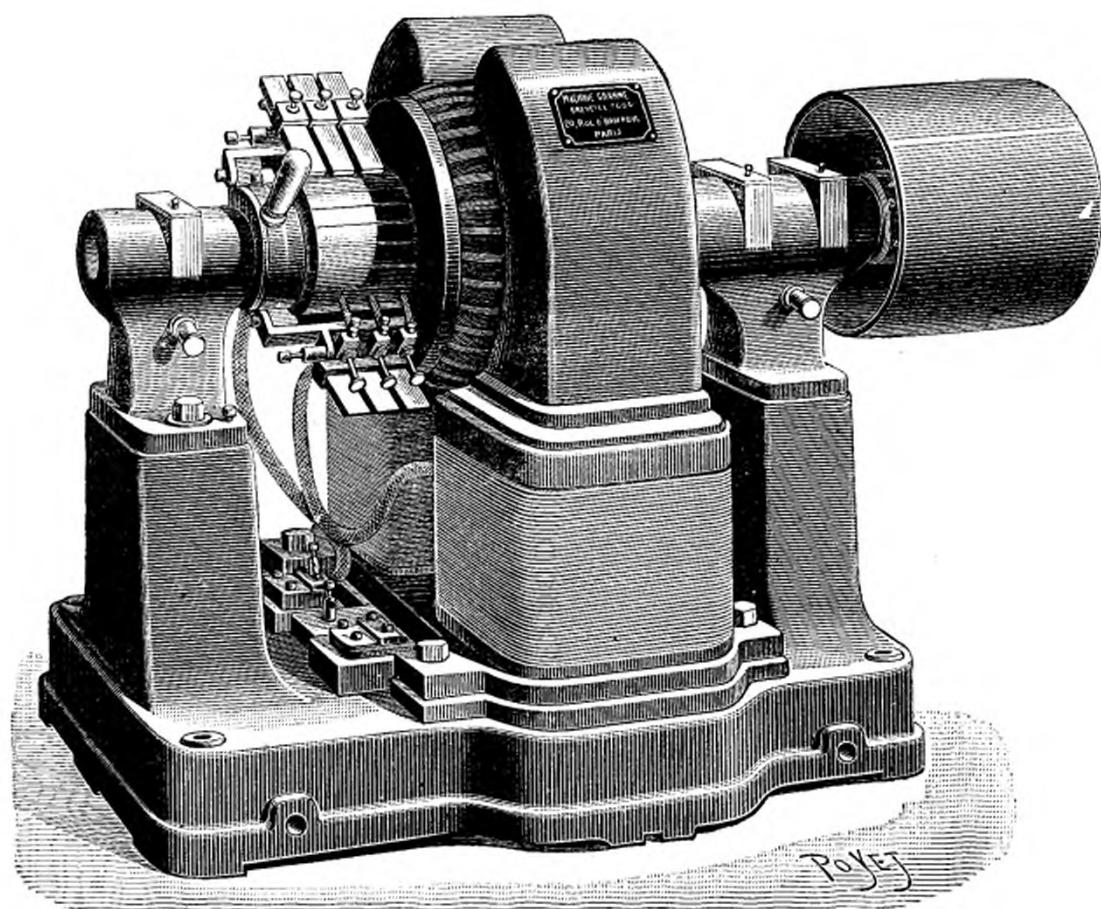


Fig. 49. — Génératrice à courant continu.

phasé de 75 kw. l'autre triphasé de 220 kw., tous deux à enroulements fixes et fer tournant, deux commutatrices monophasées de 3 et 25 kw., trois transformateurs monophasés de 1,5 et 10 kw., et plusieurs moteurs asynchrones triphasés de 1/10 de cheval à 10 chevaux.

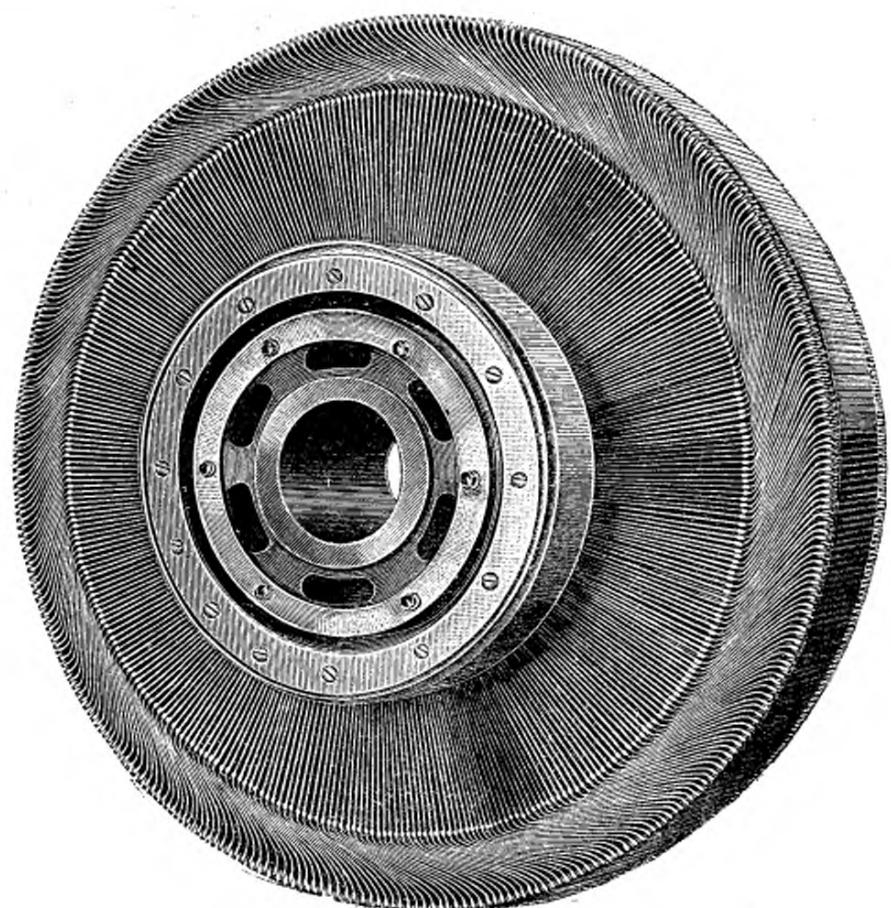


Fig. 50.

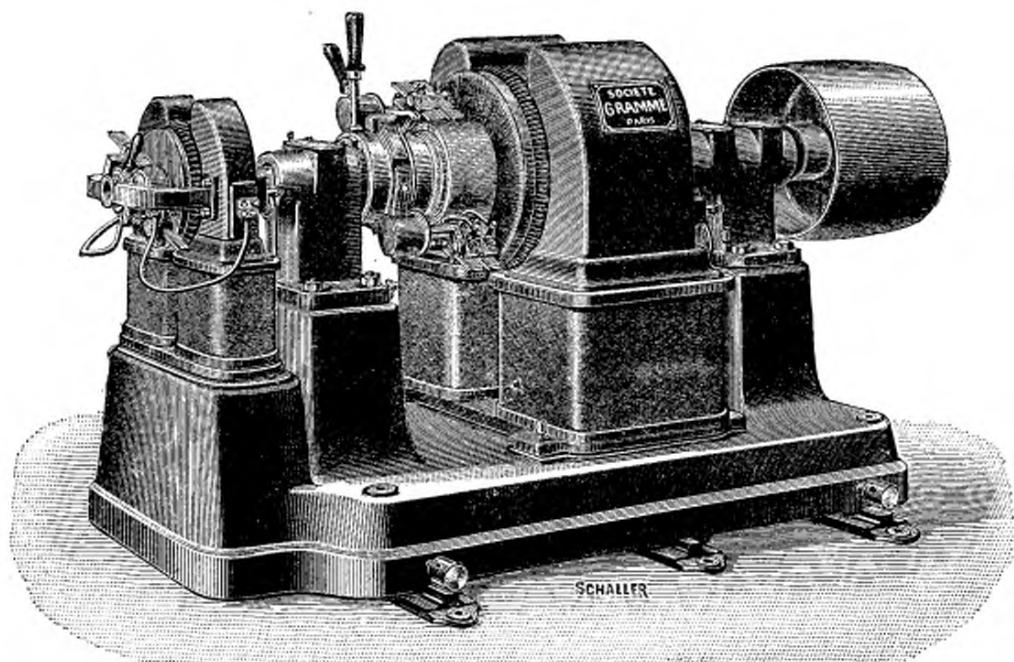


Fig. 51.

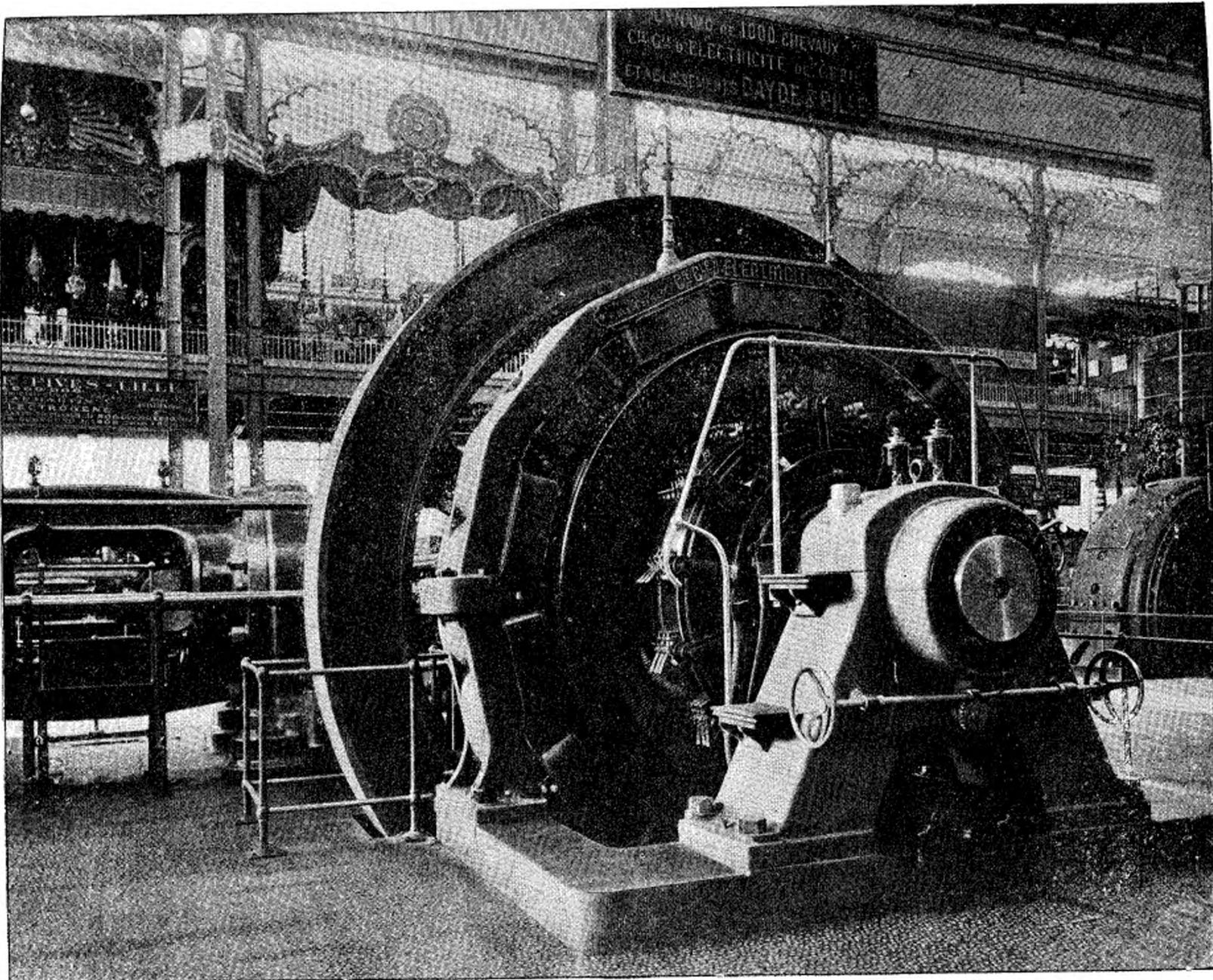


Fig. 52.

Compagnie générale d'électricité de Creil (Etablissements Daydé et Pillé).

Planche 4, figures 5 à 6.

Cette compagnie exposait dans la section française une dynamo à courant continu de 680 kw. à 250 v. Cette génératrice était actionnée directement par une machine à vapeur monocylindrique de 1 000 chevaux, à 120 tours, de la maison Weyher et Richemond (fig. 52).

La dynamo de ce groupe est du type A. 700 à induit lisse.

L'induit est monté sur l'arbre à côté du volant de la machine. Les tôles, isolées au papier, sont fixées sur un moyeu en fonte et serrées entre deux joues en bronze. L'enroulement est constitué par du câble laminé à section rectangulaire, maintenu en place par des frettages et des barrettes qui traversent les tôles de l'induit. Les lames de connexions en forme de développantes ont leurs extrémités les plus voisines du centre fixées sur un cercle isolant. Les conducteurs réunissant les spires au collecteur sont en fil de fer, de façon à augmenter leur résistance et à éviter les étincelles aux balais au moment de la mise en court-circuit d'une section.

La culasse portant les inducteurs est en acier coulé. Elle est formée de deux pièces réunies suivant le diamètre horizontal et porte 14 pôles venus de fonte avec elle. Les épanouissements polaires sont rapportés après la mise en place des bobines ; ils ont leurs bords coupés obliquement de façon à éviter une variation trop brusque du champ pour les conducteurs induits qui arrivent sous les pôles.

Les balais de cette machine sont d'un système particulier, mi-partie en cuivre, mi-partie en charbon. Le charbon placé à l'avant du cuivre par rapport au sens de marche sert à lubrifier le collecteur.

Cette machine est excitée en dérivation. Elle était montée à l'Exposition sur un des ponts de la distribution à 3 fils et 500 v. entre fils extrêmes.

Compagnie générale électrique de Nancy.

Planche 5.

Cette compagnie exposait un alternateur triphasé de 450 volts-ampères du type GT 450, actionné directement par une machine à vapeur monocylindrique Weyher et Richemond.

Les génératrices de ce type sont à induit fixe et à inducteur tournant.

L'inducteur est formé d'un volant en acier coulé portant, vissés sur

sa jante, 64 pôles en acier à section ovale. Le volant est coulé en deux pièces assemblées sur l'arbre par des boulons et des frettées posées à chaud. L'enroulement des bobines est fait sur des carcasses isolantes qui sont mises en place après le bobinage.

Les tôles de l'induit, de 5 mm d'épaisseur et isolées au papier, sont maintenues par des boulons entre deux flasques circulaires, formées chacune de deux demi-couronnes. Les demi-couronnes inférieures portent les pattes de fixation. Les demi-couronnes supérieures sont munies de quatre anneaux qui permettent de les soulever. De chaque côté de l'induit sont disposés six tirants en fer aboutissant d'une part à un collier central concentrique à l'arbre, de l'autre à la périphérie de la carcasse de l'armature et ayant pour but d'augmenter la rigidité de cette dernière sans trop l'alourdir.

Les enroulements induits sont bobinés avec du câble, plus facile à enrouler pour les fortes sections. Ils sont logés dans des rainures et isolés par des tubes en micanite. Chaque phase est formée de 32 bobines connectées en série. Le nombre total des rainures de l'induit est de 384.

Le courant d'excitation est fourni à la tension de 120 v. par une dynamo hexapolaire placée en porte-à-faux sur l'arbre. Ses inducteurs sont montés en série, disposition qui permet d'employer le même rhéostat de champ pour l'excitatrice et l'alternateur.

À 93,5 tours par minute, correspondant à 30 périodes par seconde, la tension du courant débité par cet alternateur est de 3 000 v.

Schneider et C°

Planche 6.

La maison Schneider présentait, dans la section des machines françaises, un groupe électrogène à courants triphasés de 1 500 chevaux dont la machine à vapeur provenait de la maison Dujardin de Lille.

L'alternateur de ce groupe est du type volant à inducteur mobile et induit fixe. L'inducteur est formé d'une roue en fonte, à 8 rayons et en deux pièces assemblées sur l'arbre par des frettées. La jante a une section en forme d'U ; les parties qui la composent sont réunies par des frettages d'acier logés dans des rainures latérales. Elle porte 84 pôles en acier. L'enroulement inducteur est formé d'une bande de cuivre enroulée sur champ.

Les tôles de l'induit sont maintenues dans une carcasse en fonte formée de deux demi-couronnes, composées chacune de deux flasques. Les

paquets de tôles composant l'induit sont séparés par des intervalles d'air assurant une bonne ventilation. L'enroulement est logé dans 492 rainures. Pour permettre un démontage commode de la moitié supérieure de l'induit on a laissé en outre 12 rainures vides au voisinage du diamètre horizontal. Chaque phase est formée de 82 bobines en série, les trois phases occupent dans l'induit des positions différentes de façon à séparer les points de l'enroulement présentant de grandes différences de tension.

Le courant d'excitation était fourni à ce groupe par un moteur génératrice de 40 kw. qui abaissait à 140 v. le courant fourni à la tension de 440 v. par la canalisation de l'Exposition.

La tension du courant produit par la génératrice atteint 3000 v. avec un courant d'excitation de 250 a. et une vitesse de 72 tours par minute (50 périodes par seconde). La puissance aux bornes est alors de 1 400 k. v. a.

Dans l'exposition particulière de la maison Schneider, on pouvait encore remarquer :

UNE DYNAMO POUR ÉLECTROLYSE DE 3000 A. SOUS 110 V.

Cette machine est à 12 pôles. Elle possède deux induits et deux collecteurs pouvant être montés en quantité ou en tension, la machine peut donc servir pour une distribution à trois fils. Les tôles de chaque induit sont ajustées par un assemblage à queue d'aronde sur un moyeu en fonte. L'enroulement de chaque induit est formé de 432 barres de cuivre de $0,5 \times 1$ cm logées par groupes de deux dans des rainures et maintenues par des frettés. Leurs extrémités sont réunies par des pièces fondues en laiton. Les lames du collecteur symétriquement placées par rapport aux pôles sont réunies, suivant le système Mordey, par des tiges de connexion ayant une section en forme de V pour augmenter leur rigidité.

Les collecteurs de 75 cm de diamètre et 32,5 cm de long, possèdent 216 lames. Le courant est recueilli sur chacun d'eux par 12 tiges porte-balais avec frotteurs en charbon. L'inducteur, en acier moulé, est en deux parties seulement et les pôles sont venus de fonte avec la culasse ; les épanouissements polaires sont seuls rapportés.

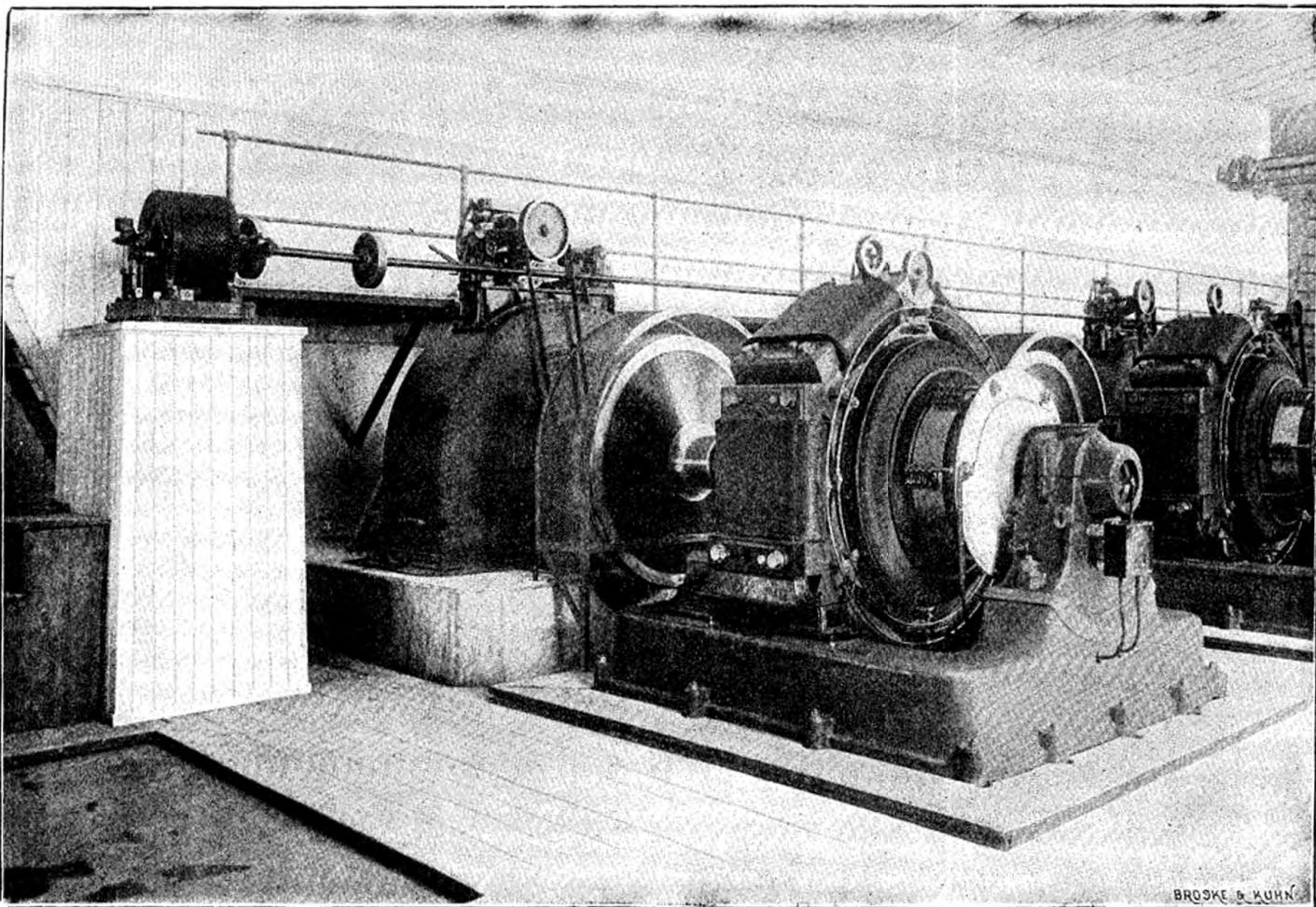


Fig. 53.

UN ALTERNATEUR DE 700 CHEVAUX, TYPE CARBURE.

Ce type est construit pour des puissances de 400 à 1500 chevaux. Il est à fer tournant ; la partie tournante est en acier moulé, elle porte 2 couronnes de 6 pôles chacune. Les deux couronnes tournent à l'intérieur de deux induits entre lesquels est logée une bobine excitatrice unique. Les enroulements induits sont reliés à des cercles de cuivre rouge qui permettent de les coupler en quantité ou en tension. Ce type de machine peut supporter sans danger des vitesses d'emballement bien supérieures à la vitesse de régime.

UN ALTERNATEUR TRIPHASÉ (TYPE A F 5) DE 105 CHEVAUX.

Ce type de machine est encore à fer tournant. La partie tournante se compose d'un moyeu en fonte ou en acier sur lequel sont fixées deux rangées de pôles en tôle de fer. Les deux rangées sont décalées l'une par rapport à l'autre du quart de la distance angulaire de deux pôles voisins. On obtient ainsi dans les deux induits qui entourent ces deux couronnes de pôles des courants diphasés transformés en triphasés par le montage de Scott. Le nombre de spires dans les deux induits est dans le rapport de 1 à 0,867. La bobine excitatrice est logée entre les deux induits ; elle est parcourue par le courant d'une dynamo tétrapolaire placée en porte-à-faux à l'extrémité de l'arbre.

UNE DYNAMO A INDUIT FORMANT COLLECTEUR.

L'induit enroulé en tambour ondulé, est à rainures, chacune d'elles contenant deux barres. Les barres supérieures ont leurs extrémités maintenues par les dents de deux roues placées de part et d'autre de l'induit ; la partie de ces barres située entre ces roues et l'induit est tournée et les barres sont isolées entre elles au mica. On obtient ainsi des deux côtés de l'induit deux collecteurs dont les lames sont obliques par rapport à l'axe de la machine. Quatre rangées de huit balais en charbon, maintenus dans des boîtes en laiton et pressés par des ressorts à houdin recueillent, sur chaque collecteur le courant à 750 v.

Notons en terminant un dispositif adopté par la maison Schneider pour le refroidissement des induits de moteurs : il consiste à monter sur l'arbre un ventilateur dont les ailettes sont dirigées de manière à envoyer un courant d'air sur l'induit.

Compagnie de Fives-Lille.

Planche 21.

La Compagnie de Fives-Lille exposait un groupe électrogène important à courant triphasé. L'alternateur de ce groupe est du type à induit fixe et inducteur mobile. A la vitesse de 79 tours par minute, correspondant à 50 périodes par seconde, il peut développer une puissance de 800 kva., sous une tension de 2 200 v.

L'inducteur forme le volant de la machine à vapeur, il est intérieur à l'induit et se compose d'une carcasse en fonte portant à sa périphérie 76 pôles en tôles de 1 mm d'épaisseur. Les paquets de tôles sont assemblés par des rivets, chacun d'eux est fixé à la jante du volant au moyen de deux boulons qui viennent se visser dans une barre d'acier noyée dans les tôles. Des goujons fixés à la jante assurent un repérage exact des pôles. Les bobines excitatrices sont enroulées sur des carcasses en laiton fondu et maintenues en place par un épaulement ménagé sur les pièces polaires.

Elles sont divisées en deux séries de 38 montées en parallèle ; la tension du courant d'excitation est de 220 v.

L'induit a une largeur suivant l'axe de 270 mm ; il est formé de tôles de 0,5 mm d'épaisseur qui sont réunies entre elles et au bâti en fonte par des boulons qui les traversent et les serrent entre une bride fixe et des flasques amovibles. On a pu se dispenser d'isoler les boulons en les plaçant suffisamment près de la périphérie de l'induit pour que le flux qui les traverse soit négligeable. Les encoches destinées à recevoir les conducteurs sont garnies de tubes en micanite avant l'enroulement. Le bobinage est fait en fil de 4,4 mm de diamètre. Le nombre des encoches est de 436, celui des bobines de 114, soit 4 encoches par bobine et 38 bobines par phase. La carcasse supportant les tôles d'induit est formée de quatre segments assemblés suivant deux diamètres, un vertical et un horizontal ; elle repose sur ses plaques de fondation par des vis calantes qui permettent de la centrer exactement.

Maison Farcot.

L'alternateur présenté par cette maison était la seule machine à courants diphasés de l'Exposition. Il a été construit pour l'agrandissement d'une installation qui utilise déjà ce genre de courants.

La dynamo était directement accouplée à une machine à vapeur à tiroirs rotatifs et à un seul cylindre de la maison Farcot. Les raisons

données par les constructeurs pour l'adoption d'une telle machine, malgré les nombreuses applications des machines compound à l'heure actuelle sont : une dépense de vapeur comparable à celle des machines à détente, un meilleur rendement provenant de la simplicité du mécanisme, une faible variation de la dépense pour une grande variation de puissance, enfin une plus grande sensibilité à l'action du régulateur. L'inconvénient qu'on peut trouver à l'emploi de ces machines pour la conduite de plusieurs alternateurs en parallèle est la difficulté de synchronisation, mais il disparaît dans le cas du groupe Farcot exposé par l'emploi des circuits amortisseurs de MM. Hutin et Leblanc.

L'alternateur du groupe est du type volant à inducteur mobile et induit fixe. L'inducteur est formé de deux couronnes venues chacune de fonte en quatre segments et entre lesquelles est enroulée une seule bobine inductrice (fig. 54 et 55).

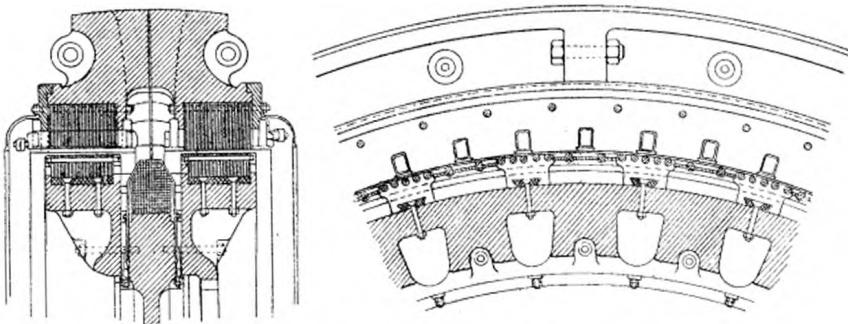


Fig. 54.

Alternateur Farcot.

Fig. 55

Les bras du volant sont cachés sous un revêtement d'acajou pour diminuer l'action de la résistance de l'air. Les pôles au nombre de 64, 32 par couronne, sont en tôles de 1 mm d'épaisseur, ils sont fixés à la périphérie des couronnes par des coins entrant dans des mortaises en queue d'aronde et boulonnés à la jante des couronnes. Les épanouissements polaires sont percés de cinq rainures servant de logement aux barres transversales des circuits amortisseurs. Il y a cinq barres dans chaque pôle et deux dans chaque intervalle interpolaire. Leurs extrémités sont réunies entre elles par de larges segments de cuivre. On forme ainsi sur chacune des deux couronnes inductrices deux véritables cages d'écureuil. Le but poursuivi par MM. Hutin et Leblanc par l'emploi de ces circuits amortisseurs est de diminuer la réaction d'in-

duit ; les ampère-tours démagnétisants de l'induit sont compensés en partie par les ampères-tours dus aux courants de Foucault qui prennent naissance dans les cages d'écureuil par suite du flux tournant produit par l'induit lui-même. Ces circuits amortisseurs permettent de plus un couplage en parallèle stable de plusieurs alternateurs. Ils fonctionnent alors comme de véritables moteurs asynchrones qui réagissent fortement au moment où l'une des machines tend à tomber hors de phase.

La bobine inductrice unique comprend 460 spires de fil de 7,5 mm de diamètre. Des brides placées de distance en distance la maintiennent entre les couronnes de pôles. Le courant d'excitation varie de 29 à 50 a., entre la marche à vide et la pleine charge. Il est fourni par une machine hexapolaire de 10 kw. sous 175 v. montée en porte-à-faux à l'extrémité de l'arbre. L'enroulement en série de l'induit de cette machine présente une disposition particulière permettant de caler les balais suivant un même diamètre du collecteur.

L'induit de l'alternateur, au lieu d'avoir ses deux enroulements chevauchant l'un sur l'autre, comme d'ordinaire, est formé de deux parties absolument distinctes portant chacune un enroulement monophasé. Chacun de ces induits est placé devant une des couronnes de l'inducteur (fig. 2) et ils sont décalés de $1/4$ de période l'un par rapport à l'autre. Un système de glissières et de vis de rappel permet de leur donner un déplacement parallèle à l'arbre de la machine de façon à permettre la visite des enroulements. Les deux carcasses en fonte supportant les tôles d'induit sont dentelées dans les parties qui se font vis-à-vis. Les creux compris entre les dents constituent des canaux de ventilation. Les dents des deux induits ne viennent pas au contact, elles sont séparées par une mince couche d'air ; ce léger espace empêche le magnétisme rémanent de s'opposer à la séparation des deux induits quand on veut faire un démontage.

Chaque induit possède 64 bobines connectées en série et composées chacune de 10 spires. Le diamètre d'alésage de l'induit est de 5,515 m, l'entrefer est de 63 cm et l'épaisseur de chacune des couronnes de 30 cm. A la vitesse de 78,5 tours par minute, correspondant à 42 périodes par seconde, la tension est de 2 200 v. et l'intensité du courant est de 200 a. par phase avec $\cos \varphi = 0,85$.

Le tableau de distribution, en marbre, comporte deux panneaux correspondant chacun à l'une des phases. Ils comprennent un électromètre, un ampèremètre, un wattmètre et un interrupteur bipolaire à haute tension.

Société anonyme « Electricité et hydraulique. »*Planche 7, figures 4 à 7.*

Cette société a exposé dans la Section française un groupe électrogène de 1 000 chevaux. La machine à vapeur du type Compound à deux cylindres horizontaux a été construite par la maison Weyher et Richemond.

La dynamo de ce groupe provient des ateliers de la Société situés à Jeumont. C'est un alternateur à courants triphasés du type L D de cette maison, pouvant fournir 250 a. sous 2200 v. avec un $\cos\varphi = 0,85$ et une fréquence de 30 périodes par seconde. Comme dans la plupart des machines similaires c'est l'inducteur qui constitue le seul volant de la machine à vapeur. Il est placé entre les deux cylindres et son poids, qui dépasse 20 tonnes, est suffisant pour assurer à la machine un coefficient de régularité de $\frac{1}{200}$. Il porte boulonnés à sa périphérie 64 pôles en acier coulé à section ovale. L'enroulement inducteur est formé par une lame de cuivre dont les couches successives sont isolées à la toile. Des plaques en bronze épousant la forme des pôles, retiennent les enroulements sur les pièces polaires. Le courant d'excitation est de 150 a. sous 110 v.; il est fourni par une excitatrice montée sur l'arbre de l'alternateur.

L'induit est formé de tôles de 5 mm d'épaisseur, isolées au vernis. Son diamètre d'alésage est de 6 m., son diamètre extérieur de 6^m,40 et son épaisseur, en comprenant les espaces réservés pour la ventilation est de 25 mm. L'enroulement induit est logé dans 384 trous complètement fermés; chaque trou laisse passer 6 fils 2 par 2 en parallèle. Le montage des bobines est fait en étoile.

La même maison exposait dans la Section belge un autre groupe électrogène identique comme puissance et comme dimensions au précédent. L'alternateur avait été construit dans les ateliers de la Société à Charleroi. La machine à vapeur provenait de la maison Bollinck de Bruxelles.

Alternateur compound Grammont (système Hutin et Leblanc).

Cet alternateur d'une puissance de 600 kw. produit du courant triphasé. L'inducteur mobile est directement monté sur l'arbre d'une

machine à vapeur monocylindrique. Sa masse est suffisante pour former volant et donner un degré de régularité de plus de $\frac{1}{250}$. Il est venu de fonte en deux parties. Les pôles, en acier coulé, au nombre de 64 sont vissés dans des logements pratiqués sur sa jante (fig. 57 et 58), ils ont une section circulaire. Les épanouissements polaires ont une forme rectangulaire. Le bobinage inducteur parcouru par le courant de l'excitatrice compoundeuse est formé d'une lame de cuivre enroulée en spirale et dont les spires successives sont simplement isolées au papier.

La carcasse maintenant les tôles de l'induit est munie de fortes nervures dans le but d'augmenter sa rigidité. Les tôles de l'induit sont divisées en trois couronnes laissant entre elles deux canaux de ventila-

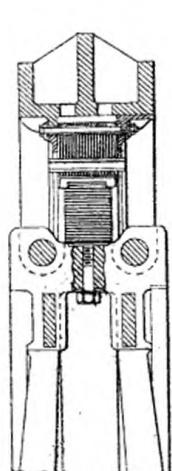
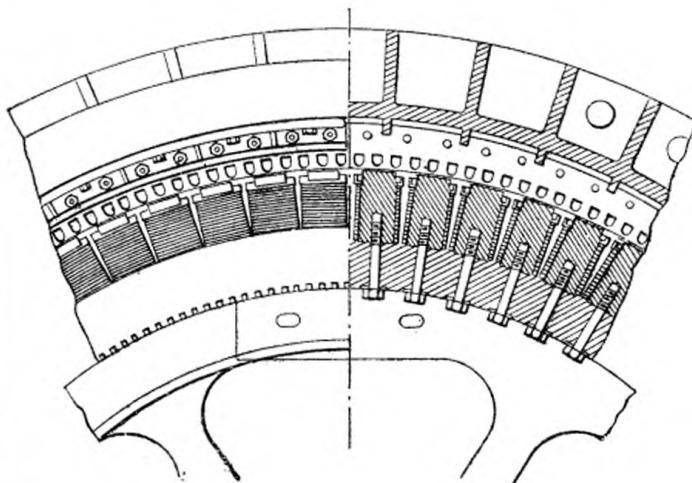


Fig. 56.



Alternateur compound Grammont.

Fig. 57.

tion de 1^{cm},5. La largeur des tôles induites en ne comprenant pas les canaux de ventilation est de 250 mm, leur diamètre d'alésage est de 5 m. Le bobinage induit est logé dans des trous de forme particulière, arrondis du côté de l'entrefer, carrés de l'autre (fig. 2) et complètement entourés de fer. Dans chaque trou passent sept conducteurs de 10^{mm},5 de diamètre. Le montage des circuits est fait en étoile.

La machine tourne à 94 tours par minute environ, correspondant à 30 périodes par seconde. Elle donne alors 2 400 v. de tension et 206 a. par phase avec un $\cos \varphi$ de 0,7.

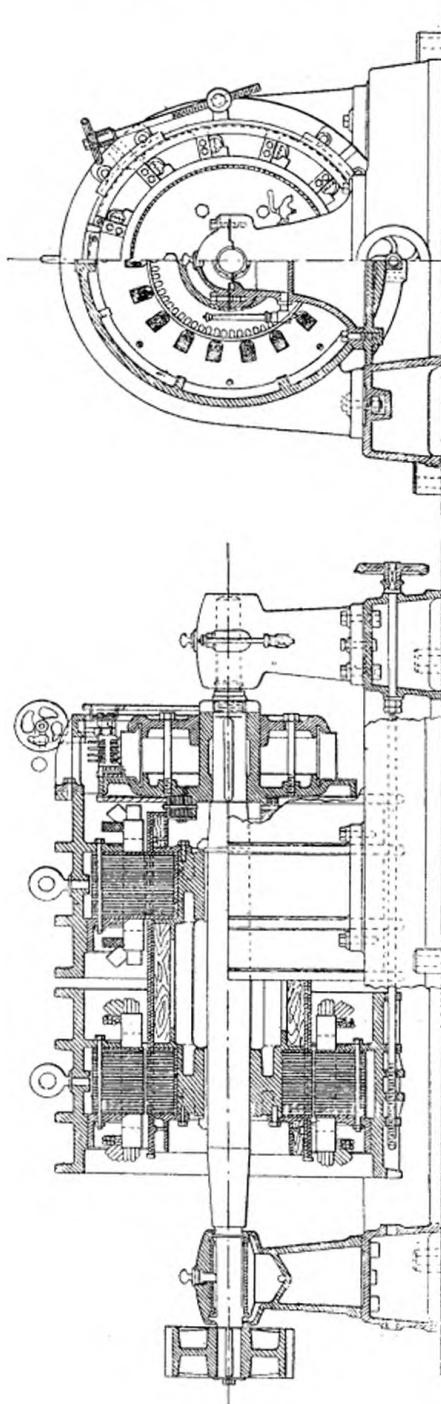


Fig. 38 et 39. — Excitatrice Hutin et Leblanc.

L'excitatrice est une machine d'un type particulier du système Hutin et Leblanc, fig. 38 et 39. Elle se compose de deux stators de moteurs asynchrones placés à côté l'un de l'autre et mis l'un en série, l'autre en dérivation avec l'induit de l'alternateur. Les deux stators produisent deux champs tournants dans le même sens qui agissent sur un induit de machine à courant continu, muni d'un collecteur. La force électromotrice qui prend naissance dans l'induit est due à la différence de vitesse de rotation du champ résultant et de l'induit; elle est proportionnelle à l'intensité des champs tournants. Avec un induit connecté à la façon ordinaire, il faudrait, pour recueillir le courant, faire tourner les balais autour du collecteur avec la vitesse relative de l'induit par rapport au champ. On évite cet inconvénient en employant entre les bobines induites et le collecteur un système particulier de connexions et en donnant à l'induit une vitesse dans un rapport donné avec celle de l'alternateur, au moyen d'un accouplement par engrenage. On peut alors recueillir

le courant avec des balais fixes et l'envoyer dans l'inducteur de l'alternateur.

En orientant convenablement chacun des stators autour de leur axe commun, on peut arriver à obtenir un courant d'excitation tenant compte à la fois du débit de l'alternateur et de son décalage, sans avoir à toucher aux balais de l'excitatrice dont la position est réglée une fois pour toutes.

Une intéressante description technique de cette disposition a été donnée par M. Routin dans l'« Industrie électrique » du 25 juin 1900.

Société l'Eclairage électrique.

Planches 8 à 15.

ALTERNATEUR TRIPHASÉ DE 1200 k. v. a (Pl. 8 et 9).

Cet alternateur, du système Labour (fig. 1, 2, 3, *Pl. 8*), est à induit fixe et inducteur mobile. Ce dernier est calé sur l'arbre d'une machine à vapeur compound à 2 cylindres en tandem construite par la maison Dujardin. Les pôles, en acier, à section rectangulaire et au nombre de 76, sont boulonnés à la périphérie d'un volant suffisamment lourd pour assurer un coefficient de régularité de $\frac{1}{600}$.

L'inducteur a 5^m,70 de diamètre et 0,65 de largeur.

Les bobines inductrices sont enroulées sur une carcasse métallique avec joues en bois.

L'induit repose sur trois semelles de fondation, l'une d'elles étant au-dessous du niveau du sol, il est séparé de l'inducteur par un entrefer de 5 mm. L'ensemble de l'induit peut se déplacer parallèlement à l'axe de façon à découvrir l'inducteur (fig. 4). Les conducteurs sont logés dans des rainures ouvertes et isolés dans des tubes en micanite de 3 mm d'épaisseur. Le montage des enroulements est fait en étoile.

A la vitesse de 80 tours par minute, l'alternateur peut fournir 1200 k. v. a. sous une tension de 5 000 v. et avec un $\cos \varphi$ de 0,5. La fréquence est de 50 périodes par seconde. A l'Exposition, il fonctionnait à la tension de 3 000 v.

Le courant d'excitation était fourni à cet alternateur par une dynamo à 8 pôles Labour, actionnée directement par un moteur à vapeur à grande vitesse Boulte Larbodiére (*Pl. 10*). Cette dynamo, pouvant développer une puissance de 60 kw. fonctionnait au régime de 280 a. sous 180 v, soit 50 kw. L'induit denté présente 128 rainures.

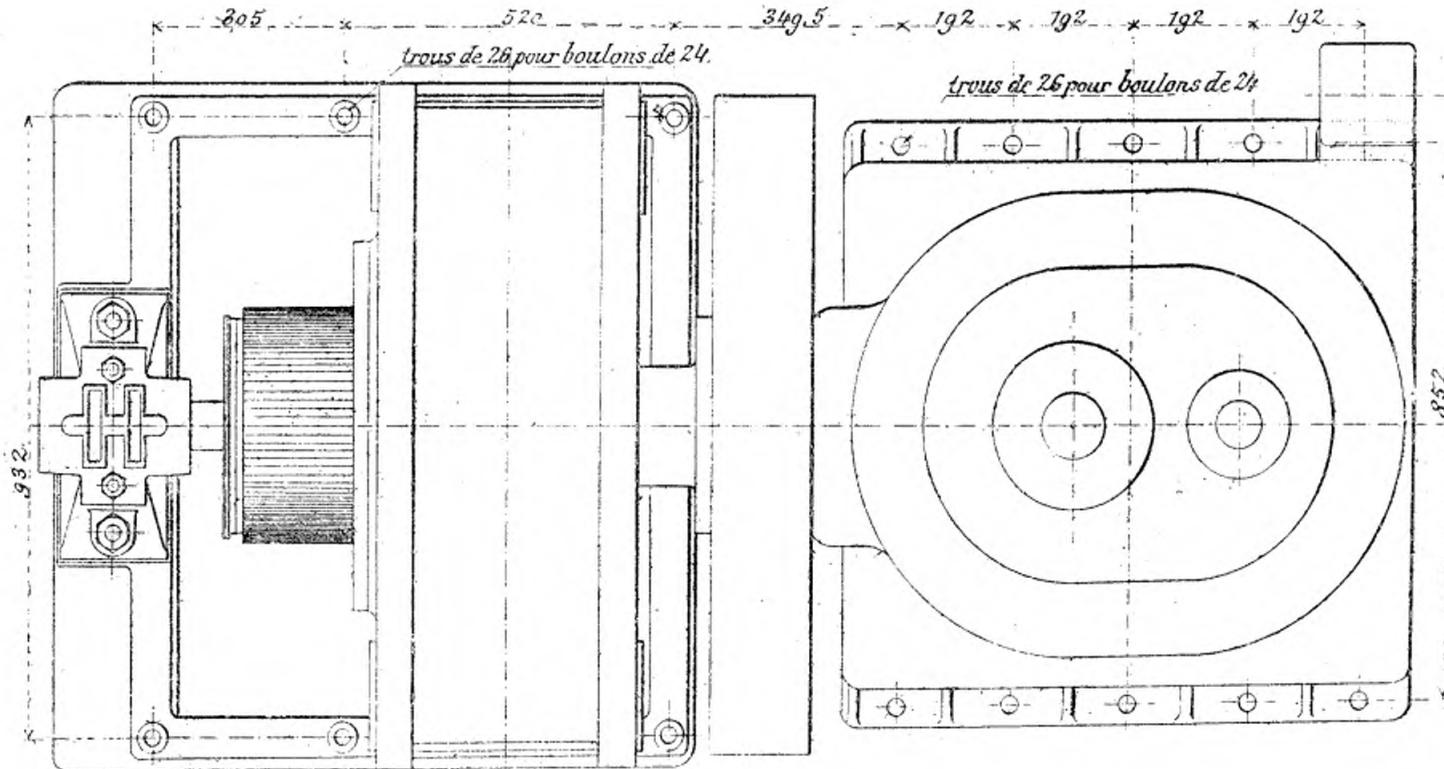


Fig. 60. — Dynamo Labour.

Les balais en charbon appuient normalement sur le collecteur au moyen d'une disposition représentée sur la *Pl. 10*, fig. 4. L'inducteur repose sur une sorte de coussinet concentrique à l'induit, ce qui permet de le faire tourner autour de son axe pour les visiter. Les pôles, venus de fonte, présentent de larges entailles dans le but de diminuer la réaction d'induit.

GÉNÉRATRICE A COURANT CONTINU DE 200 kw. (*Pl. 11*).

Cette dynamo est actionnée par une machine à vapeur de 300 chevaux à 2 cylindres compound en tandem construite par la maison Biétrix de Saint-Etienne. Un volant assure à l'ensemble un degré de régularité de $\frac{1}{200}$.

L'induit est lisse, du type à anneau, à une seule couche de fil qui est maintenu de distance en distance par des clavettes en fibre ; son diamètre est de 2 m. et sa largeur de 35 cm. Le collecteur est porté par un manchon fixé à un épaulement circulaire que présente la lanterne de l'induit. Il comprend 276 lames ; le serrage des lames est obtenu au moyen de plusieurs segments reliés entre eux par une flasque d'acier circulaire. On peut ainsi, en cas de besoin, se borner à démonter une partie seulement du collecteur. Les balais sont en charbon. La disposition des porte-balais est la même que celle employée pour l'excitatrice de 60 kw. Ils sont fixés sur une couronne rendue mobile par vis tangente, pour permettre leur décalage.

Les pôles inducteurs, au nombre de 12, sont vissés sur une couronne extérieure en acier coulé ; ils sont également en acier et présentent une fente destinée à diminuer la réaction d'induit. Les inducteurs et les porte-balais peuvent être déplacés parallèlement à l'axe, de façon à dégager complètement l'induit.

A la classe 23, la Société de l'Eclairage électrique exposait, entre autres appareils, un alternateur monophasé de 200 k. v. a. (*Pl. 12*) à induit fixe et inducteur mobile, donnant directement 30 000 v. à raison de 50 périodes par seconde et deux transformateurs, l'un de 30 000 v. destiné à être employé à l'essai d'isolation des câbles par la maison Berthoud Borel, l'autre de 100 000 v. pour M. d'Arsoaval.

Société des Etablissements Decauville.

Planche 44.

Le groupe électrogène exposé par la maison Decauville comprenait un ensemble de deux dynamos identiques à courant continu de 420 kw. chacune, montées sur l'arbre d'une même machine à vapeur compound de 1 200 chevaux, tournant à la vitesse de 75 tours par minute, de la maison Crépelle et Garand.

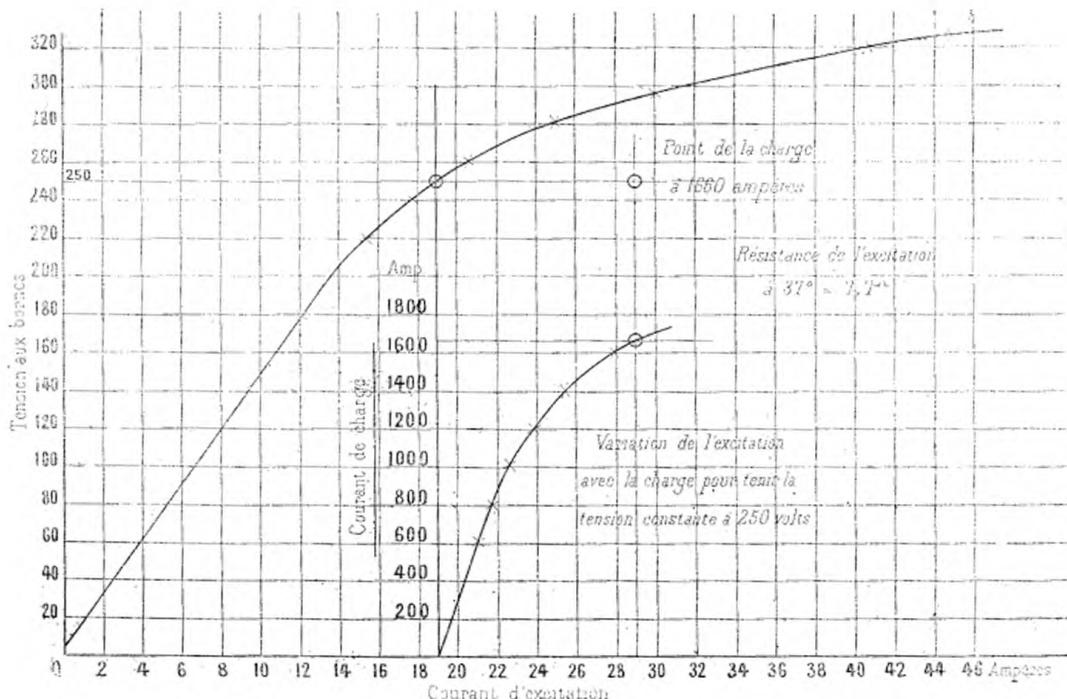


Fig. 61. — Caractéristique des dynamos Decauville.

Les induits des deux génératrices de ce groupe sont montés de part et d'autre du volant de la machine. Les tôles des noyaux, isolées entre elles à la gomme-laque, sont fixées sur un moyeu de fonte en deux pièces monté sur l'arbre et serrées entre deux flasques annulaires en acier. Les induits sont lisses et les enroulements, du type parallèle en tambour, sont constitués par 1 250 baguettes de câble laminé ayant une section rectangulaire de 45 m^2 , reliées au collecteur par des lamelles doubles de cuivre de 55 mm^2 . Le diamètre des tôles de l'induit est de $2^{m}823$, l'entrefer a $13^{m}5$.

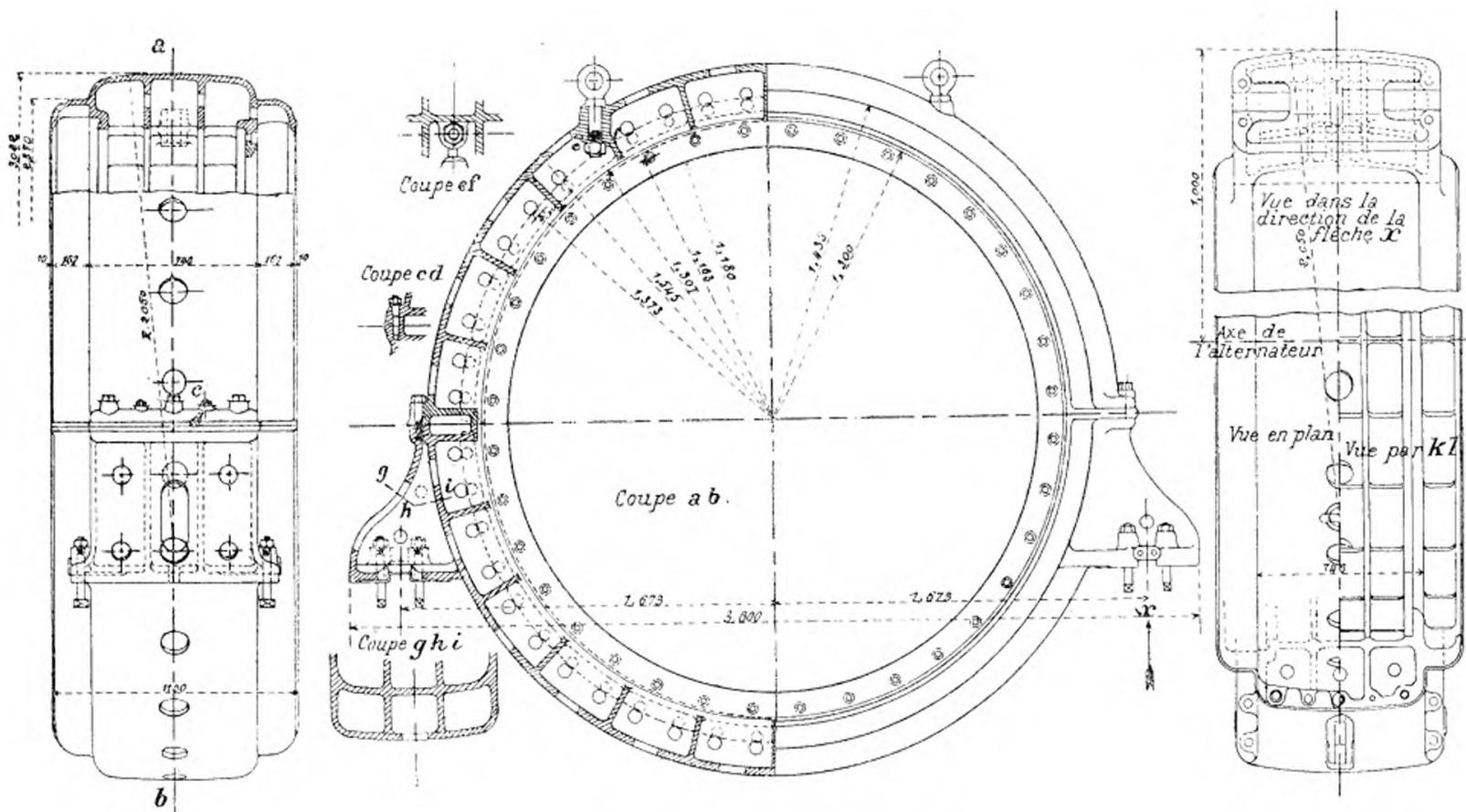


Fig. 62. — Induit de l'alternateur Boucherot.

Les collecteurs, en cuivre rouge, ont un diamètre de 2 m ; ils possèdent chacun 623 lames de 26 cm de longueur isolées au mica. Les balais sont en charbon et leur calage est fixe quelle que soit la charge.

Les pôles, au nombre de 10, sont en acier coulé : les noyaux inducteurs disposés sur une circonférence concentrique à l'induit, réunissent deux à deux les pièces polaires. Chaque bobine comporte 9 couches de 80 spires de fil de cuivre de $\frac{53}{10}$ de diamètre.

Les deux machines étaient montées en quantité à l'Exposition et elles débitaient un courant total de 3 200 a. à une tension variant entre 225 et 250 v. D'après les renseignements des constructeurs, leur rendement est de 94 0/0 à pleine charge et de 93 0/0 aux trois quarts de charge : l'échauffement d'aucune partie de la machine ne dépasse pas 33° après 9 heures de marche à pleine charge.

Maison Bréguet.

ALTERNATEUR COMPOUND TRIPHASÉ, SYSTÈME BOUCHEROT.

L'alternateur compound triphasé qu'exposait la Maison Bréguet, était accouplé à une machine à vapeur Delaunay-Belleville, du type pilon, à triple expansion, développant une puissance de 1 200 chevaux à la vitesse de 250 tours par minute ; la génératrice et son excitatrice étaient placées de part et d'autre de la machine à vapeur.

L'alternateur, qui peut débiter 220 a. par phase à la tension de 2200 v. et à la fréquence de 50 v., offre l'aspect d'un moteur à champ tournant de grandes dimensions. L'inducteur mobile et intérieur à l'induit (fig. 62) se compose d'un large volant en fonte, monté en porte-à-faux à l'une des extrémités de l'arbre de la machine à vapeur ; la jante de ce volant, réunie au moyeu par 6 rayons doubles, porte une couronne de tôles maintenues par des joues circulaires serrées par des boulons. Les tôles, serrées en 4 paquets par des canaux de ventilation, présentent 192 entailles demi-fermées servant à loger deux enroulements diphasés ayant chacun 24 pôles.

La carcasse en fonte de l'induit de l'alternateur repose par deux semelles sur le massif de fondation ; les quatre paquets de tôles de l'induit, correspondant aux quatre paquets de l'inducteur, sont maintenus par des boulons entre une nervure faisant partie de la carcasse en fonte et une couronne démontable en acier (fig. 63). Les enroulements,

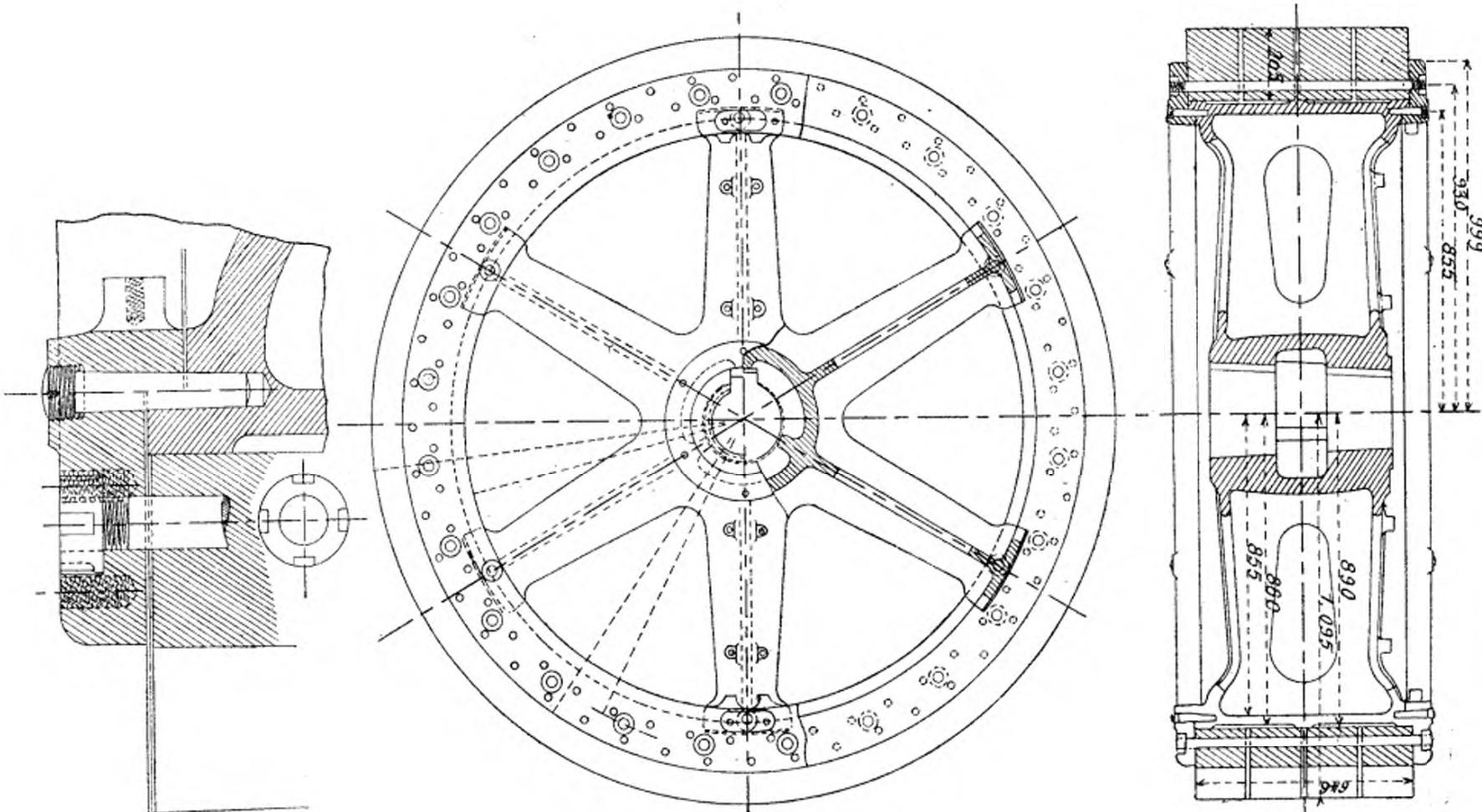


Fig. 63. — Inducteur de l'alternateur Boucherot.

logés dans 144 entailles demi-fermées comme celles de l'inducteur, sont montés en étoile.

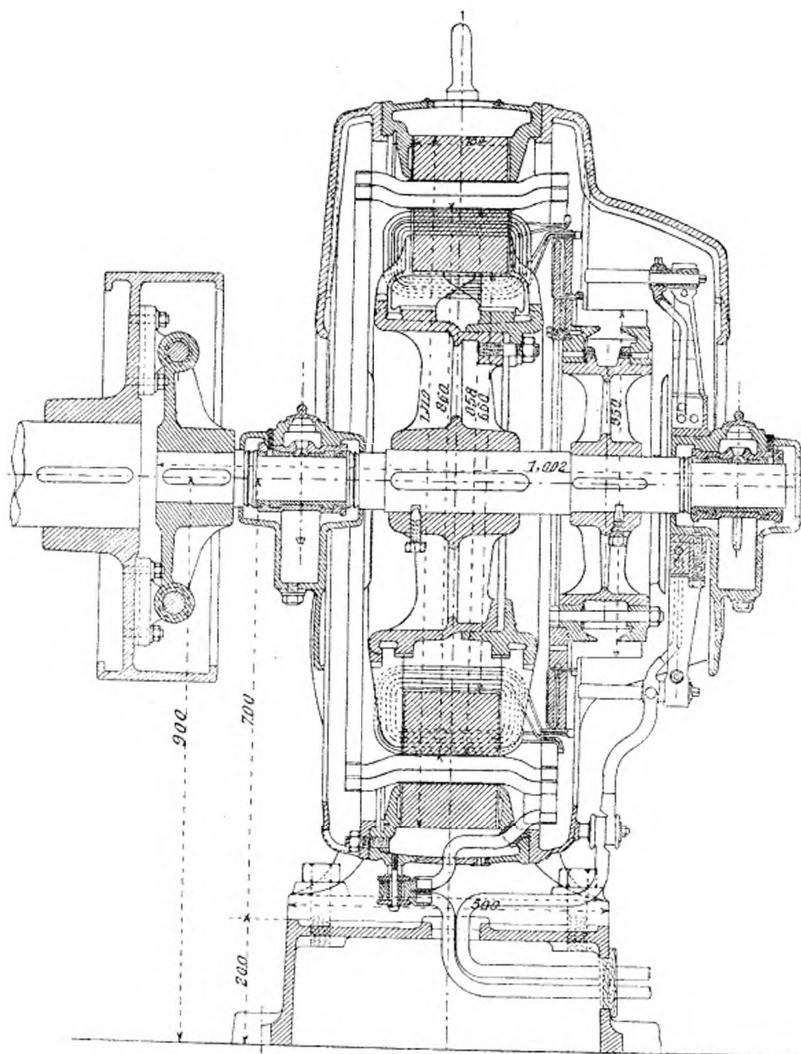


Fig. 64. — Excitatrice de l'alternateur Boucherot.

L'excitatrice de l'alternateur (fig. 64) dite *excitatrice sinusoïdale* est une machine spéciale pouvant donner à volonté du courant continu ou des courants diphasés. Elle se compose d'un stator de moteur à

champ tournant à l'intérieur duquel peut se mouvoir un anneau Gramme portant deux enroulements ; les sections de ces enroulements ont un nombre de spires variant de l'une à l'autre suivant une loi sinusoïdale et elles sont reliées de telle façon qu'une section du premier enroulement ayant $u \cos k\varphi$ spires est en série avec une section du

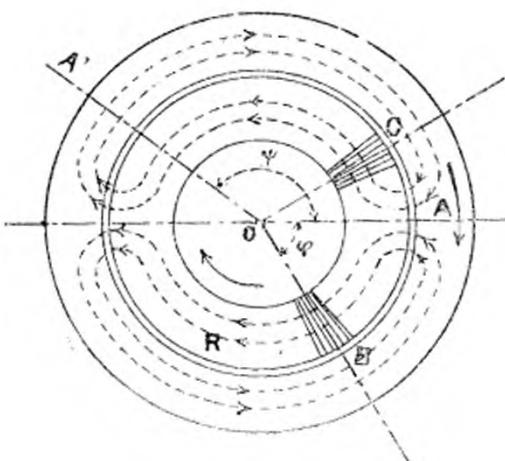


Fig. 65. — Principe de la dynamo à enroulements sinusoïdaux.

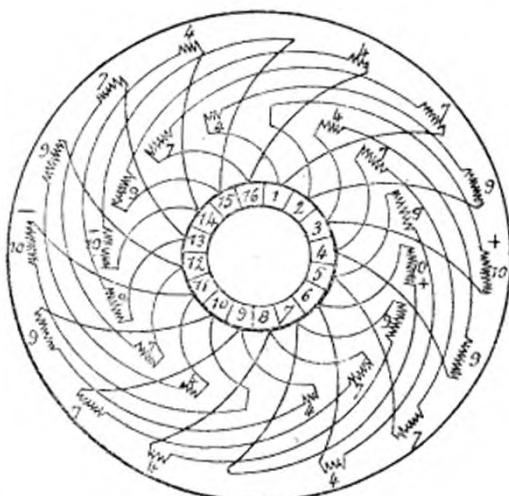


Fig. 66. — Enroulement d'induit pour excitatrice d'un alternateur simple.

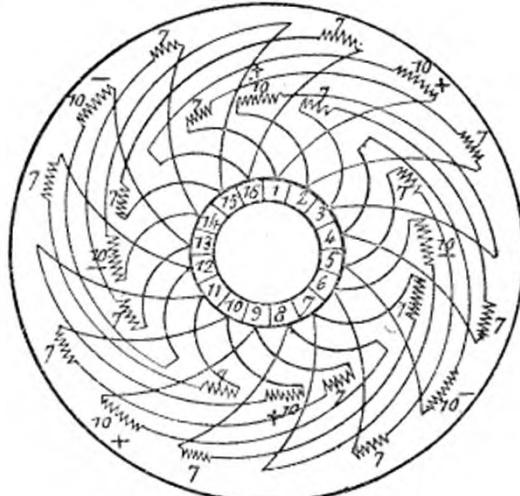


Fig. 67. — Enroulement d'induit pour excitatrice d'un alternateur polyphasé.

deuxième ayant $u \sin k\varphi$ spires (fig. 65, 66, 67). L'anneau ainsi constitué porte un collecteur ordinaire sur lequel frottent 4 rangées de balais placées à 90° l'une de l'autre : il est entraîné par l'arbre de la machine à vapeur au moyen d'un accouplement élastique.

Un calcul, trop long pour être reproduit ici, montre que suivant la vitesse relative de l'induit de l'excitatrice et du champ tournant où il

se déplace, on peut recueillir, soit du courant continu au moyen de deux balais diamétralement opposés, soit des courants diphasés au moyen des deux paires de balais : on obtient du courant continu si la vitesse de l'induit est dans un rapport simple, $1, 2, 3, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots$ avec celle du champ, du courant alternatif dans le cas contraire.

L'enroulement triphasé du stator dans lequel se meut l'induit de l'excitatrice est alimenté par le secondaire d'un transformateur particulier, dit *transformateur de compoundage* (fig. 68) : les primaires de ce transformateur sont intercalés sur les trois fils de ligne de l'alternateur et les secondaires sont montés en dérivation sur ces fils (fig. 69). L'intensité des courants qui produisent le champ tournant dépend ainsi du débit de l'alternateur, de la différence de potentiel à ses

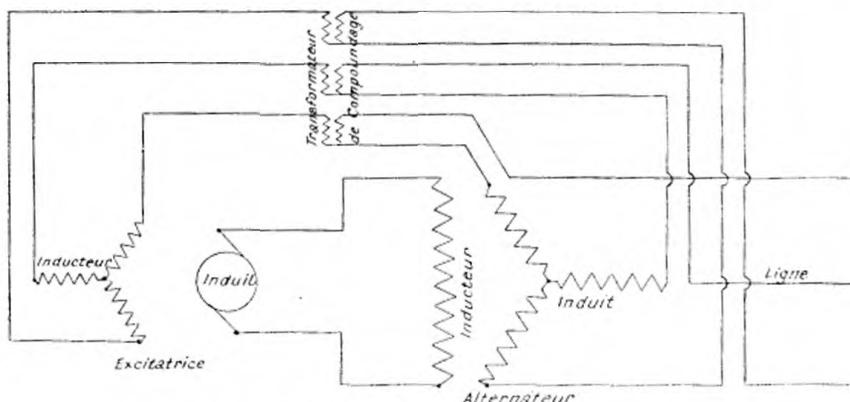


Fig. 69. — Connexion de l'excitatrice et de l'alternateur.

bornes et du décalage qui existe entre les courants et leur force électromotrice ; la force électromotrice développée dans l'induit de l'excitatrice et par suite le courant d'excitation de l'alternateur sont pour une même vitesse sensiblement proportionnels à ce champ tournant ; on peut donc concevoir que la force électromotrice aux bornes de l'alternateur demeure constante quels que soient les courants qu'il débite et le décalage entre ces courants et leur force électromotrice.

L'alternateur Boucherot peut fonctionner en génératrice *synchrone* ; on désigne ainsi le fonctionnement pour lequel le champ magnétique a la même vitesse que l'inducteur : on arrive à ce résultat en envoyant le courant continu produit par l'excitatrice dans un seul des enroulements diphasés de l'inducteur.

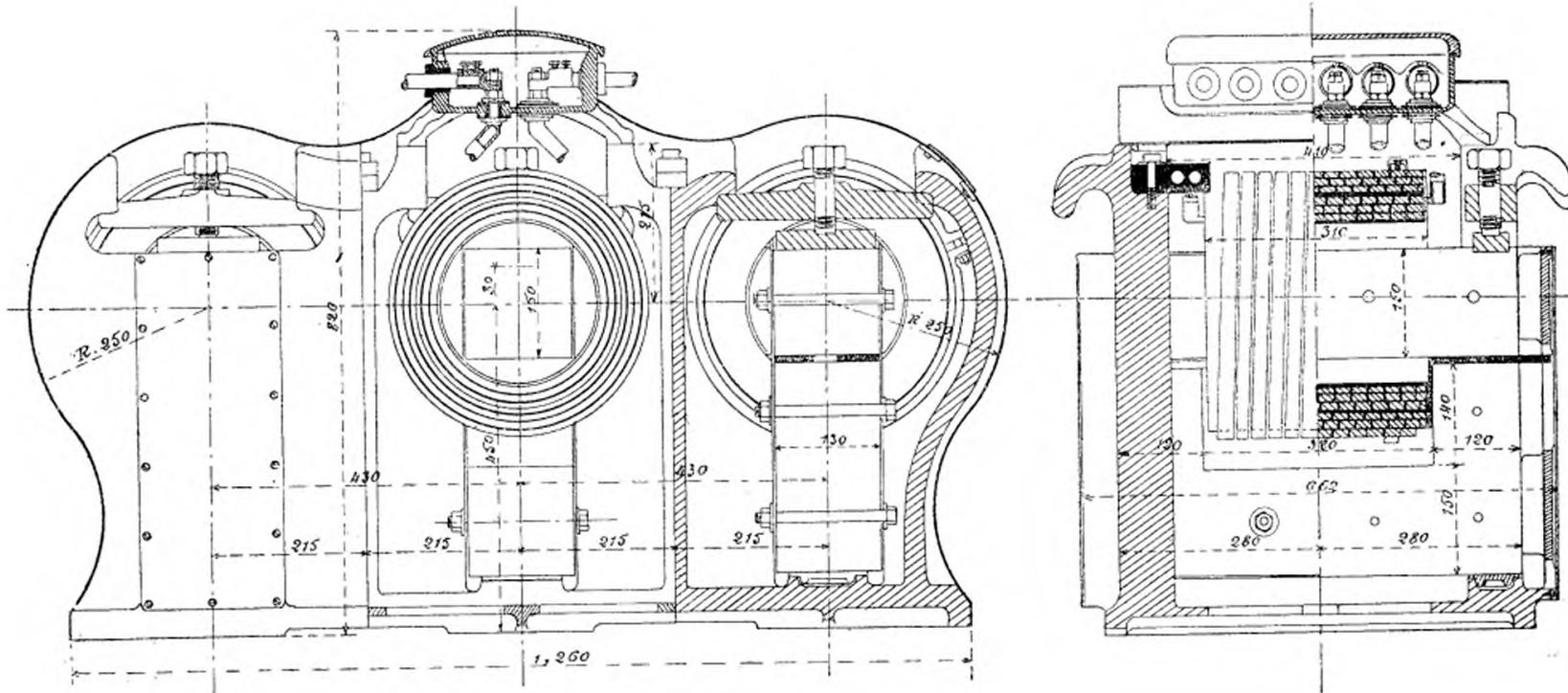


Fig. 68. — Transformateur de compoundage de l'alternateur Boucherot.

En envoyant dans deux enroulements les courants diphasés venant de l'excitatrice, on obtient un champ tournant à une vitesse différente des inducteurs : c'est le cas de la marche en *asynchrone*.

Enfin l'alternateur peut fonctionner en machine *panchrone*, sa charge est alors indépendante du glissement, et, par suite, des variations de vitesse dues aux irrégularités de marche de la machine à vapeur; il faut pour cela annuler les forces électromotrices développées dans l'inducteur de l'alternateur par le flux tournant dû à l'induit : on y parvient en introduisant dans son circuit des forces électromotrices en opposition avec les précédentes et produites soit par des bobines de self-induction, soit par des capacités, soit encore par une petite dynamo auxiliaire.

TURBO-MOTEURS DE LAVAL.

La Maison Bréguet a le monopole en France de la construction des turbines à vapeur de Laval ; elle a appliqué ces turbines à la construction de groupes électrogènes remarquables par leur simplicité de mécanisme et leur commodité de conduite : on pouvait voir à l'Exposition deux de ces groupes de 300 chevaux chacun. Dans ces machines, une seule turbine actionne deux dynamos à courant continu par l'intermédiaire d'un engrenage réducteur de vitesse et de joints élastiques type Raffard. Les deux dynamos sont placées de part et d'autre de la turbine de façon à équilibrer les efforts sur son axe. Cet arbre est flexible pour éviter les trépidations qui ne manqueraient pas de se produire à la vitesse que peuvent atteindre ces turbines, plus de 10 000 tours à la minute pour certains modèles.

Les deux dynamos sont du type cuirassé à 4 pôles dont 2 consécutifs ; les pôles sont creusés de profondes entailles dans le but de diminuer la réaction d'induit. L'enroulement inducteur est formé de 4 galettes de fil placées à raison de 2 sur chaque noyau. Le rhéostat d'excitation comporte 2 manettes commandant l'une une série de fortes résistances et l'autre une série de résistances intermédiaires entre les précédentes.

L'induit est à rainures demi-fermées ; les tôles, divisées en trois paquets par des canaux de ventilation, sont montées sur une étoile en fonte clavetée sur l'axe. L'enroulement, en tambour, est formé de barres de cuivre de 40 mm² à raison de 4 barres par rainure. Les balais, en charbon et distribués sur le collecteur en quatre rangées, sont mon-

tés dans des boîtes porte-balais d'un type spécial très légères pour parer aux vibrations qui résultent de la grande vitesse de la machine. Le collecteur a 270 mm de diamètre, 310 mm de long et comporte 120 lames.

Ce type de machines convient fort bien à une distribution à 3 fils. À l'Exposition les deux groupes fournissaient le courant au réseau de distribution du courant continu à 500 v.

MOTEURS ASYNCHRONES.

La maison Bréguet présentait encore une série de moteurs à champ tournant munis des dispositifs de démarrage Boucherot, qui permettent d'assurer à ces moteurs un couple en démarrage aussi fort que celui que l'on obtiendrait par l'emploi de résistances variables tout en

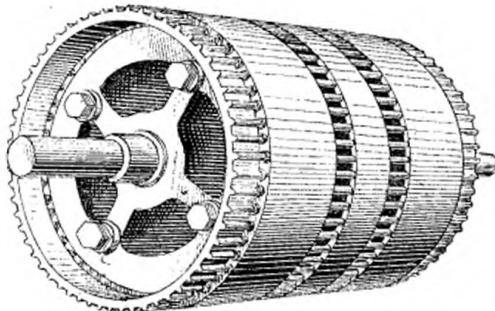


Fig. 70.

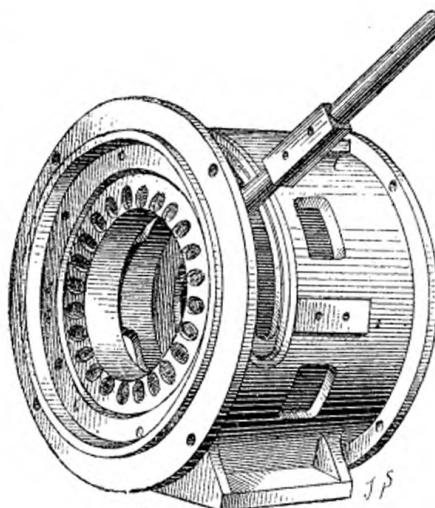


Fig. 71.

leur conservant la simplicité de construction de l'armature dite en cage d'écureuil

Dans l'un de ces dispositifs (type 2), les barres de la cage sont reliées d'une façon permanente en leur milieu par un cercle résistant de maillechort (fig. 70). L'inducteur (fig. 71) est formé de deux couronnes distinctes de bobines inducitrices ; l'une de ces couronnes est mobile autour de l'axe du moteur. Au démarrage, on décale d'une demi-période la partie mobile par rapport à la partie fixe : les courants sont alors de sens inverse dans les deux moitiés de la cage et ils se réunissent en quantité dans le cercle de maillechort. Le moteur démarre comme si l'on avait introduit une résistance dans son induit. Quand le démarrage

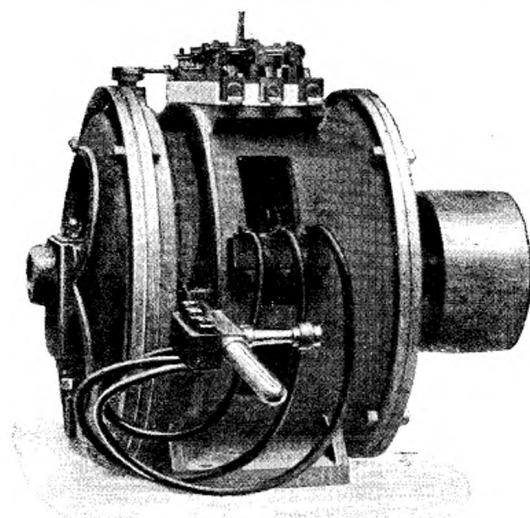


Fig. 72.

s'est effectué, on remet l'inducteur mobile dans la position pour laquelle les courants sont de même sens dans les deux moitiés de la cage

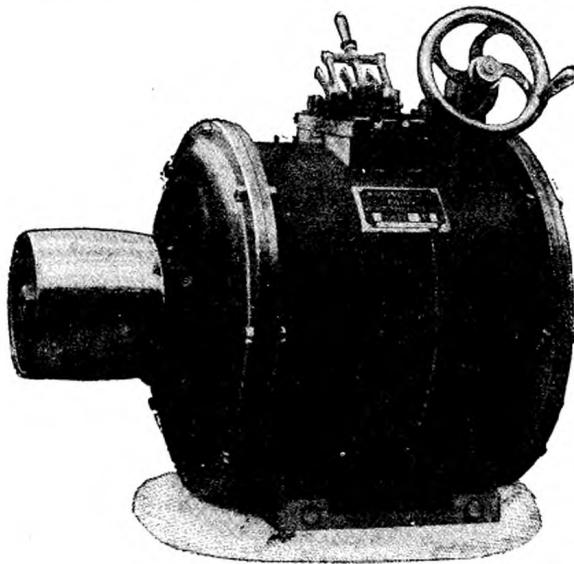


Fig. 73.

et celle-ci fonctionne à la façon ordinaire. Le décalage de l'inducteur mobile s'obtient par un levier pour les petits moteurs (fig. 72) par une

vis pour ceux dont la puissance dépasse 10 chevaux (fig. 73). Le même mécanisme manœuvre en même temps l'interrupteur à la marche et à l'arrêt.

Dans un second type (type γ), le stator est enroulé à la façon ordinaire, mais le rotor possède deux enroulements en cage d'écureuil et

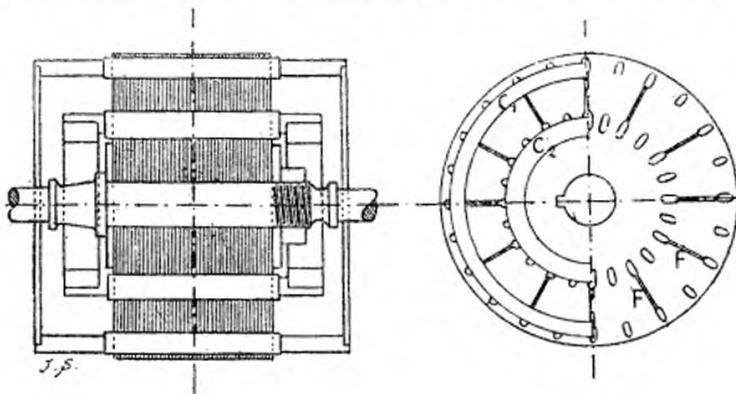


Fig. 74.

concentriques (fig. 74). Les barres de la cage extérieure sont réunies à leurs extrémités par des cercles résistants en ferro-nickel ou en maillechort, la cage intérieure est une cage ordinaire en cuivre. Au démar-

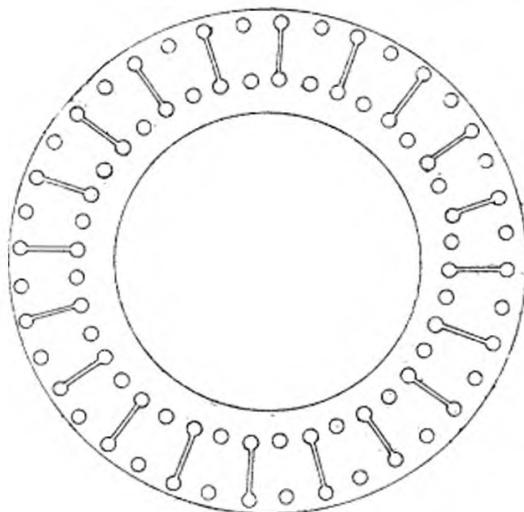


Fig. 75.

rage, le flux dans l'induit a une fréquence égale à celle des courants d'alimentation, il est presque complètement arrêté par la cage intérieure à faible résistance et forte self-induction, mais il traverse la cage extérieure, où l'intensité des courants induits est plus faible à cause de la plus grande résistance ohmique. C'est la cage extérieure qui

fonctionne seule dans de bonnes conditions pour le démarrage. A mesure que la vitesse augmente, la fréquence du flux diminue dans l'induit, la cage intérieure se laisse plus facilement traverser et le moteur fonctionne alors à la façon ordinaire. On facilite le passage du flux à travers la cage intérieure dans cette seconde partie du fonctionnement en pratiquant des fentes radiales dans les tôles de l'induit entre les deux cages (fig. 75).

La mise en marche des moteurs de ce dernier type est particulièrement simple puisqu'elle ne comporte que la manœuvre d'un interrupteur.

EXPOSITION ÉTRANGÈRE

Ateliers d'Oerlikon.

Les ateliers Oerlikon, près Zurich, étaient représentés à l'Exposition par des machines diverses : générateurs, moteurs, transformateurs, etc. Trois d'entre elles étaient particulièrement remarquables : deux génératrices à courants triphasés et un groupe transformateur de courants triphasés en courant continu.

GÉNÉRATRICES TRIPHASÉES

L'une de ces génératrices est une machine de 1 500 chevaux pouvant fournir 1 300 k. v. à. sous une tension de 5 500 v. avec un $\cos \varphi = 0,80$. (fig. 76). Elle peut encore donner un courant monophasé en produisant alors 900 kw. ($\cos \varphi = 1$) et en absorbant 1 300 chevaux. A l'Exposition, elle fonctionnait en monophasé à 2 200 v. et 50 ∞ . Elle était montée sur l'arbre d'une machine à vapeur horizontale compound, de la Société Escher Wyss de Zurich.

L'inducteur de cette machine (fig. 77) a un diamètre total de 5 m, il constitue le volant de la machine à vapeur. Les pôles, en tôle de fer, au nombre de 72, sont fixés à la périphérie du volant par un assemblage en queue d'aronde. Les bobines excitatrices enroulées sur des mandrins et mises en place après enroulement, peuvent supporter un courant de 200 a. L'excitatrice montée en porte-à-faux à une extrémité de l'arbre est une machine à anneau à 12 pôles.

L'induit de l'alternateur est supporté par un bâti en acier coulé de 6^m,20 de diamètre. Les bobines induites enroulées d'abord sur gabarit

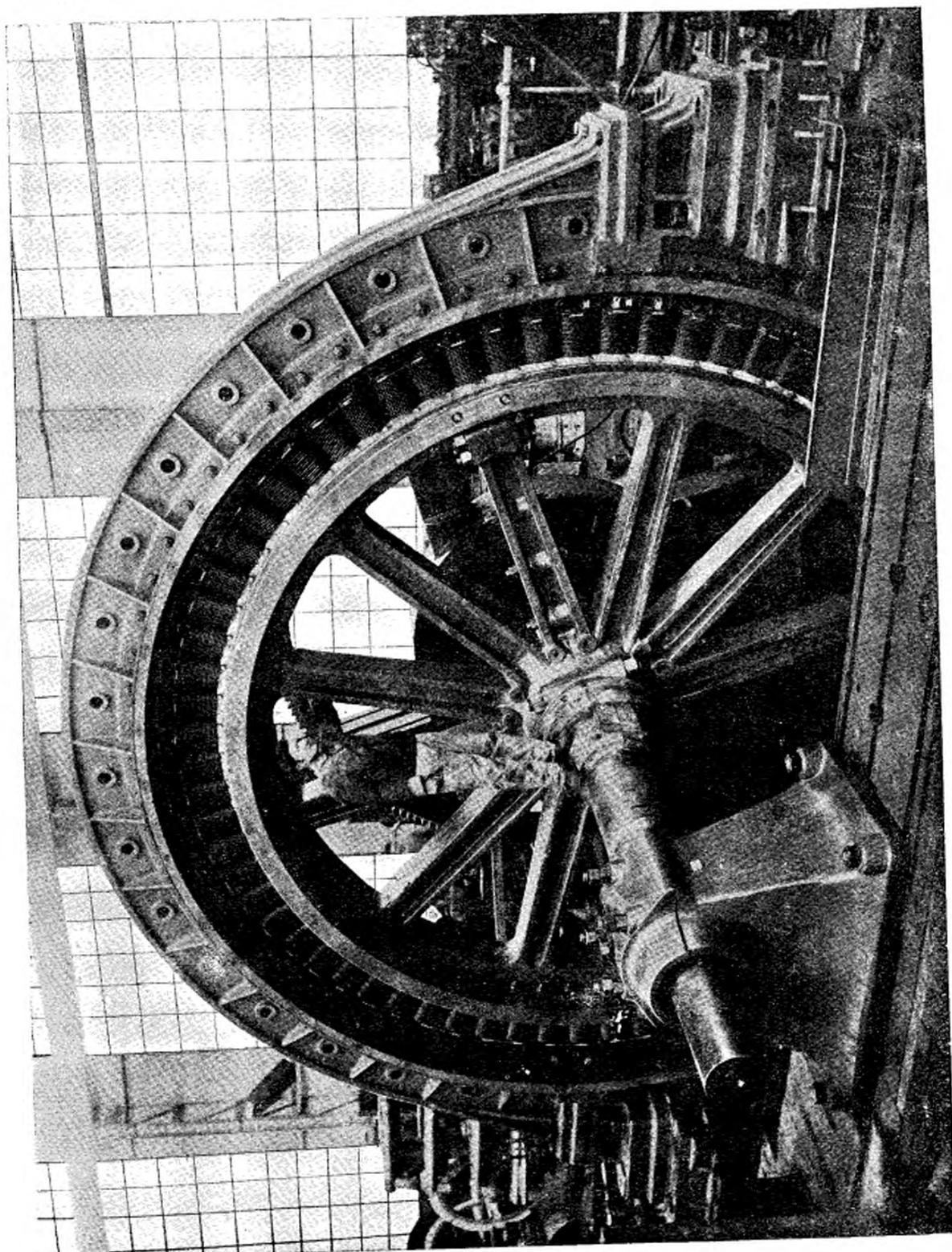


Fig. 76.

et isolées, sont logées dans des rainures. Elles y sont maintenues par des coins en matière isolante enfoués dans de petites entailles que pré-

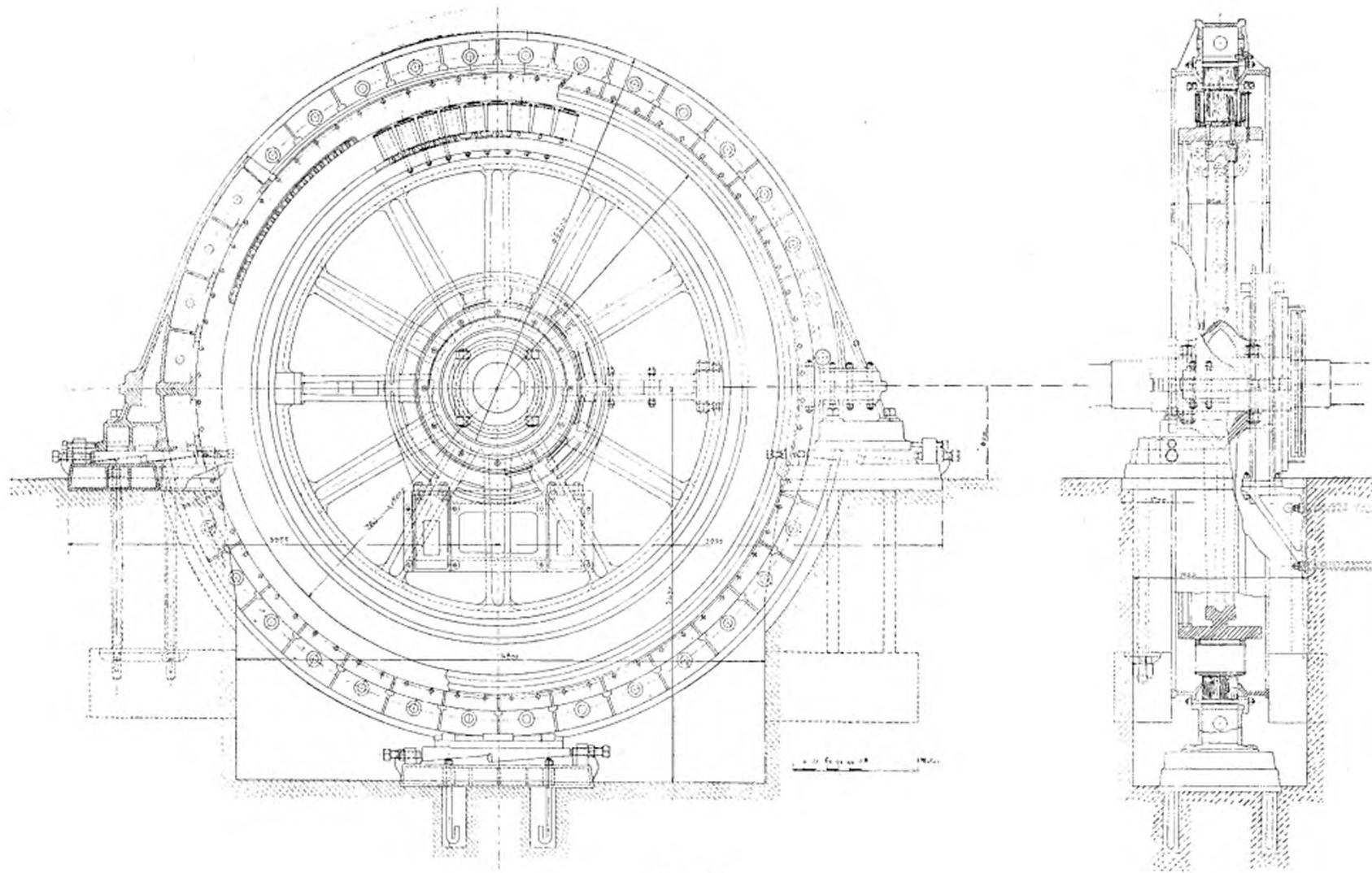


Fig. 71.

sentent les faces latérales des rainures. Le bâti de l'induit, coulé en deux pièces, repose, par son point le plus bas, sur un système de glissières et de plans inclinés qui permettent de le centrer exactement.

La partie mobile pèse 23.000 kg, la machine entière 63 000 kg. Le rendement pour un $\cos \varphi$ compris entre 0,7 et 0,8 est voisin de 93 %.

L'autre génératrice triphasée, d'une puissance de 800 chevaux, est du type à fer tournant, dit homopolaire (fig. 78, 79 et 80) ; tous les circuits sont fixes. La partie tournante, en fonte, porte 2 couronnes de

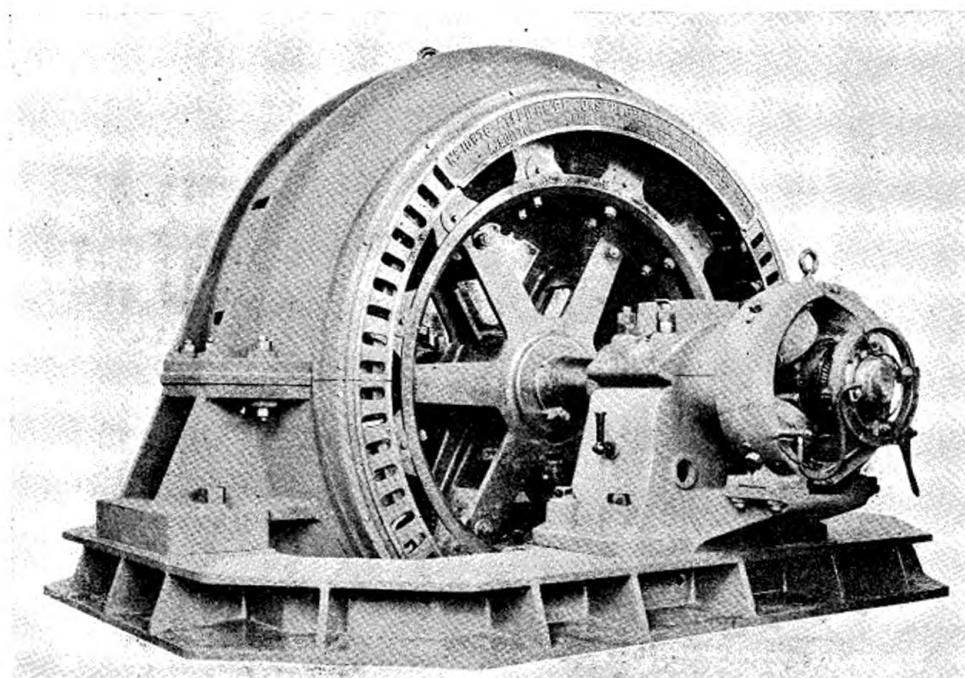


Fig. 78.

6 pôles placés 2 par 2 sur une même génératrice. Les pièces polaires sont composées de tôles et fixées sur le noyau central par un assemblage à queue d'aronde. La bobine excitatrice unique, placée entre ces deux couronnes de pôles, est constituée par une lame de cuivre enroulée en spirale et fixée au bâti de l'induit. Les couches successives sont isolées à l'amiante.

L'induit est formé de 3 couronnes de tôles placées de part et d'autre de la bobine excitatrice. Les bobines induites d'abord enroulées sur mandrin et entourées d'un tube en micanite sont fixées dans les en-

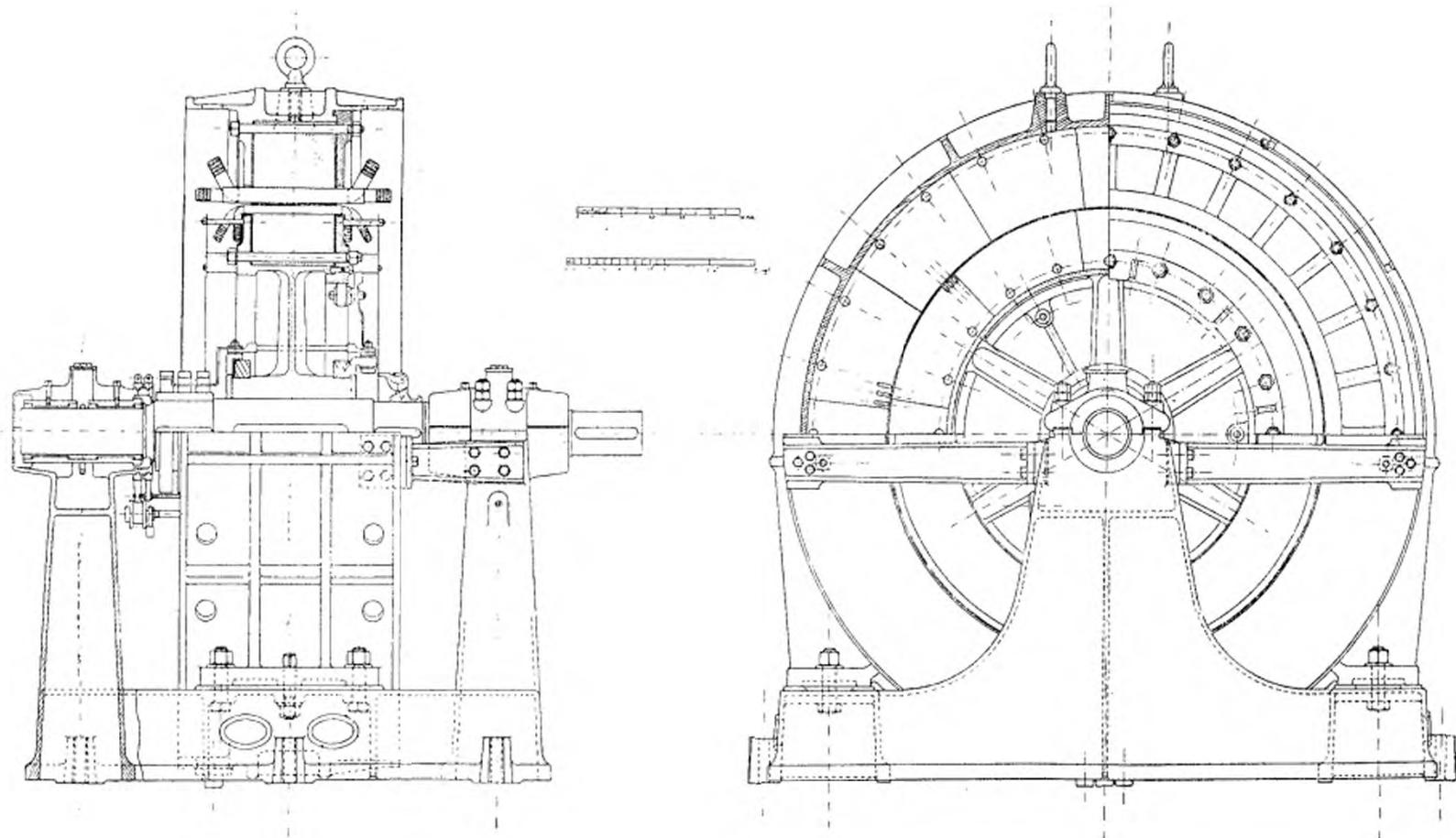


Fig. 79.

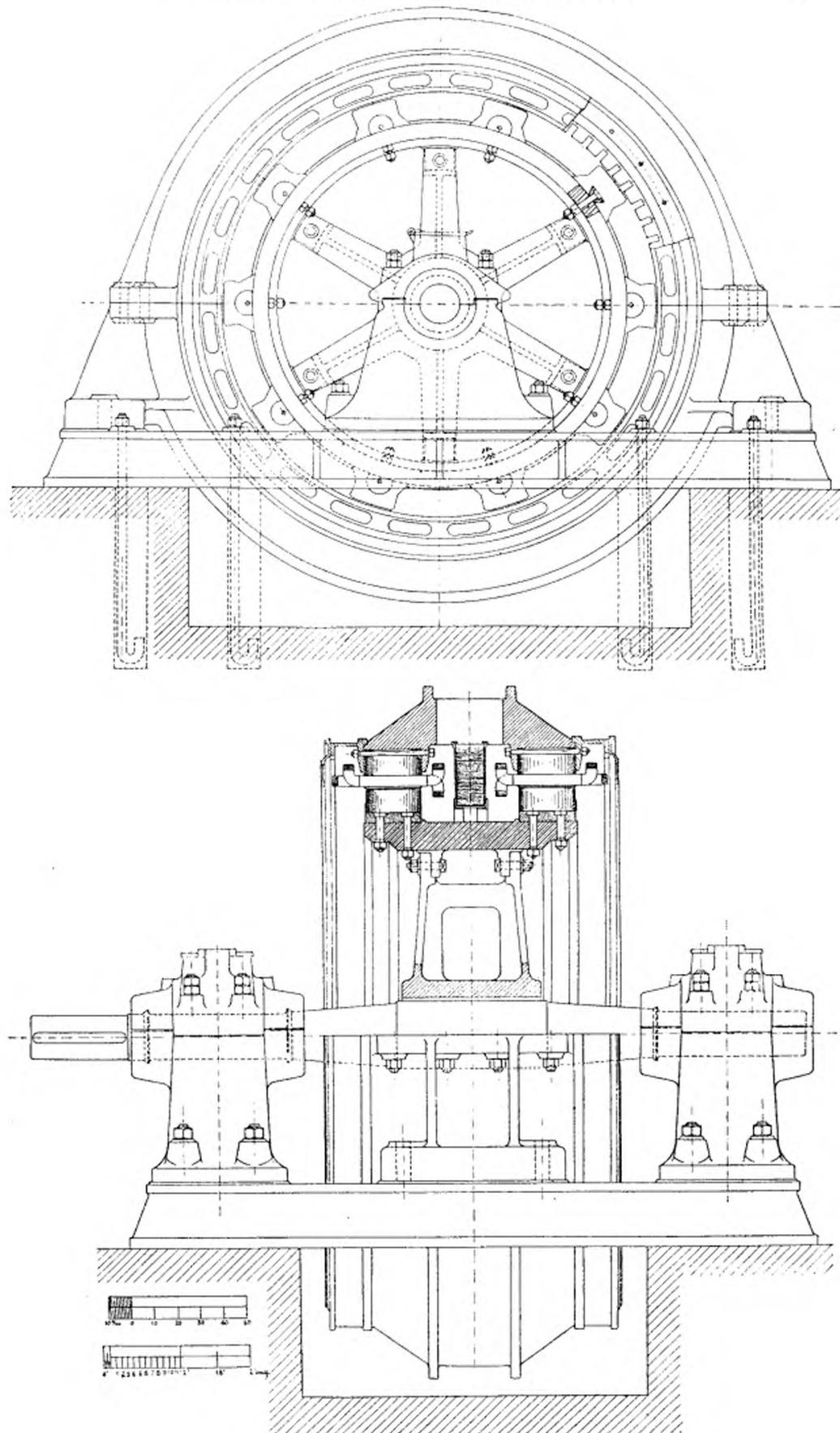


Fig. 80.

tailles au moyen de coins en matière isolante, chassés dans des rainures latérales.

L'excitatrice est une machine à 4 pôles montée en porte-à-faux sur l'arbre. Le courant d'excitation est de 20 a.

A la vitesse de 250 tours par minute, correspondant à 50 périodes, cet alternateur peut débiter 46 à 50 a., sous 7 500 v. avec un $\cos \varphi$ de 0,8.

GROUPE TRANSFORMATEUR.

Le groupe transformateur se compose d'un moteur asynchrone triphasé de 300 chevaux entraînant par un accouplement élastique un générateur à courant continu absolument indépendant du courant triphasé.

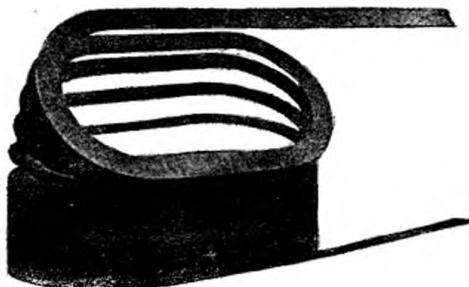


Fig. 81.

Les enroulements inducteurs et induits du moteur sont entièrement noyés dans le fer. Les trous qui les contiennent sont percés à 1 mm de la périphérie. L'isolation des fils dans les trous est obtenue avec des tubes en micanite essayés au double de la tension pour laquelle ils ont été construits.

Le bobinage de l'induit est formé de plusieurs conducteurs en cuivre nus, mis en parallèle, dont on a réduit au minimum le nombre des soudures. L'induit est muni de 3 bagues permettant d'introduire une résistance au démarrage. Après le démarrage on met l'induit en court-circuit, on peut alors soulever les balais qui frottent sur les bagues.

L'enroulement de l'inducteur n'offre rien de particulier. Le diamètre d'alésage du moteur est de 1^m,50, l'entrefer est de 1^{mm},5. Au montage on a légèrement excentré l'induit vers le haut, de façon à équilibrer en partie son poids par l'attraction magnétique. Par ce dispositif, l'induit tend à se centrer par l'usure des coussinets.

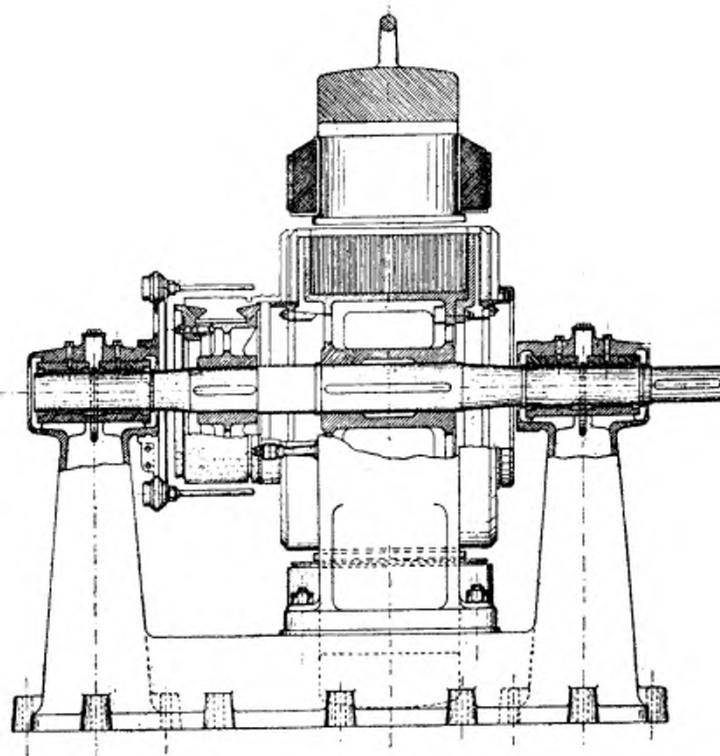
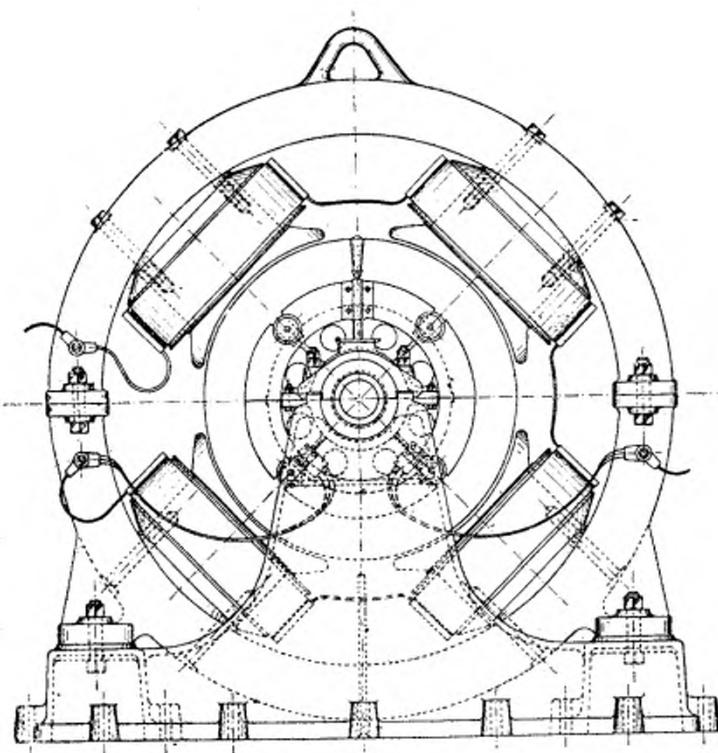


Fig. 82.

La génératrice à courant continu entraînée par le moteur précédent est une machine à 4 pôles (fig. 82) en acier coulé, à section circu-

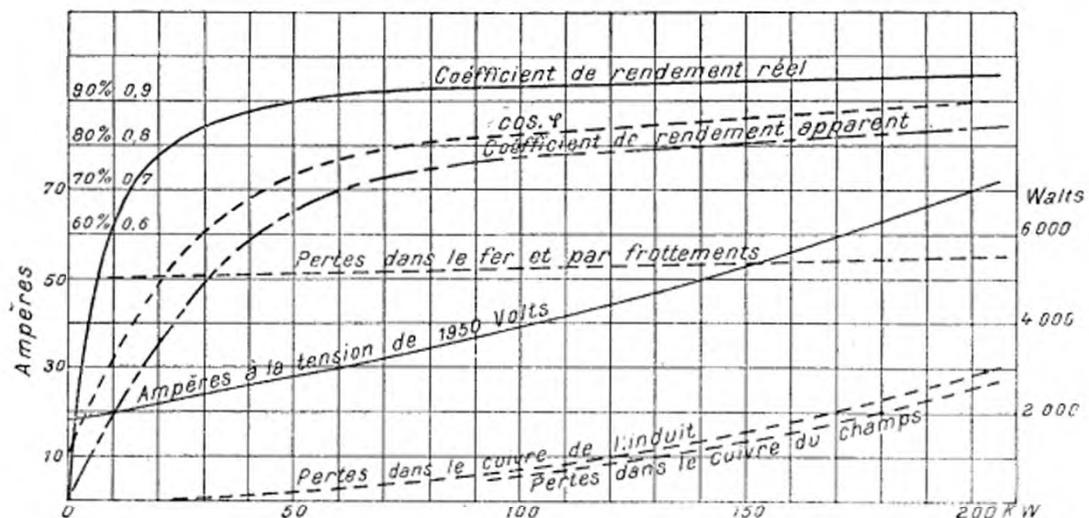


Fig. 83. — Moteur à courant triphasé de 300 chevaux, type 3071, 4.960 volts; 375 tours, 50 périodes par seconde.

laire. L'induit, en tambour, possède un enroulement ondulé comme la plupart des machines sortant des ateliers d'Oerlikon.

A la vitesse de 375 tours, le moteur absorbe 110 a. sous 1950 v. et

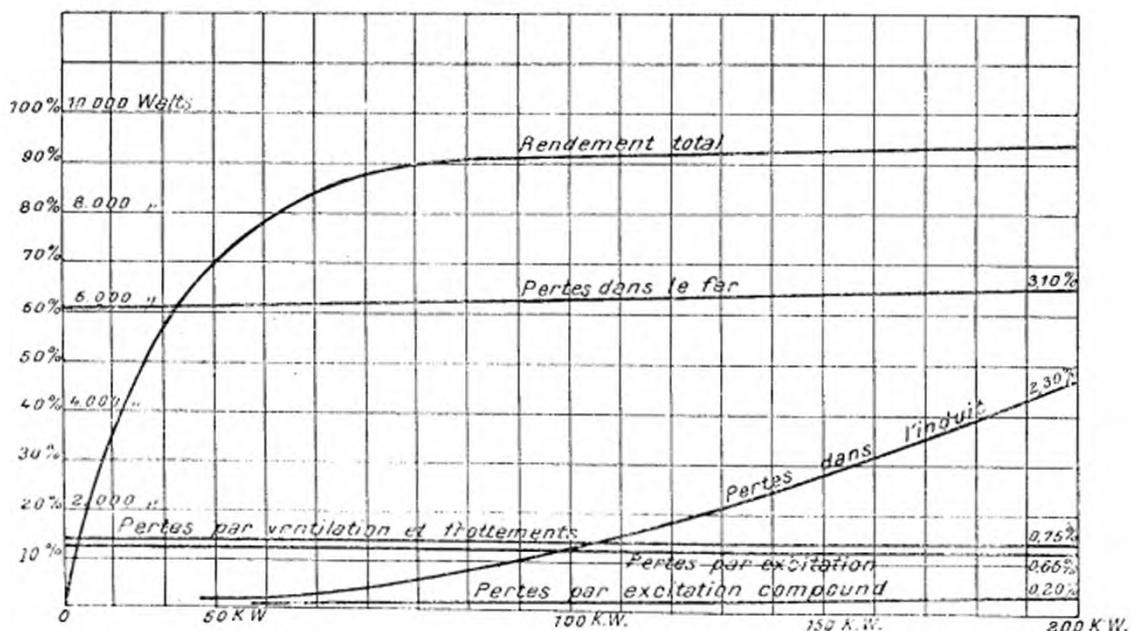


Fig. 84. — Coefficients de rendement et pertes du générateur à courant continu types NNXIV, 350 volts, 350 ampères, 375 tours.

le générateur donne un courant continu de 360 a. sous 350 v. Le rendement de l'ensemble est environ de 0,920/0 (fig. 83 et 84).

Maison Brown, Boveri et C^{ie}, de Baden.

Cette maison avait exposé plusieurs moteurs et plusieurs génératrices, en particulier deux génératrices à courants triphasés, l'une de 1 500 kw située dans la section suisse, l'autre de 250 kw dans la section russe.

ALTERNATEUR DE 1 500 kw.

Cette génératrice est du type volant, l'inducteur est mobile et l'induit est fixe, extérieur à l'inducteur ; à la vitesse de 83,5 tours par minute 50 périodes, elle peut développer une puissance de 1 500 kw sous

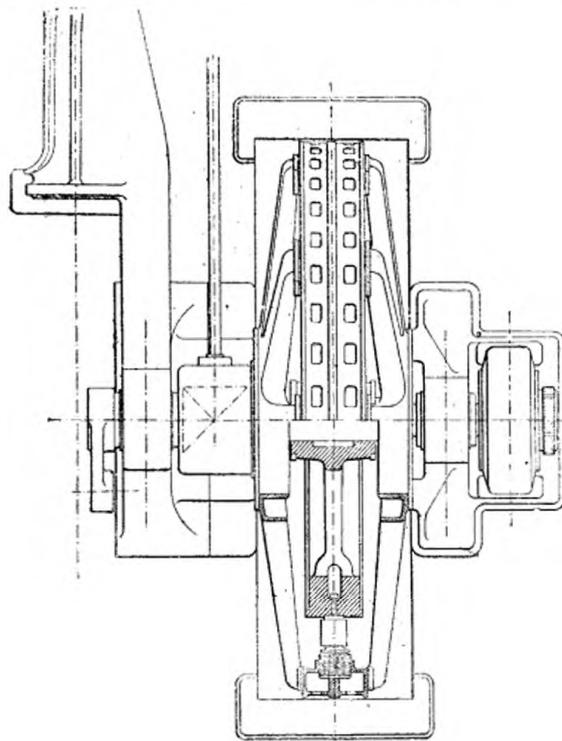


Fig. 85.

6 000 volts dans un circuit dont le $\cos \varphi$ est de 0,80. Elle était accouplée directement à une machine à vapeur horizontale Sulzer à triple expansion.

Les bobines excitatrices, au nombre de 72, sont formées d'une bande de cuivre nu enroulé sur champ sur un noyau cylindrique d'acier. Les spires successives sont isolées les unes des autres, leur surface extérieure

est simplement vernie. Les noyaux sont boulonnés sur une jante dont la section affecte la forme d'un fer à U, la concavité du fer étant tournée vers l'axe de la jante les noyaux portent les pièces polaires qui ont une forme rectangulaire (fig. 86).

La carcasse de l'armature est portée par deux séries de bras placés de

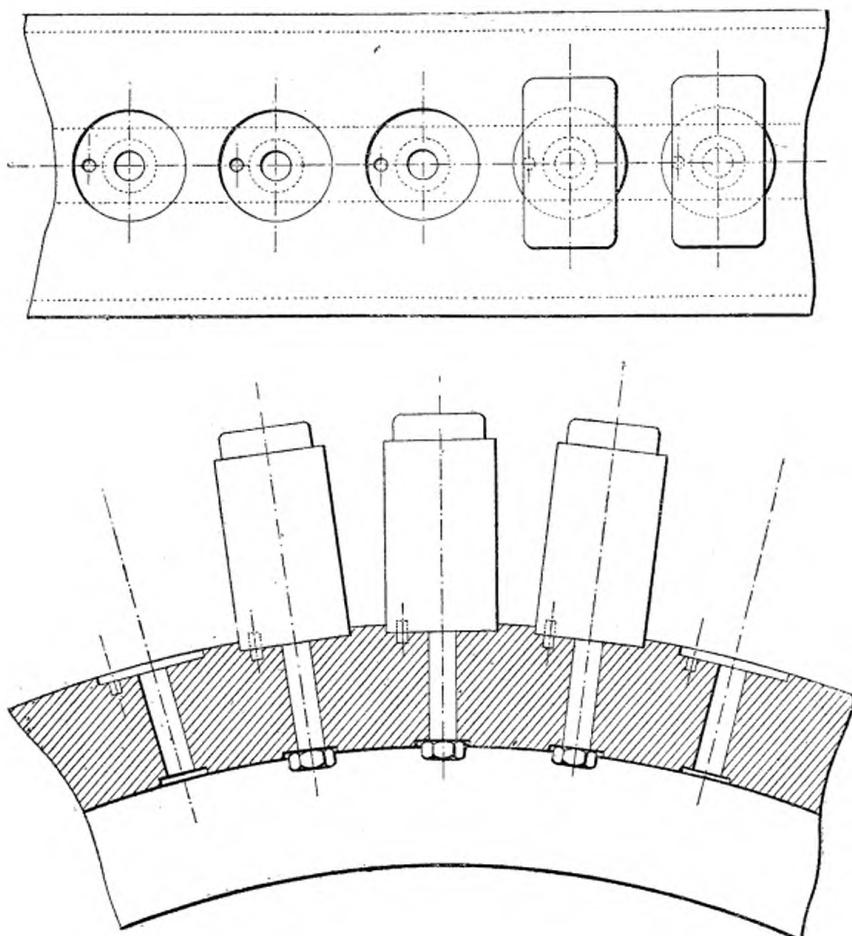


Fig. 86.

part et d'autre de l'inducteur (fig. 85), ces bras rayonnent autour de deux anneaux porteurs tournés sur l'axe d'alésage des paliers de l'alternateur, l'armature peut tourner autour de ces anneaux. En fonctionnement normal, l'armature est calée par des vis de butée et des verrous que l'on retire quand on veut visiter l'induit, on peut alors le faire tourner en se servant du vireur du volant. Le centrage de l'armature est ainsi

très bien fait, on n'a plus à se préoccuper des légers tassements qui peuvent se produire dans les fondations. Les tôles de l'induit sont serrées entre deux flasques au moyen de deux rangées de boulons, l'une extérieure à ces tôles, l'autre les traversant. L'enroulement induit est logé dans des trous, il est séparé des tôles par des tubes isolants sans joint.

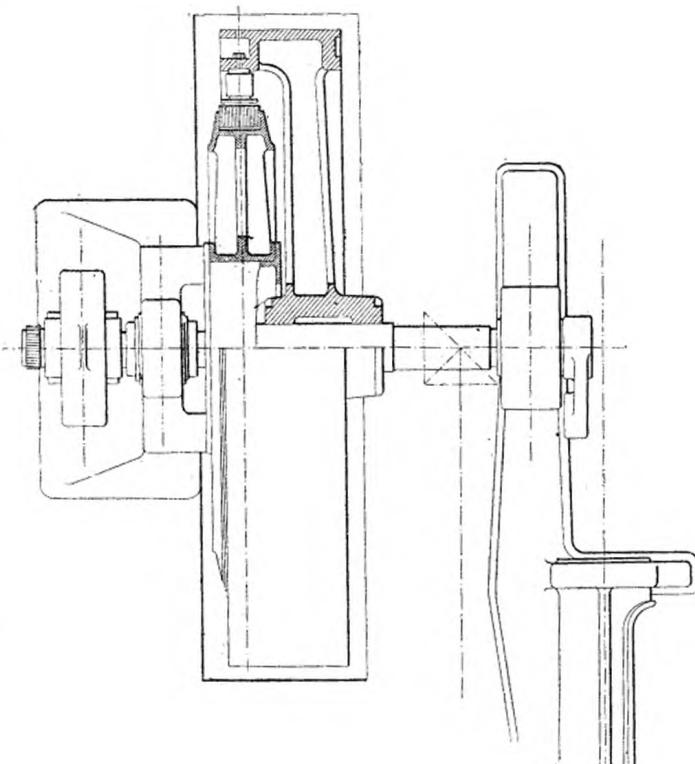


Fig. 87.

L'excitation des inducteurs était assurée à l'Exposition par une dynamo à quatre pôles de 30 chevaux accouplée directement à une machine à vapeur spéciale.

ALTERNATEUR DE 250 kw.

La génératrice de 250 kw. était accouplée à un moteur de la maison Bromley de Moscou. Elle peut donner des courants triphasés à la tension de 190 v. et à la fréquence 40 périodes.

Cette machine est encore du type volant à inducteur mobile, mais elle présente une disposition particulière employée par la maison Brown-Boveri pour les machines de moyenne puissance : l'armature fixe est placée au centre du système inducteur et les pôles radiaux portés par le volant sont dirigés vers le centre de l'armature ; ils sont intérieurs à la jante dont la surface extérieure présente ainsi l'aspect d'un volant ordinaire (fig. 88). Les rayons qui maintiennent la jante sont désaxés par rapport à l'armature (fig. 87).

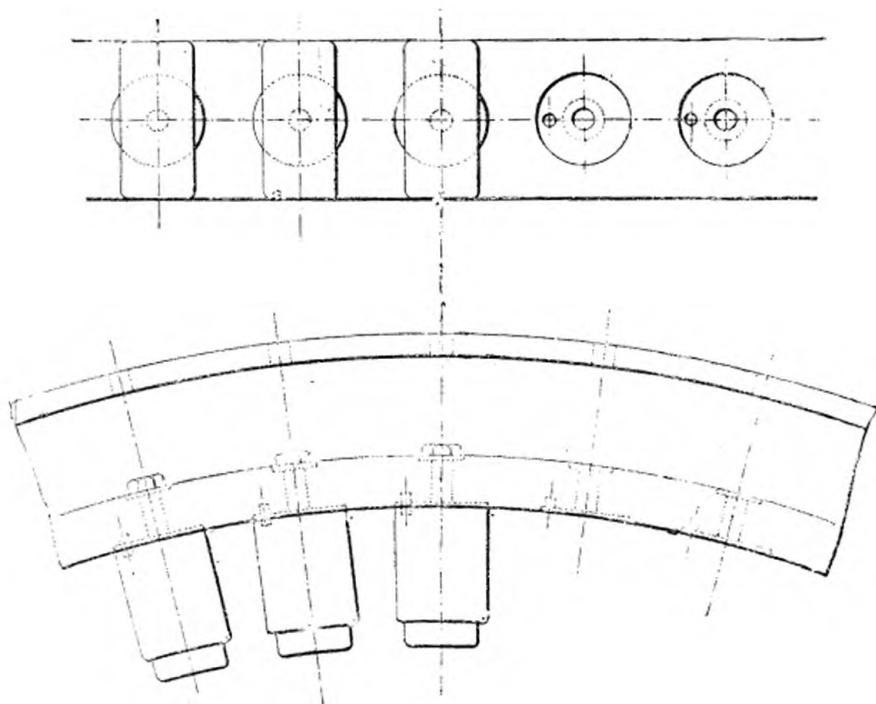


Fig. 88.

L'armature venue de fonte en deux parties est portée par deux demi-anneaux en fonte dont l'inférieur est relié, à poste, fixe au palier voisin. Le demi-anneau supérieur peut coulisser sur ce palier de façon à permettre de dégager hors du volant la moitié supérieure de l'armature.

Les fixations des tôles de l'armature, celle des pôles inducteurs et les enroulements sont les mêmes que pour la machine de 1 500 kw.

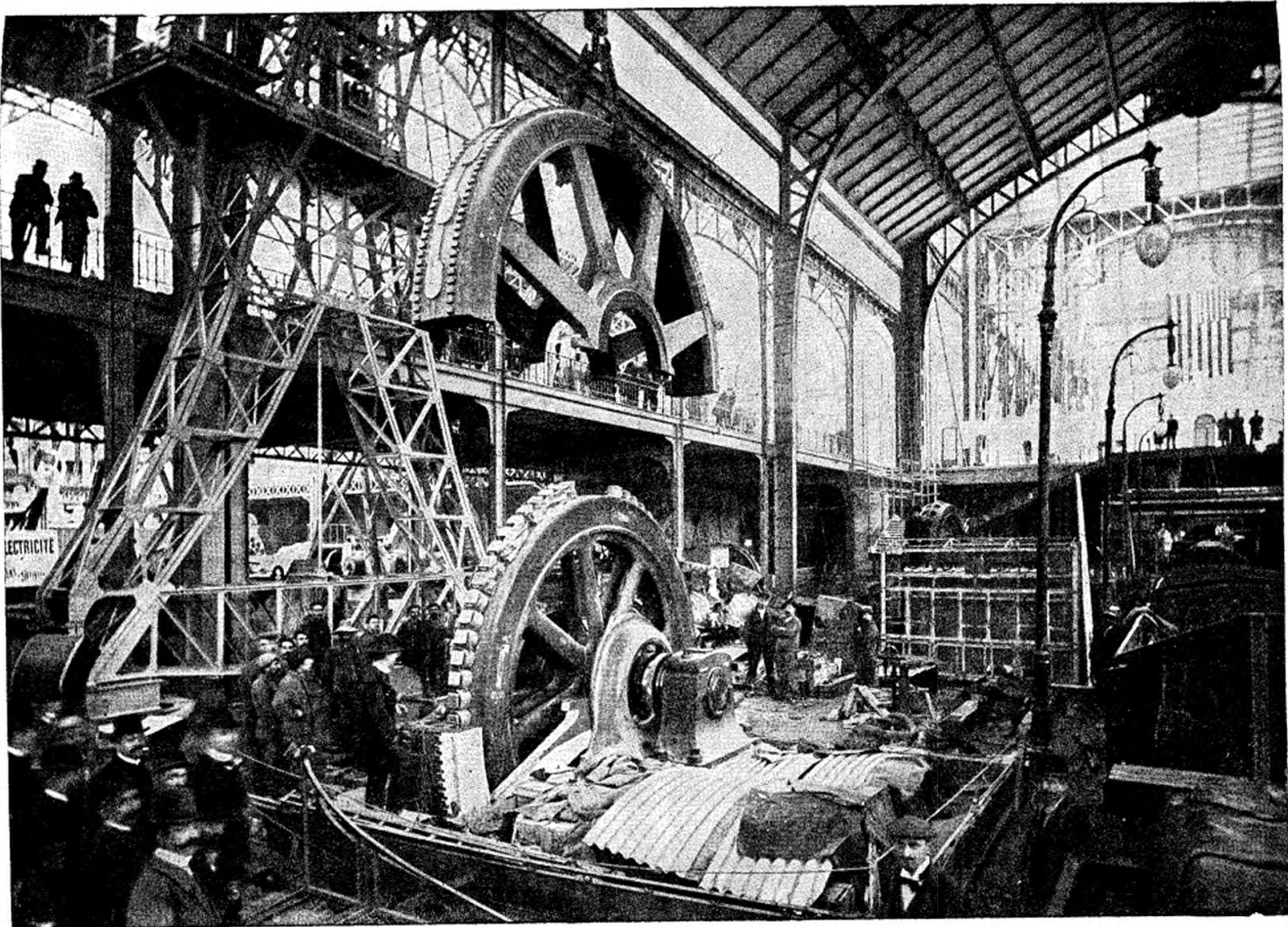


Fig. 89. — Génératrice à courants triphasés.

Compagnie internationale d'électricité de Liège

La génératrice à courants triphasés exposée par cette compagnie

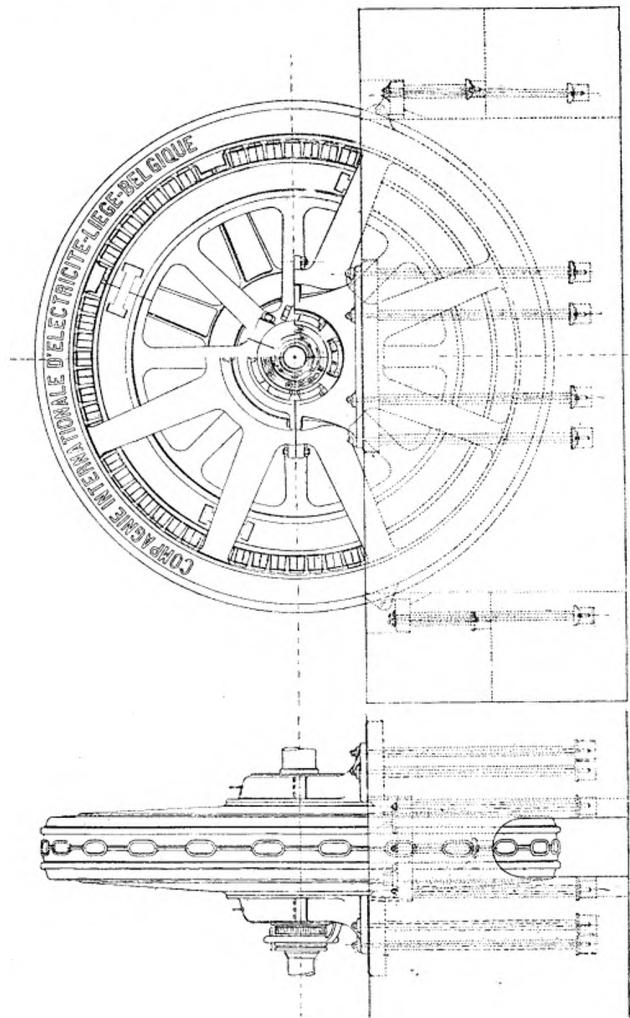


Fig. 90.

(fig. 89) était actionnée à l'Exposition par une machine à vapeur horizontale de 1 000 chevaux, de la maison Van den Kerchove, à Gand.

L'alternateur de ce groupe est du type volant ; sur l'arbre de la machine est calée une grande roue à huit rayons dont la jante porte 72 pôles en acier coulé, le diamètre de la partie tournante est de 5^m,50 (fig. 90 et 91). L'enroulement inducteur est formé de fils de cuivre à section rectangulaire.

Les tôles de l'induit, isolées par une couche d'émail, sont divisées en paquets laissant entre eux des canaux de ventilation et montés dans

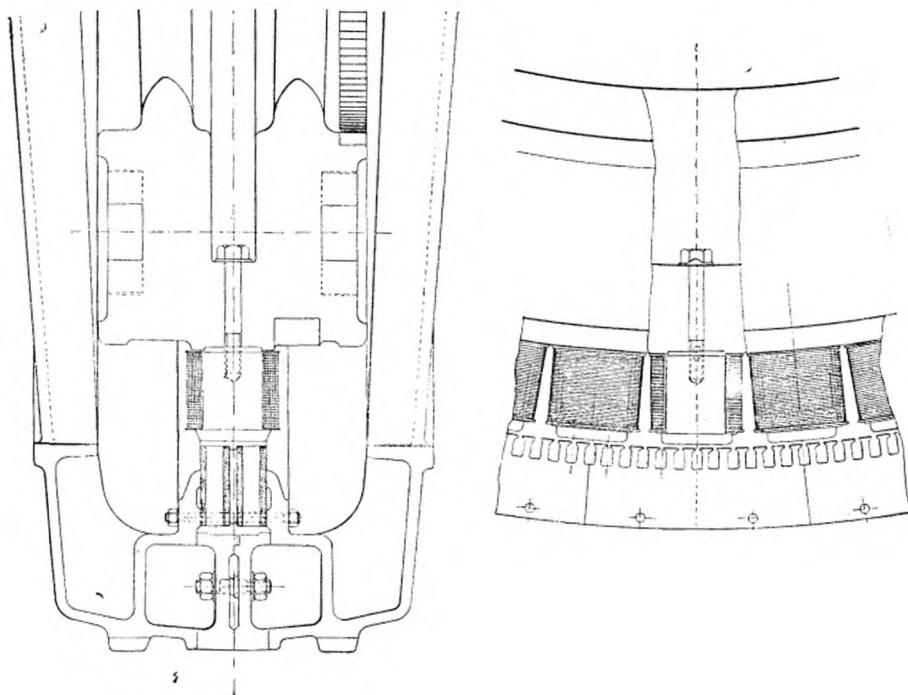


Fig. 91.

une carcasse en fonte. L'ensemble de l'induit est mobile sur des *cousinets* centrés sur l'axe de la machine. L'enroulement est logé dans des entailles demi-fermées, dont il est séparé par des tubes isolants : les trois phases montées en étoile comportent chacune 72 bobines.

Le courant d'excitation est fourni à la tension de 110 volts par une dynamo de 23 kw. montée sur l'arbre même de l'alternateur, et dont la culasse est venue de fonte avec les bras de l'induit de l'alternateur ; cette disposition diminue l'encombrement mais rend plus difficiles les

démontages. A la vitesse de 83,3 tours par minute, correspondant à 50 périodes, la machine peut fournir 260 a. par phase à la tension de 2 200 volts.

Compagnie de l'Industrie électrique de Genève.

La Compagnie de l'Industrie électrique de Genève, avait exposé un certain nombre de machines et d'appareils spéciaux au système de distribution à courant continu à intensité constante, dit système en série. On connaît le principe de ce genre de distribution. Il consiste à maintenir sur la ligne un courant constant et une différence de potentiel variable selon le nombre d'appareils placés sur le circuit. Les génératrices sont montées en série et mises en circuit au fur et à mesure des besoins. Pour diminuer leur nombre, tout en conservant un haut potentiel à la distribution, on a intérêt à faire donner à chacune d'elles le plus haut voltage

possible. A l'heure actuelle, la Compagnie de l'Industrie électrique fournit pour ce genre d'applications des machines pouvant donner jusqu'à 3 500 v. par unité.

Ces génératrices sont des machines Thury, à six pôles, l'excitation se fait séparément ou en série dans le cas de très hautes tensions. Les enroulements inducteurs en forme de larges bobines aplatis leur donnent un aspect caractéristique (fig. 92). L'induit est enroulé en

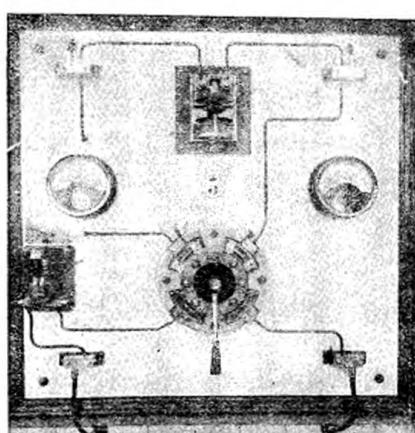


Fig. 92.

tambour. Les balais sont en charbon et les porte-balais sont fixés à un disque en porcelaine. Les machines sont soigneusement isolées du sol au moyen d'isolateurs en porcelaine ; l'accouplement avec le moteur, machine à vapeur ou turbine, se fait ordinairement par un joint élastique Raffard.

Ce système de distribution a nécessité la création d'appareils spéciaux de manœuvre et de sécurité ; le seul appareil de manœuvre est l'interrupteur de court-circuit (fig. 92), qui est du même modèle pour les génératrices ou les moteurs.

Il permet de mettre la machine en court-circuit sur elle-même sans interrompre le courant de ligne. Pour les moteurs importants, cet interrupteur est accompagné d'un pare-étincelles destiné à faire éclater entre des blocs de charbon facilement remplaçables l'étincelle qui se produit au moment de la mise en circuit, par suite de la self du moteur (fig. 92).

Comme appareils de sécurité, citons le « by-pass » (fig. 92) permettant par un déclenchement automatique de mettre en court-circuit une portion de ligne qui absorberait une tension exagérée ; le « déclencheur de vitesse » à force centrifuge, qui agit dans le cas d'emballement d'un moteur (fig. 92) ; enfin le « déclencheur par inversion » (fig. 93) qui s'emploie pour les génératrices afin d'éviter que leur sens de rotation s'inverse par suite d'un accident au moteur ou au moment de l'arrêt. Ces deux derniers appareils sont montés sur l'arbre de la machine à protéger, leur fonctionnement met la génératrice ou le moteur en court-circuit.

Le réglage de l'intensité dans les génératrices et celui de la vitesse dans les moteurs est obtenu ordinairement au moyen d'appareils automatiques. Pour les génératrices, le réglage de l'intensité se fait soit à vitesse constante, par la variation du champ ou par le décalage des balais, ou encore par la réunion de ces deux procédés, soit par un réglage de la vitesse, simultanément sur l'ensemble des machines ou séparément sur chacune d'elles. Dans les moteurs, le réglage automatique de la vitesse s'obtient par le shuntage des inducteurs, seul ou combiné avec le décalage des balais, ou enfin pour les petits moteurs, par une batterie d'accumulateurs mise en dérivation sur les bornes.

Società exercizio Bacini de Gênes.

La dynamo à courant continu exposée par cette maison était accouplée à une machine à vapeur de 800 chevaux, type Pilon, à quadruple expansion, sortant des ateliers Franco Tosi à Legnano.

Le système inducteur de cette machine est formé d'une carcasse en

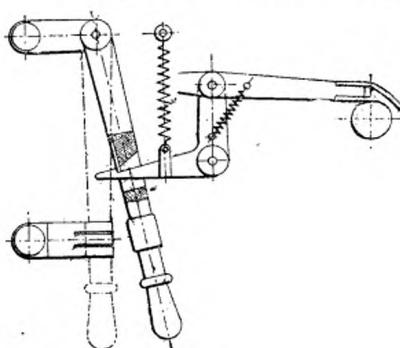


Fig. 93.

fonte portant 16 noyaux polaires en fer doux qui ont été pris dans la carcasse au moment de la fonte. Les épanouissements polaires, vissés sur les noyaux, servent à maintenir les bobines inductrices qui sont constituées par du fil de cuivre. Les semelles de fixation de l'inducteur reposent sur des coins qui permettent de le centrer exactement.

L'induit est à dents, l'enroulement est en tambour, système Arnold, il est logé dans 516 entailles.

Le collecteur de 1 m de diamètre sur 0^m,116 de large comporte 316 lames. Chaque tige porte-balais a deux balais en charbon. L'ensemble des tiges est monté sur une couronne mobile au moyen d'un secteur denté.

La machine peut fournir un courant de 1 000 a. sous 500 v., à la vitesse de 160 tours par minute.

Siemens frères de Londres.

Le groupe exposé par cette maison comporte une dynamo à courant continu actionnée par une machine à vapeur à grande vitesse William Robinson, à simple effet et triple expansion.

L'inducteur de cette dynamo est formé de 16 pôles en acier coulé venus de fonte avec leur culasse; ces bobines inductrices, bobinées sur mandrin, sont maintenues en place par des épanouissements polaires en fer forgé vissés aux noyaux.

L'enroulement de l'induit est en tambour avec sections en parallèle; les barres de cuivre qui constituent les conducteurs induits sont logées dans des entailles, il y a six barres par entaille; l'isolation est obtenu au moyen d'une matière spéciale.

Le collecteur composé de 616 lames a 1^m,67 de diamètre; la bague de serrage des lames est en plusieurs segments de façon à éviter le démontage de tout le collecteur lorsqu'il n'y a qu'une lame à remplacer.

Les balais sont en charbon et montés dans des boîtes en aluminium; 16 tiges portant chacune 19 balais et montées sur une même couronne permettent de faire varier le calage, elles servent à recueillir le courant de 2 800 a. à la tension de 550 v. que peut fournir la machine.

MM. Scott et Mountain.*Planche 45.*

La dynamo exposée par ces constructeurs est une génératrice à courant continu, à huit pôles, d'une puissance de 331 kw. correspondant à 1 440 a. sous 230 v. Elle est accouplée directement à une machine à vapeur Robey à marche lente, 90 tours par minute.

Les pôles sont disposés radialement à l'intérieur d'une culasse en acier coulé. Les bobines inductrices sont enroulées sur des carcasses en bronze maintenues en place par les épanouissements polaires.

L'induit, en tambour et à rainures, a un diamètre de 1^m,40 ; les conducteurs induits sont formés de barres de cuivre. Le courant est recueilli par huit rangées de porte-balais, avec frotteurs en charbon.

Ce type de machine est spécialement construit pour les transports de force et la traction électrique.

**Société anonyme d'électricité de Prague,
ancienne maison Kolben.**

Planche 46.

Cette société exposait dans la section belge un groupe électrogène à courants triphasés composé d'un alternateur de 1 100 chevaux actionné

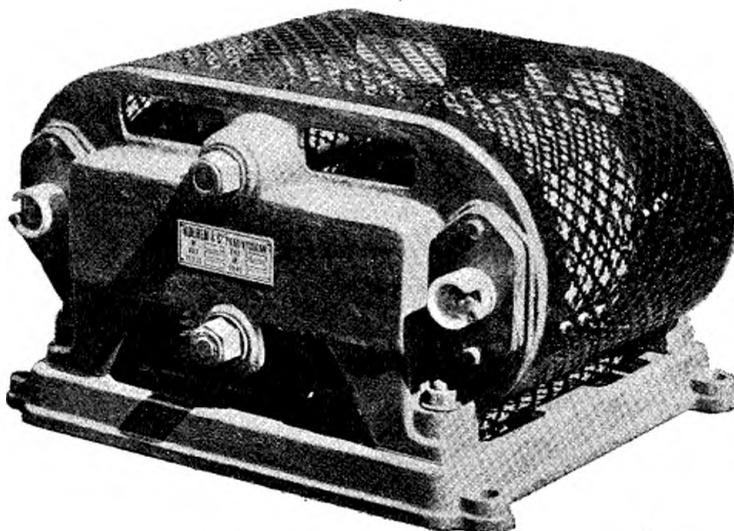


Fig. 94. — Alternateur Kolben.

directement par une machine à vapeur horizontale, compound, à deux

cylindres en tandem de la maison Carels frères de Gand. Cinq groupes identiques sont en service à la station centrale de Prague.

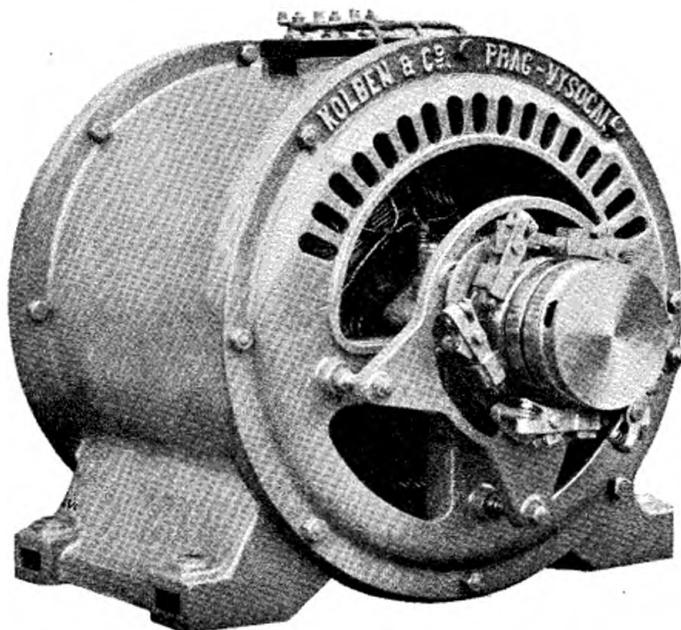


Fig. 95.

L'alternateur de ces groupes est du type volant à induit fixe et inducteur mobile. L'inducteur est formé de deux pièces de fonte portant 64 pôles périphériques en acier coulé. La partie qui reçoit le bobinage a une section ovale, celle qui est prise dans le volant a une section circulaire. Les épanouissements polaires sont formés de minces tôles de fer encastrées dans le noyau d'acier. L'enroulement inducteur est constitué par une bande de cuivre de 6×21 mm de section, enroulée sur champ et dont les spires successives sont isolées par du carton comprimé. La bobine une fois terminée est comprimée à la presse hydraulique de façon à éviter toute déformation en service.

L'induit est formé de 96 bobines logées dans des rainures et isolées à la micanite. La carcasse en fonte qui maintient les tôles est formée de quatre pièces ; elle peut recevoir un léger déplacement dans le sens horizontal et dans le sens vertical de façon à permettre un centrage exact par rapport à l'inducteur.

L'excitatrice est montée en porte-à-faux sur une extrémité de l'arbre. Elle est à six pôles, à excitation compound et elle peut débiter 80 à 100 a. sous une tension de 100 v.

A la vitesse de 96 tours par minute, (50 v.) l'alternateur peut fournir sous 3 000 v. une puissance de 825 kw. Le courant produit par la ma-

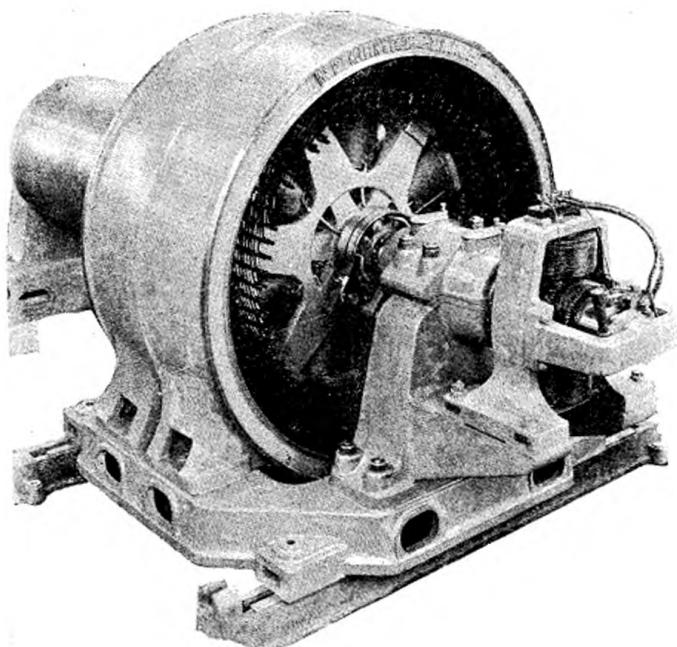


Fig. 96. — Alternateur de la maison Kolben.

chine exposée était surtout utilisé dans le Vieux Paris où sept transformateurs de la même maison abaissaient la tension à 120 v.

Société Siemens et Halske, de Vienne

Le groupe électrogène exposé par cette société comportait une dynamo à courant continu montée sur l'arbre d'une machine à vapeur à triple expansion, type Pilon, d'une puissance indiquée de 1 600 chevaux sortant des ateliers de la maison Ringhoffer de Smichow-Prague.

La dynamo est à 14 pôles, le système inducteur est formé d'une couronne en acier coulé, les pôles et les épanouissements polaires sont formés de tôles découpées et serrées dans une chemise de bronze sur laquelle est enroulée la bobine inductrice : ils sont vissés intérieurement à la couronne et maintenus par des coins en acier. La surface des épanouissements polaires n'est pas exactement concentrique à celle de l'induit ; dans le but de diminuer la réaction d'induit on a légèrement augmenté l'entrefer sous les becs de sortie. La carcasse de la machine

repose sur un support en forme de coin qui permet de regagner l'excentricité de la partie tournante due à l'usure des coussinets.

Les tôles de l'induit sont montées sur un moyeu en fonte à plusieurs rayons placé sur l'arbre et entraîné par des chevilles fixées au volant ; l'enroulement est du type série-parallèle, genre Arnold.

Le collecteur a 372 lames ; les balais, en charbon, sont montés par séries de 10 sur quatorze tiges : Les tiges sont portées par une plaque ajourée fixée contre la carcasse inductrice et mobile au moyen d'une vis tangente pour permettre le décalage des balais.

A la vitesse de 95 tours par minute, cette dynamo peut fournir un courant de 1 800 a. à la tension de 350 v.

La même société exposait encore deux génératrices pouvant fournir à la fois ou séparément du courant pour distribution à trois fils et des courants triphasés à deux tensions différentes.

Le dispositif employé pour arriver à ce résultat consiste dans l'emploi d'un enroulement ordinaire à courant continu à deux ou plusieurs circuits en parallèle et convenablement sectionnés. Dans le cas d'une machine à deux circuits en parallèle, on divise l'enroulement en six

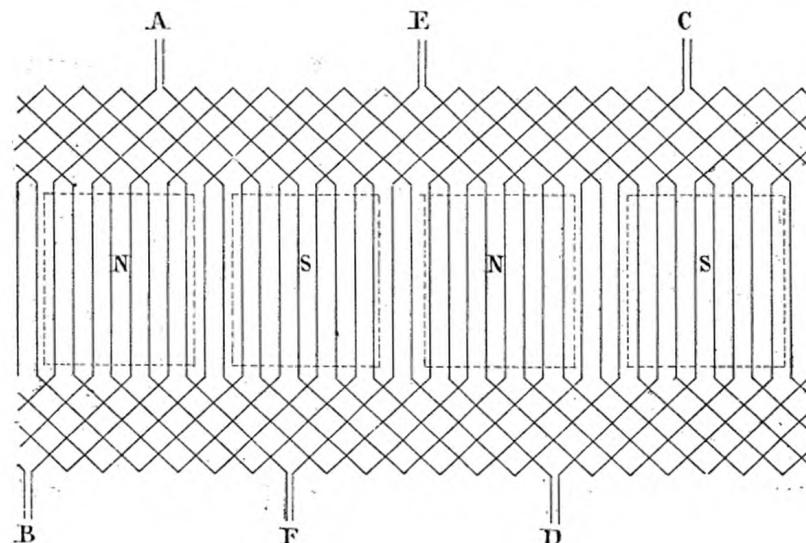


Fig. 97.

sections égales comme l'indique la fig. 97 pour le cas d'une machine à quatre pôles, les points A B C D E F sont les points de division. Si la machine avait plus de deux circuits en parallèle, chacune des sections

serait également formée de plusieurs bobines en parallèle. Les six sections ainsi constituées donnent naissance à des forces électromotrices égales

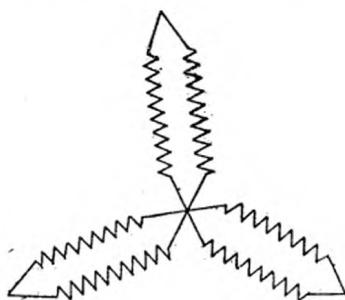


Fig. 98.

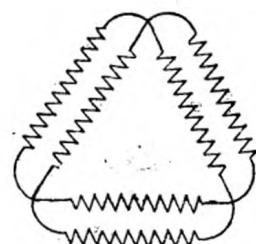


Fig. 99.

et décalées de 60° les unes par rapport aux autres. On peut combiner de différentes façons les six phases obtenues par ce procédé et s'en servir pour produire des courants triphasés à diverses tensions. On peut, par exemple, monter en triangle ou en étoile les phases réunies au préalable deux par deux en parallèle (fig. 98 et 99) ou deux par deux en série. On peut encore monter trois des phases en triangle et les trois autres en étoile aux sommets de ce triangle (fig. 100).

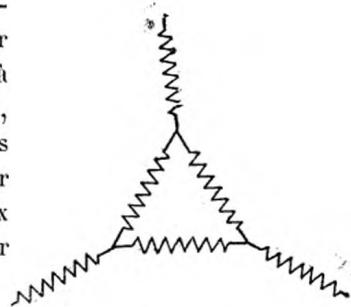


Fig. 100.

Si, à côté d'un enroulement ainsi sectionné, la machine possède un enroulement continu muni d'un collecteur, on pourra recueillir en même temps du courant continu. C'est ainsi qu'étaient disposées les deux machines exposées : on avait obtenu un enroulement triphasé en montant en étoile les six sections réunies au préalable deux par deux en parallèle. Les trois extrémités de l'étoile étaient réunies à trois points équidistants pris sur l'enroulement continu entre lesquels existaient des différences de potentiel, décalées les unes par rapport aux autres suivant le système triphasé. Si 190 v. représentent la tension efficace entre deux de ces points, entre le centre de l'étoile et l'un de ces points, la tension est de $\frac{190}{\sqrt{3}} = 110$ volts, enfin entre les deux balais du collecteur, la tension continue est de $\frac{190}{\sqrt{3}} \times 2 \times \sqrt{2}$ soit 310 v. On peut utiliser cette

tension dans une distribution à trois fils dont le fil neutre serait relié au centre de l'étoile.

Ganz et C°.

Planche 47.

La maison Ganz et C° de Budapest, exposait un grand alternateur triphasé de 1200 kw. sous 2200 v. directement accouplé à une machine à vapeur horizontale à deux cylindres compound, de la maison Lang de Budapest.

L'induit fixe de cette machine est en tôles de 0,5 mm d'épaisseur, dont le diamètre d'alésage est de 4^m,150 ; on a réduit autant que possible la self-induction en augmentant le nombre des dents et en leur donnant un profil convenable ; le nombre d'entailles par pôle est de 7,5 au lieu d'être un multiple de trois comme cela a lieu ordinairement. La carcasse qui maintient les tôles de l'induit est portée par des vis calantes qui permettent un centrage exact.

L'inducteur formant volant est placé entre les deux cylindres de la machine à vapeur ; il porte 48 pôles en acier coulé, de section cylindrique, boulonnés sur la jante. L'enroulement est constitué par une lame de cuivre nu dont les spires successives sont simplement séparées par du papier ; cet isolement suffit, étant donné le faible voltage employé pour le courant d'excitation, 90 v. au maximum. L'excitatrice, pouvant débiter un courant maximum de 200 a. est actionnée par la machine elle-même au moyen d'un accouplement à bielles. Ce système lui assure une certaine indépendance et permet de la remplacer rapidement par une machine semblable en cas d'accident.

D'après les renseignements fournis par les constructeurs, la courbe de la tension de cet alternateur se rapproche beaucoup d'une sinusoïde, surtout à vide. L'écart ne s'élèverait jamais à plus de 1 0/0. Cette propriété est due à une forme convenablement choisie des épanouissements polaires.

La maison Ganz exposait aussi plusieurs machines de moindre importance. Citons un transformateur monophasé (fig. ci-contre) de 300 kw., construit pour 5000 v. au primaire, 430 au secondaire et 25 périodes par seconde. Les tôles de ce transformateur sont divisées en paquets par des intervalles d'air. Un ventilateur, mû par un moteur électrique de un cheval contribue au refroidissement de l'appareil. Grâce à lui, la température des diverses parties ne s'élève pas à plus de 25° au-dessus

de la température ambiante. L'enroulement secondaire est formé de barres de cuivre de 25 mm^2 de section. Le rendement est de 98,3 %.

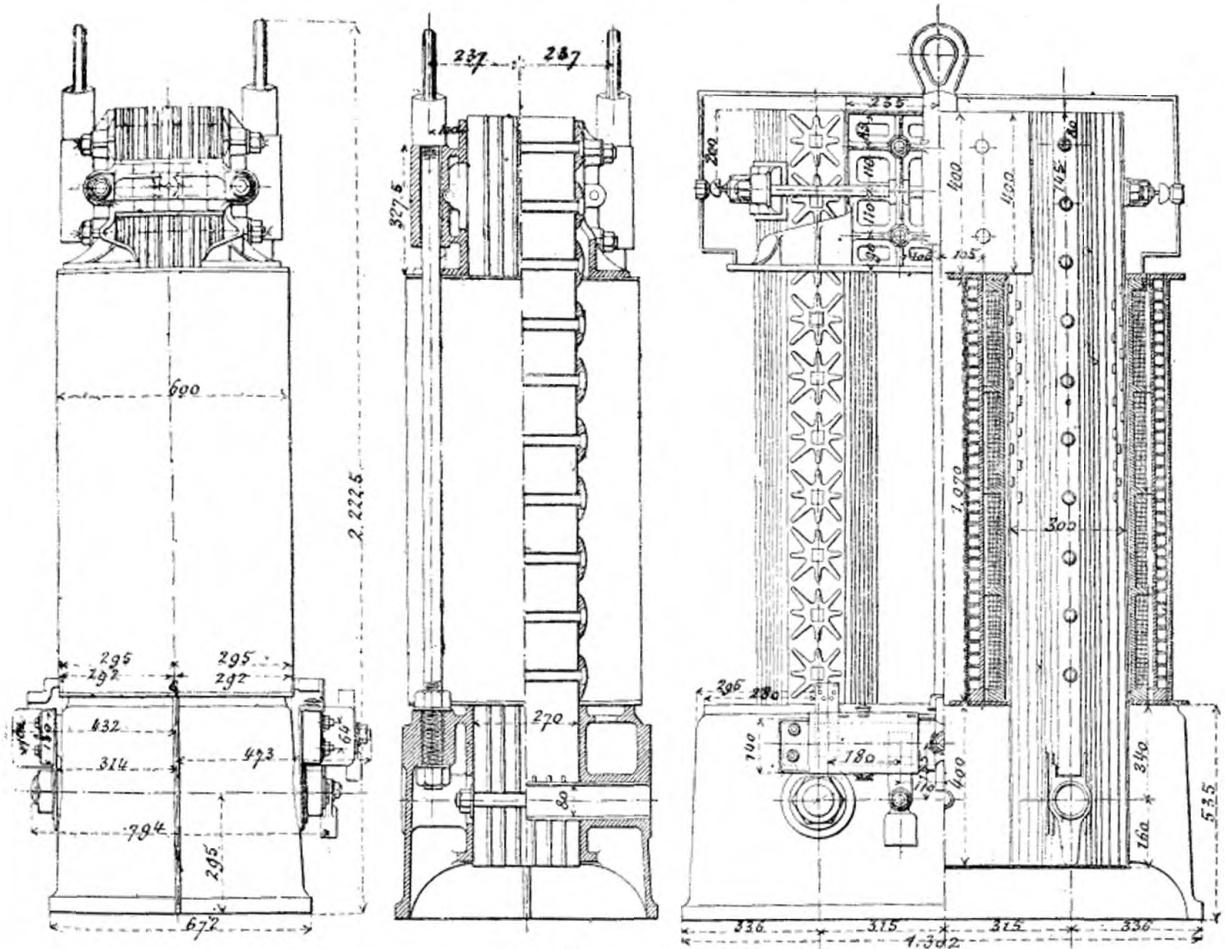
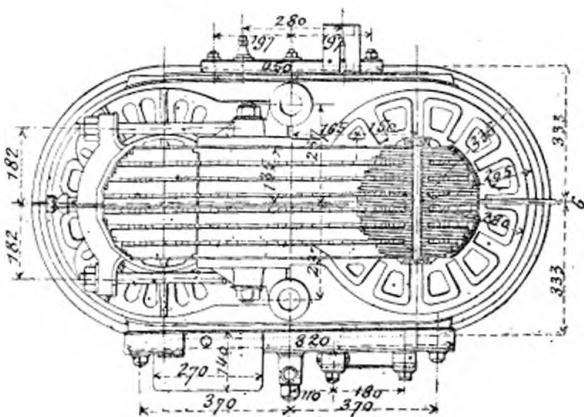


Fig. 401.

On pouvait remarquer encore dans le stand de cette maison, une génératrice pour courant continu de 60 kw. sous 120 v. Les pièces polaires de cette machine, en acier coulé, présentent de profondes rainures destinées à diminuer les effets de la réaction d'induit. Le calage des balais est fixe quelle que soit la charge, les frotteurs en charbon sont maintenus sur le col-



lecteur par un léger ressort, ils sont inclinés en sens inverse du mouvement et l'effort de coincement qui se développe entre les surfaces en regard, contribue à assurer un bon contact.

Maison Siemens et Halske (Berlin).

Le groupe électrogène présenté par cette maison se composait d'un alternateur triphasé Siemens et Halske directement accouplé à une machine à vapeur verticale à triple expansion, pouvant développer 3 000 chevaux, de la maison Borsig de Berlin.

La machine à vapeur est à quatre cylindres dont deux à basse pression, chacun de ces derniers est disposé en tandem avec l'un des cylindres à haute et moyenne pression. L'arbre est en deux pièces réunies par un manchon, il porte un volant et l'inducteur de l'alternateur.

L'alternateur triphasé peut développer une puissance de 2 000 kw. sous 2 000 à 2 200 v. à la vitesse de 83,5 tours par minute, correspondant à 50 périodes. L'inducteur calé sur l'arbre porte 64 pôles constitués par un assemblage de tôles. Une barre d'acier traversant ces tôles sert à les maintenir au moyen de boulons à la périphérie de l'inducteur ; les pôles présentent une rainure disposée pour augmenter la ventilation et les carcasses en bronze qui portent les enroulements des bobines sont évitées dans le même but. L'enroulement est formé d'une lame de cuivre de 4×23 mm ; le poids du cuivre employé dans l'enroulement est de quatre tonnes. Le courant d'excitation est d'environ 200 a. sous 210 v.

L'induit, fixe, a un diamètre d'alésage de 6 m et une largeur de 60 cm. La carcasse en fonte qui le supporte repose sur un système de deux rouleaux mobiles qui permettent de le centrer. Après centrage l'armature est fixée au massif de fondation au moyen de deux empâtements en fonte disposés suivant le diamètre horizontal de la carcasse. L'enroulement induit est logé dans 648 entailles ayant 13×55 mm de section et contenant chacune une barre de cuivre de 7×44 mm.

L'excitatrice est une dynamo à 8 pôles de 45 kw. sous 210 v. montée en porte-à-faux sur l'arbre.

Les instruments de mesure de la génératrice : voltmètre, ampèremètre, wattmètre, sont placés à l'extrémité d'une colonne creuse de 4^m,50 de haut. Les appareils de manœuvre, interrupteurs, rhéostat de champ sont disposés dans le sous-sol et commandés par des transmissions mises en mouvement au moyen de volants situés de part et d'autre d'un pupitre placé près de la machine, des voyants visibles par de petites fenêtres pratiquées.

quées dans la tablette supérieure du pupitre permettent à chaque ins-

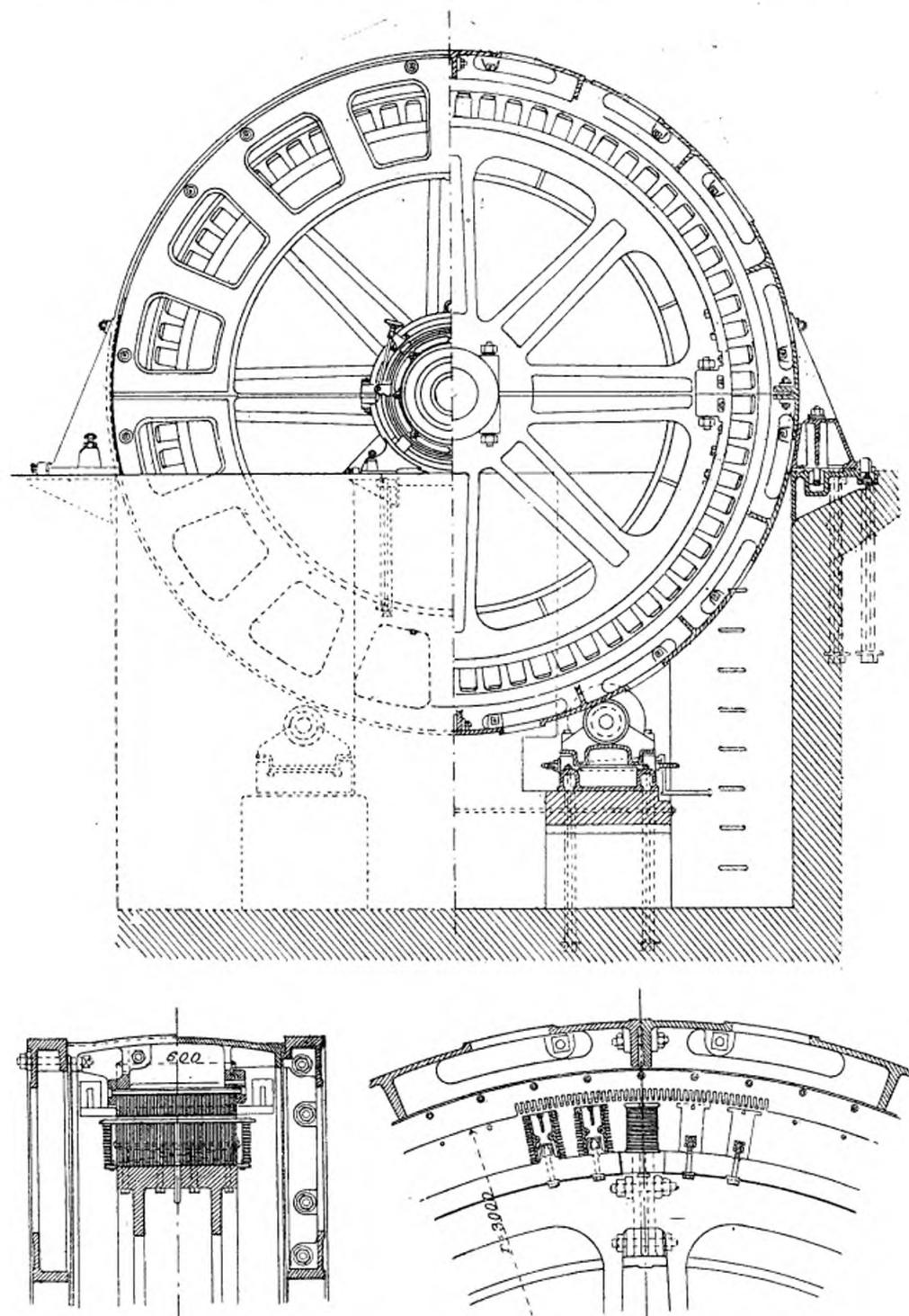


Fig. 402. -- Alternateur triphasé Siemens et Halske.

tant à l'électricien de se rendre compte du fonctionnement de ses appareils.

Allgemeine Electricitäts Gesellschaft.

Planche 48.

L'Allgemeine Electricitäts Gesellschaft avait exposé dans l'annexe allemande du Champ-de-Mars un grand alternateur triphasé de son modèle C D M 83/3000 (fig. 103). Cette machine peut développer normalement, à

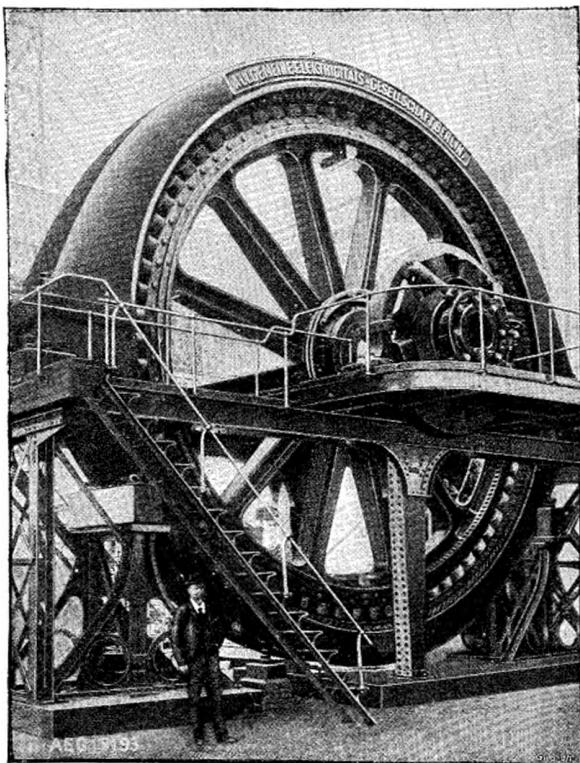


Fig. 103.

la vitesse de 83 tours par minute correspondant à 50 périodes par seconde, une puissance de 3 000 kw. Grâce à une disposition convenable des enroulements et des canaux de ventilation, elle peut supporter sans danger une notable surcharge.

L'inducteur qui forme le volant de la machine à vapeur porte 72 pôles radiaux, son diamètre est de 7^m,40, celui de la carcasse est de 8^m,60. L'induit est muni des circuits amortisseurs Hulin et Leblanc. Le poids total de la machine est de 160 000 kg. se décomposant en 80 000 kg. pour l'induit, 70 000 pour l'inducteur et 10 000 pour les plaques de fondation.

13 alternateurs identiques sont en fonctionnement à Berlin, dans les stations centrales de l'Obersprée et de Moabit : chacun d'eux est actionné par une machine à vapeur horizontale à 4 cylindres et à triple expansion. L'alternateur exposé ne fonctionnait pas en génératrice, l'emplacement dont on disposait n'ayant pas permis de lui adjoindre sa machine à vapeur, on le faisait tourner comme moteur synchrone au moyen des courants triphasés fournis par la distribution générale de l'Exposition.

Société anonyme d'électricité Lahmeyer.

Planche 19.

Le groupe électrogène exposé par cette société se composait de deux génératrices, l'une à courant triphasé de 1 000 kw. et 5 000 v., l'autre à courant continu de 350 kw. et 550 v. Ces deux dynamos étaient accouplées par joint rigide aux deux extrémités de l'arbre d'une machine à vapeur verticale, à deux cylindres compound, sortant des ateliers de constructions mécaniques de Nuremberg. Cette machine, à la vitesse de 94 tours par minute, développait 1 300 chevaux effectifs.

La dynamo triphasée (fig. 1 et 2) est du type volant. L'inducteur tourne à l'intérieur d'un induit fixe ; il est formé de quatre pièces en fonte réunies par des boulons et des frettés d'acier noyées dans sa masse et il porte 64 pôles d'acier coulé boulonnés sur sa jante. L'induit dont le diamètre d'alésage a 5^m,800, est composé de tôles maintenues par serrage entre une flasque démontable et une nervure fixe faisant partie de la carcasse ; l'enroulement est isolé par des tubes de micanite. Le courant d'excitation est fourni à la tension de 65 v. par une petite dynamo montée en porte-à-faux au bout de l'arbre ; le réglage de la tension du courant triphasé se fait simplement par le réglage du champ de la dynamo excitatrice.

Les appareils de mesure de la génératrice étaient montés suivant une disposition particulière à la maison Leh Meyer : on isole dans chaque phase une bobine de l'induit triphasé et on envoie le courant que ces bobines produisent dans le primaire d'un transformateur dont le secondaire

est parcouru par le courant total. Le rapport de transformation étant égal à l'unité, le courant dans chacun des deux enroulements est égal au courant total débité par la machine et la tension aux bornes est une fraction connue de la tension totale. Les appareils de mesure sont montés sur le primaire. Le voltmètre et le wattmètre doivent être gradués de façon à indiquer la tension et la puissance véritables.

La dynamo à courant continu est une génératrice pour réseau de tramways (fig. 3 et 4). La culasse de cette machine, de forme circulaire, se compose de deux demi-couronnes en acier moulé. Les pôles, au nombre de 12, venus de fonte avec leur épanouissement sont boulonnés à l'intérieur de la culasse. L'induit dont le diamètre est de 2^m,40 et la largeur de 0^m,40, porte 609 rainures contenant chacune deux barres de cuivre ; les conducteurs sont maintenus dans les rainures par des plaques

en papier comprimé. Le collecteur a un diamètre de 2 m et une largeur de 0^m,12. Les lames au nombre de 609, sont reliées à l'enroulement par des fils de connexion à grande résistance dans le but de réduire les étincelles aux balais. Ceux-ci sont en

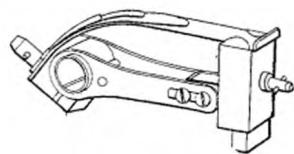


Fig. 104.

charbon et pressés sur le collecteur par un ressort à lames (fig. 104).

Ancienne maison Schuckert (Nuremberg).

Le groupe électrogène exposé par cette maison se composait de deux génératrices l'une à courant continu, l'autre à courants triphasés, actionnées par la même machine à vapeur.

Celle-ci construite dans les ateliers d'Augsbourg est une machine verticale, genre Corliss, à triple expansion, avec condenseur à injection. A la vitesse de 83 tours par minute, elle développe 2 000 chevaux effectifs ; elle peut donner 2 500 chevaux à la vitesse de 100 tours. Les deux génératrices sont montées sur l'arbre de part et d'autre de la machine à vapeur.

La dynamo à courant continu est du type A de la maison Schuckert. Elle peut développer une puissance de 750 kw., soit 1 500 a. sous 500 v. L'inducteur est fixe et entoure l'induit ; il se compose d'une culasse en acier coulé portant 12 pôles du même métal. L'armature, montée sur l'arbre est constituée par des segments de tôles isolées avec du papier ; son diamètre est de 3 m. L'enroulement, en tambour, est formé d'une seule couche de barres dont les extrémités rabattues sur

les joues de l'armature provoquent une énergique ventilation. Les barres logées dans les rainures sont maintenues par plusieurs fretttes de fil métallique. Les lames du commutateur, au nombre de 536, sont en cuivre durci, les balais sont en charbon.

Le poids total de la machine est de 45 t.

L'alternateur triphasé du type WID peut développer une puissance de 850 k. v. a. en débitant 98 a. par phase à la tension de 5 000 v. L'induit fixe, a un diamètre d'alésage de 5^m,50. Les tôles qui le constituent sont supportées par un solide bâti d'acier coulé, elles sont isolées entre elles par du papier. Des intervalles d'air ménagés entre les paquets de tôles assurent une bonne ventilation.

Pour remédier aux déformations inévitables dues à de légers mouvements des fondations ou à l'échauffement de la machine pendant son fonctionnement, le bâti de l'induit est maintenu par des tiges de tension permettant un centrage exact, elles sont assez légères pour ne pas gêner la visite et le nettoyage de l'enroulement à haute tension.

La partie tournante est formée d'une seule pièce d'acier coulé, du poids de 26 t. portant 72 pôles boulonnés sur sa jante. Le courant d'excitation, à la tension de 220 v. est amené aux bobines par deux bagues isolées.

Les appareils de réglage et de manœuvre des deux dynamos : voltmètres, ampèremètres, disjoncteurs, rhéostats, indicateurs de phase, étaient disposés sur les parois latérales en marbre de deux sortes de kiosques dont l'intérieur était accessible pour permettre la visite des connexions.

La maison Schuckert exposait également une machine à courant continu, du même type que celle décrite précédemment, mais d'une puissance de 700 kw. (1 150 a. sous 600 v.) actionnée par une machine à vapeur horizontale à triple expansion et à quatre cylindres de la maison Franco Tosi de Legnano.

Société d'électricité Hélios de Cologne.

Planche 20.

L'alternateur de 3 000 chevaux exposé par cette maison était un des plus puissants de ceux qui se trouvaient dans la grande halle. Il était directement accouplé à une machine à vapeur, à triple expansion, à condenseur et à distribution par soupapes, fournie par la Société de construction de machines de Nuremberg et d'Augsbourg.

La dynamo est du type à induit fixe et inducteur mobile.

L'inducteur forme volant (fig. 105). Son diamètre total, y compris les

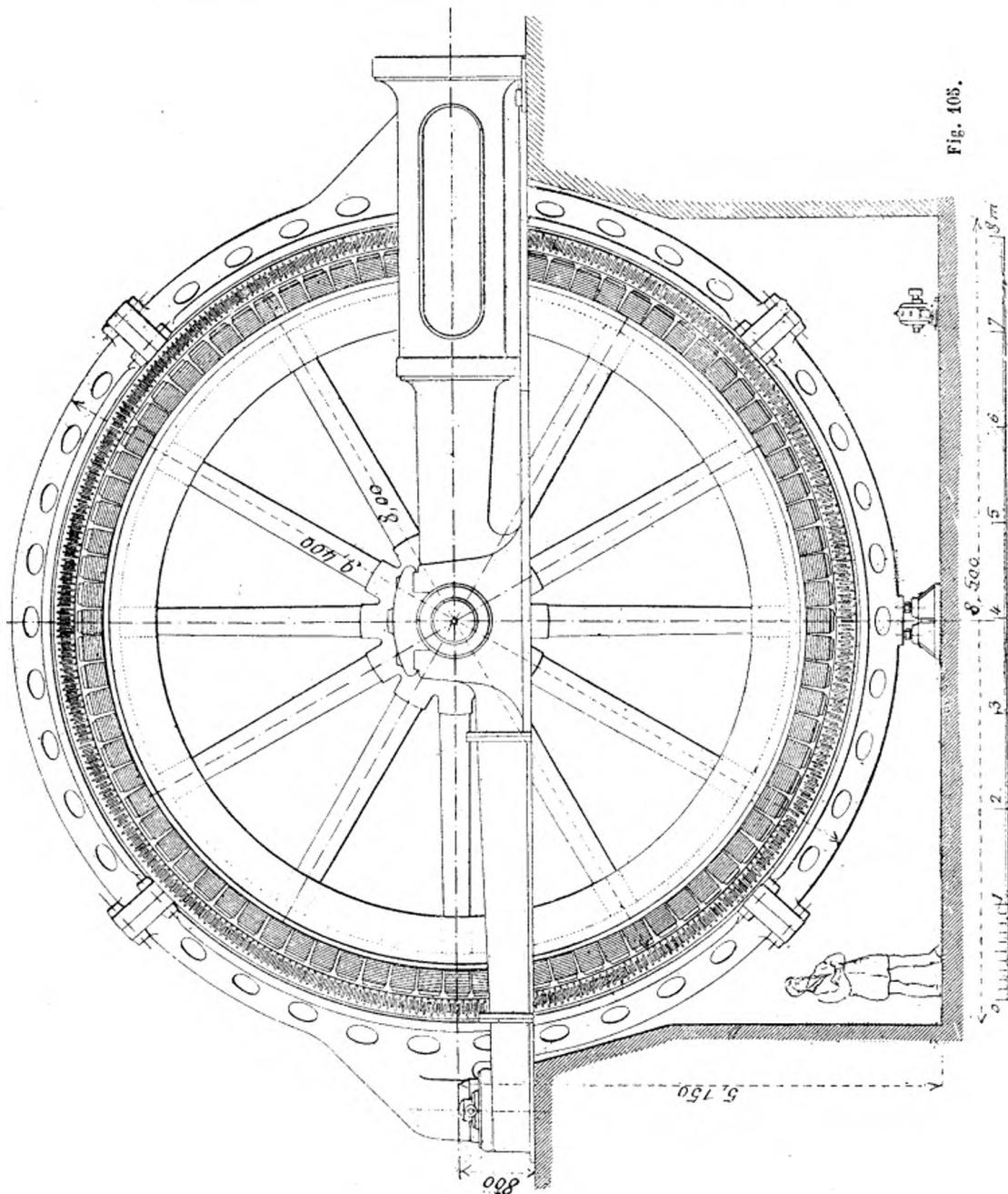


Fig. 105.

pôles, est de 8 m. Les pôles, en acier coulé et à section circulaire, sont

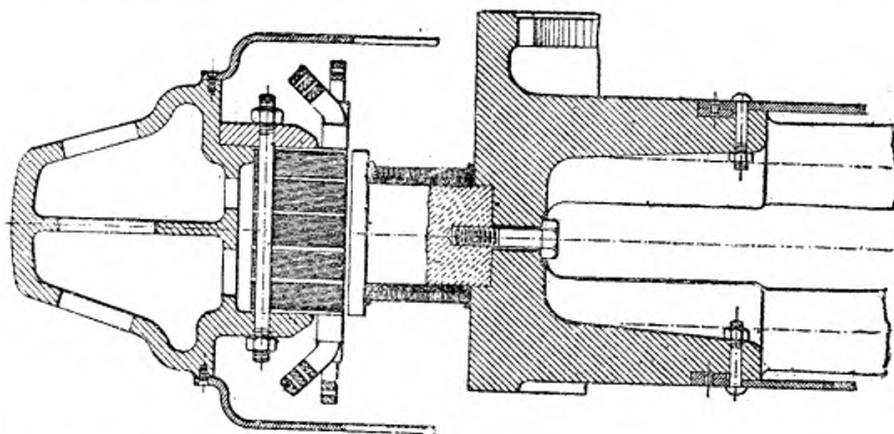


Fig. 406.

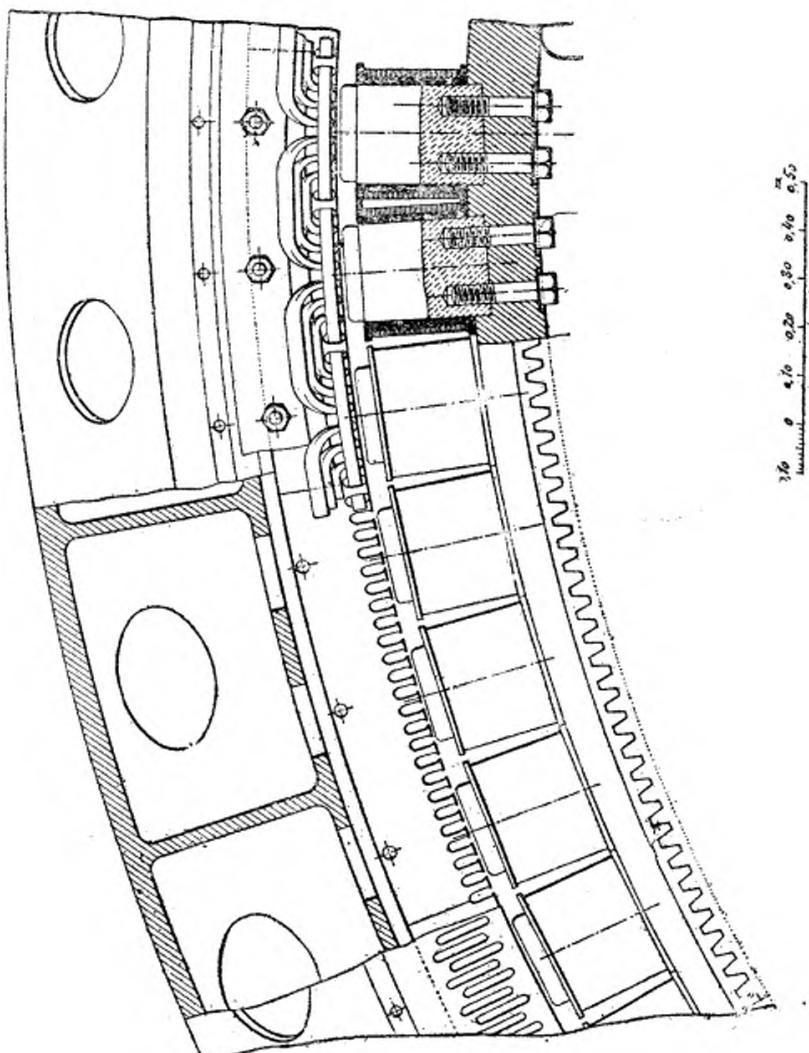


Fig. 407.

fixés radialement à la périphérie d'une roue venue de fonte et en qua-

tre pièces. L'enroulement des pôles est formé par une lame de cuivre disposée en spirale et isolée une fois en place. L'isolation est assez léger, car on n'a pas plus d'un volt sur chaque bobine. L'excitation est faite séparément par une dynamo à vapeur de 40 kw.

L'induit de l'alternateur, extérieur à l'inducteur, est constitué par une couronne de fonte de 9^m,40 de diamètre, composée de six segments et supportant les tôles (fig. 106). Les conducteurs induits sont logés dans des rainures. La self-induction des bobines de l'induit est faible, grâce à la forme de ces rainures, aussi la machine se distingue par une faible chute de tension à forte charge et par un fort courant de court-circuit.

Les tôles formant l'induit sont divisées en cinq couronnes empilées et séparées par des intervalles d'air. Ces intervalles communiquent avec la partie creuse et ajourée de la carcasse en fonte, ils assurent ainsi une excellente ventilation.

La fig. 107 montre la façon dont a été exécuté l'enroulement. A chacun des 84 pôles correspondent huit rainures de l'induit. On a deux systèmes monophasés inégaux et décalés de 90° l'un par rapport à l'autre. Les deux enroulements sont réunis entre eux suivant le montage du transformateur Scott de sorte que la machine peut donner du courant triphasé. On peut aussi en obtenir du courant monophasé soit seul, soit en même temps que le triphasé.

A la vitesse de 70 tours par minute environ, correspondant à 50 périodes la machine donne sous 2 000 v. de tension, soit 2 000 k.v.a. de courant monophasé, soit 3 000 k. v. a. de courants triphasés. Mais elle peut aussi donner simultanément 1 500 k. v. a. de courant monophasé et 1 200 k. v. a. de courants triphasés, ceux-ci pouvant servir à alimenter un réseau de moteurs et le premier un réseau d'éclairage. A l'Exposition cette machine fournissait du courant alternatif simple à 2 200 v.

Le tableau de distribution a été remplacé dans cette machine par deux colonnes placées entre les cylindres de la machine à vapeur et portant tous les appareils de mesure électriques et mécaniques. Les leviers de manœuvre des divers appareils, valve de la machine à vapeur, commutateur principal à soufflage pneumatique, etc. étaient placés à côté de ces deux colonnes.

TRANSPORT

DE

L'ÉNERGIE A GRANDES DISTANCES

PAR

L'ÉLECTRICITÉ

PAR

F. LOPPÉ

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

Lors de l'Exposition de 1889, la transmission électrique de l'énergie était encore à ses débuts, on ne connaissait guère que le transport à courant continu à faible tension; car il n'existaient pour ainsi dire pas de moteurs à courant alternatif, le rayon d'utilisation était donc très limité.

Ce ne fut qu'à la suite du brillant résultat du transport d'énergie par courants triphasés de Lauffen-Francfort (73 km., 15.000 volts) et des études de M. Thury sur le transport à courant continu à haute tension, que la question du transport de l'énergie à longues distances entra dans la pratique. Actuellement il existe des transmissions d'énergie à plus de 160 km. et il est certain qu'on peut atteindre, sans frais d'installation et sans perte de puissance exagérés, une distance de transport de 250 km. au moins.

A l'Exposition il existe un grand nombre de transports de puissance (naturellement à une distance relativement faible), la tension atteignant 5.000 volts.

La puissance totale nécessaire pour l'éclairage et le fonctionnement des moteurs est de 15.800 kw. répartie ainsi.

Puissance fournie par l'administration de l'Exposition (tension de 500 à 5 000 v.)	11 000 kw.
Puissance fournie par les secteurs de la rive gauche et des Champs-Élysées (tension primaire : 2 400 v.) . . .	3 400 kw.
Puissance fournie par des installations particulières . .	400 kw.
Puissance fournie par l'usine des Moulineaux (courants triphasés : 5 000 v.) pour la plate-forme roulante et le chemin de fer électrique.	1 000 kw.

Des génératrices et des appareils destinés au transport électrique à grande distance étaient exposés par un grand nombre de constructeurs.

Des plans et des descriptions détaillées d'installations étaient exposés tant par des constructeurs que par des collectivités.

Au lieu de donner une simple description de tout le matériel exposé, nous avons cru bon de faire une étude méthodique de la question en décrivant au fur et à mesure les appareils exposés et de donner une statistique des installations utilisant des courants d'une tension minimum de 10.000 volts, ainsi que l'étude détaillée de quelques-unes de ces installations.

Des divers systèmes de transmission

Les systèmes se divisent en deux grandes classes: ceux à courant continu et ceux à courants alternatifs.

DISTRIBUTIONS PAR COURANT CONTINU

Par suite des difficultés d'isolation des collecteurs des dynamos à courant continu, on ne peut guère dépasser une différence de potentiel de 3.000 à 3.500 volts par machine.

La distribution à *potentiel constant* aurait donc un rayon d'action assez limité, et en outre, les moteurs continus, à des tensions dépassant 500 volts, exigeant certaines précautions dans leur maniement, ne pourraient être mis sans inconvénient entre les mains de tout le monde.

Le *système série* au contraire peut être très bien employé, les génératrices sont groupées en série, soit en un seul soit en plusieurs points de la distribution. Ce système, dans lequel l'intensité du courant est maintenue constante et les moteurs placés en série absorbent une différence de potentiel à peu près proportionnelle à leur puissance, offre des avantages comme nous le verrons. Il peut être employé quand l'on a à desservir un petit nombre de moteurs, ordinairement de grande puissance.

DISTRIBUTIONS PAR COURANTS ALTERNATIFS

Les génératrices à courant alternatif actuellement employées (¹) ne

(1) M. Maurice Leblanc a proposé l'emploi de génératrices d'induction pouvant se coupler en tension. Avec ces machines on pourra effectuer des distributions série (à faible fréquence pour supprimer ou atténuer les inconvénients

peuvent se coupler en tension, aussi les distributions se font elles toutes à potentiel constant, les génératrices étant mises en parallèle.

La facilité de transformation du courant alternatif au moyen de transformateurs statiques (c'est-à-dire n'ayant aucune partie tournante), n'exigeant pas de surveillance et ayant un très bon rendement, permet d'obtenir en ligne des tensions très élevées et de distribuer le courant à basse tension.

La tendance actuelle est d'employer des génératrices donnant directement une tension élevée (on en a construit à 20.000 v. ⁽¹⁾ et il est certain que cette tension sera dépassée) pour la ligne, et de n'utiliser des transformateurs que pour réduire la tension au lieu d'emploi. Pour des transmissions à longues distances, dépassant 60 km., la tension en ligne étant ordinairement de plus de 20.000 v., on emploie des transformateurs élévateurs de tension, les générateurs fournissant le courant à une tension moins élevée.

On emploie le courant alternatif, par suite de sa facilité de transformation, toutes les fois que l'énergie doit être distribuée à un grand nombre de consommateurs.

La distribution par courants alternatifs peut se faire : par *courant alternatif simple*, par *courants diphasés*, par *courants triphasés* ou encore par le *système monocyclique*.

Courant alternatif simple

Le courant alternatif simple n'exige que la pose de deux conducteurs par circuit ; en outre le couplage d'alternateurs à courant alternatif simple est plus facile à réaliser que celui d'alternateurs polyphasés.

Par contre, le poids du cuivre de la ligne, à puissance égale transportée et à perte de puissance égale, est plus élevé que dans le cas de courants polyphasés, et en outre le démarrage des moteurs offre certaines difficultés.

Le courant alternatif simple peut être employé pour le cas où la transmission n'a pas une grande longueur (au plus 30 à 40 km.) et assure principalement de l'éclairage, les moteurs étant peu nombreux et

que nous signalons plus loin dans les lignes à courants alternatifs), et employer après transformation des moteurs à basse tension. La suppression du collecteur permettra en outre d'atteindre une différence de potentiel élevée par machine, ce qui permettra de diminuer le nombre d'unités nécessaires pour atteindre une tension donnée.

(1) Voir la statistique.

de faible puissance et ceux de grande puissance n'exigeant pas des démarriages fréquents.

Courants alternatifs diphasés

Les courants diphasés peuvent être employés quand on a des moteurs à démarriages fréquents à desservir, mais à ce point de vue ils ne présentent aucun avantage sur les courants triphasés.

La distribution par courants diphasés exige au moins autant de conducteurs par ligne que celle par courants triphasés et le poids du cuivre, toutes choses égales d'ailleurs, est beaucoup plus élevé.

Ce système n'est plus employé pour les lignes à haute tension. Par suite cependant de l'avantage qu'il présente au point de vue de l'éclairage (la répartition des lampes étant plus simple) on l'emploie parfois dans les canalisations secondaires. La canalisation primaire est alors à courants triphasés, et des transformateurs du *système Scott* abaissent la tension et desservent le réseau secondaire en courants diphasés.

Courants alternatifs triphasés

L'emploi des courants alternatifs triphasés donne une économie considérable pour la ligne ; avec ce genre de courant on a un démarrage facile des moteurs asynchrones et les convertisseurs rotatifs fonctionnent dans de très bonnes conditions.

On a craint pendant longtemps que si l'on alimentait des lampes avec des courants triphasés et si celles-ci n'étaient pas absolument bien réparties entre les trois phases, il en résulterait des décalages anormaux entre phases, pouvant gêner le fonctionnement des moteurs. Aujourd'hui l'on n'a plus ces craintes et l'on arrive même à brancher toutes les lampes sur une seule phase ; il suffit pour cela d'employer des alternateurs à faible réaction d'armature et de monter les primaires des transformateurs en triangle.

Il vaut cependant mieux répartir les lampes autant que possible sur les trois phases, soit en établissant des réseaux secondaires triphasés, soit en répartissant des transformateurs à courant alternatif simple, aussi uniformément que possible sur chacune des phases.

Quand on dessert des lampes directement placées sur le réseau secondaire des transformateurs, il faut employer pour avoir une lumière fixe une fréquence assez élevée, au moins 23 pour les lampes à incandescence, 42 pour les lampes à arc à foyer enfermé et 50 pour les lampes

à arc à feu nu. Dans ces cas on emploie à peu près généralement la fréquence 50 en Europe et la fréquence 60 en Amérique.

Quand la transmission dessert uniquement des moteurs (qui peuvent être employés pour fournir l'énergie nécessaire à l'éclairage) on adopte une fréquence moins élevée, 25 à 30 périodes ordinairement.

On peut ainsi, comme nous le verrons, employer des conducteurs aériens de section plus forte que pour la fréquence ordinaire, et, en outre, le couplage des alternateurs est beaucoup plus simple (les moteurs actionnant les alternateurs n'ont pas besoin d'avoir une allure aussi régulière). Les alternateurs et les moteurs sont meilleur marché, les transformateurs seuls sont, à puissance égale, un peu plus lourds et plus chers ; d'autre part, les convertisseurs fonctionnent beaucoup mieux.

Système monocyclique

Le système monocyclique, dû à M. Steinmetz, permet d'assurer l'éclairage au moyen de deux fils et d'avoir un troisième fil pour les moteurs. Son emploi a permis de placer des moteurs démarrant facilement sur des réseaux à courants alternatifs simples ; aussi, aux Etats-Unis la general electric C° a-t-elle substitué dans beaucoup d'installations ce système au système à courant alternatif simple.

En résumé, on a de plus en plus tendance à employer les courants triphasés dans les distributions à courants alternatifs, même celles où la puissance à employer pour l'éclairage prédomine.

CANALISATIONS

On construit actuellement des câbles isolés pouvant supporter des tensions de 20.000 v. et plus, mais, vu les prix très élevés des canalisations souterraines, on ne les emploie que rarement et dans des cas exceptionnels, par exemple aux environs des grandes villes ou dans ces dernières.

La station d'Issy-les-Moulineaux fournit l'énergie pour le service de la Compagnie de l'Ouest, de tramways et, pendant l'Exposition, celle nécessaire au fonctionnement de la plate-forme roulante et du chemin de fer électrique au moyen de courants triphasés à la tension de 5.000 v. entre phases et les canalisations sont souterraines.

A Londres, au chemin de fer métropolitain. l'énergie est distribuée par courants triphasés à 10.000 v. et au chemin de fer de l'île de Manhattan (New-York) à 11.000 v. (¹) avec canalisations souterraines.

On a renoncé à l'emploi de conducteurs concentriques par suite des phénomènes de résonnance ; aujourd'hui l'on utilise des câbles à trois conducteurs, placés sous la même enveloppe.

(1) Quand nous parlons de tension dans le cas de courants triphasés, nous entendons toujours la tension composée ou entre deux phases.

En général, les canalisations à haute tension, par raison d'économie sont aériennes.

Dans certains cas, il serait intéressant de pouvoir construire une partie de la ligne en câbles isolés, par exemple au passage des routes, des lignes de chemin de fer, etc..., mais on craint en général de ne pouvoir suffisamment protéger ces câbles contre l'action de la foudre.

La ligne aérienne du transport d'énergie à 12.000 v. de Chambley à Montréal au Canada comporte trois sections, avec câbles souterrains. La longueur totale de la ligne est de 27 km., celle des trois sections de câbles souterrains de 4 km. Des précautions spéciales ont été prises pour la protection contre la foudre (voir page 141). C'est le seul cas de canalisation mixte qui existe à notre connaissance.

Lignes aériennes

Un inconvénient du courant alternatif est l'augmentation de la résistance des conducteurs par suite de la self-induction dans le fil, qui fait que le courant n'est pas uniformément réparti dans la section, mais se porte plutôt à la partie extérieure.

M. Hospitalier a dressé, d'après les données de M. Potier, une table permettant de déterminer l'augmentation de résistance dans le cas de conducteurs cylindriques.

La table donne les valeurs du facteur k , par lequel il faut multiplier la résistance du conducteur au courant continu, pour avoir la résistance aux courants alternatifs en fonction d'une variable α .

On a :

$$\alpha = \frac{\omega}{r_1} \cdot 10^{-4}$$

ω pulsation du courant, $\omega = 2\pi F$, F étant la fréquence. r_1 résistance du conducteur en *ohms* par kilomètre.

α	k	α	k	α	k
0,1	1,001	4	1,676	9	2,394
0,5	1,020	5	1,853	10	2,507
1	1,078	6	2,07	16	3,096
2	1,263	7	2,146	20	3,415
3	1,479	8	2,274	25	3,735

Pour des valeurs de a supérieures à 23, on a :

$$k = 0,25 + \sqrt{\frac{a}{2}}$$

Pour des valeurs de a , inférieures à 1, on a :

$$k = 1 + \frac{a^2}{12} - \frac{a^4}{180}$$

Pour des fils de cuivre (à la température de 25°), on a :

$$r_1 = \frac{17}{s} = \frac{4 \times 17}{\pi d^2}$$

d étant le diamètre en millimètres.

$$a = 0,000029 \text{ F. } d^2$$

Pour des fils d'aluminium, on a :

$$r_1 = \frac{30}{s} = \frac{4 \times 30}{\pi d^2}$$

$$a = 0,0000164 \text{ F. } d^2$$

On n'a pratiquement pas à tenir compte de l'accroissement de résistance pour les fils de ligne, avec les fréquences ordinairement employées (à la fréquence 50, on a $k = 1,01$ pour un fil de cuivre de 15,75 mm de diamètre).

On emploie souvent des barres de cuivre ou d'aluminium pour réaliser les connexions entre les alternateurs, les tableaux et les transformateurs, et quand les alternateurs sont à tension peu élevée, ces barres peuvent avoir de fortes sections ; il faut alors employer des bandes minces. Il n'existe malheureusement pas de données sur l'augmentation de résistance des conducteurs de section rectangulaire, mais on peut admettre que pour une barre d'épaisseur e , l'augmentation de résistance est la même que pour un conducteur cylindrique de section e^2 et employer les relations données ci-dessus ; dans ce cas pour le cuivre (à 25°) on a, si e est l'épaisseur de la bande en millimètres :

$$a = 0,000037 \text{ Fe}^2$$

et pour l'aluminium :

$$a = 0,0000209 \text{ Fe}^2$$

Le tableau suivant donne pour des bandes de cuivre l'augmentation de résistance à diverses fréquences.

ÉPAISSEUR en mm e	DIAMÈTRE du fil de section équivalente	VALEURS DE K POUR LA FRÉQUENCE				
		25	50	60	100	133
10	11,3	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02
15	16,9	1,00	1,01	1,02	1,05	1,09
20	22,6	1,01	1,04	1,06	1,16	1,26
25	28,1	1,03	1,10	1,16	1,33	1,48
30	33,8	1,05	1,20	1,26	1,57	1,75
50	56,4	1,33	1,79	1,92	2,44	3,05

Un autre inconvénient des courants alternatifs est la chute de tension due à l'inductance des lignes aériennes.

M. Blondel (*Eclairage électrique* du 24 novembre 1894), a démontré que le coefficient d'inductance L était égal au coefficient de self-induction du fil L' diminué du coefficient d'induction mutuelle M , des fils de la ligne.

Le tableau suivant donne la valeur de $2\pi L'$ par kilomètre de ligne en unités pratiques.

DIAMÈTRE du fil en mm	VALEUR de $2\pi L'$	DIAMÈTRE du fil en mm	VALEUR de $2\pi L'$
3	0,00270	8	0,00147
4	0,00234	9	0,00132
5	0,00206	10	0,00119
6	0,00182	11	0,00107
7	0,00163		

Les valeurs de $-2\pi M$ sont données dans le tableau suivant en fonction de l'écartement des fils, en unités pratiques, au kilomètre.

DISTANCE entre fils en cm	VALEUR de $-2\pi M$	DISTANCE entre fils en cm	VALEUR de $-2\pi M$
30	0,00427	90	0,00565
40	0,00463	100	0,00578
50	0,00491	120	0,00601
60	0,00514	150	0,00629
70	0,00534	200	0,00665
80	0,00550		

Pour avoir l'inductance totale d'une ligne ωL , il suffira de multiplier la somme des valeurs correspondantes des deux tables par la fréquence du courant employé.

Si R est la résistance ohmique d'un fil, le diagramme de la figure 1 permettra de déterminer la chute totale de tension $OB - OA$, l'angle de décalage φ , entre le courant et la d. de p. u' à l'extrémité de la ligne étant donné. On pourra également déterminer le décalage φ' à l'origine de la ligne. (Dans le cas d'une ligne à double fil, rI et $\omega L I$ sont le double des valeurs pour un fil; dans le cas d'une ligne triphasée rI et $\omega L I$ sont les valeurs trouvées pour un fil, mais u et u' sont les différences de potentiel étoilées et non entre fils).

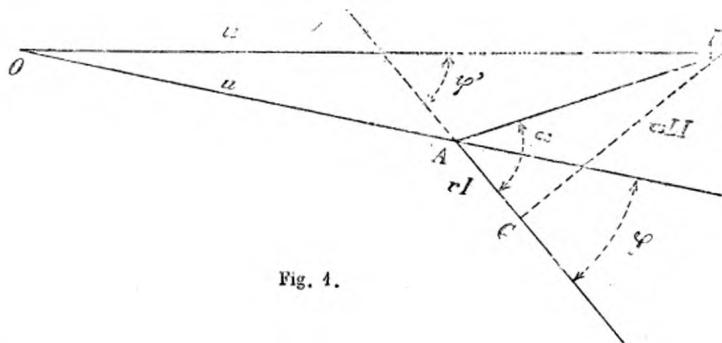


Fig. 4.

En général, on s'arrange pour que les pertes soient très faibles, de sorte que AC est très petit, la chute de tension peut être prise égale à AB , qui est du reste un maximum.]

La chute de tension est alors $u - u' = AB = \frac{rI}{\cos \alpha}$, et le rapport de la chute totale à la chute ohmique est $\frac{1}{\cos \alpha}$.

Le tableau suivant donne pour des fils espacés de 50 cm., ce qui est le cas ordinaire de la pratique, pour des tensions inférieures à 20000 v., les valeurs de ωL , $\operatorname{tg} \alpha$, $\cos \alpha$, et $\frac{1}{\cos \alpha}$ (c'est-à-dire le coefficient par lequel on doit multiplier la chute ohmique pour avoir le maximum de la chute réelle) pour des fréquences de 25, 50 et 100 à la seconde.

Quand $\cos \alpha$ est plus grand que $\cos \varphi$, le décalage à l'origine de la ligne est plus petit qu'à l'extrémité; dans le cas contraire, il est plus

grand, et dans ce dernier cas ($\cos \varphi < \cos \varphi'$), pour la même énergie à transporter, l'intensité du courant doit être augmentée. Pour une ligne servant à l'éclairage, avec $\cos \varphi' = 0,90$ environ, on voit que, dès que les conducteurs ont une section supérieure à 20 mm^2 pour une fréquence de 50, le facteur de puissance à l'origine est plus petit qu'à l'extrémité de la ligne.

On ne peut, en outre, à moins d'avoir des variations de tension très élevées, prendre des conducteurs de grande section, même en réglant la tension à l'usine pour maintenir une différence de potentiel constante en un des points de la ligne, celle des autres points variant trop.

Diam. du fil en cm	Sec- tion mm ²	Résis- tance en ohms par km	Valeur de ωL en unités pratiques au kilomètre pour les fréquences.			Cos α pour les fréquences.			$\frac{1}{\cos \alpha}$ pour les fréquences		
			25	50	100	25	50	100	25	50	100
3	7,07	2,40	0,191	0,381	0,761	0,997	0,987	0,953	1,00	1,01	1,05
4	12,57	1,36	0,182	0,363	0,725	0,991	0,967	0,882	1,01	1,03	1,13
5	19,64	0,87	0,174	0,349	0,697	0,980	0,928	0,781	1,02	1,08	1,28
6	28,27	0,60	0,168	0,337	0,673	0,963	0,872	0,666	1,04	1,15	1,50
7	38,49	0,45	0,164	0,327	0,654	0,940	0,809	0,568	1,06	1,24	1,76
8	50,27	0,34	0,160	0,319	0,638	0,905	0,728	0,471	1,10	1,37	2,12
9	63,62	0,26	0,156	0,312	0,623	0,858	0,640	0,392	1,17	1,56	2,55
10	78,54	0,21	0,152	0,305	0,610	0,810	0,568	0,326	1,23	1,76	3,07
11	95,03	0,17	0,150	0,299	0,598	0,751	0,494	0,274	1,33	2,02	3,65

Le tableau fait bien ressortir l'avantage de l'emploi de la basse fréquence.

La capacité des lignes aériennes n'a pratiquement aucune influence au point de vue de l'exploitation. Elle peut seulement entraîner des phénomènes de surélévation de tension quand la ligne n'est pas chargée.

La capacité d'une ligne aérienne est due à la capacité uniformément répartie des conducteurs et à la capacité des isolateurs.

La capacité uniformément répartie, en microfarads est, d'après Steinmetz, donnée par kilomètre par la relation :

$$C = \frac{0,012}{\log. \frac{d}{r}}$$

dans laquelle $\log \frac{d}{r}$ est le logarithme ordinaire du rapport de la distance entre les fils, à leur rayon.

La capacité des isolateurs est très faible, particulièrement dans les isolateurs de forte épaisseur employés dans les transmissions à haute tension.

La période de résonnance d'un circuit électrique est donnée très approximativement par la relation

$$T = 0,00629 \sqrt{L \cdot C}.$$

T étant la période en secondes $\left(\frac{1}{T} \right)$ la fréquence L le coefficient de self induction en henrys et C la capacité en microfarads.

Si l'on ne tient compte que de la capacité du conducteur, on aura, si l représente la longueur du conducteur en kilomètres, c' la capacité et l' le coefficient de s. i. au kilomètre.

$$T = 0,00629 l \cdot \sqrt{l' \cdot c'}$$

qui montre que la période de résonnance augmente avec la longueur d'une ligne (c'est-à-dire que la fréquence de résonnance diminue).

Supposons, par exemple, une ligne constituée par des fils de 10 mm de diamètre écartés de 60 cm, nous aurons :

$$C' = \frac{0,012}{\log. \frac{600}{10}} = \frac{0,012}{\log. 60} = \frac{0,012}{1,7781} = 0,00675$$

d'après les tableaux de la page 7 on aura :

$$2 \pi l' = 0,00147 + 0,00514 = 0,00661.$$

$$l' = \frac{0,00661}{2 \pi} = 0,00105.$$

$$\sqrt{c' \cdot l'} = \sqrt{0,0000070875} = 0,00266$$

$$T = 0,00629 \times 0,00266 l = 0,000167314 l.$$

$$F = \frac{1}{T} = \frac{60000}{l}$$

pour un conducteur de 100 km., la fréquence de résonnance serait 600. Si la fréquence du courant était de 50, l'harmonique de fréquence 12 fois plus forte donnerait lieu à la résonnance.

La condition de ne pas avoir une chute de tension exagérée force souvent, avec les courants alternatifs, à constituer la canalisation de plusieurs lignes placées en parallèle afin d'éviter l'emploi de conducteurs de section trop forte; ce qui complique la construction.

A ce point de vue le courant continu est plus avantageux, car on n'est pas limité par la section des conducteurs, la chute de potentiel étant due uniquement à la résistance ohmique.

Au point de vue de l'emploi des hautes tensions, on est limité comme nous le verrons plus loin, non pas tant par des considérations d'isolement, que par le fait que, à partir d'une certaine tension, par suite de décharges entre les fils, une partie de la puissance est perdue. Il peut arriver que l'emploi d'une très haute tension entraîne à des pertes d'énergie plus élevées que l'emploi d'une tension moindre, avec les mêmes sections de fils.

Dans tous les cas, que l'on considère les questions d'isolement ou celles de pertes entre les fils, il faut toujours se baser sur la valeur de la tension maximum, et non celle de la tension efficace dans le cas de courants alternatifs. Au point de vue de l'isolement, si une ligne n'a aucun point à la terre, l'isolement est assuré par deux séries d'isolateurs (on peut considérer les poteaux comme n'isolant pas et la tension sur toute la ligne comme uniforme, la perte étant petite) placés pour ainsi dire entre les fils deux par deux en tension, qui doivent résister dans le cas du courant continu à une tension e , tension maximum du courant mesurée, et dans le cas de courants alternatifs à une tension $\sqrt{2}e$, e étant la tension efficace entre deux conducteurs, aussi bien pour le courant alternatif simple que pour les courants triphasés (¹).

Quand un point de la ligne est à la terre, dans le cas du courant continu et du courant alternatif simple, une seule série d'isolateurs est soumise soit à la tension e , soit à la tension $\sqrt{2}e$ et l'isolation est deux fois plus éprouvée. Il faut mettre à la terre soit le milieu de l'enroulement induit des alternateurs (²), soit le milieu de l'enroulement secondaire des transformateurs élévateurs de tension, pour que l'isolation ne soit pas plus éprouvée que dans le premier cas, la tension par isolateur étant $\frac{1}{2}e$ pour le courant continu et $\frac{1}{2}\sqrt{2}e$ pour le courant alternatif simple. Dans le cas de courants triphasés on peut mettre à la terre les centres d'étoiles, et, dans ce cas, chaque série d'isolateurs doit résister à une tension ainsi calculée :

(¹) On admet ainsi que le courant est sinusoïdal; en pratique avec certaines courbes du courant le rapport peut être beaucoup plus élevé.

(²) Dans le cas du courant continu, il faudrait mettre à la terre un point placé entre les génératrices occupant le milieu de la série.

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{2}e}{\sqrt{3}} = 0,577 \sqrt{2}e$$

c'est-à-dire pas beaucoup plus élevée que dans le premier cas.

La mise à la terre a l'inconvénient de doubler pour ainsi dire les chances d'interruption du service; en effet un défaut d'isolement en un seul point de la ligne donne lieu à un court-circuit, tandis que, dans le cas où aucun point n'est mis à la terre, il faut que deux points de deux conducteurs différents aient des défauts d'isolation.

Pour pouvoir comparer les divers systèmes de distribution au point de vue du poids du cuivre :

Supposons une puissance W à transmettre à l'extrémité d'une ligne, de longueur l , avec une perte de puissance w donnée.

Désignons par ρ la résistance ohmique du fil par unité de longueur, pour l'unité de section, et par S , la section totale du cuivre de la ligne.

Pour le courant continu. Si ε est la tension entre les deux fils et I l'intensité du courant, on a :

$$\begin{aligned} W &= \varepsilon \cdot I & I &= \frac{W}{\varepsilon} \\ w &= 2rI^2 & r &= \frac{\rho l}{s} \\ w &= \frac{2\rho l}{s} \cdot \frac{W^2}{\varepsilon^2} & s &= 2 \cdot \frac{\rho l}{w} \cdot \frac{W^2}{\varepsilon^2} \\ S &= 2s = 4 \cdot \frac{\rho l}{w} \cdot \frac{W^2}{\varepsilon^2} \end{aligned}$$

Pour le courant alternatif simple, si ε' est la tension entre les deux fils, et $\cos \varphi$ le facteur de puissance, on a :

$$\begin{aligned} W &= \varepsilon' \cdot I \cos \varphi : \\ S &= 4 \cdot \frac{\rho l}{w} \cdot \frac{W^2}{\varepsilon'^2 \cos^2 \varphi} \end{aligned}$$

Pour le courant triphasé, si ε'' est la tension entre les deux fils, I'' l'intensité du courant dans un fil et $\cos \varphi$, le facteur de puissance, on a :

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{3} \cdot \varepsilon'' I'' \cos \varphi. & I'' &= \frac{W}{\sqrt{3} \cdot \varepsilon'' \cos \varphi} \\ w &= 3r \cdot I''^2 & r &= \frac{\rho l}{s} \\ w &= 3 \cdot \frac{\rho l}{s} I''^2 & s &= 3 \cdot \rho l \cdot \frac{W^2}{3 \cdot \varepsilon''^2 \cos^2 \varphi} \\ S &= 3s = 3 \cdot \frac{\rho l}{w} \cdot \frac{W^2}{\varepsilon''^2 \cos^2 \varphi} \end{aligned}$$

Les sections totales des fils conducteurs sont donc proportionnelles :

Pour le courant continu à	$\frac{100}{\varepsilon^2}$
Pour le courant alternatif simple à . .	$\frac{100}{\varepsilon'^2 \cos^2 \varphi}$
Pour les courants triphasés à	$\frac{75}{\varepsilon'^2 \cos^2 \varphi}$

Si la tension efficace des courants alternatifs est égale à la tension du courant continu on a :

$$\varepsilon = \varepsilon' = \varepsilon''$$

et les sections totales des conducteurs sont proportionnelles :

Pour le courant continu à	$\frac{100}{\varepsilon^2}$
Pour le courant alternatif simple à . . .	$\frac{100}{\cos^2 \varphi}$
Pour les courants alternatifs triphasés à .	$\frac{75}{\cos^2 \varphi}$

Si les tensions maxima sont égales (c'est-à-dire si les isolements sont également éprouvés) on a :

$$\varepsilon' = \varepsilon'' = \sqrt{2} \varepsilon.$$

et dans ce cas les sections et les poids sont proportionnels :

Pour le courant continu à	$\frac{100}{\varepsilon^2}$
Pour le courant alternatif simple à . . .	$\frac{200}{\cos^2 \varphi}$
Pour les courants alternatifs triphasés à .	$\frac{150}{\cos^2 \varphi}$

Ce qui fait bien ressortir l'avantage de l'emploi du courant continu au point de vue du poids du cuivre de la ligne.

Dans les distributions à courant alternatif simple, on a principalement à desservir des lampes à incandescence ; dans ce cas, on peut admettre pour $\cos \varphi$ la valeur 0,90.

Le poids du cuivre, à tension maxima égale, est alors : $\frac{2}{0,92} = 2,47$ fois plus élevé que pour le courant continu.

Avec $\cos \varphi = 0,90$ le poids du cuivre dans le cas d'emploi de courants triphasés $\frac{150}{0,92} = 1,83$ fois plus élevé que pour le courant continu.

A facteur de puissance égal, le poids du cuivre pour le courant alternatif simple est 1,33 fois plus élevé que pour les courants alternatifs triphasés.

On a procédé en Amérique à des essais sur les courants à très haute

tension, dont M. Scott a rendu compte à l'Institut des Ingénieurs Américains (¹), nous donnons ci-dessous un résumé du rapport de M. Scott.

Dans ces essais, on a constaté que les pertes d'énergie par suite de dérivations aux isolateurs, c'est-à-dire par suite de défaut d'isolation sont insignifiantes. Sur une ligne avec isolateurs à double cloche en verre (de 14 cm de diamètre maximum et une hauteur de 12^{cm},7), on a relié par un fil les isolateurs et par un autre fil leurs tiges, la perte d'énergie, même par un temps humide, n'a pas dépassé 2 watts par isolateur pour une tension de 25 000 v. (ce qui correspond à une tension de 30 000 v., dans la pratique, où l'on a pour ainsi dire deux isolateurs en série entre les fils). Du reste la présence du courant sur la ligne semble améliorer l'isolation, probablement en faisant disparaître en partie l'humidité. Ainsi, par des temps humides, au moment de la mise du courant sur la ligne, le wattmètre marquait 116 divisions, quelques minutes après il n'en marquait plus que 72. Dans un autre essai le wattmètre a marqué 153 divisions et trois minutes après 138.

À Telluride, sur une ligne de 3^{km},37, constituée par 62 poteaux en bois, portant des traverses en bois, sur lesquelles étaient disposés deux de chacun des isolateurs dont les dimensions sont indiquées ci-dessous, on a pu marcher pendant plusieurs jours à une tension de 70 000 volts, les pertes par les temps humides n'augmentant pour ainsi dire pas.

Pendant ces essais, la neige tombée sur les traverses a atteint parfois la partie inférieure des isolateurs.

On a constaté dans les essais faits tant dans les ateliers de la Société Westinghouse, qu'à Telluride, à East. Pittsburg et au Niagara que :

1^o À partir d'une tension de 18 000 volts environ, les fils commencent

Tableau des dimensions des isolateurs employés aux essais de Telluride.

NATURE	NOMBRE de cloches.	HAUTEUR	DIAMÈTRE maximum	DISTANCE du bord inférieur au-dessus de la traverse.
Verre.	2	12,7	17,0	3,17
Verre.	3	0,9	10,79	5,70
Porcelaine. . . .	2	10,22	14,92	7,78

à devenir lumineux, ils entrent en vibration et émettent un son qui s'élève au fur et à mesure que la tension augmente.

(1) Transactions de 1898.

2° Qu'il y a une perte d'énergie corrélative de ces phénomènes et que cette perte est d'autant moindre que les fils sont plus écartés (des fils écartés de 10 cm. donnent lieu, à 23 000 v., à une perte égale à celle de fils écartés de 40 cm à 30 000 v. — Des fils écartés de 35^{cm}, 54 donnent à 69 000 v., la même perte que des fils écartés de 67^{cm}, 77 à 91 000 v.) La perte est moindre pour des fils polis que pour des fils rugueux.

3° Les pertes, toutes choses égales d'ailleurs, sont proportionnelles à la

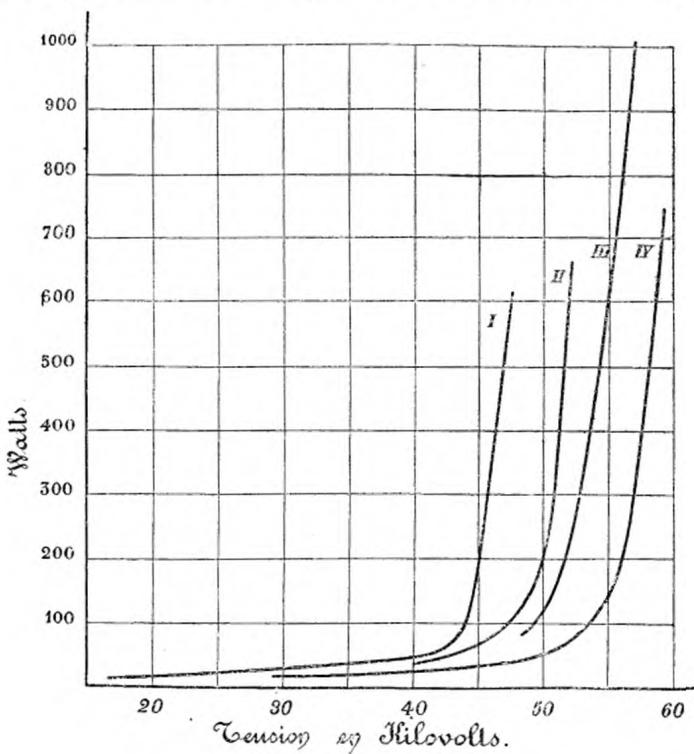


Fig. 2.

longueur de la ligne et comme le montre le tableau donné ci-dessous, elles sont plus faibles pour des fils de grand diamètre que pour des fils fins.

4° La fréquence ne semble pas avoir d'influence sur les pertes d'énergie ; par contre la forme de la courbe de la tension (dont dépend le rapport de la tension maximum à la tension efficace) a une grande influence, les tensions sinusoïdales donnent le minimum des pertes.

Les courbes de la fig. 2 donnent la perte de puissance par kilomètre de ligne constatée dans les essais de Telluride, en fonction de la ten-

sion, pour des fils de 40 mm de diamètre. La courbe I se rapporte à des fils écartés de 38 cm, la courbe II à des fils écartés de 56 cm, la courbe III à un écart de 89 cm et la courbe IV à un écart de 132 cm.

Le tableau suivant montre l'énorme influence du diamètre des fils, il donne la perte d'énergie par kilomètre à diverses tensions (essais de East-Pitsburg).

	PERTE d'ÉNERGIE en WATTS par km à la tension de			
	30000 v.	40000 v.	50000 v.	60000 v.
2 conducteurs en cuivre nu de 6,32 mm de diamètre, espacés de 122 cm ..	1750	3150	5150	»
1 conducteur en cuivre nu de 0,32 mm de diamètre.				
1 conducteur en cuivre nu de 3,25 mm de diamètre, espacés de 61 cm ..	950	1750	4000	»
2 conducteurs en cuivre nu de 3,25 mm de diamètre, espacés de 120 cm ..	190	380	880	2000
2 fils isolés.	20	60	100	300

Les fils isolés avaient un diamètre de 3^{mm},66, pour le cuivre, de 7^{mm},62 pour le caoutchouc; le diamètre total, y compris la tresse, était de 8^{mm},89. A partir de 70 000 v., l'isolant du fil est percé et la perte d'énergie est alors aussi élevée que pour des fils nus.

Le tableau et les courbes montrent nettement l'influence de l'écartement des fils; en écartant les fils on augmente il est vrai l'inductance de la ligne, mais le tableau de la page 122 montre que, à partir de 50 cm d'écartement, cette augmentation n'est pas très importante.

M. Scott a conclu de ces essais, qu'il sera difficile de dépasser pratiquement une tension de 50 000 v. et qu'avec l'emploi d'une telle tension on pourra atteindre des distances de transport de 150 à 180 milles (240 à 290 km.). Pour pouvoir employer une tension de 50 000 v. il faut que l'air soit très pur. Dans les pays où il y a beaucoup de poussières dans l'air il ne serait probablement pas prudent de dépasser 20 000 à 25 000 v. (1).

(1) A Biberest, près Soleure, où est installé un transport d'énergie à 25 km à courant continu (système Thury), à la tension de 8 000 v., l'isolement global est tombé parfois à 2 400 ohms, pour devenir pratiquement infini après l'enlèvement des poussières par la pluie.

A la suite de ces essais, on a installé à Telluride une transmission par courants triphasés à 40 000 v.

La longueur totale de la ligne est de 161 km. Sur 56 km. elle est constituée par des fils de cuivre de 4,61 mm de diamètre, le reste est constitué par du fil d'aluminium d'un diamètre correspondant; l'écartement des fils est de 198 cm. La ligne comporte 12 000 isolateurs en verre. Quoique les pluies et la neige soient très abondantes dans le pays, jamais la perte totale de puissance en ligne n'a dépassé 150 kw.

M. Scott, à la suite de sa conférence, a donné quelques indications sur le fonctionnement des lignes à haute tension.

Sur certaines lignes, on remarque des piqûres sur les tiges en bois des isolateurs (en Amérique on emploie beaucoup des tiges en bois fixées verticalement sur les traverses; à Telluride ces tiges sont en chêne imprégné de paraffine), piqûres qui entraînent parfois la carbonisation de la traverse; il est même arrivé qu'un poteau soit complètement brûlé (on a trouvé parfois les fils suspendus en l'air tenant aux deux autres poteaux, sans qu'on se soit aperçu de rien à l'usine⁽¹⁾). Les piqûres proviennent de décharges dues à des défauts des isolateurs; en remplaçant ceux-ci par des isolateurs de bonne qualité les défauts ont disparu.

Sur une ligne, les piqûres étaient plus abondantes aux poteaux placés près de la mer; principalement du côté du vent régnant amenant les émanations salines.

CONSTRUCTION DES LIGNES.

Il y a un grand intérêt au point de vue de la facilité de la surveillance à installer les lignes le long des chemins. Le grand danger pour les lignes à haute tension est la chute sur les fils des branches d'arbres, par un temps d'orage par exemple; il faut donc bien prendre les précautions nécessaires, éloigner la ligne des arbres ou, si cela est impossible, élaguer ces derniers de manière à éviter tout danger.

La ligne doit être établie dans les meilleures conditions de résistance mécanique possible et il faut tenir compte de l'influence du vent, du verglas et de la neige.

Dans un pays abrité, on peut admettre que la pression maximum du vent sur une surface plane est de 200 kg. par mètre carré (la pression

(1) Le fait s'est même produit sur des lignes à tension relativement faible, à 8 000 volts par exemple.

sur une surface cylindrique de même section droite, fil ou poteau en bois est environ 0⁵,6 de celle sur une surface plane); dans les plaines et au bord de la mer la pression du vent peut atteindre 250 kg. par mètre carré de surface plane.

Par des temps de neige ou de verglas, les fils pouvant se recouvrir de neige ou de glace, on peut admettre (Picou, *Canalisations électriques*) que les valeurs maxima les plus probables sont :

Pour la neige, 10 fois le volume du cuivre, avec une densité de 0,2.

Pour la glace, 3 fois le volume du cuivre, avec une densité de 0,9.

En outre il peut en même temps y avoir du vent, mais on peut admettre que la neige est balayée par un vent de 6 m à la seconde (pression de 3 kg. par mètre carré de section droite de surface cylindrique) et que la glace est cassée par un vent de 10 m (pression de 7,2 kg par mètre carré de section droite surface cylindrique).

Les poteaux peuvent être en bois ou en fer⁽¹⁾; ces derniers sont constitués soit par de tubes (voir la description du transport d'énergie de Johannesburg, Rand), soit par des treillis.

Les poteaux en bois, afin d'avoir une longue durée, doivent être injectés (un poteau non injecté peut durer une dizaine d'années; l'injection double au moins la durée). La substance la meilleure pour l'injection est la créosote ou huile lourde de goudron, mais son prix de revient est élevé. (La durée d'un poteau injecté à la créosote dépasse trente années; sur 7,716 poteaux des lignes télégraphiques des chemins de fer de l'Etat prussien, placés de 1870 à 1875, 191 seulement avaient dû être remplacés par suite de putréfaction, à l'ouverture de l'exposition).

Les poteaux télégraphiques de l'administration des postes et télégraphes en France sont injectés au sulfate de cuivre, d'après le procédé Boucherie. On emploie beaucoup actuellement l'injection, par le procédé Rüdgers, d'un mélange de chlorure de zinc et de créosote qui revient meilleur marché que la créosote pure. (Ce procédé est employé par les chemins de fer de l'Etat français pour les traverses et par l'administration des postes et télégraphes allemands pour les poteaux).

On a également essayé d'employer le sublimé corrosif ou bichlorure de mercure, le chlorure de zinc et certains produits dérivés du goudron, comme le carbonyle (employé pour les poteaux de la ligne triphasée d'Engins à 13 000 v., installée par la Société l'Eclairage électrique).

Pour éviter l'injection soit par pression, soit par élévation de tempé-

(1) On emploie aussi parfois des poteaux en ciment armé.

rature, etc., qui revient toujours à un prix assez élevé, M. Hermann Luban, de Magdebourg, perce au centre de la partie du poteau qui doit être enfoncée dans le sol, un petit canal qu'il ferme à la partie inférieure par un bouchon en bois. Après plantation du poteau, le liquide à injecter est amené dans le canal intérieur au moyen d'un trou percé latéralement. On peut également, au lieu d'injecter les poteaux, les faire tremper pendant quelques jours dans une solution de 10/0 de bichlorure de mercure.

Les poteaux doivent naturellement avoir la hauteur nécessaire pour que le point le plus bas des fils soit à la distance du sol fixée par les règlements administratifs (en France, en rase campagne, le point le plus bas doit être à 3 m au-dessus du sol et, à la traversée des routes, à 6 m).

On emploie ordinairement des fils ou des câbles de cuivre pour la construction des lignes ; on n'utilise pas du fil de cuivre d'un diamètre inférieur à 3 et même 4 mm, car dans ce cas la portée des fils doit être relativement faible (par suite de l'influence du vent) et l'augmentation du nombre des poteaux entraîne à une dépense plus forte que celle de l'augmentation du poids du cuivre. Il y a tout intérêt au point de vue de l'isolement à avoir peu de poteaux.

Les portées ordinaires varient de 40 à 80 m ; dans le cas de traversées de rivières, etc., où on est obligé d'augmenter la portée, il faut employer au besoin des fils ou des câbles en acier.

La portée maximum est certainement celle de la traversée du détroit de Carquinet (Californie) par une ligne triphasée. La ligne comporte, à la traversée, quatre câbles (dont un de réserve), de 11,88 mm de diamètre, constitués par 19 torons de fil d'acier. La portée est de 1 328 m, ja flèche de 30 m et les câbles sont espacés de 6 m seulement.

Dans le cas où on n'a besoin que d'une section de cuivre très faible, on peut remplacer avantageusement le cuivre pur par du bronze phosphoreux ou siliceux d'une conductibilité moindre que celle du cuivre, mais ayant une résistance mécanique beaucoup plus considérable.

En Amérique, par raison d'économie, on commence à employer l'aluminiun pour la construction des lignes. Pour la même résistance ohmique, on a par rapport un conducteur en cuivre pris pour unité :

Section 1,64.

Diamètre 1,27.

Résistance mécanique 0,629.

Poids 0,301.

Les fils en aluminium présentant des points défectueux il faut, avant la pose, les soumettre à une traction voisine de la limite d'élasticité afin de déceler ces points, sinon, au bout de quelque temps, il s'y produit des ruptures. Les raccords des fils doivent se faire au moyen de manchons en aluminium, tout autre métal entraînant la formation d'un couple électrique qui amène bientôt la détérioration du fil.

Les *isolateurs* sont en porcelaine ou en verre ; ce sont les seules substances qui soient inaltérables et qui, dans certaines conditions, n'absorbent pas l'humidité.

Les isolateurs doivent présenter à la fois une grande résistance d'isolation de masse et de surface.

La résistance d'isolation de masse est facile à obtenir avec le verre, il suffit qu'il n'ait pas de fentes, ce que l'on peut vérifier facilement à cause de la translucidité de la substance. Pour que la porcelaine ait un bon isolement de masse, il faut qu'elle soit cuite à très haute température; qu'elle soit d'un grain très fin; la cassure doit en être nette et brillante, et la substance ne doit pas absorber l'humidité, ce dont on s'assure en déposant par exemple une goutte d'encre rouge sur la cassure; la tache ne doit pas s'étendre.

Dans des essais entrepris par M. White, une coupe de bonne porcelaine dure, bien homogène, de 2 mm d'épaisseur a pu résister à 60 000 v., tandis que de la porcelaine poreuse de 2 pouces (5,07 cm) d'épaisseur n'a pu supporter une tension de 20 000 v.

Il faut en outre que l'émaillage ne présente aucune crique ou fente, ce que l'on ne peut vérifier qu'en essayant l'isolateur (ordinairement à une tension au moins double de celle de ligne). L'essai se fait en mettant les isolateurs renversés, la tige en l'air, dans une cuve que l'on remplit d'eau jusqu'à mi-hauteur de la porcelaine. On relie alors la cuve à une des bornes de la source d'électricité (ordinairement un transformateur), et les ferrures à l'autre borne. Un fusible est installé dans le primaire du transformateur. Dès que l'essai commence (à une tension supérieure à 20 000 v.), une forte odeur d'ozone se répand et on entend une sorte de bruissement. Quand un isolateur cède, on entend un son un peu plus bas, puis un bruit sec, la partie de l'isolateur rougit et le fusible fond. Après avoir retiré l'isolateur avarié, on continue pendant 30 à 40 minutes. Quelques isolateurs peuvent ne pas sauter et cependant chauffer par suite de poussières métalliques dans le vernis; on ne doit employer que les isolateurs qui n'ont pas chauffé du tout.

L'isolation de surface dépend de la longueur de la partie extérieure

du profil de l'isolateur, ou ligne de fuite, comprise entre l'endroit où le conducteur repose sur l'isolateur, et la tige; pour allonger cette ligne, on constitue l'isolateur de plusieurs cloches superposées (1). Il faut que la surface soit bien lisse et ne présente aucune rugosité pouvant retenir les poussières; à cet effet, il faut employer du verre très acide contenant peu de sels alcalins, du verre à bouteilles par exemple. La surface des verres alcalins est attaquée à la longue par l'humidité et devient rugueuse.

La cloche extérieure de l'isolateur présente soit une forme arrondie, type en ombrelle, soit une forme cylindrique; il nous semble que cette dernière forme est plus convenable, particulièrement quand on a à craindre le dépôt de poussière, qui est alors plus facilement enlevé par la



Fig. 3.

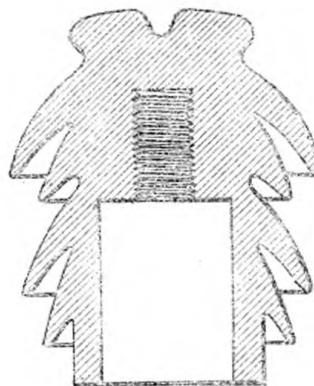


Fig. 4.

pluie. Dans le type à ombrelle, par contre, la distance entre le bord inférieur et la tige est la plus grande, ce qui est un avantage dans le cas de très hautes tensions.

Les isolateurs en verre sont moins résistants mécaniquement que les isolateurs en porcelaine, ils sont par contre moins chers et nous pensons que leur emploi se répandra en Europe, comme cela existe déjà en Amérique.

(1) L'emploi des cloches superposées a en outre l'avantage de soustraire les cloches intérieures aux changements brusques de température, entraînant des dépôts d'humidité; en effet, celles-ci sont protégées par la cloche extérieure. On a renoncé à l'emploi des isolateurs à garde d'huile qui ont eu tant de succès à un moment donné (employés lors des essais de Lauffen-Francfort). L'huile se recouvre bientôt de moisissures et d'insectes, et est plutôt nuisible qu'utile; l'entretien étant pratiquement impossible.

En Amérique, un grand nombre d'accidents de ligne sont dus au bris des isolateurs par des balles de carabine; en Europe, on n'a guère à

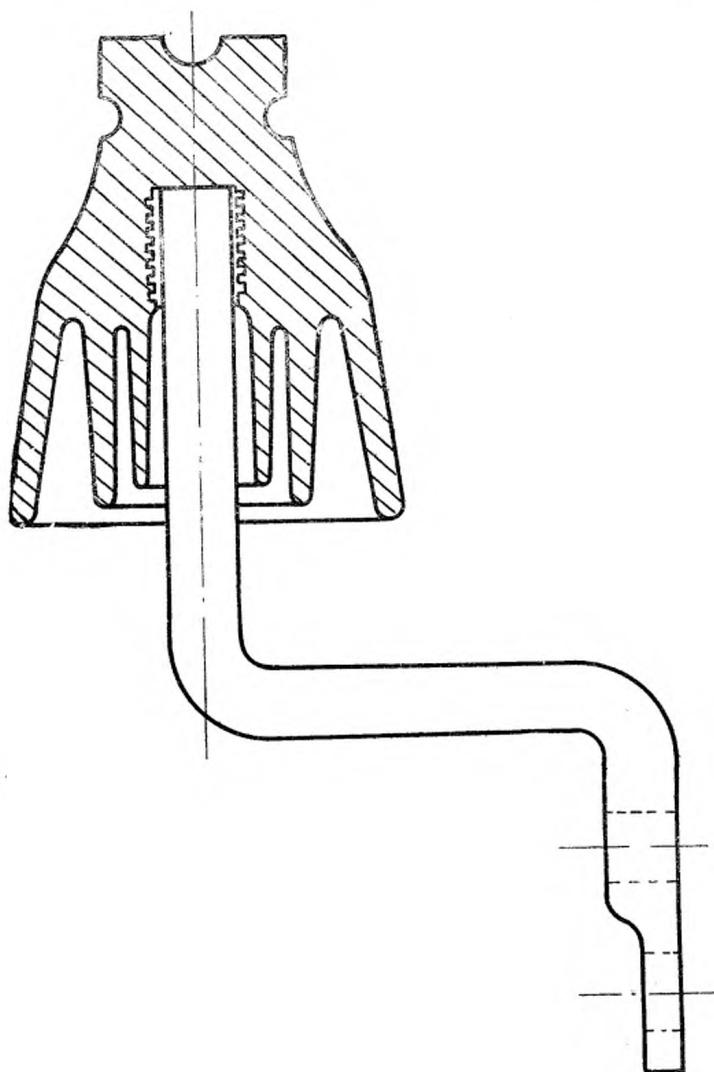


Fig. 5.

craindre cet inconvénient, mais les isolateurs sont exposés au jet de pierres. Si les pierres ne peuvent casser un gros isolateur placé très haut, elles peuvent tout au moins fendre l'émail des isolateurs en por-

celaine, de sorte que ceux-ci sont bientôt hors de service; tandis qu'un isolateur en verre, dont la partie inférieure de la cloche est fendue, peut encore résister. Un autre avantage des isolateurs en verre est qu'ils sont moins visibles et moins exposés à servir de cibles (en Belgique, sur certaines lignes, l'administration des postes et télégraphes a dû employer des isolateurs à émail gris, moins visibles que les blancs).

La fig. 3 représente un isolateur de la maison Parvillé frères, de Paris. Les isolateurs de ce type, employés par la Société l'Eclairage électrique, dans la distribution de la vallée du Grésivaudun, à 12 000 v., ont un diamètre de 112 mm et une hauteur de 165 mm.

La fig. 4 représente, au quart de la grandeur naturelle, l'isolateur

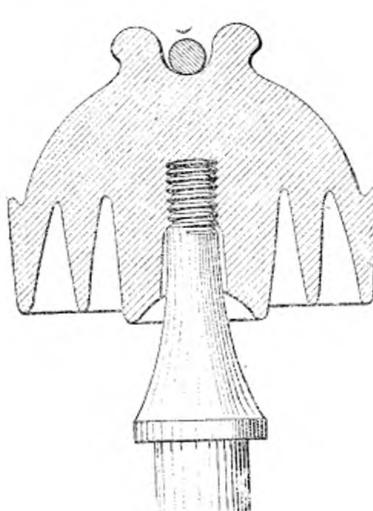


Fig. 6.

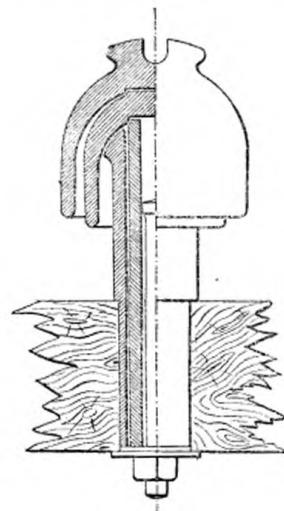


Fig. 7.

construit par la maison Ginori, de Gênes, pour la distribution de Paderno-Milan, à 15 000 v.

L'isolateur de la distribution de Saint-Georges (20 000 v.), étudié par la Société des Applications industrielles et construit par la fabrique de produits céramiques de Sainte-Foix l'Argentière est représenté fig. 5, au tiers de la grandeur naturelle.

La fig. 6 représente l'isolateur en porcelaine employé à Niagara-Falls, à 12 000 v.; son diamètre est de 18 cm, il est muni d'une tige en bois fixée verticalement dans une traverse horizontale, le bord inférieur de l'isolateur est à 5,5 cm au-dessus de la traverse.

L'isolateur est muni sur le pourtour d'une sorte de gouttière, dis-

posée de manière que l'eau de pluie tombe de part et d'autre de la traverse qui a une largeur de 10 cm environ (4 pouces).

L'isolateur représenté fig. 7 est construit par la maison Locke, de New-York ; il est constitué par deux coupes en porcelaine, reliées entre elles et aux gaines entourant la tige, au moyen d'un vernis fondu. L'avantage de ce système est que l'on fabrique d'abord des parties minces qui peuvent être homogènes et bien cuites.

La fig. 8 représente un isolateur « Victor » de la maison Locke, formé également de plusieurs parties. La tête en porcelaine, d'un grand diamètre, porte une rigole rejetant les eaux en dehors de la traverse ; la



Fig. 8.

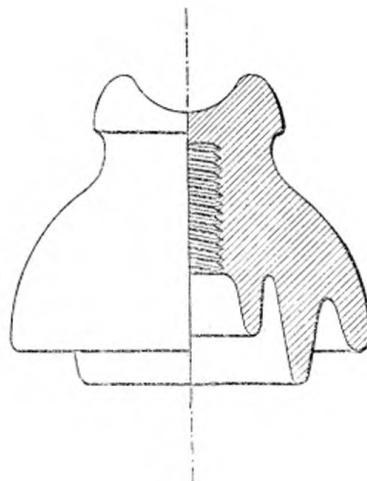


Fig. 9.

partie intérieure très allongée est en verre ou en porcelaine. La tige en acier est elle-même entourée à sa base par une gaine en porcelaine en forme de cône et se termine, à la partie supérieure, par une partie filetée en bois paraffiné qui se visse dans l'isolateur. D'après les données de la maison Locke (représentée en France par la maison Blackwell) un isolateur Victor ayant un diamètre de 10,5 pouces (26,7 cm) peut être employé pour une tension de 60 000 v. et est essayé à 120 000 v.

La fig. 9 représente un isolateur en verre de la même maison pour une tension de 5 000 v. ; son diamètre est de 11,4 cm, sa hauteur de 8,9 cm.

L'isolateur en verre employé au transport d'énergie de Provo (Telluride), à 40 000 v., est représenté fig. 10.

M. E. Sartiaux, ingénieur-chef du service électrique des chemins de fer du Nord, a procédé à des essais d'isolateurs en verre sur la ligne diphasée à 10 000 v., de Saint-Ouen à la gare du Nord. Depuis deux ans que ces isolateurs à double cloche, de forme presque cylindrique, d'un diamètre de 85 mm et d'une hauteur de 113 mm, construits par la verrerie de Folembray, sont en service, ils ont donné toute satisfaction tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique.

Le scellement des tiges en fer des isolateurs peut se faire au moyen d'étoupe enduite d'huile de lin, il faut alors prendre beaucoup de précaution pour ne pas faire éclater la porcelaine ; ce système de scellement est utilisé par l'administration des postes et télégraphes allemande, il est à recommander pour les isolateurs à haute tension.

Le scellement au soufre est également très bon, mais il faut que l'opé-



Fig. 10.

ration soit faite avec précaution ; il est à recommander de chauffer l'isolateur avant d'y verser le soufre ; sans cela le brusque changement de température fait fendre la porcelaine, et les fentes d'abord imperceptibles s'agrandissent bientôt sous l'influence des vibrations, de sorte que l'isolateur est perdu. On attribue parfois aussi le bris des isolateurs scellés au soufre, à la formation d'un sulfure de fer autour de la tige, ce qui entraîne un foisonnement.

Le scellement au plâtre, bien exécuté, peut donner une grande solidité. On a également essayé de sceller au ciment et avec certains alliages à point de fusion très peu élevé.

En Amérique, où l'on a des bois de très bonne qualité, on emploie des tiges en bois paraffiné, tout simplement vissées dans l'intérieur de l'isolateur (fig. 6), la tige est fixée dans un trou percé dans la traverse

horizontale et au besoin maintenue par un goujon. L'emploi de tiges en bois a l'avantage de fatiguer moins l'isolateur et de diminuer la capacité de la ligne. Le bois doit être résistant et élastique, le chêne ne convient guère, il se brise au bout de quelques années.

Il faut prendre des précautions pour qu'un fil cassé qui tombe à terre ne fasse pas courir de dangers aux personnes qui viendraient à le toucher.

L'emploi d'un fil isolé est une précaution illusoire dans le cas de très hautes tensions.

Il vaut mieux employer des fils nus et prendre des dispositions pour que tout fil cassé soit mis à la terre.

Il suffit d'installer sur le poteau des sortes de fourches en fer (voir la distribution de Wiesloch), reliées à la terre, sur lesquelles le fil cassé vient tomber. Dans le cas où le fil ou le câble est un peu raide, il faut placer ces fourches assez loin du poteau, pour être bien sûr que les fils cassés viendront reposer dessus.

On peut également disposer, de chaque côté d'un isolateur, une petite fourche au milieu duquel le fil tendu passe. Ces fourches peuvent être fixées à la tige de l'isolateur reliée elle-même à la terre. Il faut avoir soin de ne pas employer d'anneaux, ou de dispositifs 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 on aurait alors une perte d'énergie due à l'induction dans le fer. Dans le cas où le circuit à haute tension a déjà 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. Il peut ne pas en être de même dans le cas contraire et alors, en touchant un fil, il peut arriver qu'on supprime son contact avec la fourche, de sorte qu'il y a danger.

On a également proposé d'installer sur le fil, à proximité de l'isolateur, un tube en matière isolante, rempli à demi de mercure qui, lorsque le fil est tendu et le tube horizontal, établit la communication. Quand le fil casse, le tube se place à peu près verticalement, le mercure vient à la partie inférieure et la communication est rompue. Il est bien difficile de réaliser un bon isolement de cette manière pour de très hautes tensions et, en tout cas, le prix de tels dispositifs est très élevé.

À la traversée des routes et au passage au-dessus des canalisations aériennes, téléphoniques, télégraphiques, etc. on doit placer au-dessous des fils à haute tension un filet, en fil de fer galvanisé, mis à la terre, filet qui retient un fil cassé. Quand la ligne doit traverser une voie de

chemin de fer, on est souvent forcé de construire une sorte de passerelle en treillis, à la partie supérieure de laquelle on dispose les isolateurs.

La fig. 11 montre la traversée d'une voie de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée, par la ligne triphasée d'Engins-Voiron installée par la Société l'Eclairage électrique.

Quand la canalisation à haute tension passe au-dessous d'autres ca-

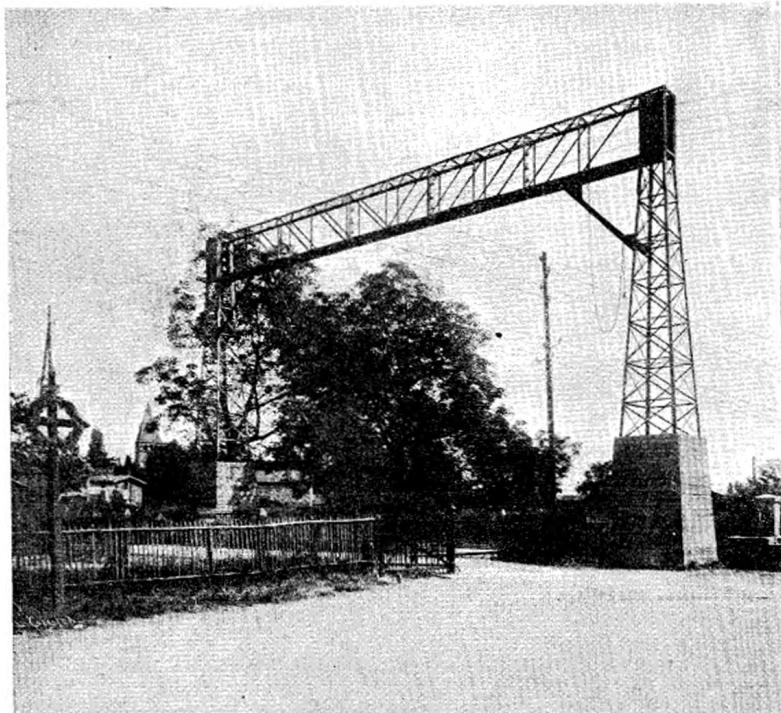


Fig. 11.

nalisations, il faut empêcher les fils de ces dernières, en cas de rupture, de pouvoir toucher aux fils à haute tension.

La fig. 12 montre les dispositions adoptées par la maison Siemens et Halske de Berlin, dans la distribution triphasée à 10 000 v. de Eichdorf Grünberg en Silésie, au croisement des fils téléphoniques dans l'intérieur des agglomérations.

A la partie supérieure des poteaux est adaptée une traverse métallique portant, de part et d'autre du poteau, trois fils de fer; au haut du poteau est installée une ronce artificielle, formant paratonnerre.

Au-dessous des fils à haute tension est disposée une seconde traverse métallique qui porte deux fils, entre lesquels sont disposés de distance en distance des fils transversaux formant filet. De chaque côté des conducteurs à haute tension sont disposés deux fils de fer portés par des fils diagonaux fixés aux traverses.

L'ensemble des fils de fer, enveloppant pour ainsi dire les conducteurs à haute tension, est mis à la terre. On a fait de nombreux essais, en coupant des fils téléphoniques traversant la ligne à haute tension, et jamais le fil coupé, en tombant, n'est venu toucher les conducteurs à haute tension.

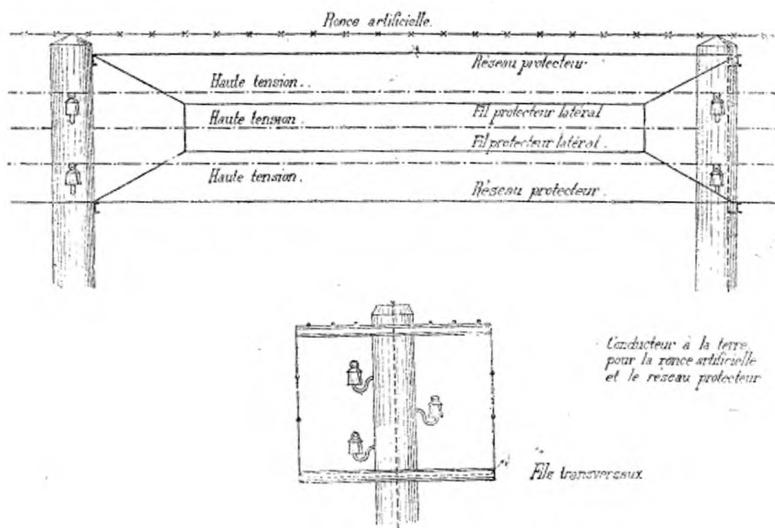


Fig. 12.

On doit disposer autour des poteaux des ronces artificielles, pour empêcher d'y grimper, et y placer, près des routes, des inscriptions prévenant le public du danger qu'il y a à toucher aux fils.

Les lignes doivent être protégées par des *paratonnerres* et des *parafoudres* sont installés pour la protection des appareils.

Comme paratonnerre, on peut disposer au-dessus des poteaux, une sorte de ronce artificielle portant des pointes (fig. 12). A Eichdorf Grünberg, la ronce règne sur toute la longueur de la ligne et est mise dans la campagne à la terre tous les six poteaux. Sur la ligne de Chambley (Canada), à 12 000 v., sont disposés trois fils de ronce artificielle, l'un au sommet du poteau, les deux autres à chacune des extrémités de la

traverse supérieure ; les trois ronces qui sont supportées par des isolateurs en verre sont mises à la terre à tous les poteaux. Lors d'un violent orage, les lignes voisines non munies de ronces ont été endommagées par la foudre, malgré les paratonnerres, tandis que celle munie de ronces est restée intacte quoi qu'elle soit en partie souterraine (voir p. 118).

Les poteaux en bois peuvent aussi être munis de pointes, reliées entre elles et à la terre par un fil de fer. Il faut tout au moins munir de pointes mises à la terre quatre ou cinq poteaux de part et d'autre des poteaux formant des points hauts de la ligne.

Les poteaux en fer sont munis de pointes (voir la distribution de Johannesburg).

Les *parafoudres* sont des appareils placés en dérivation sur les conducteurs et reliés à la terre : ils doivent livrer passage aux décharges atmosphériques, et protéger contre leur irruption les divers machines et appareils (¹).

Les parafoudres doivent réaliser deux conditions :

1^o Que les décharges atmosphériques passent plutôt par le parafoudre que de continuer à suivre la ligne.

2^o Que le courant à haute tension ne puisse passer par ce dernier, surtout quand, l'arc étant formé, la résistance est beaucoup moins grande.

Les décharges oscillatoires de la foudre ayant une fréquence beaucoup plus élevée que celle des courants industriels, il est possible d'intercaler dans la ligne, entre la dérivation du paratonnerre et les appareils à protéger, une bobine à réaction offrant une très grande résistance au courant à haute fréquence, (d'après M. Steinmetz, la fréquence est de 7 300 pour une ligne de 10 km. 750 pour une ligne de 100 km. et 500 pour une ligne de 130 km.) et une faible résistance aux courants indus-

(1) Il se produit parfois des décharges atmosphériques par des très beaux temps, particulièrement quand la ligne présente des différences d'altitude.

Dans un article paru dans la *Revue d'électricité* de Berne du 15 janvier 1898 M. Ritter cite le cas d'une ligne de 40 km. établie à Grenade (Espagne), par la société Alioth, de Bâle où tous les soirs régulièrement de fortes décharges atmosphériques ont lieu au coucher du soleil.

La ligne de l'usine à Grenade, suit un profil en faible pente interrompu brusquement au milieu par une dénivellation de 70 m. de hauteur. D'après M. Ritter en ce point culminant, la ligne provoque une décharge entre les couches atmosphériques froides massées au fond de la vallée, chargées à un certain potentiel et celles supérieures encore chauffées par les rayons du soleil couchant et chargées à un autre potentiel. Ces décharges se produisent sans accompagnement des phénomènes habituels tels que détonations, éclairs etc... Le fonctionnement des parafoudres automatiques Alioth (voir page 147) permet seul de s'en rendre compte.

triels. Quand la décharge n'est pas oscillatoire, elle est d'une durée excessivement faible, de sorte que les bobines à réaction lui offrent également une très grande résistance.

Dans le paratonnerre, la décharge atmosphérique franchit un (ou plusieurs) espace d'air, infranchissable à la tension de la ligne en temps ordinaire, mais dont la résistance peut diminuer dans le cas de formation d'un arc. Il faut donc que l'espace d'air que doit franchir la foudre soit en rapport avec la tension en ligne, et aussi qu'il ne soit pas trop grand afin de laisser un passage facile à la décharge atmosphérique.

On peut baser la construction des parafoudres sur l'un des principes suivants :

1^o Sur le fait que l'arc permanent s'établit beaucoup moins bien quand le courant est obligé de franchir successivement plusieurs espaces d'air, placés pour ainsi dire en cascade.

2^o Sur le fait que certains métaux et alliages, (métaux anti-arc, non arc-ing-metals), ont la propriété de ne pas former d'arc, ou des arcs s'éteignant rapidement.

3^o L'arc peut être rompu, au moyen d'une disposition mécanique, éloignant momentanément les parties entre lesquelles il a éclaté.

4^o L'arc peut être soufflé par une action magnétique ou par un courant d'air.

Le paratonnerre de la maison *Voigt et Haeffner* est basé sur le premier principe. Des disques d'un métal spécial sont enfilés à la partie supérieure sur deux tiges isolantes et séparés par des disques en matière isolante.

Le nombre de disques est proportionné à la tension en ligne.

L'ensemble forme un bloc rectangulaire (voir P fig. 33), qui porte quatre broches qu'on enfonce dans des trous correspondants percés dans des tiges placées à l'intérieur d'isolateurs et en communication, les deux d'un côté avec la ligne, les deux de l'autre avec la terre.

Si par hasard un des disques fond, le métal coule, tombe et ne forme pas de court-circuit. La partie amovible est facilement démontable pour le remplacement des disques, etc.

La Stanley Electric C° emploie un paratonnerre dans lequel, à la suite de l'espace d'air, sont disposés des tubes de verre contenant des boules métalliques qui forment le circuit. Un tel appareil a une résistance de 50 mégohms.

Le parafoudre Wirt employé par la General Electric C° (Société Thomson-Houston), sur les circuits à courants alternatifs, est constitué

par des cylindres de cuivre, de 50 mm de hauteur et 50 mm de diamètre, terminés par des boules ou pointes de décharge séparées par un intervalle d'air de 0,4 mm

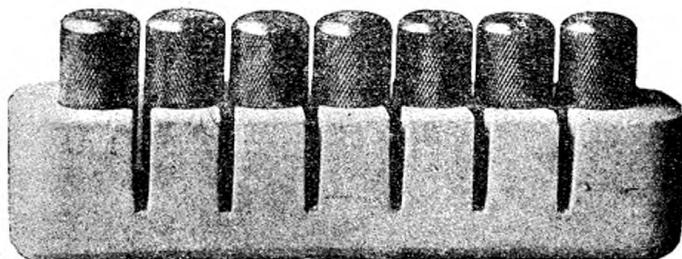


Fig. 43.

En série avec les cylindres extrêmes mis, l'un en relation avec la ligne, l'autre avec la terre, sont disposés deux cylindres de charbon, présentant des résistances sans self-induction et limitant l'intensité du courant.

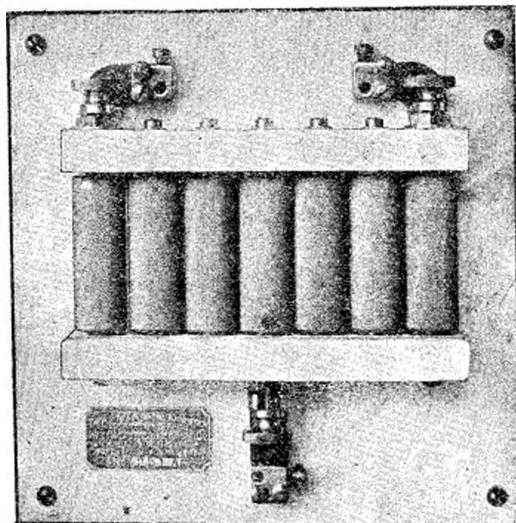


Fig. 44.

Le parafoudre comporte un espace d'air de 0,4 mm par 1 000 v. de tension. L'arc alternatif ne s'établit pas, car il n'y a pas échauffement, les résistances de charbon limitant l'intensité du courant. Ce parafoudre ne peut être employé avec le courant continu, car l'arc est alors perma-

ment; avec 5 000 v. continus l'arc se maintient dans un parafoudre construit pour 20 000 v. alternatifs.

Le paratonnerre système Wurts de la *Société Westinghouse* est basé sur l'application simultanée des deux premiers principes.

Il est composé d'unités constituées (fig. 13 et 14) chacune par sept cylindres de métal anti-arc, disposés à côté les uns des autres dans une sorte de boîte en porcelaine, présentant des fentes. Le premier et le dernier cylindre sont reliés à la ligne et celui du milieu à la terre.

Suivant la tension en ligne, on met en cascade plusieurs unités, en

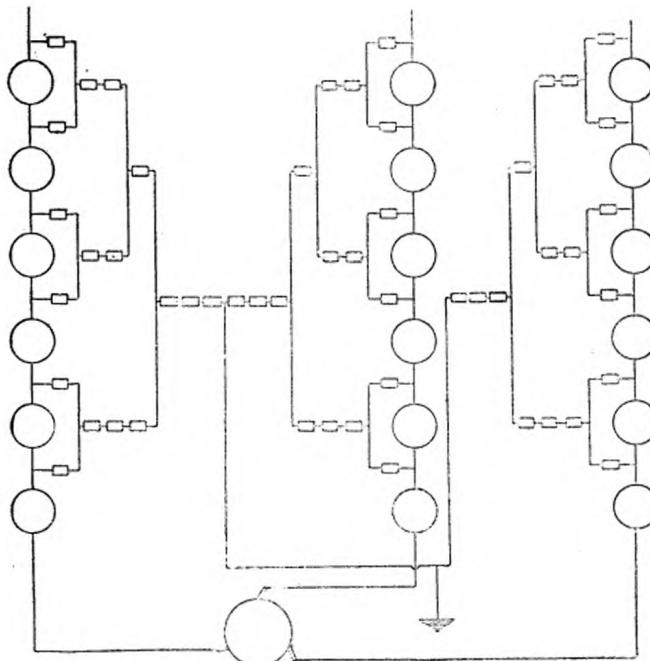


Fig. 13.

les combinant avec des bobines à réaction formées d'un ruban de cuivre enroulé, constituant une sorte de plateau; suivant l'intensité du courant, le ruban a une section plus ou moins forte.

Le schéma de la fig. 13 montre la disposition des bobines à réaction (représentées par des cercles) et des parafoudres unitaires (représentés par des rectangles) pour la protection d'une génératrice à 15 000 v.

On voit qu'il y a sept parafoudres unitaires en cascade ou tension.

Quand la tension de la ligne est plus élevée le nombre d'unités en cascade est également plus élevé (on met à peu près une unité en série

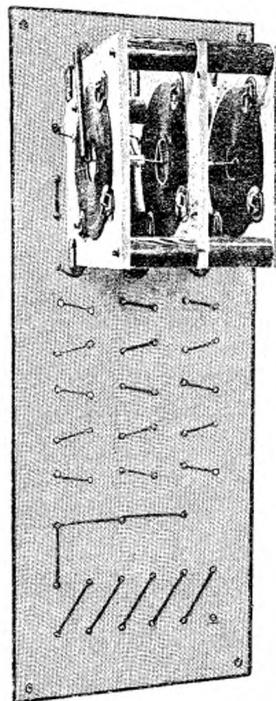


Fig. 16.

pour 2 000 v.). Les parafoudres unitaires sont renfermés dans des boîtes en fonte, bien étanches et disposées sur la partie avant d'une table

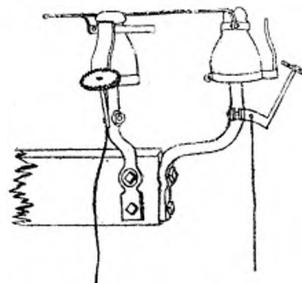


Fig. 17.

de marbre, derrière laquelle sont placées les bobines à réaction en forme de disques (fig. 16).

Le parafoudre de la société *l'Eclairage électrique* (fig. 17) est cons-

titué par un isolateur, à la partie supérieure duquel est placé un collier en relation avec le fil de ligne ; sur la cloche de l'isolateur, sont disposés des fils fins de plomb, qui viennent jusqu'à une certaine distance d'un anneau métallique placé à la partie inférieure de la cloche. En face d'une tige portée par cet anneau est disposé un disque denté, en zinc, maintenu dans une position légèrement inclinée par une tige reliée à la terre.

Le parafoudre de M. *Thury* appartient à la classe des appareils à rupture mécanique de l'arc. Un peigne est monté sur un long bras mobile, actionné par un électro-aimant qui, sous l'influence du courant qui le traverse au moment de la décharge, fait soulever le levier, de sorte que l'arc est rompu entre le peigne fixe et le peigne mobile. Quand le courant cesse, le levier retombe et l'appareil est prêt à fonctionner de nouveau. Il faut disposer plusieurs de ces appareils à côté les uns des autres, afin d'éviter l'inconvénient d'une décharge se produisant avant que le bras de levier n'ait repris sa position normale.

Le parafoudre *Alioth* est également un parafoudre à rupture mécanique de l'arc, celle-ci se produisant en deux points.

L'appareil comporte un levier très léger en aluminium, pouvant osciller autour d'un axe. A la partie supérieure, le levier porte un disque de charbon, à la partie inférieure une palette en fer doux et un peigne. Quand le levier est dans la position d'équilibre, le disque en charbon est à une certaine distance d'un autre disque fixe en charbon, relié au conducteur à protéger, et le peigne inférieur en cuivre est en face d'un autre peigne fixe relié à la terre. Un électro-aimant, dont l'enroulement est placé en dérivation entre les deux peignes, attire, quand son enroulement est parcouru par un courant, la palette en fer doux portée par le levier de sorte que ce dernier oscille, et que les disques, et respectivement les peignes sont éloignés les uns des autres. Quand une décharge atmosphérique a lieu dans le conducteur relié au parafoudre, l'arc jaillit, tant entre les disques qu'entre les peignes, et les arcs étant amorcés, le courant de ligne passe par la terre. Une certaine partie du courant traverse les spires de l'électro-aimant placé en dérivation entre les peignes, de sorte que celui-ci attire la palette le levier bascule et les arcs sont rompus. La palette n'est plus alors attirée et le levier reprend sa position d'équilibre prêt à fonctionner pour une nouvelle décharge. Les disques en charbon se détériorent au bout de quelques décharges, mais il est facile de les remplacer ; ils débordent de quelques millimètres les cercles en cuivre

qui les embrassent, afin que ceux-ci ne soient pas détériorés ; on doit aussi limer de temps à autre les pointes des peignes.

L'intervalle entre les disques, dans la position normale, dépend de la tension en ligne ainsi que de la forme de la courbe de la tension alternative et de la fréquence.

Le tableau suivant dressé, par M. Ritter, indique les distances en millimètres pour le courant continu et pour du courant alternatif sinusoïdal à 50 périodes.

TENSION EN LIGNE (Tension efficace pour le courant alternatif).	DISTANCE en mm entre les disques de charbon.	
	Courant continu.	Courant alternatif à 50 périodes.
volts		
2000 . . .	2,00 . . .	2,5
2000 . . .	2,25 . . .	3,0
4000 . . .	2,50 . . .	3,5
5000 . . .	2,75 . . .	4,0
6000 . . .	3,00 . . .	4,5
7000 . . .	3,50 . . .	5,0
8000 . . .	4,00 . . .	6,0
9000 . . .	4,50 . . .	7,0
10000 . . .	5,00 . . .	8,0

Le parafoudre Thomson est basé sur le principe du soufflage magnétique de l'arc.

Le *parafoudre à cornes*, qui est très employé à cause de sa simplicité et du peu de surveillance qu'il exige (dont un modèle, exposé par la société Siemens et Halske de Berlin, fonctionnait à la grande joie du public), est constitué par deux tiges métalliques recourbées en sens inverses, comprenant entre elles un espace d'air allant en grandissant de bas en haut. L'une des barres est reliée à la ligne, l'autre à la terre.

Quand une décharge éclate à la partie inférieure, l'arc formé a tendance à monter, mais il est bientôt rompu, l'intervalle d'air devenant de plus en plus grand. La fig. 18 représente un parafoudre à cornes, de la maison Siemens et Halske, monté sur un poteau.

Les parafoudres doivent être reliés à la terre par des conducteurs, aussi droits et aussi courts que possible, ayant le minimum de self-induction ; c'est-à-dire qu'il faut éviter l'emploi du fer ainsi que celui de

conducteurs en cuivre très épais ; le mieux est d'employer, soit des fils fins placés en parallèle, soit des câbles, soit des bandes de cuivre ou d'aluminium.

Chaque parafoudre doit être relié à la terre par une conduite spéciale et avoir une plaque de terre, sans cela il peut y avoir, dans le cas où la

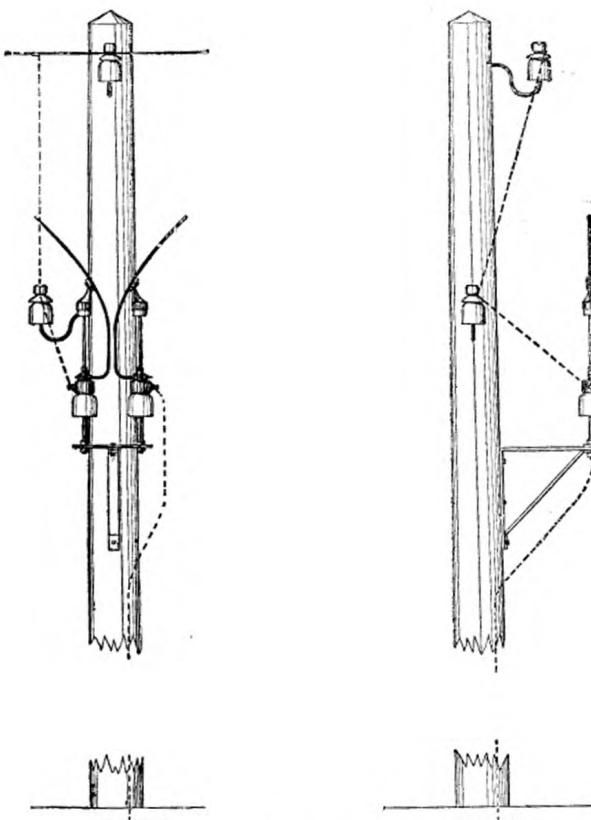


Fig. 18.

décharge se produirait sur les deux fils à la fois, court-circuit direct et de là destruction complète des appareils. Dans le cas de deux plaques de terre, une certaine résistance est intercalée entre les deux fils, de sorte que le courant ne peut prendre une intensité dangereuse.

Il faut apporter un grand soin à la confection de la terre elle-même, choisir autant que possible un endroit humide et installer les parafoudres à proximité. Dans un terrain humide, il suffit de disposer dans le

sol une plaque de cuivre. Quand le sol n'est pas très humide, la société Westinghouse conseille de procéder de la manière suivante : on creuse un trou jusqu'à ce que l'on atteigne la terre végétale non rapportée : on dispose dans ce trou une couche de 50 cm, au moins, de coke fin et on place au-dessus une plaque de cuivre de $0^{\text{m}}\text{,}25$ à laquelle est souillé, sur toute la surface, un fil de cuivre de 10 mm. de diamètre (ou mieux plusieurs fils d'un diamètre moindre). La plaque est ensuite recouverte d'une couche de 50 cm. de coke fin ; on arrose abondamment et la fouille est comblée. Il faut de temps en temps, pendant la sécheresse, arroser la terre ; on peut disposer au besoin une conduite d'eau spéciale à cet effet.

DISTRIBUTION PAR COURANT CONTINU EN SÉRIE

La société l'Industrie électrique de Genève exposait dans la section suisse, une génératrice et un moteur destinés au transport de l'énergie de Saint-Maurice à Lausanne et de nombreux dessins et descriptions des transports de puissance qu'elle a effectués, par le système série dû à M. Thury, son ingénieur en chef.

Dans le système série l'intensité du courant est maintenue constante, et la tension fournie par les génératrices varie suivant la charge.

La perte en ligne est donc constante, c'est-à-dire que le rendement est maximum à pleine charge, ce qui est un grand avantage pour le cas où l'énergie est fournie par une chute d'eau.

Dans le cas où, à certaines périodes de l'année, la chute ne peut fournir la puissance maximum, il suffit d'un simple réglage pour faire varier l'intensité et, la tension restant la même, tous les moteurs ont leur puissance maximum diminuée dans la même proportion.

Les moteurs étant placés en série sont desservis par un seul conducteur, ce qui permet dans certains cas de disposer la ligne en boucle et d'économiser une certaine longueur de conducteur (voir le plan de la distribution de La Chaux-de-Fonds, fig. 37). Le poids du cuivre est naturellement alors encore diminué dans des proportions plus grandes que nous ne l'avons indiqué.

Le système exige l'emploi de moteurs dont la force contre-électromotrice varie proportionnellement à la puissance absorbée si l'on veut que leur vitesse reste constante, et de génératrices dont la tension varie proportionnellement à la charge de la ligne.

Il y a donc un double réglage à effectuer.

- 1^o Le réglage des moteurs pour que leur vitesse reste constante.
- 2^o Le réglage des génératrices pour une intensité constante.

RÉGLAGE DES MOTEURS.

La force contre-électromotrice variant, pour que la vitesse puisse rester constante il faut, ou bien que l'intensité du champ inducteur varie ou que le calage des balais varie.

Avec une construction spéciale des dynamos, on peut obtenir, sans étineelles aux balais, des variations très grandes de la valeur de la force contre-électromotrice (ou électromotrice dans le cas de génératrices) en faisant varier l'angle de calage de ces derniers.

Suivant la puissance des moteurs, on peut employer les moyens suivants pour le réglage :

- 1^o Placer une batterie d'accumulateurs en dérivation aux bornes.
- 2^o Faire varier l'intensité du champ inducteur.
- 3^o Faire varier l'angle de calage des balais.
- 4^o Employer une combinaison des deux dernières méthodes.

Réglage au moyen d'accumulateurs. — La différence de potentiel aux bornes étant proportionnelle à la puissance du moteur, la batterie devrait avoir un trop grand nombre d'éléments pour un moteur un peu puissant ; on n'emploie donc ce système de réglage que pour les moteurs de quelques chevaux. Le moteur est muni d'un enroulement compound et la batterie est placée en dérivation entre les balais.

Quand la puissance demandée au moteur diminue, sa vitesse augmente légèrement et la batterie se charge. Quand il faut au contraire donner un coup de collier, la batterie se décharge. En somme le moteur fonctionne à peu près à potentiel constant, et l'intensité du courant dans l'induit varie suivant la puissance, la batterie étant en somme shuntée par lui.

Réglage par variation de l'intensité du champ. — Le réglage peut être effectué en divisant l'enroulement inducteur en plusieurs bobines parcourues chacune par une fraction de même intensité du courant total (fig. 19). Un pendule à boules (tel que celui des régulateurs à boules), commande, par l'intermédiaire de leviers, un commutateur qui inverse le courant dans un plus ou moins grand nombre de bobines, sui-

vant que la charge diminue ou augmente. Quand le moteur fonctionne à pleine charge, les courants dans les diverses bobines sont tous de même sens ; quand le moteur fonctionne à vide la moitié des bobines est parcourue par le courant dans un sens, et l'autre moitié par un courant de sens contraire.

Le système est donc compliqué, vu le grand nombre de bobines que l'on doit avoir pour obtenir un réglage un peu précis ; il n'est plus guère employé que pour des moteurs dont le sens de rotation doit pouvoir être inversé ; l'inversion étant ainsi facilement obtenue.

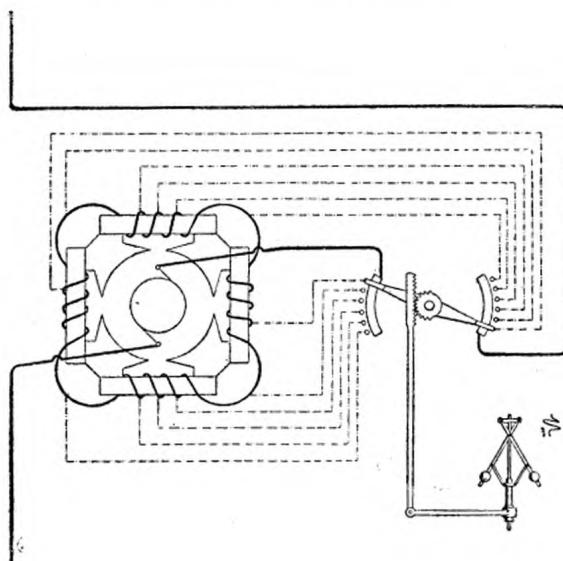


Fig. 19.

Actuellement la variation du champ est obtenue en shuntant, au moyen d'une résistance plus ou moins grande, les inducteurs qui sont enroulés en série, de manière à y faire varier l'intensité du courant, dont une portion plus ou moins considérable passe par le shunt.

Le réglage par variation du champ ne peut guère être employé seul que pour des moteurs d'une puissance inférieure à 60 ou 100 chevaux suivant les cas. Ceci provient de la difficulté d'entretien du collecteur, (surtout lors du fonctionnement à blanc des moteurs) quand les différences de force électromotrice entre les lames sont considérables (ce qui a lieu pour les moteurs puissants).

Le réglage par décalage des balais n'est pas employé seul.

Le réglage shunt combiné avec le décalage des balais est employé pour les moteurs d'une puissance supérieure à 100 chevaux.

La fig. 20 donne le schéma du dispositif.

Un petit arbre horizontal porte à un de ses bouts une poulie sur laquelle est enroulée une petite courroie dont les extrémités sont attachées en deux points opposés de la couronne porte-balais. L'arbre porte en outre un frotteur, qui intercale dans un circuit branché aux bornes de l'enroulement inducteur série du moteur, une résistance plus ou moins grande suivant sa position.

A l'autre bout de l'arbre est une petite roue qui est commandée par un double encliquetage, obéissant à l'action d'un tachymètre à boules système Thury.

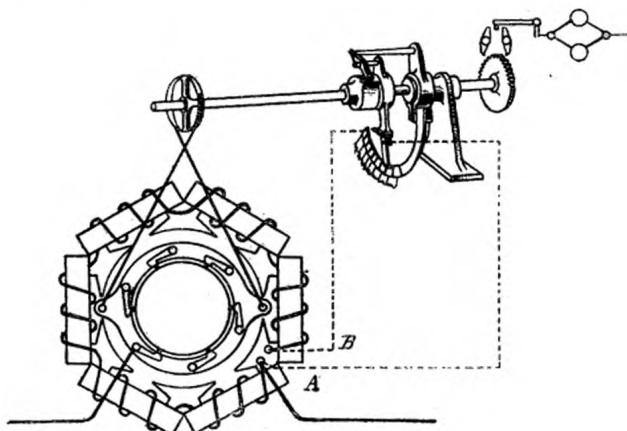


Fig. 20.

Lorsque le décalage des balais produit par l'action du régulateur correspond à la position normale (pleine charge), les balais restent fixes et le réglage continu au moyen du rhéostat intercalé dans le circuit shuntant les inducteurs.

Si la vitesse des moteurs n'a pas besoin d'être constante, on emploie des moteurs série qui ont les avantages bien connus.

RÉGLAGE DES GÉNÉRATRICES.

L'intensité du courant restant constante, la différence de potentiel de l'ensemble des génératrices doit varier proportionnellement à la charge de la ligne.

Il y a deux cas à considérer :

- 1^o *La vitesse du moteur actionnant la génératrice est variable.*
- 2^o *La vitesse du moteur est constante.*

Moteurs à vitesse variable.

Quand on enlève le régulateur d'une machine à vapeur ordinaire, la vitesse est proportionnelle au couple. Comme le couple d'une dynamo série croît plus vite que l'intensité du courant, il se fait une autorégulation de ce fait ; dès que l'intensité du courant tend à augmenter, le couple croît et le moteur ralentit de lui-même. Quand l'intensité tend à diminuer, l'effet inverse se produit, le moteur accélère son allure. La dépense de vapeur est proportionnelle à la puissance fournie.

L'autorégulation est moins sensible dans le cas des turbines, car le couple varie avec la vitesse ; mais cependant, comme le couple résistant de la génératrice varie dans de plus grandes proportions, le réglage se fait quand même, et il suffit ordinairement d'un réglage à la main pour le cas où les variations du courant dépassent certaines limites.

Naturellement, pour que le réglage s'effectue bien, il faut que les masses en mouvement aient le moins d'inertie possible.

Dans le cas de turbines on emploie ordinairement, malgré leur autorégulation, un réglage automatique.

Le réglage s'obtient soit au moyen d'un petit moteur, mis en marche dans un sens ou dans un autre par un électro-aimant agissant sur un relais ; soit en employant un moteur série, dont le couple normal de l'induit est équilibré au moyen de ressorts et qui, suivant que le couple est au-dessus ou au-dessous de sa valeur normale, se déplace d'un certain angle dans un sens ou dans l'autre.

Dans l'un ou l'autre cas, le moteur commande soit le servo-moteur de la turbine de l'une des génératrices, soit, par l'intermédiaire d'une transmission, les servo-moteurs des turbines d'un groupe.

Il faut installer la transmission de commande de manière à pouvoir arrêter complètement une ou plusieurs génératrices, car il est bon de laisser autant que possible en marche des génératrices un peu chargées, au lieu de les laisser fonctionner toutes simultanément à faible charge.

Moteurs à vitesse constante.

Le réglage des génératrices commandées par des moteurs à vitesse constante est effectué, soit par variation du champ, soit par variation du calage des balais.

Le réglage individuel d'une génératrice peut se faire d'une manière tout à fait analogue à celle du réglage d'un moteur, indiquée plus haut. Ordinairement, dans les génératrices, le réglage se fait par shuntage de l'enroulement inducteur entre la pleine charge et les trois quarts de la charge, au-dessous le réglage se fait par décalage des balais. Le tachymètre à boules est remplacé par un petit inducteur parcouru par le courant de ligne, qui actionne une armature très légère, agissant sur le double encliquetage. Un groupe de génératrices peut être également réglé par variation de champ; il suffit pour cela de les exciter au moyen d'une dynamo, commandée par une turbine spéciale très légère, dont la vitesse peut varier.

Le pendule du régulateur de vitesse de cette turbine est remplacé par un cylindre en fer doux assez lourd, tenu en équilibre par un solénoïde parcouru par le courant de ligne à maintenir constant. Si l'intensité du courant primaire baisse, le cylindre de fer agit sur le servomoteur de la turbine, en fait ouvrir le vannage, la vitesse de la turbine croît et la tension de la dynamo qu'elle entraîne augmente, ainsi que l'excitation des génératrices dont le potentiel augmente, ce qui a pour résultat d'augmenter l'intensité du courant de ligne. Quand l'intensité du courant de ligne dépasse la valeur normale, les phénomènes inverses se produisent.

En excitant des génératrices au moyen d'une même excitatrice, on les relie électriquement, et le circuit doit être isolé pour la tension totale, ce qui ne peut se faire que si celle-ci ne dépasse pas une certaine valeur. A Gênes, la tension totale des génératrices excitées simultanément par la même dynamo atteint 8000 v.

APPAREILLAGE DU SYSTÈME SÉRIE.

Appareils de contrôle. — Il suffit naturellement d'un seul ampèremètre à l'usine génératrice. Les génératrices et les moteurs peuvent être munis de voltmètres branchés à leurs bornes, la tension indiquée par le voltmètre est proportionnelle à la charge de la dynamo.

Appareil de mise en marche et d'arrêt. — Pour la mise en marche et l'arrêt d'une génératrice ou d'un moteur, on se sert d'un interrupteur, l'interrupteur de court circuit (fig. 21).

Les fils de ligne, ainsi que les conducteurs aboutissant aux bornes de la dynamo, sont reliés à des bornes de l'interrupteur. Quand la manette

de ce dernier occupe la position indiquée au croquis, les fils de ligne sont reliés directement entre eux ; il en est de même pour ceux de la dynamo qui est mise en court-circuit.

En déplaçant la manette on peut insérer la dynamo dans le circuit et cette manœuvre s'exécute sans interrompre le courant de ligne. Lorsque l'interrupteur sert à la mise en marche d'un moteur puissant, il s'y produit une étincelle due à la self-induction des enroulements du moteur. On munit alors l'appareil d'un pare étincelle (fig. 22).

Les bornes de la dynamo sont reliées par une dérivation dans laquelle sont intercalés deux blocs de charbon, qui sont en contact. L'un de ces charbons est fixé à la palette d'un électro-aimant, dont l'enroulement est mis en série dans le circuit du moteur. Lors de la manœuvre de l'interrupteur pour la mise en marche du moteur, la dérivation des deux

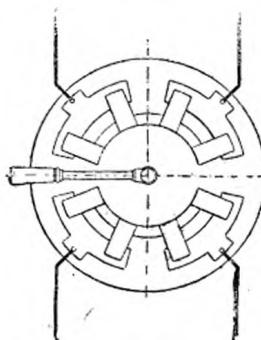


Fig. 21.

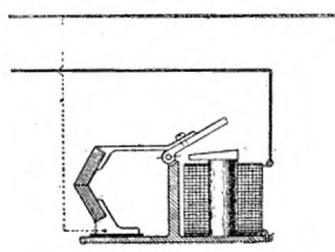


Fig. 22.

charbons shunte le circuit du moteur dans lequel circule un faible courant, suffisant cependant pour que l'électro-aimant attire son armature. A ce moment le charbon relié à cette armature s'écarte de l'autre, l'étincelle éclate entre les charbons et le moteur se met en marche.

La mise en service d'une génératrice s'effectue de la manière suivante : On ouvre le distributeur du moteur jusqu'à ce que la génératrice auto-excitée en court-circuit produise le courant normal indiqué par un ampèremètre branché dans le circuit. On ouvre alors l'interrupteur, et la dynamo est mise en série sur le circuit. On ouvre ensuite un peu plus le distributeur et on laisse agir le régulateur automatique.

Pour retirer une génératrice on arrête son moteur, puis on agit sur l'interrupteur.

La mise en marche et l'arrêt d'un moteur sont effectués par simple manœuvre de l'interrupteur.

Appareils de sécurité. — Les appareils de sécurité à fonctionnement automatique sont les suivants :

1^o Le bypass, mettant en court-circuit toute portion de la ligne qui, par suite d'un accident, absorberait une différence de potentiel exagérée.

2^o Le déclencheur de vitesse, qui met en court-circuit tout moteur prenant une vitesse exagérée.

3^o Le déclencheur par inversion, mettant en court-circuit toute génératrice dont le sens de rotation s'inverse.

Le bypass (fig. 23) est composé d'un interrupteur qu'un ressort tend à maintenir fermé, et qui dans cette position shunte par court-circuit la partie qu'il s'agit de protéger (boucle de ligne, ou moteur). L'interrupteur est enclenché dans la position d'ouverture et l'enclenchement maintenu par l'armature mobile d'un électro-aimant. L'enroulement de ce dernier est placé en dérivation aux extrémités de la boucle à protéger, et une résistance permet de régler l'intensité du courant, de manière que l'électro n'attire son armature que lorsque la tension atteint une certaine valeur. Quand l'armature est attirée, l'interrupteur étant déclenché obéit à l'action du ressort, et la boucle est shuntée par un court-circuit.

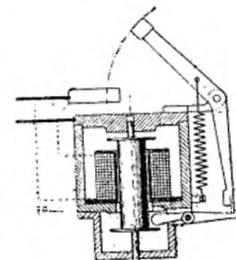


Fig. 23.

Le déclencheur de vitesse est également constitué par un interrupteur qu'un ressort tend à maintenir fermé, et qui, dans ce cas met en court-circuit le moteur. L'interrupteur est enclenché dans la position ouvert, et le déclenchement est produit par le choc d'une petite masse. Cette masse est reliée à l'arbre par un ressort faisant, à la vitesse normale, équilibre à la force centrifuge. Quand la vitesse normale est dépassée, le ressort se tend et la masse vient heurter l'appareil déclencheur, de sorte que le moteur est shunté en court-circuit par l'interrupteur.

Le déclencheur par inversion est basé sur le même principe que le déclencheur de vitesse ; le butoir provoquant le déclenchement agit quand le sens de rotation s'inverse. Cet appareil est appliqué aux génératrices qui pourraient fonctionner comme moteurs en inversant leur sens de rotation.

DISTRIBUTIONS A COURANTS ALTERNATIFS

Moteurs et alternateurs. — La plupart des distributions à longue distance utilisent naturellement la puissance hydraulique; cependant il y a bien des cas où il est avantageux d'installer une centrale à vapeur pour desservir simultanément plusieurs localités éloignées les unes des autres (exemples: la centrale de Wiesloch et celle du Rand, que nous décrivons plus loin).

Les moteurs à gaz, alimentés soit au moyen de gazogène, soit par le gaz des hauts fourneaux, commencent à entrer en ligne de compte.

On emploie aujourd'hui à peu près exclusivement des alternateurs à induit fixe, à fer tournant ou à inducteur tournant; jusqu'à 200 kw. la commande peut se faire par courroie, de 200 à 400, par cordes, et au-dessus l'alternateur est commandé directement par l'arbre du moteur.

On emploie comme moteurs hydrauliques des roues et des turbines. Les turbines à basse chute sont à axe vertical et l'alternateur peut être commandé par l'intermédiaire d'engrenages coniques, de manière que son arbre soit horizontal. A partir de 200 ou 300 kw., on emploie cependant la commande directe, l'arbre de l'alternateur étant vertical, et la roue inductrice horizontale formant volant.

Les turbines à haute chute ont leur axe horizontal, et la commande est directe.

Les turbines sont munies de régulateurs hydrauliques, réglant automatiquement la vitesse. Le couplage en parallèle des alternateurs est facile, la vitesse périphérique étant bien constante.

Comme moteurs à vapeur, on emploie actuellement presque exclusivement des moteurs à cylindres; cependant il n'est pas douteux que les turbines à vapeur ne soient bientôt très employées, vu les grands progrès réalisés dans leur construction, abaissant de plus en plus leur consommation de vapeur.

L'avantage des turbines à vapeur est leur facilité de mise en marche, leur régularité de vitesse périphérique et leur grande vitesse. Les alternateurs commandés par turbines à vapeur sont légers et ont peu de self-induction, de sorte que la chute de tension en charge est beaucoup plus faible que dans les alternateurs commandés par machines à faible vitesse. Vu la régularité de vitesse périphérique, le couplage en parallèle est facile avec les turbines.

Dans les machines à cylindres, le volant doit avoir un certain moment

d'inertie pour assurer une régularité suffisante de la vitesse périphérique ; le plus ordinairement lorsque l'alternateur est commandé directement, l'inducteur sert de volant ; cependant, dans certains cas spéciaux, on est obligé d'ajouter encore un volant.

Pour assurer un bon couplage en parallèle, il faut que le coefficient d'irrégularité (c'est-à-dire la différence entre la vitesse périphérique maximum et la vitesse périphérique minimum divisée par le double de la vitesse moyenne par tour) ne dépasse pas une certaine valeur.

Pour une fréquence comprise entre 30 et 60, le coefficient d'irrégularité pour une commande par courroie ne doit pas être supérieur à $\frac{1}{150}$ (cette valeur élevée provient de ce qu'il peut y avoir un certain glissement de la courroie) ; pour la commande directe, le coefficient d'irrégularité ne doit pas être supérieur à $\frac{1}{250}$.

Pour des fréquences moins élevées, le coefficient d'irrégularité peut être plus grand ; pour des fréquences plus élevées, il doit être plus faible (pour une fréquence de 100, il faudrait un coefficient d'irrégularité de $\frac{1}{300}$, pratiquement impossible à atteindre avec des moteurs à cylindres).

Les moteurs à gaz ont une irrégularité d'allures encore plus forte que les moteurs à vapeur à cylindres, aussi ne peut-on guère coupler des alternateurs à fréquence ordinaire (30 à 60) commandés directement par moteurs à gaz, il vaut mieux dans ce cas employer une fréquence faible (10 à 25). Cependant les moteurs à gaz font tous les jours des progrès et il est certain que l'on arrivera à pouvoir les employer, même dans le cas de la fréquence ordinaire.

Le couplage en parallèle peut être facilité par l'emploi des circuits amortisseurs de M. Leblanc, par l'emploi de pôles massifs, par l'adjonction de bobines à réaction qui atténuent les mouvements pendulaires.

Le couplage peut être également beaucoup facilité par l'emploi d'un dispositif permettant de faire varier d'une manière continue le nombre de tours du moteur à vapeur ; ce dispositif a été appliqué pour la première fois par la maison Siemens et Halske à l'usine centrale de la gare de Dresde.

Le poids chargeant le régulateur peut se déplacer sur le levier, de sorte que le couple de charge peut varier. Le déplacement du poids est commandé par un petit moteur, qui peut tourner dans un sens ou dans

l'autre. Un commutateur placé sur le tableau permet d'actionner le moteur dans un sens ou dans l'autre, et par conséquent de faire varier à volonté, par degrés insensibles, le nombre de tours du moteur. Le petit moteur peut être à courant continu; on peut également employer un moteur asynchrone polyphasé (la Société réunie d'Electricité de Vienne et Budapest exposait un groupe électrogène muni de ce dispositif).

L'emploi du régulateur à charge variable permet, non seulement un couplage facile des alternateurs, mais en outre, dans la marche en parallèle de plusieurs alternateurs, il permet de faire varier facilement la charge d'un des alternateurs. On peut par exemple décharger peu à peu un alternateur avant de le retirer du circuit.

Il y a intérêt à coupler les alternateurs au moment où les pistons des moteurs qui les commandent sont exactement dans la même position; pour cela on munit les moteurs de timbres qui sonnent au moment où la bielle est dans une position donnée et on couple quand les timbres agissent en même temps (cette disposition a été adoptée par M. Kolben à la station centrale de Prague).

Avec des moteurs identiques actionnant des alternateurs identiques, en couplant dans ces conditions, on pourrait ne pas avoir à s'inquiéter de l'irrégularité d'allure du moteur. Ce système pourrait être employé avantageusement avec des moteurs à gaz.

Comme nous l'avons déjà dit, 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 suite de la crainte de voir l'alternateur détérioré par la foudre. Dans le cas de transformateurs-élévateurs, le transformateur est plus exposé que l'alternateur et un transformateur est moins cher et plus facile à réparer qu'un alternateur. Il est arrivé cependant que la foudre est venue brûler une bobine d'un alternateur, quoi qu'il y eut interposition d'un transformateur-élévateur, qui lui même n'a pas été détérioré.

Excitation des alternateurs. — Chaque alternateur peut être muni d'une excitatrice, soit montée directement sur son arbre, soit actionnée par l'intermédiaire d'une courroie ou d'engrenages. L'excitatrice peut être excitée en série et un rhéostat intercalé dans le circuit permet le réglage. Elle peut être également excitée en dérivation, le réglage se faisant au moyen d'un rhéostat intercalé, soit dans son circuit principal, soit dans le circuit d'excitation. La société d'Oerlikon place un rhéostat dans chaque circuit; on effectue alors un premier réglage au moyen du

rhéostat intercalé dans le circuit d'excitation. On termine le réglage au moyen du rhéostat intercalé dans le circuit principal. On obtient ainsi un réglage très précis sans consommation inutile d'énergie.

L'inconvénient du système d'une excitatrice commandée par le moteur de l'alternateur est que, si pour une cause quelconque, la vitesse du moteur actionnant l'alternateur vient à varier, l'excitation de l'alternateur variant dans le même sens, la cause de trouble est pour ainsi dire doublée.

Pour éviter en partie cet inconvénient, la maison Brown-Boveri, à l'usine de la Kander, excite les excitatrices montées sur les arbres des alternateurs au moyen de dynamos commandées par des turbines spéciales ; dans le cas de variation de la vitesse d'un moteur actionnant un alternateur, la variation d'excitation de ce dernier est moins grande que si l'excitatrice était autoexcitée.

On peut également employer un circuit spécial pour l'excitation de tous les alternateurs mais il faut, dans ce cas, que la différence de potentiel dans ce circuit se maintienne bien constante quelle que soit la charge. En effet dans le cas du couplage d'un alternateur, on doit n'avoir à s'occuper que du réglage de l'excitation de ce dernier (en agissant sur le rhéostat) et non de celui des autres, ce qui arriverait dans le cas où la tension baisserait dans le circuit général d'excitation quand la charge y augmente.

Le circuit général d'excitation doit être installé avec de grandes précautions, car tout le fonctionnement de l'usine serait arrêté dans le cas de rupture de ce circuit. Il faut y avoir des groupes générateurs de rechange et il est même bon d'y installer une batterie d'accumulateurs.

On peut employer pour actionner les dynamos du circuit général d'excitation des moteurs asynchrones, alimentés par le courant de la station (système employé par raison d'économie dans certaines installations de la maison Schuckert) ; dans ce cas, pour la mise en route de l'usine, il faut nécessairement disposer d'une batterie d'accumulateurs.

APPAREILS DIVERS

Interrupteurs. — Les interrupteurs à haute tension sont actionnés à distance, soit par l'intermédiaire de leviers isolés, soit au moyen de commandes électriques, hydrauliques ou à l'air comprimé.

Quand on interrompt des circuits parcourus par des courants de grande intensité ou à haute tension, l'étincelle de rupture peut amorcer un arc permanent.

La longueur de l'arc dépend de la tension, de l'intensité du courant, de la nature des métaux entre lesquels il se produit (les vapeurs de certains métaux, tels que le cuivre, sont très bonnes conductrices, celles du zinc au contraire étouffent l'arc), et aussi de la position de l'arc (un arc vertical se forme dans les mêmes conditions, plus facilement qu'un arc horizontal, ceci est dû à l'action du courant dû à l'air échauffé qui souffle l'arc en montant).

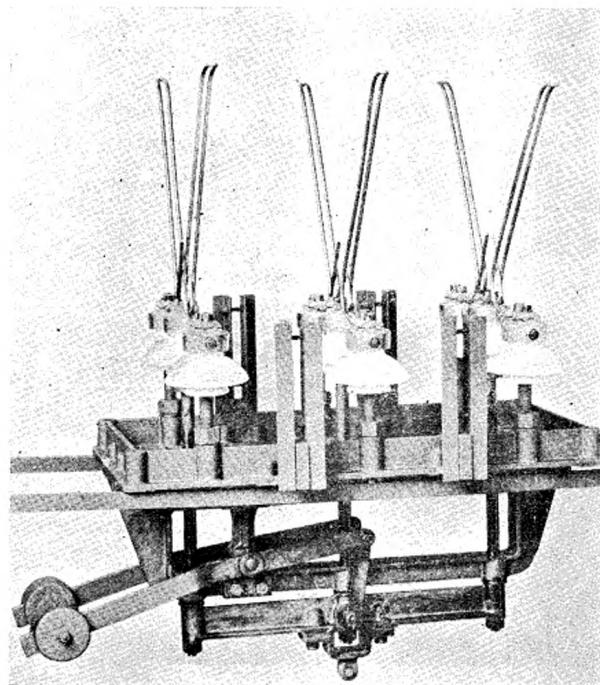


Fig. 24.

A une tension de 3500 v. et une intensité de 130 a., on peut avoir des arcs permanents de 1 m de longueur, à 8 000 v. et 80 a., la longueur de l'arc peut atteindre 1^m,50.

Dans des essais de laboratoire entrepris par la maison Schuckert, de Nuremberg, on a obtenu des arcs de plus de 2 m de longueur à 20 000 v.

Il faut donc autant que possible disposer les interrupteurs de manière que l'arc se forme horizontalement; on peut également, pour diminuer

le danger de l'arc, interrompre chaque conducteur en plusieurs points ou rompre dans de l'huile, ce qui en diminue beaucoup la longueur.

La fig. 24 représente un interrupteur à haute tension de la maison Schuckert de Nuremberg. Dans la position de circuit fermé, les deux cornes sont reliées par une courte pièce métallique. Si on interrompt le courant, les cornes agissent comme dans le cas d'un paratonnerre.

La fig. 25 représente l'arc obtenu lors de la rupture d'un circuit à 20 000 v. à l'usine de Vizzola (Italie), installée par la maison Schuckert.

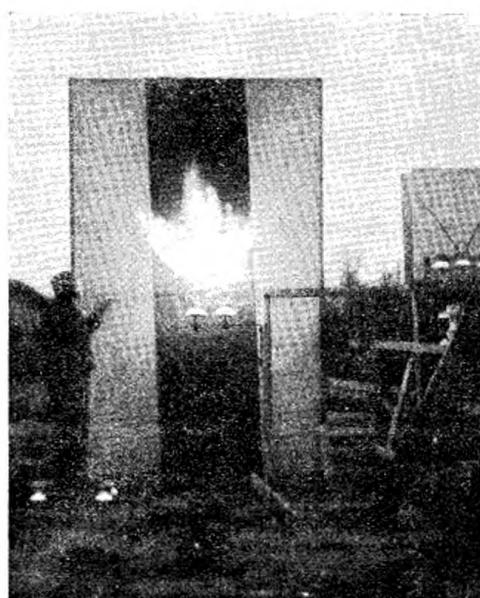


Fig. 25.

L'interrupteur exposé par la maison Voigt et Haefner est également muni de cornes ou antennes pour la rupture de l'arc (voir fig. 33).

Dans l'interrupteur de la société l'*Eclairage électrique*, une tige isolante porte autant de traverses horizontales qu'il y a de lignes à interrompre. Les traverses portent à chacune de leurs extrémités des lames de cuivre recourbées formant balais.

La tige coulisse et les balais viennent relier des pointes de cuivre fixées au centre d'isolateurs, pour fermer les circuits. La société construit des interrupteurs pour des puissances de 30 à 200 kw. et pour des tensions de 3 000 à 25 000 v.

La fig. 26 représente un interrupteur à haute tension de la Société industrielle des téléphones.

Les interrupteurs à haute tension sont souvent à rupture dans l'huile; tels sont les interrupteurs des maisons Sage et Grillet de Paris, Brown-Boveri de Baden (société l'Electro-mécanique en France), de la General electric C° et de la société Westinghouse en Amérique.

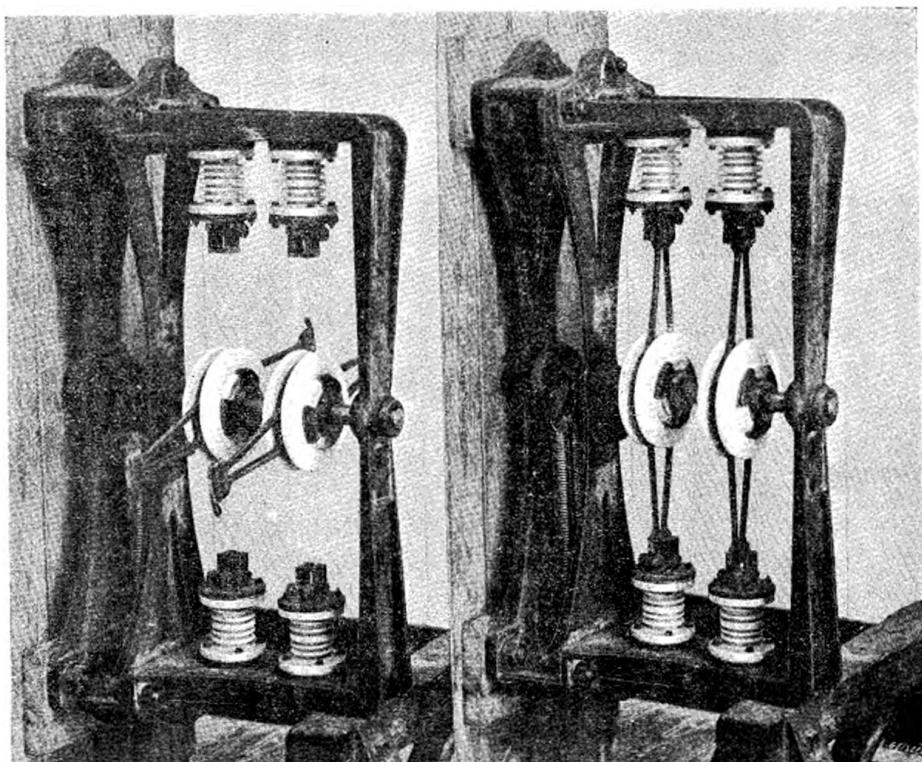


Fig. 26.

La société des Applications industrielles commande les interrupteurs à très haute tension au moyen d'air comprimé, cet air étant fourni par un compresseur actionné par un petit moteur électrique.

La société Westinghouse commande les interrupteurs à haute tension par des moteurs électriques conjugués à de puissants ressorts.

La maison Guénée expose des interrupteurs commandés par l'intermédiaire d'électro-aimants.

Toutes les fois que la commande n'est pas rigide, il faut que la position de l'interrupteur soit indiquée, ce qui peut se faire au moyen de lampes de couleur.

Coupe-circuits. — Les coupe-circuits sont, soit automatiques, soit à fil fusible.

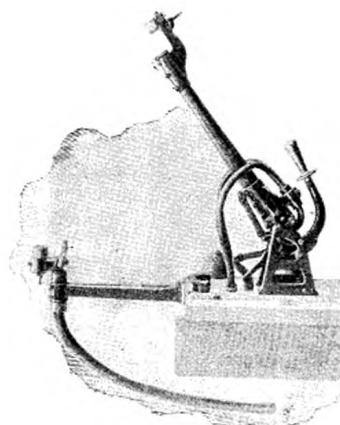


Fig. 27.

La fig. 27 représente un coupe-circuit automatique à haute tension de la société Westinghouse dans la position de circuit interrompu. Un électro-aimant attire le levier quand le courant atteint une certaine in-

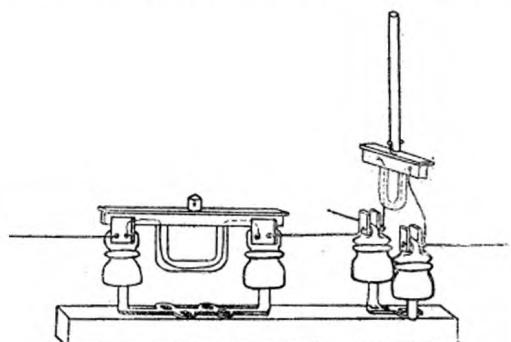


Fig. 28

tensité, celui-ci bascule et coupe alors le circuit. Le contact est assuré par des charbons à la partie supérieure et un ressort en cuivre un peu au-dessous. Quand l'électro-aimant agit, le levier prend d'abord un

mouvement de haut en bas, et le contact en cuivre est rompu le premier ; le contact des charbons n'est rompu qu'ensuite et c'est là que se forme l'arc de rupture, les charbons pouvant être facilement remplacés. Une manette permet de ramener l'appareil dans la position de circuit fermé quand il a agi, de sorte qu'il peut servir en même temps d'interrupteur.

La société l'Eclairage électrique enferme le plomb fusible dans un tube en verre en forme de U rempli de paraffine (fig. 28). La figure montre un coupe-circuit en place et un autre que l'on met en place en le tenant par une tige isolée.

Les coupe-circuits fusibles sont ordinairement renfermés dans un tube de verre ou de porcelaine, formant une poignée isolée, portant aux deux extrémités des renflements protégeant la main. Aux deux bouts sont disposés des ressorts en cuivre qui viennent se placer sur des lames de cuivre fixées à des isolateurs placés à une certaine distance l'un de

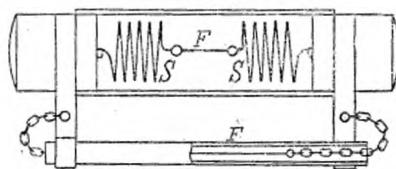


Fig. 29.

l'autre et reliés à la ligne. Le coupe-circuit peut être enlevé, soit à la main, soit par l'intermédiaire d'une pince ou d'un bâton isolé, soit pour y remplacer le fil fusible, soit pour interrompre le circuit.

Les fils fusibles sont constitués soit par un alliage de plomb, soit par du cuivre ; il faut prendre des précautions pour interrompre l'arc qui se forme lorsque le fil a fondu.

La société Lahmeyer de Francfort emploie des coupe-circuits présentant une double sécurité au point de vue de la rupture de l'arc (fig. 29). Deux fils fusibles sont placés en parallèle, le plus gros est tendu par un ressort de sorte que lorsqu'il fond ses extrémités sont écartées et l'arc est rompu ; cet arc est du reste peu important car le courant passe, après fusion du gros fil, par le fil fin qui fond alors seulement.

Dans les coupe-circuits pour haute tension de la maison Voigt et Haeffner (voir fig. 33 et 33), la poignée est mise à la terre par un fil. Le fil fusible est entouré d'un cylindre 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. A la partie inférieure le contact se fait par un mouvement à baïonnette à l'intérieur d'un isolateur ; à la partie supérieure il y a un

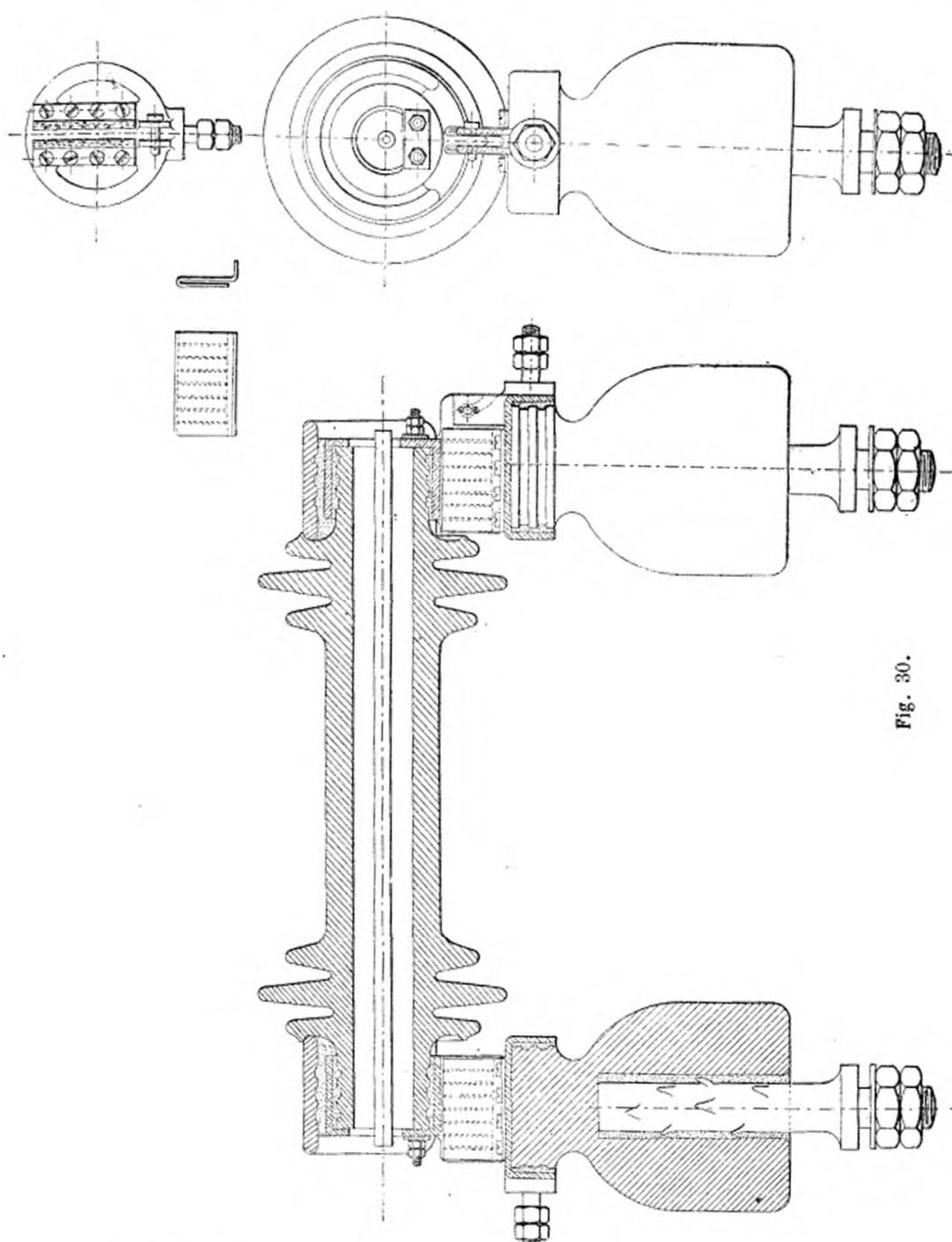


Fig. 30.

contact à ressort et une corne en métal spécial pour rompre l'arc. Pour interrompre le circuit, on commence par rompre le contact supérieur,

et l'arc s'éteint bientôt en montant le long de la corne ; on fait alors tourner l'appareil d'un quart de cercle autour de l'isolateur inférieur pour pouvoir le retirer complètement.

La fig. 30 représente un coupe-circuit de la Société des applications industrielles, le fil fusible est entouré d'un tube d'amiante destiné à éteindre l'arc.

Le tube en porcelaine porte à chacune des extrémités une plaque de cuivre pénétrant à force entre des ressorts de cuivre portés par les isolateurs. A l'extrémité de droite, la plaque de cuivre est munie d'une fente en demi-cercle. Sur l'isolateur de droite est disposé un petit cylin-

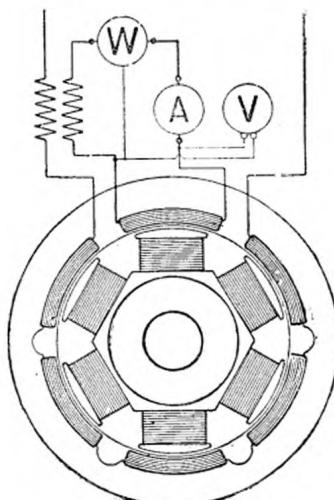


Fig. 31.

dre de cuivre horizontal formant axe. Quand on veut placer le fusible, on fait d'abord glisser l'axe dans la jante, de manière à avoir un centre de rotation, puis on abaisse brusquement la partie de gauche du manchon, l'axe servant de guide.

Dans le coupe-circuit de la Société Schuckert, le manchon isolant est traversé suivant l'axe par trois tubes en vulcanite, dont le diamètre intérieure est un peu plus grand que celui du fil fusible, qui les traverse et qui est formé d'un alliage métallique facilement oxydable.

Les tubes en vulcanite sont notamment plus longs que la distance entre pôles.

Le fil fond avec une forte détonation et les gaz formés s'échappant des tubes étroits entraînent l'air, ce qui suffit pour éteindre l'arc.

Dans les coupe-circuits Brown-Boveri et Thomson-Houston, le fil est placé dans une sorte de caisse munie d'une étroite ouverture; quand le fil fond, il y a dégagement de gaz par l'ouverture et l'arc est rompu.

Les fusibles Thomson-Houston, faits de différents métaux suivant les cas, sont soumis à la tension de ressorts qui s'opposent à l'établissement d'un arc de rupture.

Appareils de mesure. — Quand les alternateurs fournissent une tension élevée, les appareils de mesure (ampèremètres, voltmètres, wattmètres, etc.), ainsi que les lampes de phase, ne sont pas branchés directement dans le circuit, à cause du danger et aussi parce que certains de ces appareils absorberaient, sous la haute tension, une énergie par trop considérable.

On emploie ordinairement des transformateurs dans les secondaires desquels les appareils sont installés, mais il faut prendre des précautions spéciales pour que, par suite d'un défaut d'isolation, la haute tension ne pénètre pas dans le circuit secondaire (dans ces petits transformateurs on peut très bien séparer les enroulements par une lame métallique mince mise à la terre).

La société Lahmeyer de Francfort emploie un système supprimant l'emploi des transformateurs de mesure. Une bobine (ou une fraction de bobine bien isolée du reste de l'enroulement) forme un circuit dans lequel sont branchés les instruments de mesure (fig. 31). Dans ce circuit est intercalé le primaire d'un transformateur, dont le rapport de transformation est égal à l'unité, et dont le secondaire est branché dans le circuit principal. La tension dans le circuit principal est proportionnelle à celle de la bobine séparée; si le transformateur n'avait pas de pertes, l'intensité dans le circuit des instruments serait la même que dans le circuit principal; pour avoir égalité parfaite, il suffit de donner à la bobine séparée une petite longueur de fil de plus qu'aux autres.

TABLEAUX DE DISTRIBUTION ET MONTAGE GÉNÉRAL DES USINES.

Dans le cas où les alternateurs sont à basse tension (il y a alors des transformateurs élévateurs de tension) le tableau porte les barres générales de distribution, ainsi que les appareils de mesure, de régulation de couplage en parallèle, etc...

Les barres générales du tableau communiquent avec d'autres barres générales qui sont installées à proximité de la salle des transformateurs et d'où partent les diverses dérivations aux transformateurs. Sur cha-

un des fils de ces dérivations est placé un coupe-circuit permettant d'isoler au besoin un transformateur pour y faire les réparations nécessaires.

Les transformateurs sont installés dans une salle spéciale avec plancher reposant sur isolateurs. Ces appareils doivent être suffisamment espacés pour que le service puisse s'y faire commodément et sans danger.

Les bornes à haute tension des transformateurs sont reliées par des conducteurs (soit formés de câbles isolés, soit de barres minces nues posées sur isolateurs), à des barres générales; sur chacun de ces conducteurs est disposé un coupe-circuit à haute tension permettant au besoin d'isoler un transformateur du circuit général. Les coupe-circuits, ainsi que les barres générales à haute tension, sont disposés dans une salle spéciale fermée.

De ces barres générales à haute tension sont dérivées les canalisations extérieures (munies également de coupe-circuits à haute tension), qui sont ordinairement constituées par des conducteurs posés sur isolateurs; la traversée du mur de l'usine se fait au centre d'un tube de porcelaine d'un certain diamètre, débordant de chaque côté du mur, les isolateurs supportant le fil étant disposés de part et d'autre du mur, de manière que ce fil soit bien centré au milieu du tube.

De telles dispositions ont été adoptées à la station du Rand, installée par la maison Siemens et Halske, dont nous donnons la description plus loin.

Dans le cas où les alternateurs fournissent directement la haute tension, aucune partie du tableau n'est ordinairement en communication directe avec la haute tension. Le tableau porte seulement les appareils de mesure et de couplage, fonctionnant à basse tension, ainsi que les appareils de commande.

Les départs des conduites à haute tension des alternateurs ont lieu dans le sous-sol, où sont également installés au besoin les transformateurs des appareils de mesure, dont les secondaires seuls sont reliés au tableau. Les barres générales sont disposées dans une salle spéciale, ou dans un espace fermé derrière le tableau. Des coupe-circuits sont installés sur les divers conducteurs partant des alternateurs, et sur les fils de départ des canalisations extérieures sur lesquels sont également disposés les paratonnerres qui doivent être munis de bobines à réaction (voir les dispositions adoptées à l'usine de Wiesloch que nous décrivons plus loin).

Ordinairement, le tableau porte un panneau par alternateur et en

plus un panneau (généralement placé au centre) pour le couplage en parallèle.

Le panneau de chaque machine porte l'ampèremètre, le voltmètre, au besoin le wattmètre et le compteur, le levier de l'interrupteur, les manettes de commande des rhéostats de l'excitatrice et, au besoin, le

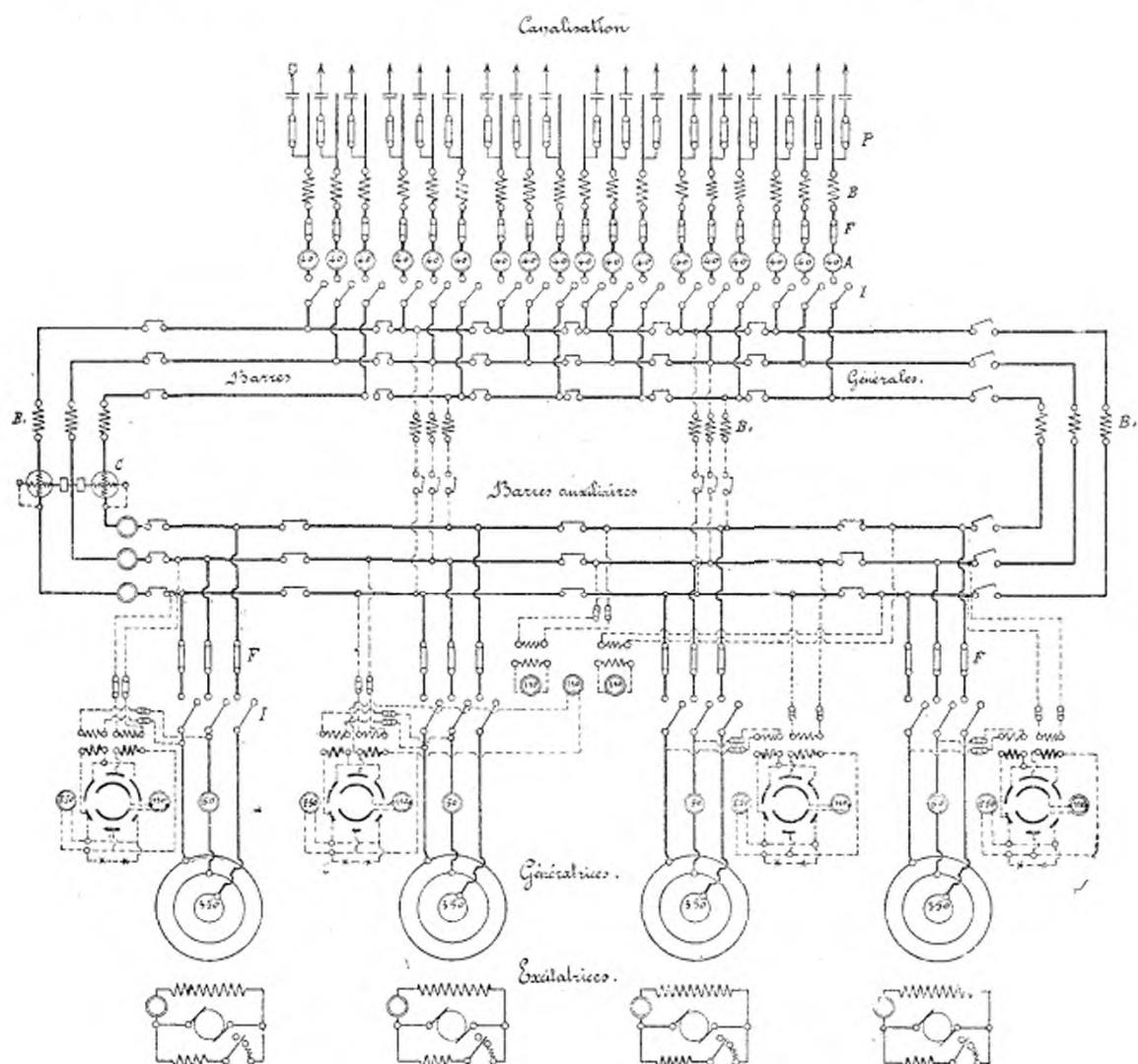


Fig. 32.

commutateur de commande du moteur agissant sur le régulateur de la machine à vapeur. Le panneau pour le couplage porte les lampes et les voltmètres, ainsi que les commutateurs pour le couplage en parallèle.

(Nous donnons dans les descriptions des installations plusieurs schémas de tableaux).

La maison Voigt et Haeffner exposait un panneau de tableau, système Bertram.

Dans le système Bertram dont le schéma est donné fig. 32, les barres générales sont disposées en forme de bouches, placées derrière le tableau (dont la coupe est donnée fig. 33); des interrupteurs, formés de simples couteaux disposés comme les coupe-circuits à haute tension, permettent de diviser les barres en sections correspondant chacune soit à un alternateur, soit à une ligne, de sorte que l'on peut, même pendant le service, isoler soit un alternateur, soit une ligne, sans interrompre

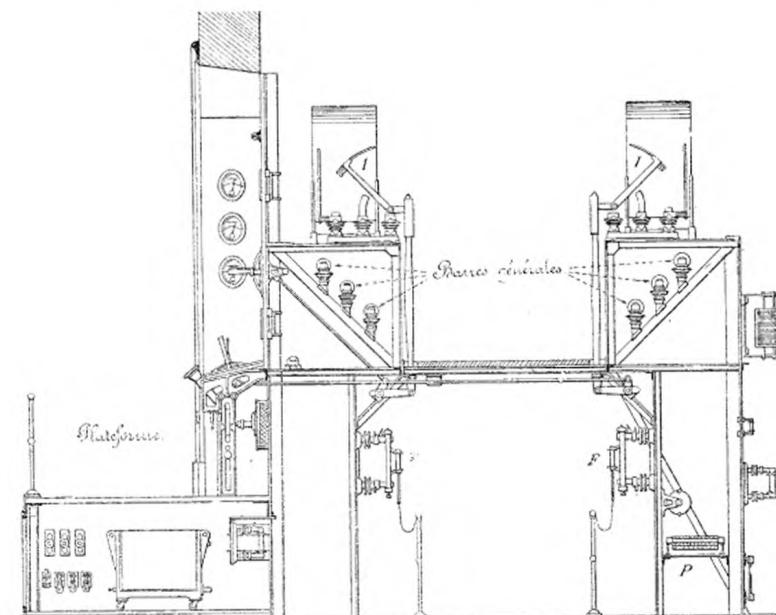


Fig. 33.

le service des autres et, en disposant des écrans protecteurs, travailler aux réparations du tableau.

Normalement, la partie de droite des barres et les barres auxiliaires représentées en pointillé sont coupées et tout le courant de la station passe par le compteur C et les ampéremètres généraux A_i .

Des bobines de self-induction B, sont disposées au besoin sur les barres, pour faciliter le couplage des machines et empêcher les mouvements pendulaires.

Les interrupteurs I des alternateurs, et ceux I' des lignes sont commandés du tableau par l'intermédiaire de leviers.

Chaque panneau porte les appareils de mesure pour un alternateur, les appareils de commande de l'excitatrice, etc., ainsi que ceux de mise en parallèle.

Sur chaque conducteur de chacune des lignes est disposé un ampèremètre A, placé à la partie supérieure du tableau, un coupe-circuit F, une bobine à réaction B' pour le paratonnerre P. La fig. 33 donne la coupe du tableau, on voit que les barres générales formées de barres minces de cuivre sont disposées en gradins.

La société d'Œrlikon emploie l'aluminium pour les barres générales et les connexions de ses tableaux.

Lignes aériennes. — Dans les lignes aériennes à courants alternatifs, il faut pouvoir isoler une partie de ligne, une dérivation par exemple, afin de pouvoir y relever des dérangements sans arrêter le service de l'usine entière.

Le plus ordinairement, on dispose aux endroits où l'on veut pouvoir interrompre la ligne, des coupe-circuits. Pour isoler une portion de ligne il suffit d'enlever les coupe-circuits, soit à la main, soit par l'intermédiaire de perches isolées.

La maison Voigt et Haeffner construit des interrupteurs de ligne commandés par levier. L'appareil est basé sur le même principe que l'interrupteur ordinaire, mais il est construit en alliage spécial résistant aux intempéries et les contacts sont renfermés. Afin d'éviter que l'on ne le manœuvre intempestivement le levier de commande est verrouillé.

STATIONS DE TRANSFORMATEURS RÉDUCTEURS DE TENSION

Les transformateurs desservant le réseau secondaire peuvent être disposés soit sur des poteaux en bois, soit dans des colonnes en tôle, soit dans des maisonnettes en tôle ou en maçonnerie (voir les divers exemples de distribution).

Les conducteurs aboutissant aux bornes à haute tension sont munis de paratonnerres, de bobines à réaction et de coupe-circuits fusibles. Il en est de même des conducteurs aériens des réseaux à basse tension.

Un point très important est naturellement d'écartier le danger qui pourrait résulter d'une communication entre le réseau à basse tension et le réseau à haute tension, par suite d'une rupture d'isolant. Dans certains cas également le transformateur peut agir comme condensateur (c'est ce qui arrive par exemple quand, dans un transformateur triphasé,

deux conducteurs à haute tension sont isolés du circuit, à la suite de la fusion de coupe-circuits) et le fer, ainsi que le secondaire peuvent être soumis à la haute tension.

Pour remédier à la rupture de l'isolant, on a proposé de séparer les enroulements à haute et basse tension par une tôle mince prise à la terre, mais cela entraîne à des difficultés presque insurmontables pour la construction du transformateur.

Le moyen le plus efficace est de mettre à la terre simultanément le bâti du transformateur et un point de l'enroulement secondaire (le milieu de l'enroulement dans le cas de courant alternatif simple, le centre de l'étoile dans le cas de courants triphasés) mais dans ce cas, les chances d'interruption du circuit (et d'incendie dans certains cas) sont de beaucoup augmentées ; il suffit qu'un autre point du circuit soit à la terre pour avoir court-circuit et par conséquent tout au moins fonctionnement des coupe-circuits.

Pour éviter cet inconvénient, on peut employer des appareils ne mettant à la terre le secondaire que quand la haute tension y pénètre.

Dans l'appareil Thomson-Houston, les conducteurs secondaires sont reliés à des boutons de métal installés à proximité d'une plaque métallique reliée à la terre ; entre les boutons et la plaque est disposée une feuille d'isolant qui peut supporter la tension normale secondaire. Si la haute tension pénètre dans le secondaire, la feuille isolante est percée, les boutons communiquent avec la terre et entre eux, il y a court-circuit et les coupe-circuits primaires agissent.

M. Cardew utilise l'attraction statique qui s'exerce sur une petite feuille d'aluminium pour mettre le secondaire à la terre quand la tension dans le secondaire (par suite de communication avec le primaire), est assez élevée pour soulever la feuille.

Le dispositif Ferranti met le secondaire en court-circuit (ce qui entraîne la fusion des plombs du primaire) quand la haute tension y pénètre.

En reliant le centre de l'étoile du circuit secondaire et le bâti à la terre dans le cas de courants triphasés, il y a des courants provenant du non équilibrage des phases qui circulent et peuvent gêner les transmissions téléphoniques.

La maison Voigt et Haeffner, pour éviter cet inconvénient, relie le bâti et le centre de l'étoile secondaire et met l'ensemble à la terre par l'intermédiaire d'un condensateur formé de lames de zinc et de mica.

Le nombre de lames varie suivant la tension ; dans le cas de fusion du

condensateur, il forme une jonction directe avec la terre. Le condensateur protège aussi bien contre les phénomènes statiques que contre l'irruption de la haute tension dans le secondaire. Il y aurait cependant danger à toucher le bâti; aussi lorsque l'on veut toucher au transformateur, on shunte le condensateur au moyen d'un interrupteur reliant directement le bâti à la terre.

Dans les installations, la maison Voigt et Haeffner place en outre un condensateur à chaque borne secondaire du transformateur triphasé. Ces condensateurs sont reliés en étoile à la terre et dans le cas de pénétration de la haute tension, ils fondent; il y a alors court-circuit à la terre, et les coupe-circuits à haute tension du transformateur fonctionnent.

Ces condensateurs peuvent servir de contrôle de la canalisation, pour cela chacun d'eux peut avoir son armature supérieure et inférieure reliée par une lampe à incandescence.

Ordinairement les lampes ne sont pas vissées dans leurs douilles; en en vissant une on peut reconnaître si le conducteur secondaire correspondant est à la terre. En les mettant en circuit toutes les trois, si elles s'allument, on reconnaît une rupture de fil; en mettant en court-circuit en même temps le condensateur de l'étoile, on peut reconnaître si il y a des différences de tension dans les phases. La maison Voigt et Haeffner livre des abris en tôle, pour transformateur, tout préparés et qu'il suffit de monter sur place, le monteur n'ayant ensuite qu'à relier les conducteurs aux diverses bornes.

La fig. 34 donne le schéma de montage d'une station transformatrice installée sur le parcours des fils à haute tension qui pénètrent dans la station et en ressortent ensuite.

Les conducteurs d'arrivée et de départ à haute tension sont reliés par l'intermédiaire de coupe-circuits F à trois barres à haute tension, qui elles-mêmes sont reliées aux bornes à haute tension du transformateur par l'intermédiaire d'autres coupe-circuits, F_1 . Sur les conducteurs reliant les barres au transformateur sont disposés les paratonnerres. Le fer du transformateur et le centre de l'étoile sont mis à la terre par l'intermédiaire d'un condensateur pouvant être shunté. Aux bornes du circuit à basse tension sont disposés les condensateurs à lampes. Les bornes du secondaire sont reliées à trois barres à basse tension par l'intermédiaire de coupe-circuits à basse tension f_1 . Les lignes à basse tension sont reliées aux barres par l'intermédiaire de coupe-circuits f ; sur chacun des conducteurs à basse tension est placé un ampèremètre Am .

Les fig. 35 et 36 donnent une coupe de la maisonnette et une vue du tableau (les portes d'entrée de la partie la plus petite de la maisonnette contenant le tableau étant ouvertes). Les barres à haute tension sont protégées par une sorte de grillage maintenu par des équerres en fer.

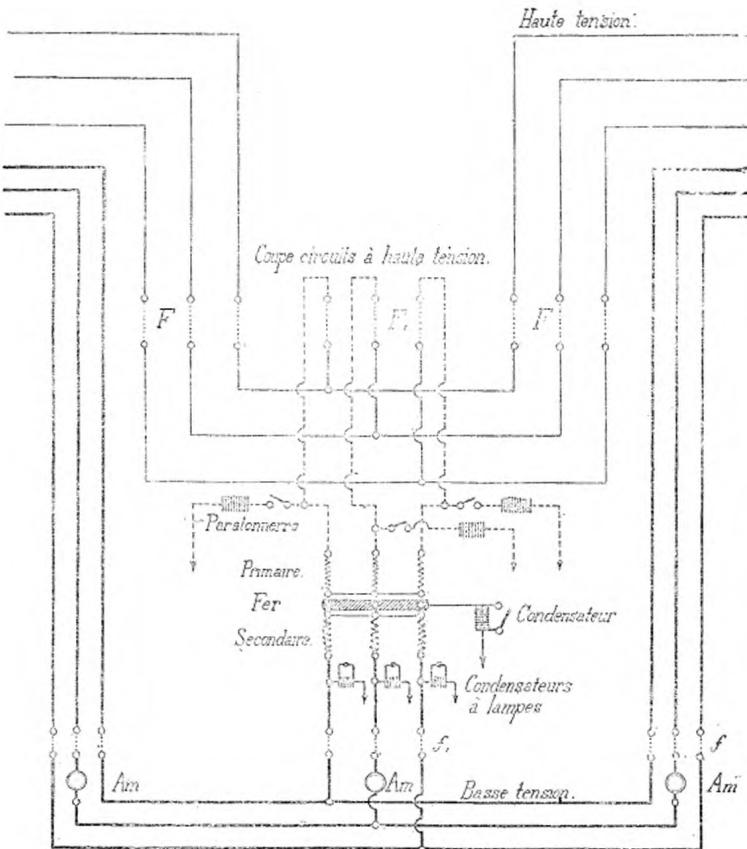


Fig. 34.

En retirant les coupe-circuits F_1 , on isole complètement le transformateur et les lignes secondaires de la haute tension. En retirant les coupe-circuits F , soit à droite, soit à gauche, on isole la partie correspondante des lignes à haute tension.

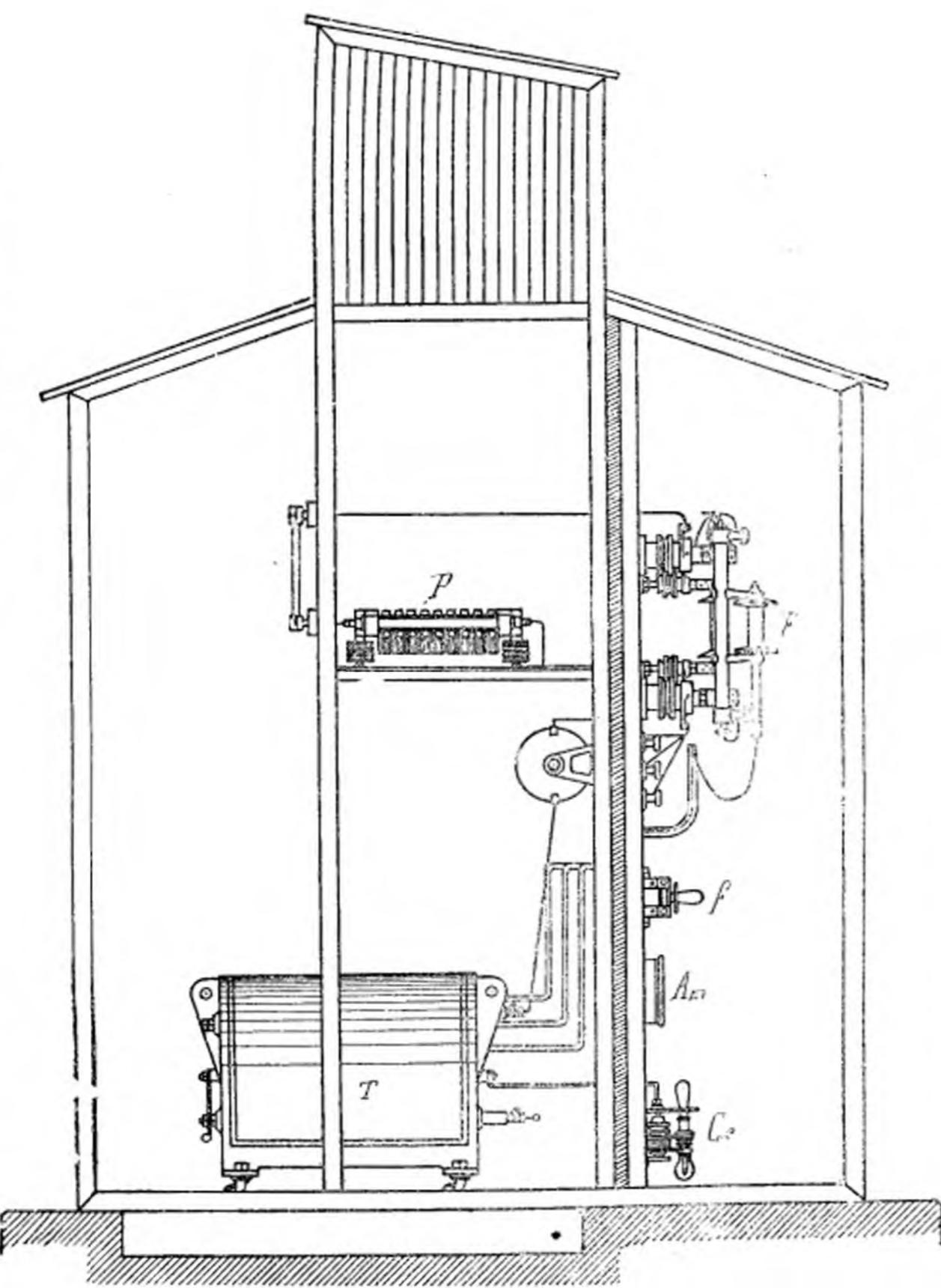


Fig. 35.

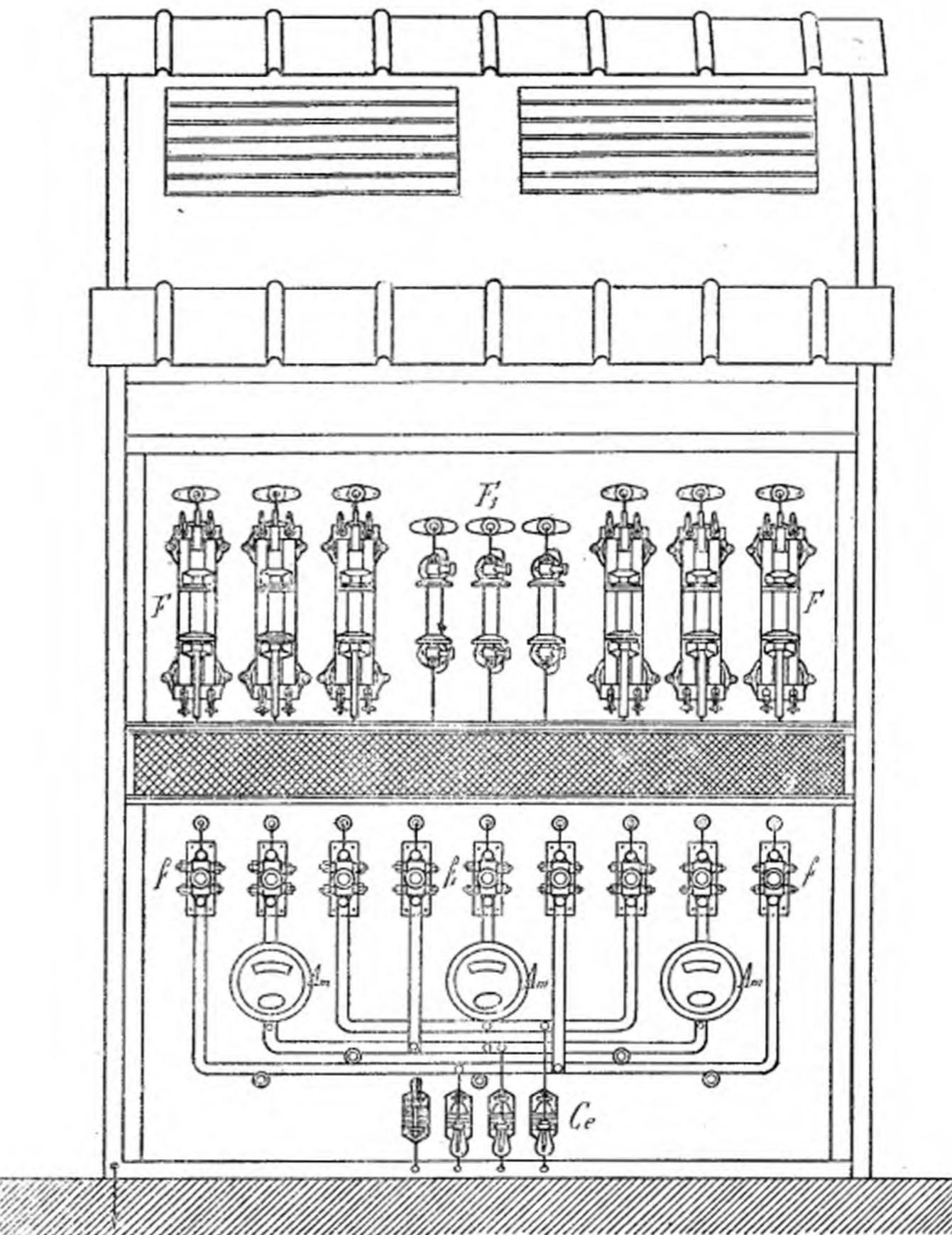


Fig. 36.

RÉGLAGE DE LA TENSION DANS LES CIRCUITS SECONDAIRES.

Dans les distributions à très hautes tensions, il est impossible de régler la tension du secondaire en agissant comme on le fait parfois sur le circuit primaire. Le seul moyen de réglage de la tension est d'installer des transformateurs donnant une tension secondaire plus élevée que la tension normale et d'employer des bobines à réaction, pour réduire la tension à certains moments. Ce dispositif est très employé dans le cas où l'on veut pouvoir régler dans certaines limites la tension du courant continu fourni par un convertisseur. On peut constituer ces bobines de réglage par de simples bobines de self (Fleming, Thomson, etc.) ou mieux par des ensembles où l'inductance mutuelle joue un rôle prépondérant. Tel est le cas des régulateurs d'induction Thomson-Houston. Les appareils pour courant alternatif simple sont composés d'un enroulement induit placé en série dans la ligne, et d'un enroulement inducteur en dérivation. En déplaçant l'induit par rapport à l'inducteur, on obtient un décalage plus ou moins grand du courant par rapport à la f. é. m.). Pour un réseau triphasé, on emploiera un induit triphasé semblablement mobile par rapport à un inducteur triphasé. La Compagnie Thomson-Houston laisse d'ordinaire, dans le cas de courant monophasé, les deux enroulements fixes et déplace un noyau oblong concentriquement placé.

Quand une distribution à haute tension doit assurer l'éclairage de diverses localités, les appareils d'éclairage étant branchés directement dans les divers circuits secondaires, on calcule la ligne primaire pour que la variation de la chute de tension suivant la charge soit très faible à partir d'un point que l'on choisit comme centre à potentiel constant, et on règle la tension à l'usine pour que la tension en ce point reste constante. On peut obtenir un bon réglage en choisissant des transformateurs abaisseurs de tension donnant une tension un peu trop élevée et en installant des bobines à réaction dans les secondaires. En réglant le potentiel à l'usine suivant la charge et en réglant les bobines à réaction, d'après le nombre de lampes installées dans chaque localité, on peut arriver à obtenir un fonctionnement très satisfaisant des lampes à incandescence.

DESCRIPTION DE QUELQUES INSTALLATIONS

**Transport d'énergie de La Chaux-de-Fonds et du Locle,
à courant continu série (1).**

L'installation qui comporte un circuit de 52 km. de longueur (voir le plan général fig. 37) a été exécutée par la Compagnie de l'Industrie électrique de Genève, dont M. Thury est l'ingénieur en chef.

Les communes de La Chaux-de-Fonds et du Locle, possèdent sur l'Areuse une partie d'une chute de 91 m de hauteur, qui est utilisée pour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'usine génératrice. Comme la puissance de cette chute est très variable et que souvent en hiver elle ne peut fournir l'énergie nécessaire, on a été obligé d'installer des usines de réserve, ainsi que nous allons le voir.

Usine génératrice. — L'usine génératrice est installée à proximité de l'Areuse, au lieu dit la Combe-Garot.

On a construit un barrage sur l'Areuse, et de là partent deux conduites en tôle d'acier de 1^m,10 de diamètre, d'une longueur de 200 m, aboutissant à l'usine. Les communes de La Chaux-de-Fonds et du Locle ont droit à 70 0/0 de l'eau de la rivière, le reste appartenant à la ville de Neufchâtel; on a admis pour les deux communes un débit maximum de 5 m³ (6000 chevaux) et un débit normal de 3 m³ (3 600 chevaux). D'après le programme du concours pour l'adjudication de la construction, il était admis qu'à l'étiage absolu on disposerait d'un débit de 1^m,7 (2.000 chevaux), mais la réalité a été bien au-dessous de ces prévisions. Le projet comportait neuf groupes électrogènes de 150 a. et 1800 v. dont huit en fonctionnement et un de réserve, soit une puissance totale disponible de 2700 kw., sous une tension de 8×1800 = 14400 v.

Il y a actuellement cinq groupes installés.

Chacun des groupes est constitué par une turbine à axe horizontal actionnant directement une dynamo Thury, à 6 pôles, dont le diamètre d'alésage est de 1^m,23.

Le réglage de la différence de potentiel est obtenu automatiquement, la turbine ayant un moment d'inertie très faible (voir page 154). On a

(1) D'après une conférence faite à la Société internationale des électriciens, par M. Cuénot, Ingénieur à Genève.



Fig. 37.

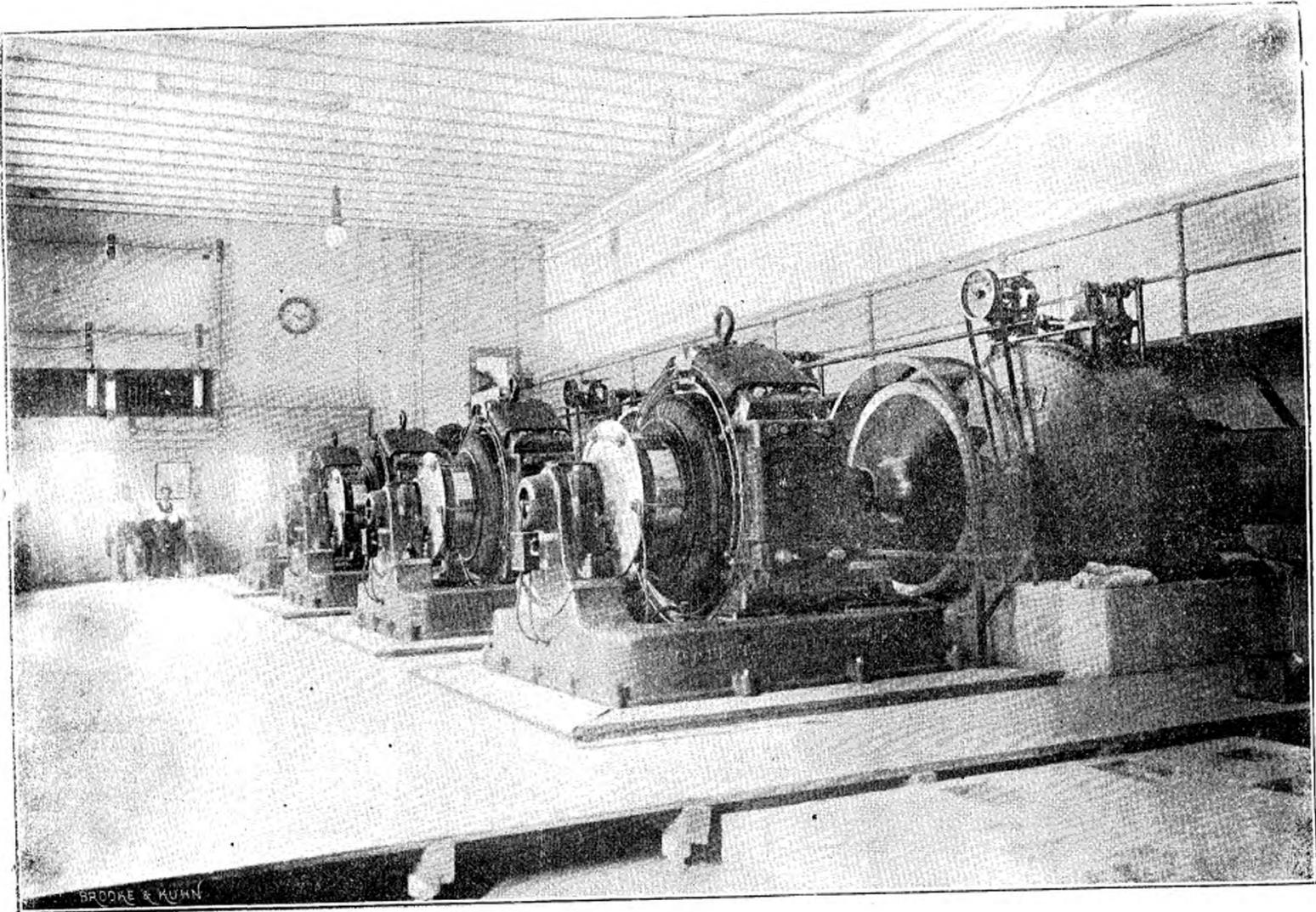


Fig. 38.

cependant ajouté un régulateur de vitesse pouvant agir simultanément sur les vannages de toutes les turbines; ce régulateur décrit page 153, commande une transmission constituée par des tubes légers montés sur billes (fig. 38).

A 12 tours par minute la dynamo fournit en court-circuit le courant normal de 150 a., à 300 tours à la minute elle donne 150 a et 1800 v. Les dynamos ont été essayées à une tension de 2700 v. Auprès de chacune d'elles est le petit tableau de commande qui porte l'interrupteur de court-circuit; un tableau général comportant un ampèremètre et un voltmètre de précision permet de faire les relevés statistiques.

Chaque dynamo est munie d'un déclencheur par inversion (voir page 157).

La station est protégée par des parafoudres du système Thury (voir page 147). Les parafoudres sont branchés sur chacun des conducteurs à leur sortie de l'usine, et sont complétés chacun par quatre bobines d'induction et deux condensateurs montés en cascade.

Le service de l'usine est assuré par trois surveillants qui se remplacent toutes les 8 heures.

Lignes. — Comme nous le verrons plus loin, la distribution comporte actuellement deux usines de secours, l'une à la Chaux-de-Fonds, l'autre au Locle et une troisième usine de secours est prévue sur l'Areuse, à environ 2 km. de la Combe-Garot, au champ du Moulin.

Comme le montre le plan de la canalisation (fig. 37), il y aura une boucle au départ reliant l'usine génératrice à l'usine du plan du Moulin; puis de l'usine génératrice la ligne part à deux conducteurs, sur une longueur de 10 km. environ; là il y a bifurcation et un conducteur se dirige vers la Chaux-de-Fonds. Là, il forme une boucle de 3 km. de longueur environ, puis revient au Locle, où existe une nouvelle boucle, pour ensuite revenir rejoindre l'autre conducteur à la bifurcation.

Au moyen de bypass (page 157) on peut, soit isoler les usines de secours, l'usine génératrice desservant le réseau, soit mettre en série l'usine génératrice et toutes les usines de secours, soit desservir le réseau par une seule des usines de secours, etc. Les boucles du Locle ou de La Chaux-de-Fonds peuvent également être isolées chacune du reste du réseau et être desservies par les usines de secours respectives, ou bien être placées en série (au moyen d'un bypass installé à la bifurcation placée à 10 km. de l'usine génératrice sur le réseau commun).

Le conducteur est un câble de 150 mm² de section, son développe-



Fig. 39.

ment est de 52 km., la résistance totale est de 5,76 ohms, et la chute de tension de $5,76 \times 150 = 864$ v. A pleine charge, la perte d'énergie sur la ligne est de $\frac{864 \times 100}{14400} = 6$ 0/0; à demi-charge elle est naturellement de 12 0/0. La ligne est constituée par des poteaux en bois; les isolateurs en porcelaine sont à double cloche; les deux fils placés sur un même poteau, dans la campagne, sont à une distance de 80 cm l'un de l'autre.

Les circuits urbains à haute tension sont également aériens; comme le montre la fig. 39 qui représente la ligne primaire de la Chaux-de-Fonds, un filet circulaire enveloppe le câble à haute tension, ce qui prévient tout accident.

USINE TRANSFORMATRICE DE LA CHAUX-DE-FONDS (FIG. 40).

L'usine terminée comportera huit groupes de moteurs série de 260 chevaux actionnant des génératrices.

Actuellement *le service des tramways* à 550 v. est assuré par deux groupes de 260 chevaux.

Chacun de ces groupes comporte une génératrice à 550 v. Une batterie d'accumulateurs-tampon de 250 éléments est placée en parallèle.

La batterie tampon n'a pas d'éléments de réduction, un survolteur système Thury, actionné par un moteur série (branché dans le circuit à haute tension), ajoute automatiquement à la tension de la batterie la tension nécessaire pour que, lorsqu'elle se décharge (pour venir en aide aux génératrices), la différence de potentiel constant de 550 v. soit maintenue, ou, dans le cas inverse, ajoute sa tension à celle des génératrices pour charger la batterie (à la décharge la tension par élément peut baisser à 1,80, la batterie fournit donc $1,80 \times 250 = 450$ v., le survolteur doit fournir 100 v. en plus. A fin de charge la batterie peut avoir une tension de $250 \times 2,60 = 650$ v., le survolteur doit alors ajouter 100 v. à la tension des génératrices).

L'intensité du courant pouvant atteindre 400 a., la puissance du survolteur est de $400 \times 100 = 40000$ w., il est actionné par un moteur série de 45 kw. à 550 tours par minute.

L'éclairage se fait par une distribution à trois fils, sous une différence de potentiel de $2 \times 160 = 320$ v.

Deux groupes de 260 chevaux (fig. 41) constitués chacun par un mo-

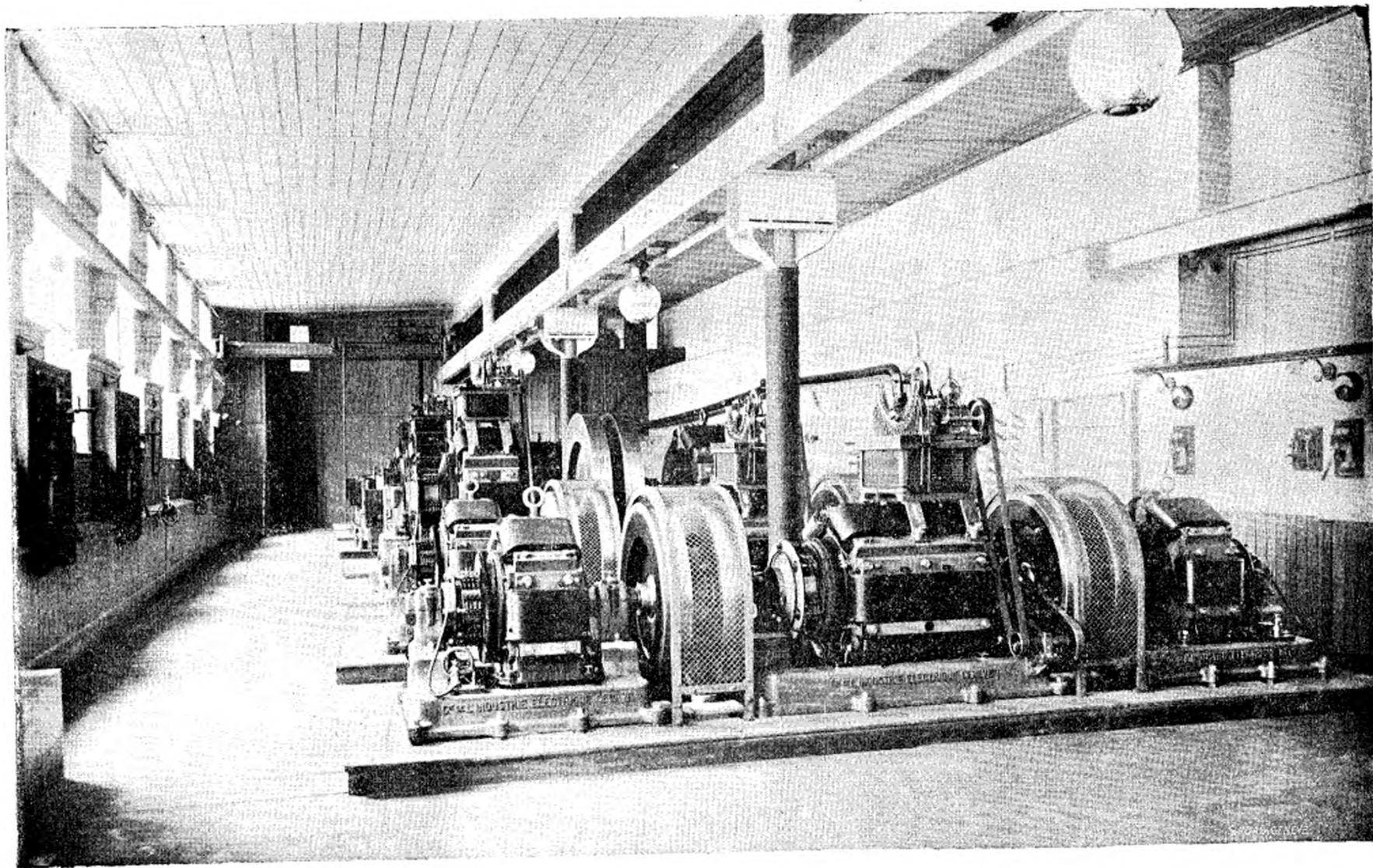


Fig. 40.

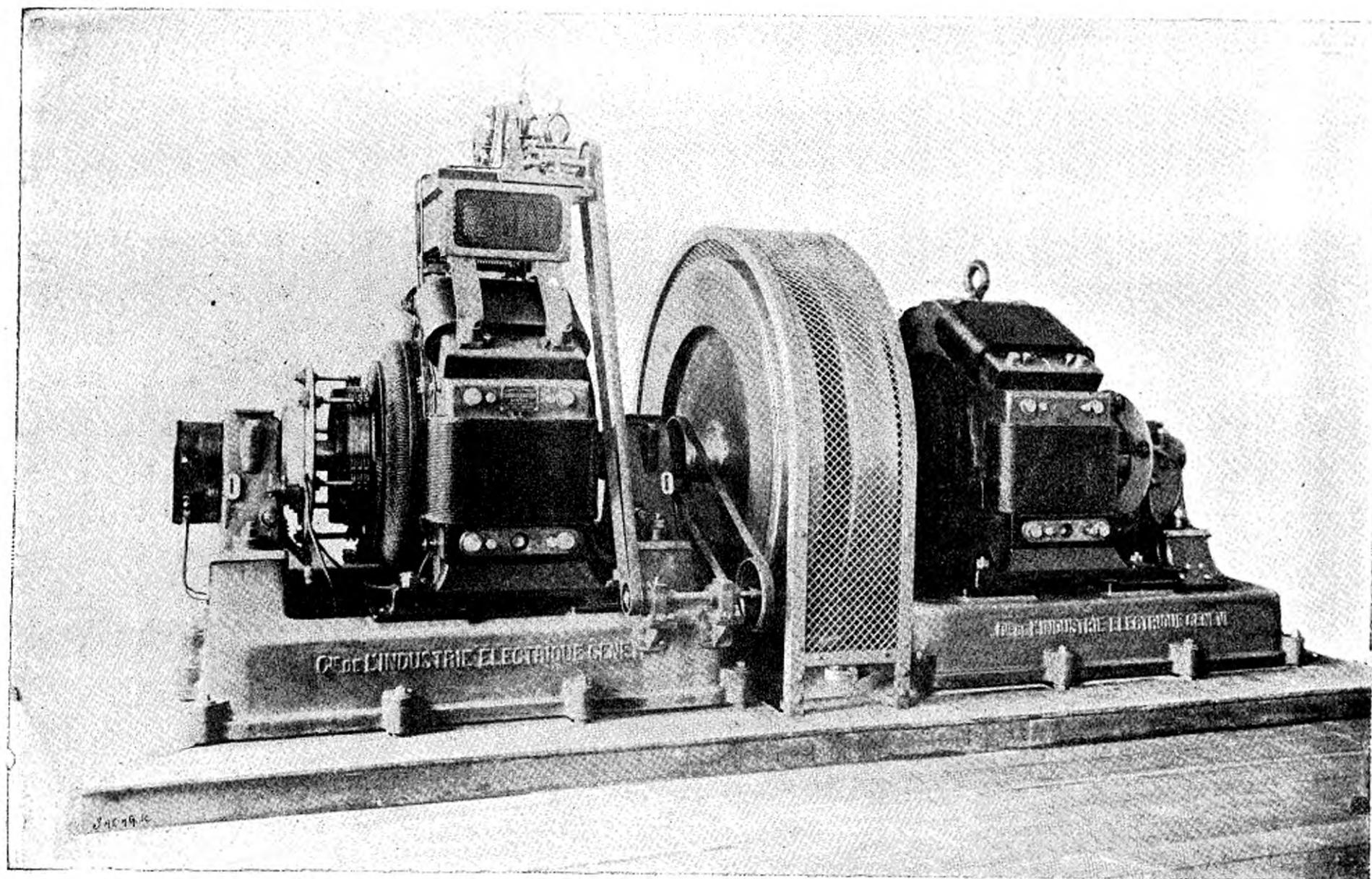


Fig. 41.

teur série activant une génératrice à 350 v., assurent actuellement le service de l'éclairage (1).

L'équilibrage entre les ponts est obtenu au moyen de deux groupes de moteurs série de 75 kw. actionnant chacun deux génératrices à 175 v.

La distribution à trois fils desservait, au commencement de 1900, 120 moteurs d'une puissance totale de 250 chevaux, 3 600 lampes à incandescence et 33 lampes à arc. La consommation augmentant toujours, on a installé deux batteries d'accumulateurs que l'on charge pendant la journée, au moyen des génératrices à 350 v. qui peuvent être poussées pour la charge jusqu'à 550 v. (elles peuvent également servir de secours pour le service des tramways).

USINE DE SECOURS DE LA CHAUX-DE-FONDS.

Le manque d'eau à l'usine génératrice pendant l'hiver a fait installer l'usine de réserve.

Comme il y a des moteurs industriels branchés sur le réseau à haute tension, il fallait pouvoir les desservir ; mais comme d'autre part il n'était pas nécessaire d'assurer le service de l'éclairage et des tramways au moyen d'une double transformation du courant, on a adopté une solution permettant de desservir avec la même génératrice l'un quelconque des trois réseaux.

On a prévu huit groupes électrogènes dont trois sont installés.

Chaque groupe comporte un moteur à gaz de 250 chevaux à 160 tours à la minute commandant directement, par l'intermédiaire d'un manchon Raffard, une dynamo Thury.

Cette dynamo est munie de deux enroulements induits qui peuvent, à l'aide d'un commutateur, être placés soit en tension, soit en parallèle.

La dynamo peut fournir soit 150 ampères sous 1150 v. pour la distribution à haute tension, soit 300 ampères sous 575 v. pour le service des tramways, soit 540 ampères sous 320 v. pour le service de l'éclairage.

Dans la marche à potentiel constant (sous 575 ou 320 v.), la dynamo est excitée en dérivation, un rhéostat manœuvré à la main permettant le réglage.

(1). La compagnie de l'Industrie avait garanti pour ces groupes un rendement de 82 0/0 à pleine charge, le rendement mesuré a été de 87 0/0 (93,5 0/0 pour chacune des dynamos).

Dans la marche à intensité constante, comme la vitesse du moteur est constante, on emploie l'excitation séparée. L'excitatrice, commandée par un moteur à gaz, peut desservir quatre groupes. Un rhéostat spécial permet l'ajustage de l'excitation et un régulateur automatique fixé sur la machine même, assure la constance de l'intensité.

La mise en marche du moteur à gaz s'effectue en faisant fonctionner la génératrice comme moteur sur le réseau des tramways. Le démarrage effectué, la machine, au moyen du commutateur, est branchée sur l'un ou l'autre des réseaux.

USINE TRANSFORMATRICE ET STATION DU RÉSEAU DU LOCLE.

L'éclairage au Locle fonctionne à 3 fils sous une tension de $2 \times 150 = 300$ v.

L'usine transformatrice comprend :

1^o Deux groupes transformateurs de 200 kw. constitués chacun par un moteur série, actionnant une génératrice pouvant donner 600 ampères sous 325 v. Ces génératrices peuvent donner 550 v. et pourront assurer soit le service des tramways projetés, soit la charge des batteries d'accumulateurs pour l'extension de l'éclairage.

2^o Trois groupes compensateurs de 175 kw. composés chacun d'un moteur série de 200 kw. actionnant deux génératrices à 160 v.

D'autres moteurs série actionneront les pompes élévatrices d'une usine hydraulique devant alimenter le Locle en eau potable.

Comme réserve on a prévu trois machines à vapeur Sulzer verticales de 250 chevaux, actionnant chacune directement une dynamo Thury analogue à celles de la station de réserve de la Chaux-de-Fonds et de même puissance. Quand la dynamo desservira le réseau d'éclairage (325 v.) la dynamo sera excitée en dérivation et la machine à vapeur munie de son régulateur tournera à la vitesse de 300 tours par vitesse.

Quand la dynamo sera branchée sur le réseau à haute tension (150 a.), elle donnera au maximum 1 150 v. à la vitesse de 300 tours par minute. Le régulateur de la machine à vapeur sera enlevé et la régulation (à excitation séparée pour l'intensité constante) se fera par variation du nombre de tours du moteur (voir page 154).

STATION DE RÉSERVE SUR L'AREUSE.

La commune de La-Chaux-de-Fonds possède sur l'Areuse, au Champ du Moulin, une usine hydraulique élévant l'eau à 300 m au moyen de pompes mues par des turbines. (Cette installation a été décrite dans la *Revue technique de l'Exposition de 1889* (Hydraulique, par MM. L. Vigreux et F. Loppé, page 73). On installera dans cette usine de nouveaux groupes composés d'une turbine, d'une pompe et d'une dynamo série.

Aux époques des basses eaux, pendant que les services d'éclairage sont chargés (particulièrement l'hiver de 4 à 8 heures du soir), les turbines actionneront les dynamos qui seront placées en série dans le circuit à haute tension.

Pendant les heures de la nuit et de la journée où le service électrique sera peu chargé, les dynamos serviront de moteurs et actionneront les pompes de l'usine du Champ du Moulin.

DISTRIBUTIONS A COURANT ALTERNATIF

—
ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE DE LA VALLÉE DU GRÉSIVAUDAN

M. Bergès, ingénieur des Arts et Manufactures, industriel à Lancey (Isère), s'est occupé depuis longtemps de l'utilisation des hautes chutes et, à l'Exposition de 1889, sous le titre de *la Houille blanche* (1), il exposait un projet complet pour l'utilisation de chutes créées en utilisant, comme réservoirs, des lacs situés sur la montagne au-dessus de Lancey. A ce moment il prévoyait déjà la possibilité de transporter l'énergie électrique à longue distance et espérait pouvoir éclairer électriquement, à très bas prix, Grenoble et ses environs. Aujourd'hui l'idée de M. Bergès se réalise et la première partie du projet qui, il y a dix

(1) *Revue technique de l'Exposition de 1889*. « L'Hydraulique », par MM. E. Vigreux et F. Loppé, p. 162.

ans, semblait presque un rêve, est exécutée ; plus de cinquante villages de la vallée du Grésivaudan sont éclairés à l'électricité au moyen de la houille blanche.

Quand les travaux d'installation des réservoirs et des chutes seront complètement terminés, M. Bergès disposera d'une puissance de 10 000 chevaux ; pour le moment, il utilise pour l'éclairage de la vallée du Grésivaudan une faible partie de cette puissance.

L'installation et l'exécution de toute la partie électrique de la distribution : alternateurs, transformateurs, lignes, a été confiée à la Société « l'Eclairage électrique », dont le directeur technique est l'ingénieur bien connu, E. Labour. Cette Société a réalisé l'installation dans des conditions de simplicité d'exécution et d'exploitation vraiment remarquables.

Un réservoir naturel, situé à 450 m au-dessus de l'usine, alimente, par des conduites en tôle d'acier, deux turbines de la maison Brenier Neyret et C^{ie}, de Grenoble.

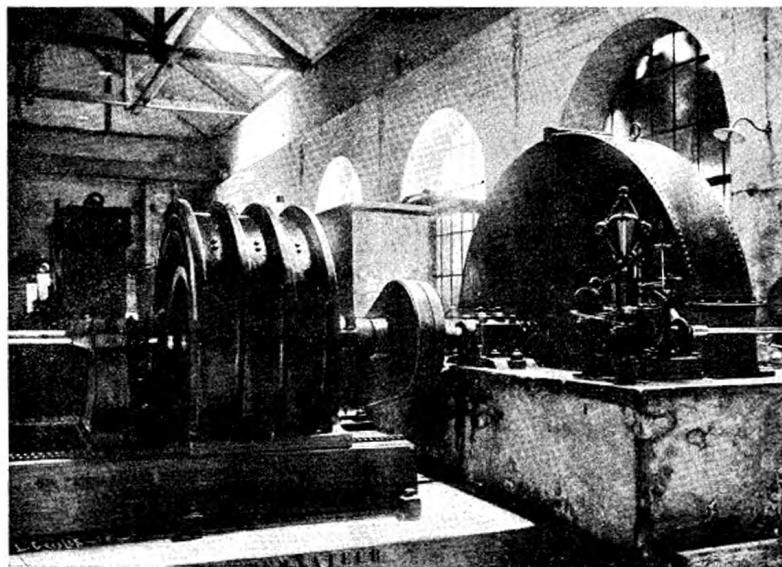


Fig. 42.

Les turbines, à axe horizontal, à distribution partielle et à libre déviation, sont munies d'aubages en acier coulé. Les régulateurs de vitesse (fig. 42) actionnent les languettes mobiles des distributeurs.

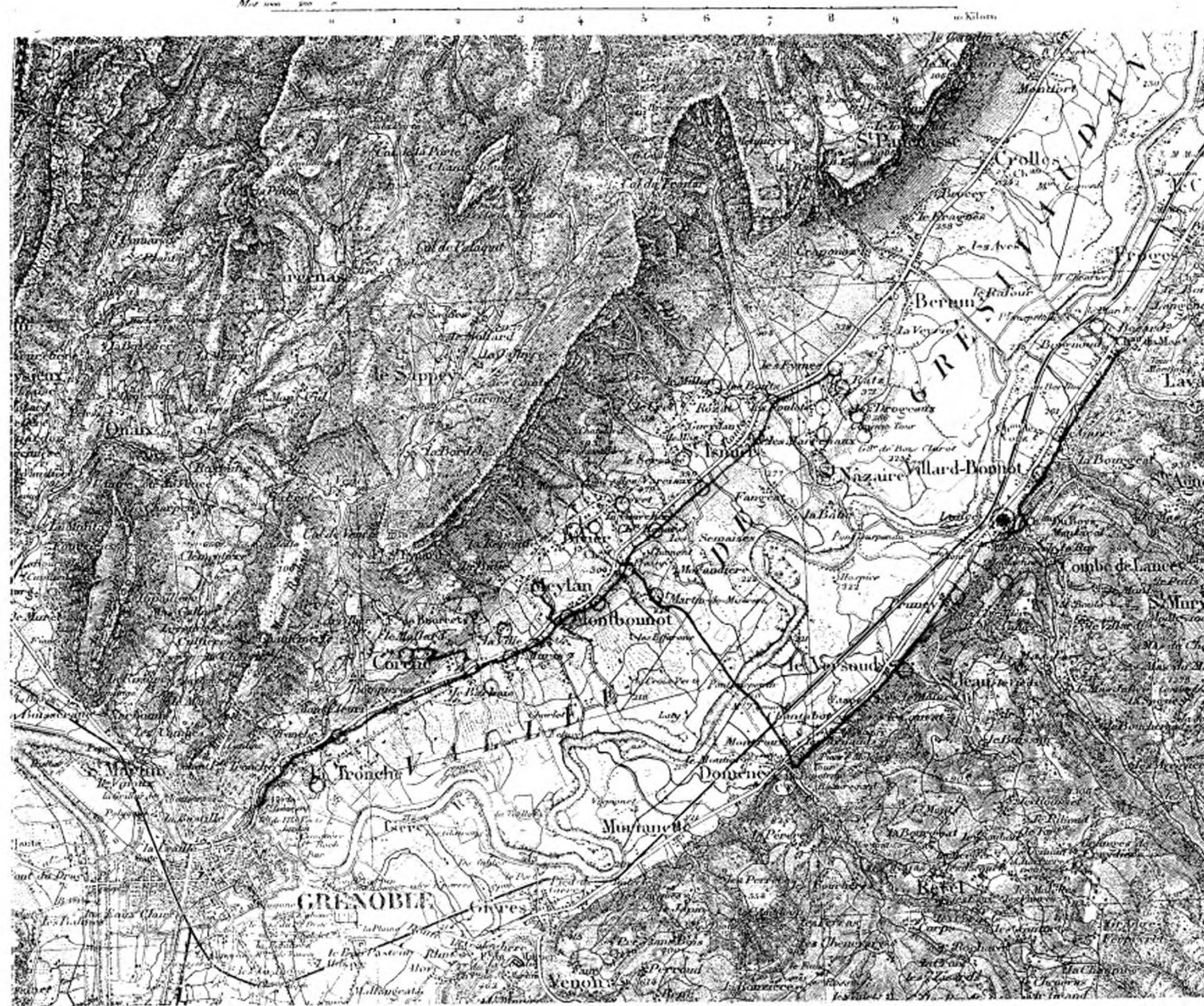


Fig. 43.

Chacune des turbines, tournant à la vitesse de 330 tours à la minute, actionne directement un alternateur monophasé ; l'un de ces alternateurs a une puissance de 200 kilowatts, l'autre de 300 kilowatts.

La tension aux bornes est de 125 volts et la fréquence de 42.

Chaque alternateur est muni d'une excitatrice commandée par courroie (fig. 44).

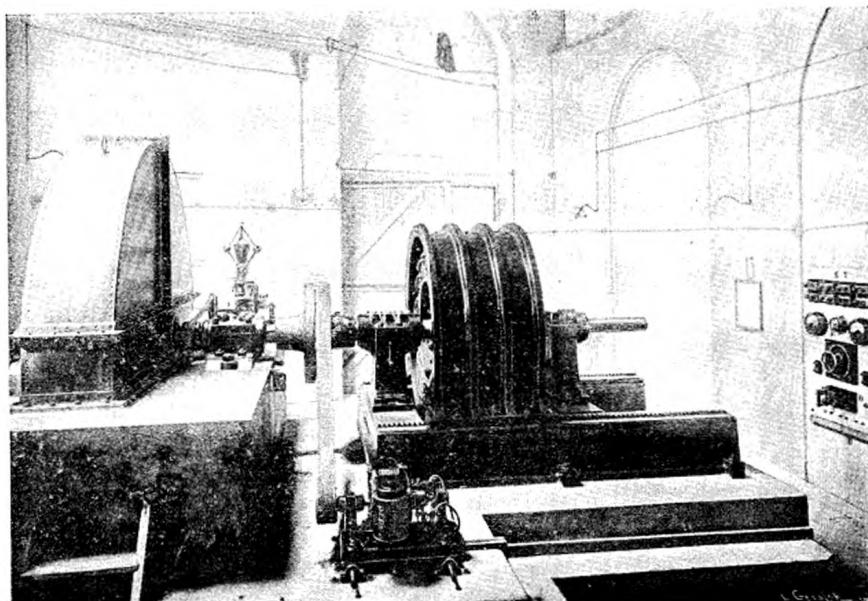


Fig. 44.

Le tableau à basse tension est constitué par trois panneaux, un pour chaque alternateur, comportant les coupe-circuits, un ampèremètre et un voltmètre pour le courant alternatif, un ampèremètre pour le courant d'excitation, etc.

Le panneau du milieu comporte les appareils pour le couplage en parallèle, ainsi que les interrupteurs principaux.

Six transformateurs de 100 kilowatts, placés dans des bacs métalliques reliés à la terre et remplis de paraffine, élèvent la tension de 120 à 12 000 volts.

Au sortir de l'usine, la ligne aérienne (V. le plan général, fig. 43), se divise en deux parties : l'une se dirige vers le Nord, tandis que l'autre

traverse l'Isère pour alimenter, à peu près en son milieu, une artère suivant la route de Grenoble à Chaparaillon.

La ligne principale est formée de deux fils de cuivre de 40 mm^2 de

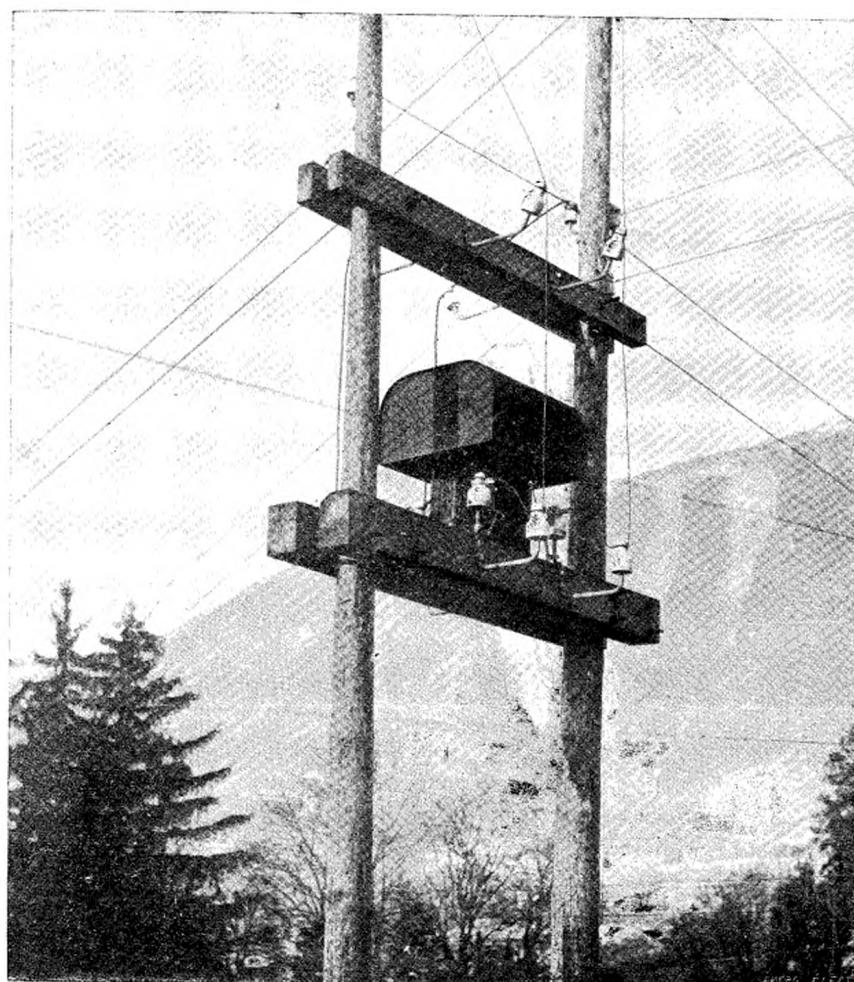


Fig. 45.

section, les dérivations sont en fils de 3 mm de diamètre. Les fils posés sur isolateurs à triple cloche de la maison Parvillée (fig. 3), sont espacés de 0^m,63.

A la traversée de l'Isère, la portée des fils de 40 mm^2 est de 80 m.

Le développement total des lignes à haute tension est d'environ 40 km.; le point le plus éloigné est à 20 km. de l'usine.

A la traversée des routes, des filets de protection sont installés à environ 0^m,80 au-dessous du fil inférieur.

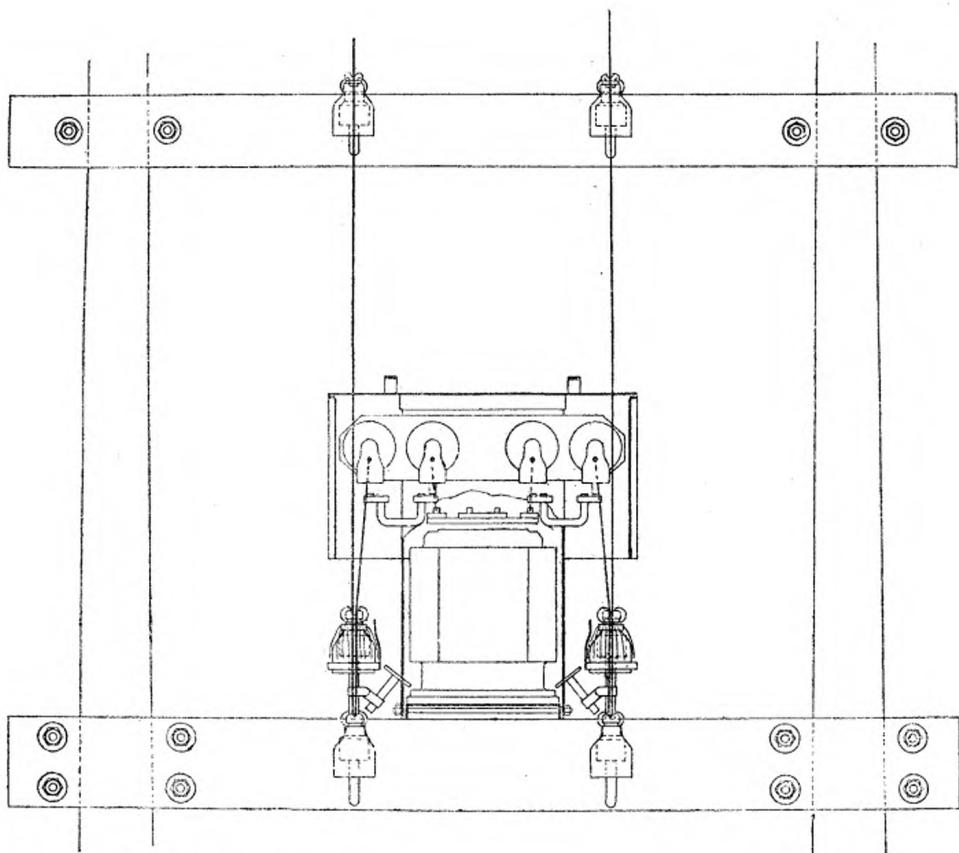


Fig. 46.

Il y a 50 postes de transformateurs aériens placés sur des poteaux en bois, abaissant la tension à 120 volts :

30 de 3 kilowatts.

15 de 5 —

5 de 7 —

Les transformateurs sont disposés sur une traverse portée par deux poteaux et sont placés dans des bacs remplis de parafine, le tout est recouvert de capots en tôle.

Comme le montrent les fig. 45, 46 et 47, un fil (représenté en traits fins) est dérivé de chacun des conducteurs à haute tension, et est amené à un isolateur-parafoudre (p. 146, fig. 47), protégé par le capot. Le fil monte ensuite directement sous le capot, traverse une pipe en porcelaine, à la sortie de laquelle est installé le coupe-circuit fusible (p. 166, fig. 28) et va à l'intérieur se fixer à la borne correspondante du transformateur, en traversant une seconde pipe en porcelaine. Le circuit à basse tension (représenté en gros traits) est installé de la même manière.

Les circuits à basse tension sont mis automatiquement à la terre, dans le cas de contact avec la haute tension.

La fig. 48 représente les canalisations à haute et à basse tension à la traversée du village de la Tronche. Cette figure, ainsi que celles portant les N°s 43 et 43, sont extraites du N° du 1^{er} septembre 1898 du journal l'*Energie Elec-*

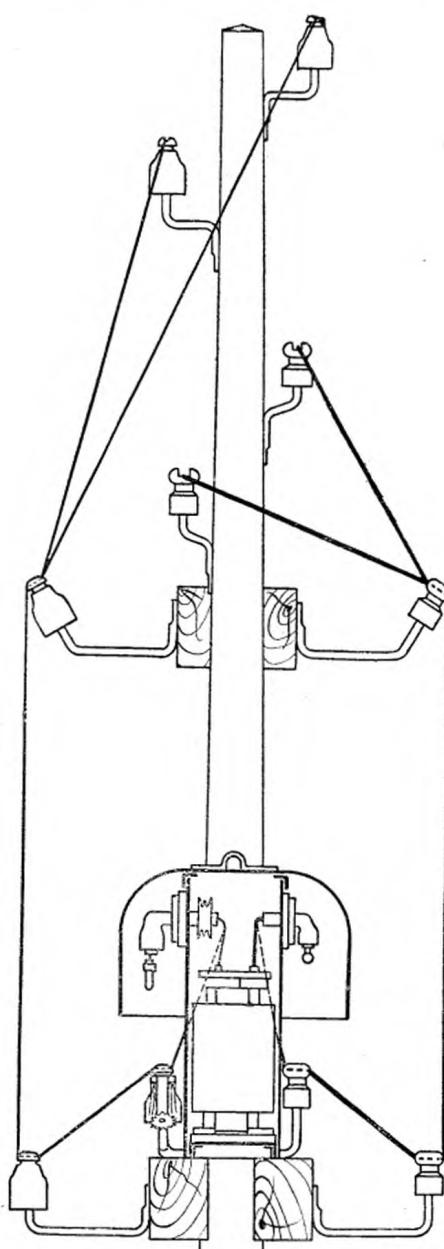


Fig. 47

trique, qui contient un article très intéressant de M. E. Vigneron sur l'éclairage électrique de la vallée du Grésivaudan.

Le nombre des abonnés est actuellement de 780, utilisant 5 400 lampes à incandescence de 5 à 25 bougies.

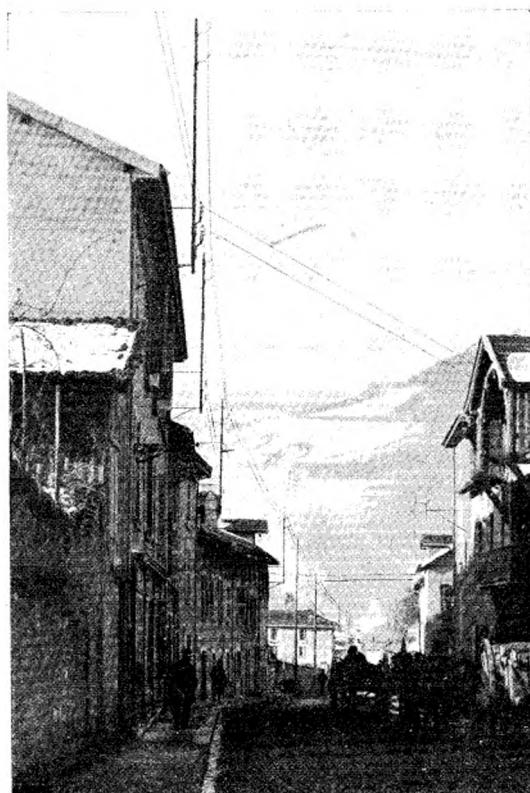


Fig. 48

Les prix pour les lampes de 10 bougies sont les suivants :

Pour 1 lampe, 25 francs par an.

—	2	—	35	—	—
—	3	—	60	—	—
—	4	—	65	—	—

Et 5 francs par an pour chaque lampe supplémentaire.

Distribution de Wiesloch.

La station centrale de Wiesloch (grand duché de Bade), établie près de la gare de Wiesloch, sur la ligne de Heidelberg-Bruchsal, est destinée principalement à desservir l'éclairage de 22 communes, peu industrielles; aussi a-t-on choisi le courant alternatif simple.

Ainsi que le montre le plan des canalisations (fig. 49), les localités desservies sont réparties à peu près également autour de la station centrale; le développement du réseau aérien à 10'000 volts est de 87 km.; la station transformatrice la plus éloignée est à 12 km. de la station centrale. La distribution secondaire se fait sous 150 volts; le réseau secondaire est également aérien.

La station fournira dans quelque temps l'énergie pour le chemin de fer de Heidelberg-Wiesloch, d'une longueur de 14 km.; pour cela on installera à Leimen une station secondaire avec deux groupes de transformateurs de courant alternatif en courant continu de 40 kilowatts chacun.

L'installation complète a été faite par la Société d'électricité par actions, autrefois Lahmeyer et Cie, pour le compte de la Société d'électricité de Karlsruhe.

La station centrale, installée tout à côté de la gare de Wiesloch (fig. 50), comporte une salle des chaudières, une salle des machines et des bureaux au-dessus desquels se trouve la tour d'où partent les canalisations aériennes.

Dans la chaufferie sont installées actuellement trois chaudières de 173 m² de surface de chauffe, fournies par la maison Göhrig et Lauch, de Darmstadt, munies de surchauffeurs Hering. Un économiseur placé dans les conduits de fumée sert à réchauffer l'eau d'alimentation. Cette eau est envoyée dans la chaudière par des pompes à vapeur la puissant dans un réservoir qui est lui-même alimenté par une pompe mue électriquement.

La tuyauterie de vapeur est disposée en anneau, de manière que la distribution de la vapeur puisse se faire même pendant les réparations.

Dans la salle des machines (fig. 51) sont disposées actuellement trois machines compound tandem horizontales de la Société hanovrienne, autrefois Egesdorff de Linden (Hanovre). Deux de ces machines peuvent développer chacune une puissance de 313-373 chevaux; la troisième, 150 à 180 chevaux; le nombre de tours par minute est de 90.

Chacune de ces machines actionne directement un alternateur de la Société Lahmeyer; les deux premiers alternateurs peuvent donner,

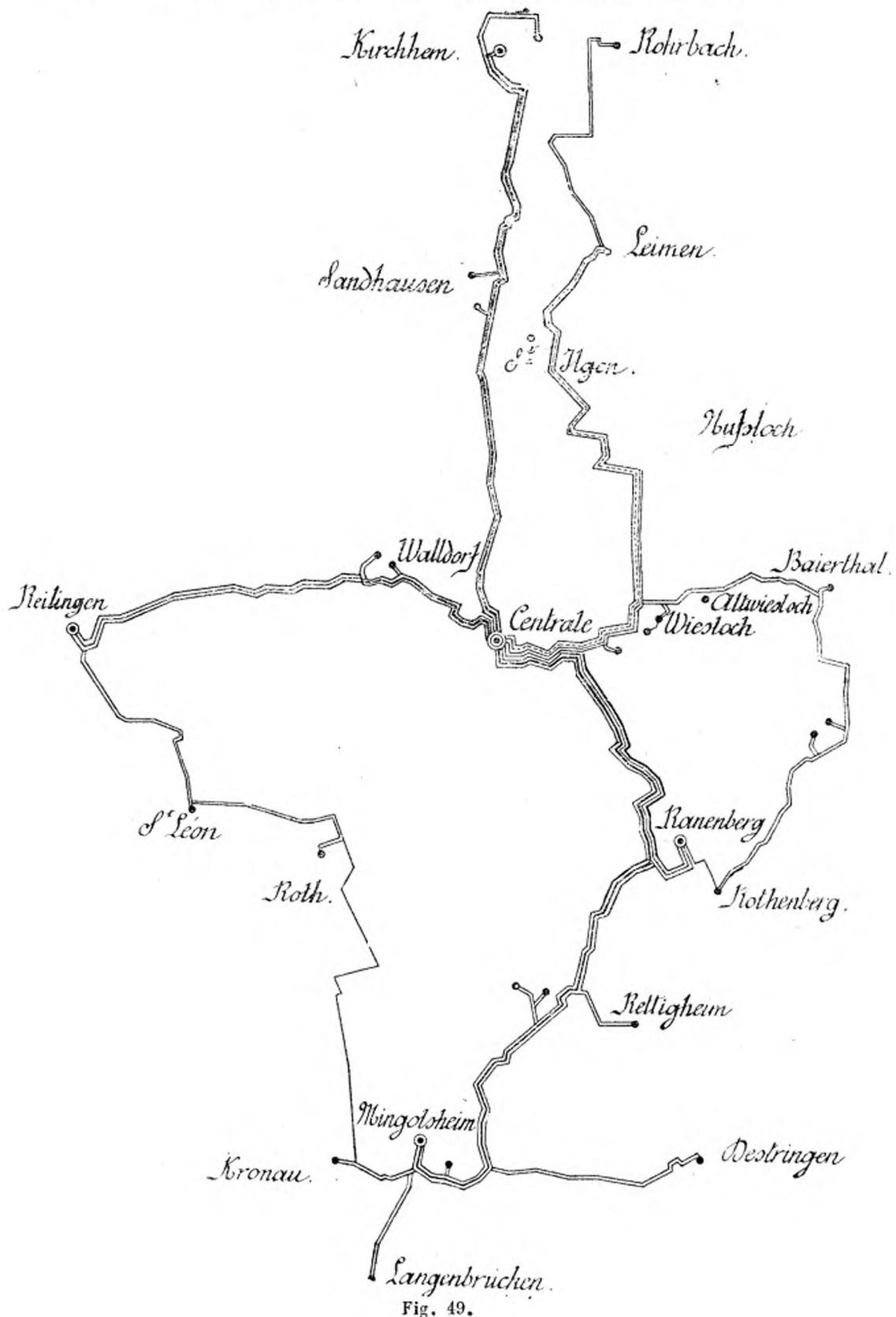


Fig. 49.

sous charge non inductive, une puissance de 300 kilowatts, le troisième une puissance de 130 kilowatts.

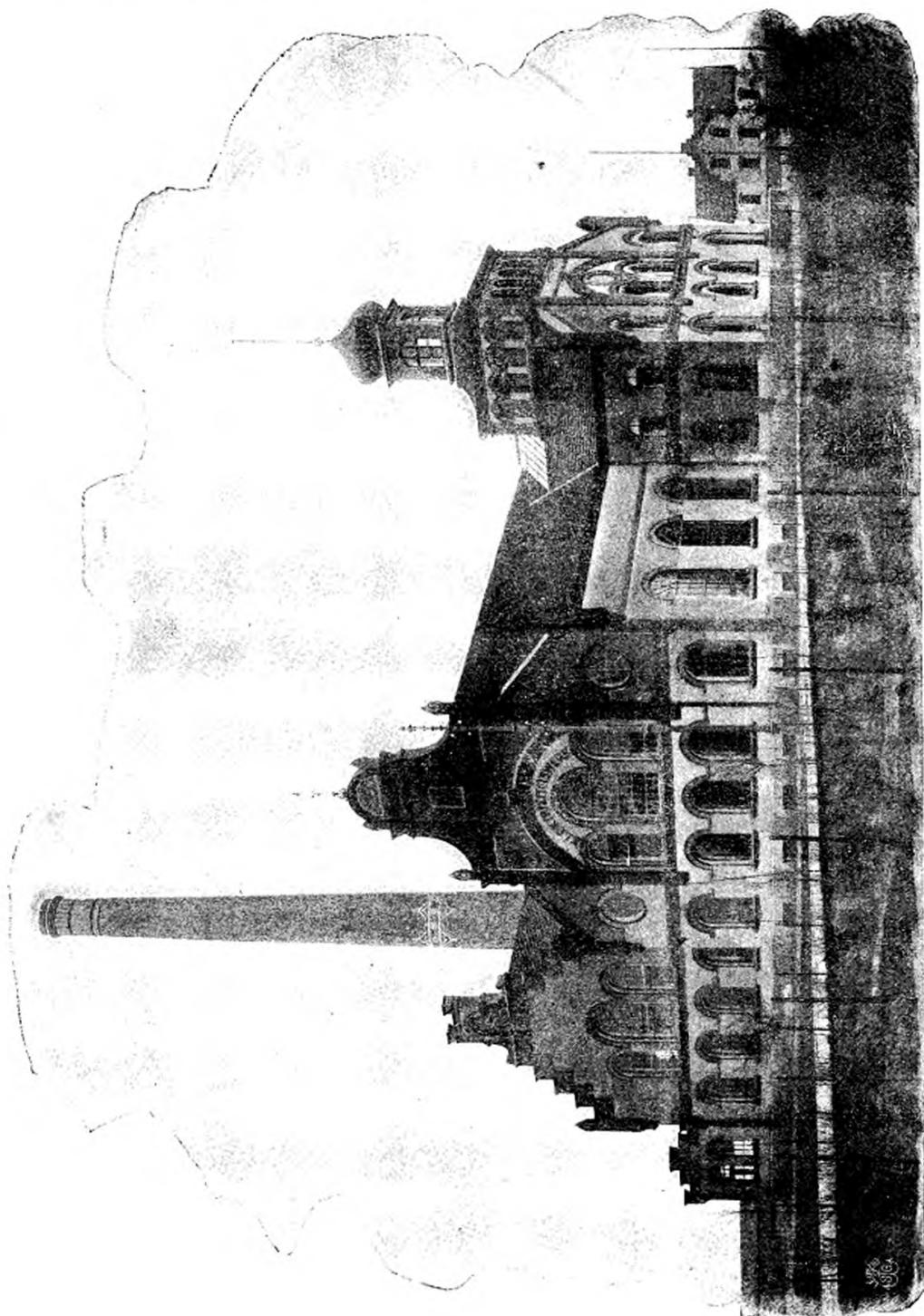


Fig. 50.

Les alternateurs sont du type à inducteur tournant et à induit fixe.

L'inducteur servant de volant porte 64 pôles à sa surface extérieure, de sorte que la fréquence est $\frac{99 \times 64}{2 \times 60} = 48$.

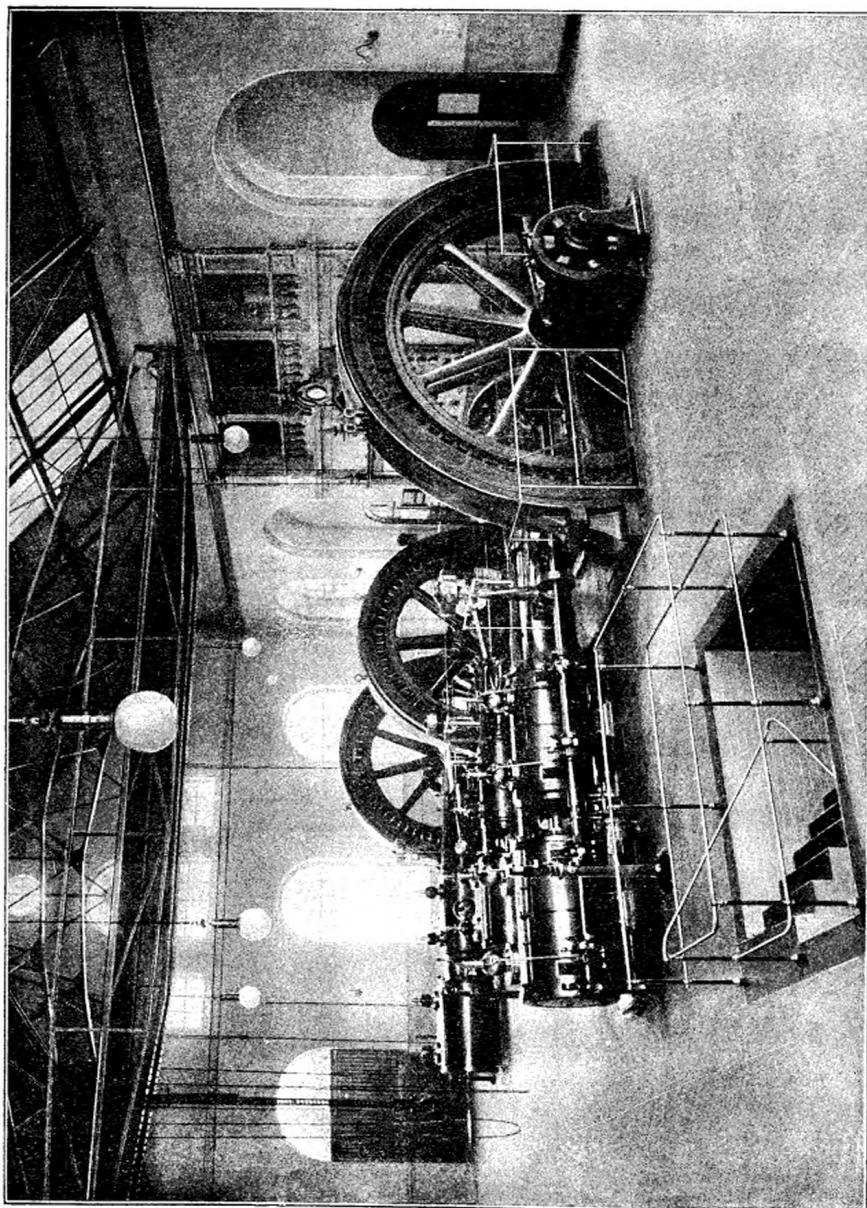


Fig. 31.

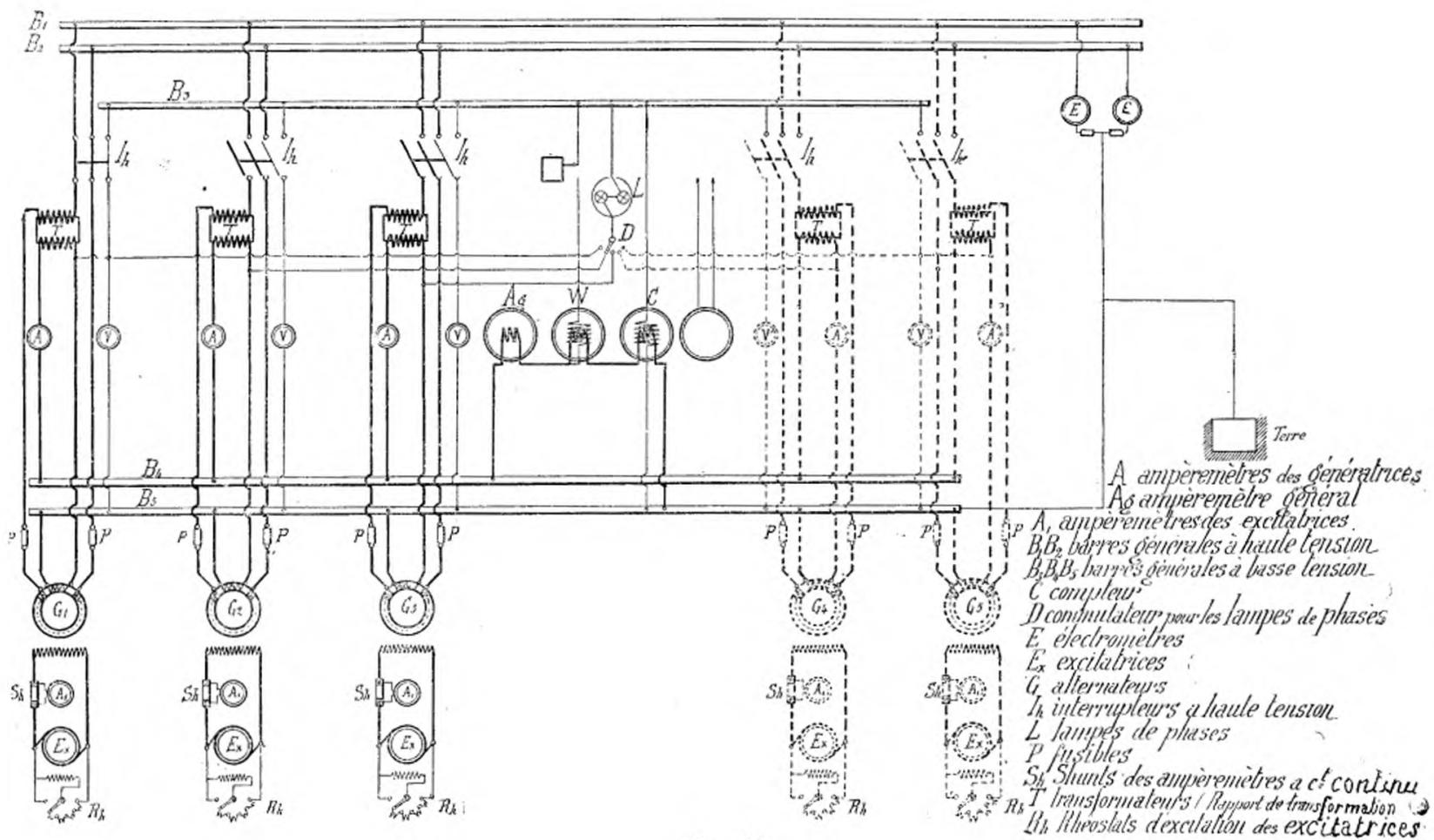


Fig. 52.

Les alternateurs fournissent directement le courant à 10 000 volts, les bobines induites sont renfermées complètement dans des tuyaux de

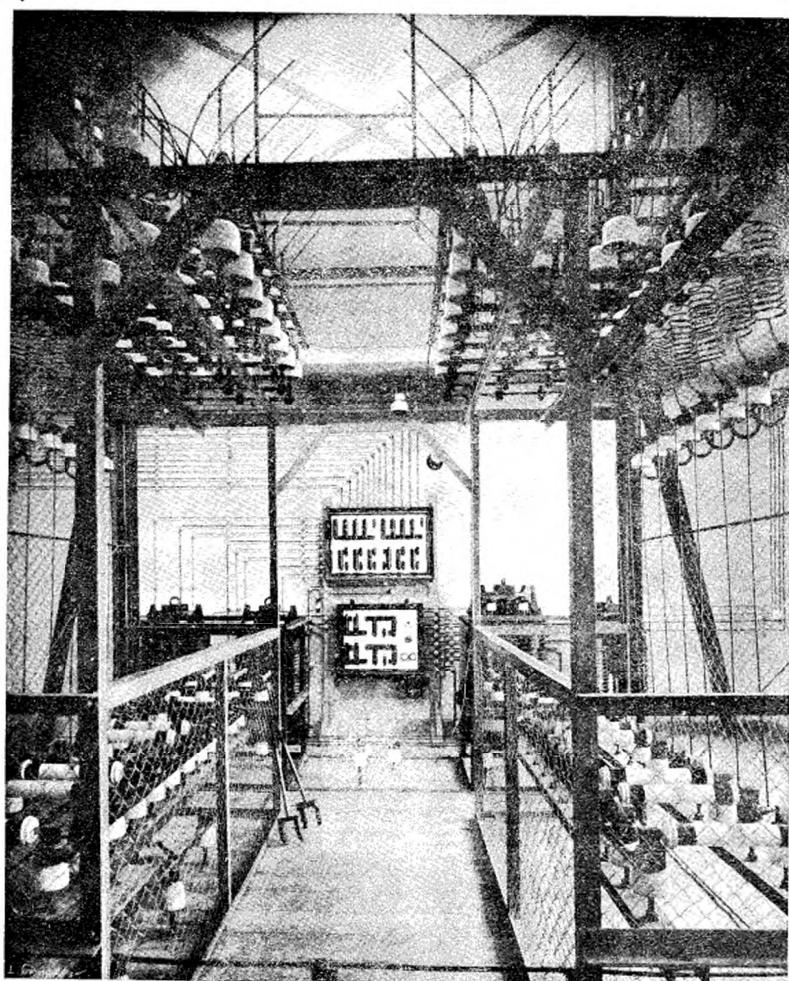


Fig. 53.

micanite. Des tôles protègent l'enroulement et empêchent tout danger pour le personnel.

Les alternateurs ont été construits de manière à avoir une chute de tension minime et à pouvoir se coupler facilement. Le réglage de la

tension s'effectue au moyen d'un rhéostat, intercalé dans le circuit d'excitation, en dérivation de l'excitatrice (dont l'induit est monté sur l'arbre de l'alternateur). Les conditions magnétiques de cette dernière et de l'alternateur sont telles que la chute de tension, entre la marche à vide et la marche à pleine charge ne dépasse pas 7 0/0.

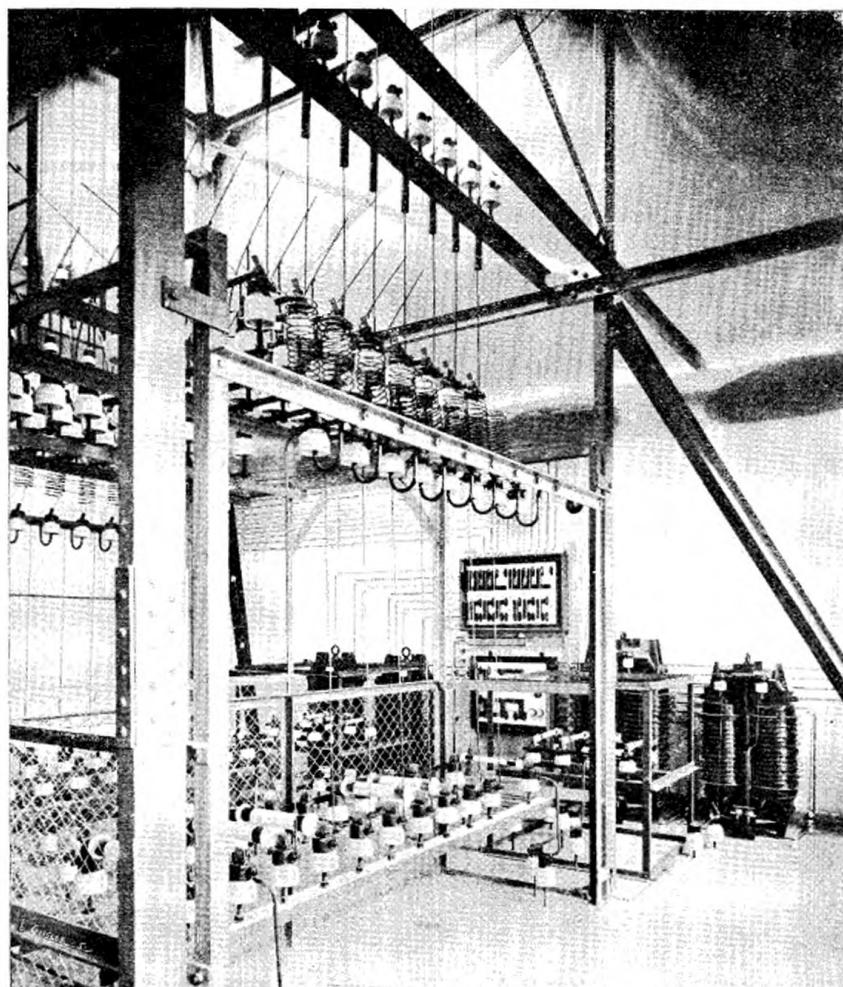


Fig. 54.

Les appareils de mesure sont tous branchés dans un circuit, d'après le système breveté par la Société Lahmeyer (p. 169).

La fig. 52 donne le schéma de la distribution de l'usine, les circuits des trois groupes générateurs installés y sont indiqués en traits pleins.

Dans le circuit de chacune des excitatrices E_x est placé le shunt $Sh.$ d'un ampéremètre A_i ; le rhéostat R_h . placé dans le circuit d'excitation

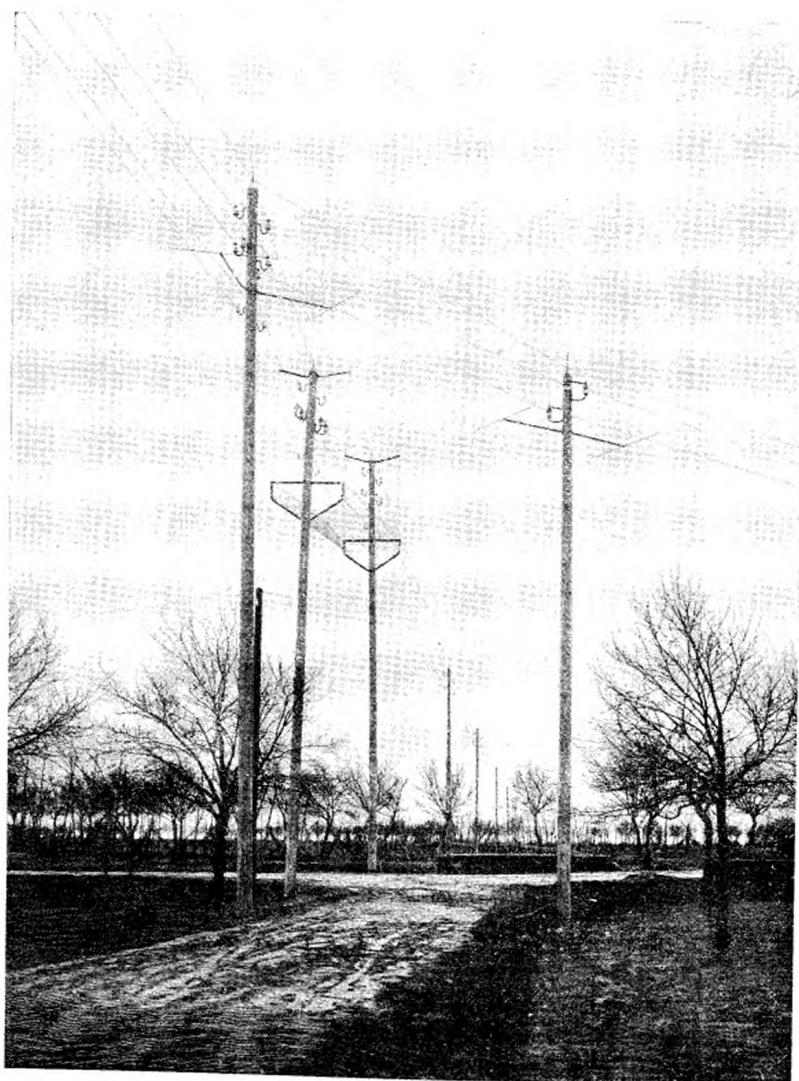


Fig. 35.

de l'excitatrice permet de faire varier l'excitation de l'alternateur G . Les extrémités de la bobine induite desserrant les appareils de mesure

et séparée des autres, aboutissent au transformateur T avec rapport de transformation égal à l'unité.

L'interrupteur tripolaire I_h permet de relier les extrémités du circuit à haute tension de l'alternateur, respectivement aux barres générales à haute tension B_1 et B_2 et, simultanément, de réunir entre elles les barres B_3 , B_4 et B_5 à basse tension.

Supposons que l'alternateur de gauche G_1 soit en fonctionnement, comme l'indique le schéma, l'interrupteur I_h correspondant est fermé. Le courant à basse tension passe d'une des bornes de la bobine séparée à la barre B_5 , de là à travers le compteur C , le wattmètre W et l'ampèremètre général A_g , à la barre B_1 , pour revenir à travers le secondaire du transformateur T à l'autre borne de la bobine séparée. Si on veut coupler le second alternateur, par exemple G_2 , on le met en marche à vide et on déplace le commutateur D , des lampes de phase L , sur le plot correspondant à cet alternateur (position du schéma) ; l'extinction des lampes indique le moment du couplage, on ferme alors l'interrupteur I_h correspondant. Il est facile de voir que les ampèremètres tels que A , donnent l'intensité du courant fourni par chacun des alternateurs, tandis que l'ampèremètre général A_g mesure le courant total. Le compteur et le wattmètre sont également traversés par le courant total.

Pour éviter tout danger, la barre à basse tension B_5 est reliée à la terre. Entre les barres à haute tension B_1 et B_2 sont intercalés des voltmètres statiques E , servant d'indicateurs de terre. Ordinairement chacun de ces électromètres indique la moitié de la tension totale ; si une terre se produit sur un conducteur à haute tension, l'électromètre de la barre correspondante tombe à zéro, tandis que l'autre indique la tension totale.

Les interrupteurs à haute tension, manœuvrés par l'intermédiaire de leviers isolés, sont placés à la partie supérieure du tableau. Les transformateurs de mesures, ainsi que les fusibles des génératrices sont disposés dans les fondations de ces dernières.

Le départ des diverses lignes a lieu dans un local spécial, à la partie supérieure du bâtiment, immédiatement au-dessous de la tour d'où partent les lignes aériennes ; les fig. 33 et 34 montrent la disposition du local.

Les fusibles (voir page 166) sont reliés d'un côté à une des barres à haute tension ; pour chacun d'eux l'autre extrémité est reliée à un conducteur isolé qui monte verticalement et est attaché à un isolateur. Après cet isolateur est intercalée une bobine d'induction (obtenue en enroulant le conducteur en spirale), dont l'autre extrémité est reliée à un autre isolateur ; de là le conducteur est amené à l'extérieur.

Après la bobine d'induction, est placé sur chaque conducteur un parafoudre à cornes. Les parafoudres de chacun des pôles sont reliés par une barre spéciale mise à la terre (afin d'éviter un court-circuit direct pour le cas où la foudre tomberait simultanément sur les deux pôles).

Les bobines d'induction intercalées entre les paratonnerres et les fusibles ont pour but de protéger les machines.

Les fusibles peuvent être facilement remplacés sans danger, pendant l'exploitation en employant une pince en bois (visible sur la fig. 53) qui est reliée à la terre au moyen d'un conducteur flexible.

Dans le local où se fait la répartition (fig. 53 et 54) sont disposés les transformateurs réducteurs desservant les circuits d'éclairage de l'usine, ainsi que ceux desservant le moteur de la pompe d'alimentation du réservoir et un moteur actionnant une dynamo à courant continu, pour la charge des accumulateurs d'un automobile.

La canalisation à haute tension entièrement aérienne est disposée en boucle, et dessert les 22 communes; elle est alimentée de l'usine en cinq points. La canalisation à haute tension ne pénètre pas dans les agglomérations, les transformateurs sont disposés en dehors de ces dernières.

Les poteaux en bois, de 12 et 15 mètres de hauteur, portent les isolateurs à triple cloche et sont munis de paratonnerres.

Les canalisations parallèles aux chemins sont munies de sortes de fourches (voir fig. 55)

en fer portées par les poteaux, et mises à la terre, de sorte que si un fil casse, il est immédiatement mis à la terre en tombant sur ces fourches et rendu inoffensif. Comme le montre également la fig. 55, aux traversées des chemins, ainsi qu'à la rencontre des fils de téléphone et de télégraphe, on a employé des filets protecteurs.

A toutes les dérivations, il y a des poteaux spéciaux portant des fusibles dont l'enlèvement permet d'isoler une partie de la canalisation, même

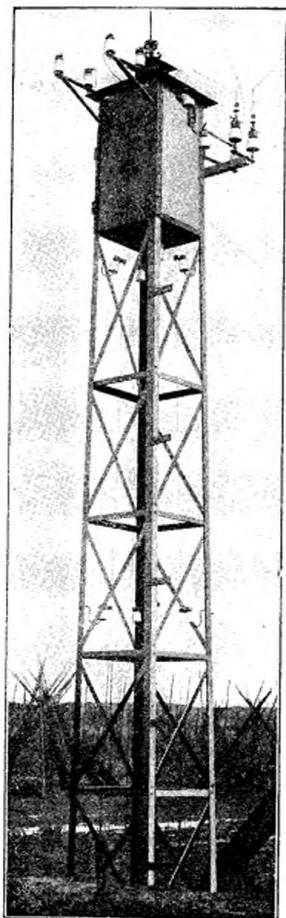


Fig. 56.

pendant l'exploitation, pour procéder soit à des mesures, soit à des réparations.



Fig. 57.

Les transformateurs qui abaissent la tension de 10 000 à 150 volts, sont disposés soit sur des poteaux en fer (fig. 56), soit dans des maisonnettes en tôle (fig. 57). Les abris des transformateurs sont divisés en trois compartiments dans chacun desquels est disposé, soit le transfor-

mateur (du type à noyau bien connu de la Société Lahmeyer) soit les appareils à haute tension, soit ceux à basse tension.

Les stations secondaires sont comme la station centrale munies de paratonnerres à cornes, de bobines d'induction et de fusibles à haute tension. Elles sont reliées téléphoniquement à cette dernière.

Le réseau secondaire est également aérien, et on a beaucoup employé pour supporter les isolateurs, des tuyaux du système Mannesmann ce qui permet un montage facile (fig. 58).

Toutes les municipalités ont traité avec l'entreprise pour l'éclairage des rues, réalisé soit au moyen de lampes à arc, soit au moyen de lampes à incandescence.

Les petits consommateurs sont abonnés à la lampe, tandis que les installations plus importantes paient au compteur. L'hectowatt-heure est payé 7,5 c. m. le rabais pouvant atteindre 30 0/0 pour de grandes consommations. Le courant pour les moteurs et les appareils de chauffage se paie 3,75 c. m. l'hectowatt-heure. Actuellement la station fournit un courant correspondant à 11 000 lampes environ. Les moteurs desservis ont une puissance de 135 chevaux environ. Ce sont des moteurs monophasés asynchrones de la Société Lahmeyer, démarrant très facilement et supportant une grande surcharge.

A l'ouverture de la ligne Heidelberg-Wiesloch, la puissance de la station centrale devant être augmentée, l'espace nécessaire a été prévu.

**STATION CENTRALE DU WITWATERSRAND, PRÈS JOHANNESBURG,
AU TRANSVAAL (1)**

L'installation complète a été effectuée par la Société Siemens et Halske de Berlin pour le compte de la « Rand central electric works ». La station centrale située à une des extrémités du réseau (fig. 59) dessert les nombreuses mines d'or du Witwatersrand, et en outre fournit l'éclairage des faubourgs de la ville de Johannesburg, située à l'autre extrémité du réseau à 29 km. de l'usine environ.

Après l'examen de nombreux emplacements proposés pour l'usine, dont l'un était desservi par une chute d'eau, on décida d'employer la force motrice à vapeur pour l'usine, qui à cet effet a été installée à proximité (2,4 km. environ) des mines de charbon de la Transvaal Coal

(1) D'après une description de M. Walter King parue dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de 1898, cahier 31

trust C^{ie}, sur le bord d'un réservoir naturel d'eau, près de la station de Brakpan.

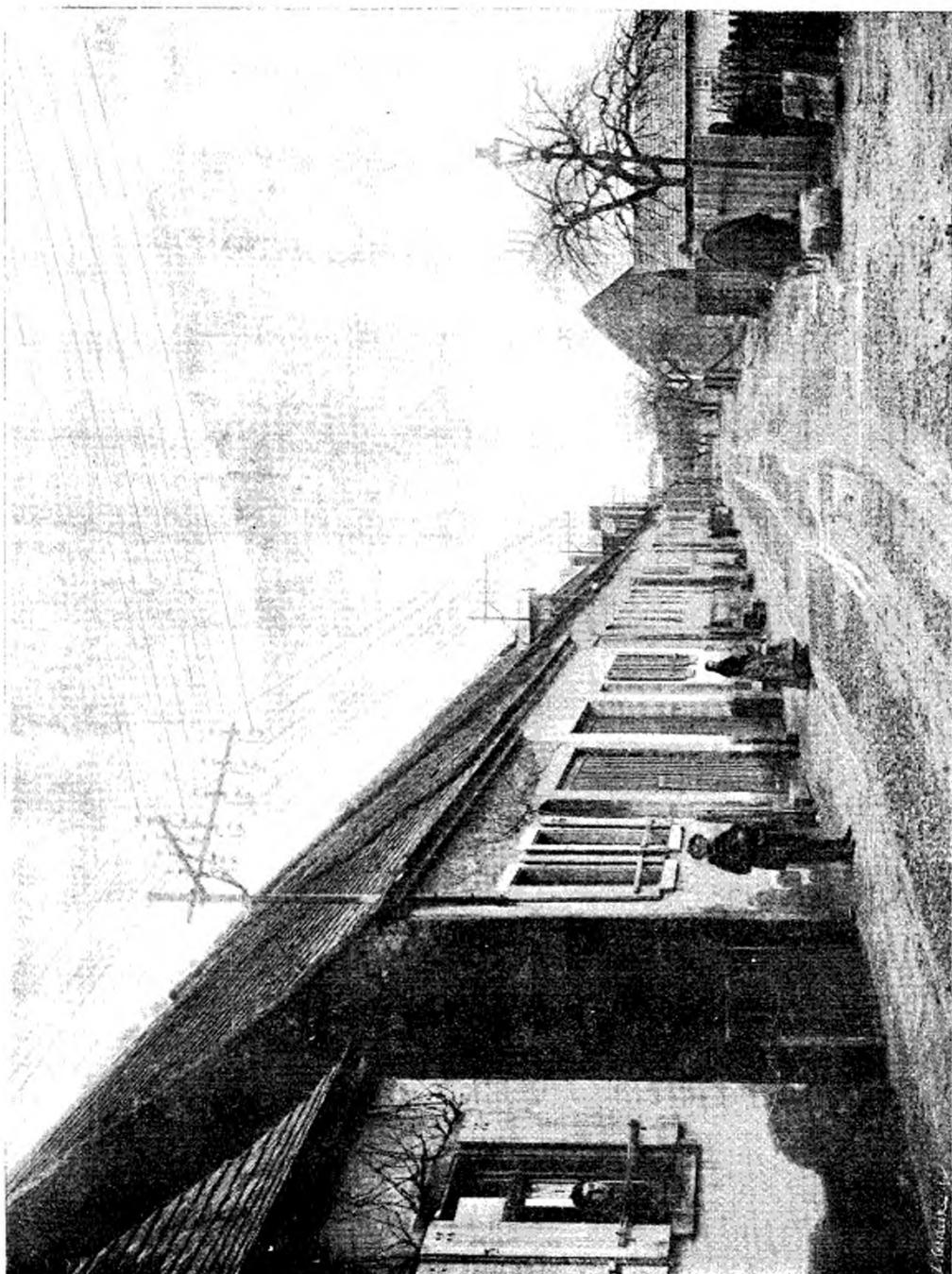


Fig. 58.

Un marché fut passé avec la mine pour la fourniture du charbon et en même temps cette dernière s'engageait à diriger sur le réservoir toutes ses eaux d'épuisement pour maintenir une réserve d'eau,

pendant les périodes de sécheresse. Comme le réservoir avait peu de profondeur et avait, par conséquent, une surface d'évaporation relativement grande par rapport au volume d'eau, on a diminué ce rapport

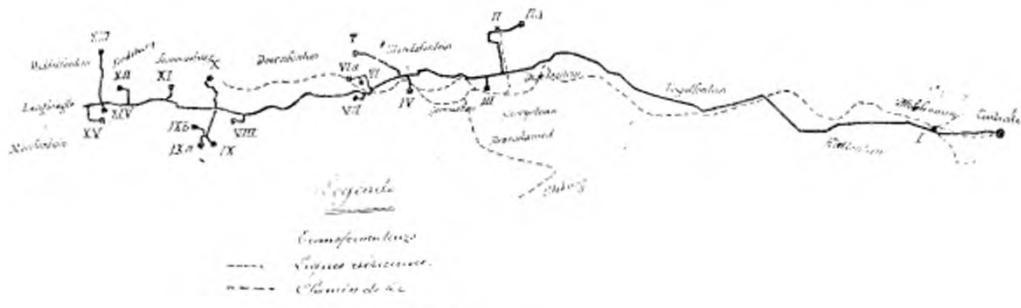


Fig. 59

en divisant le réservoir en deux parties, par une digue, de sorte que dans l'une des parties, la plus profonde, on a un volume d'eau beaucoup plus élevé par unité de surface d'évaporation. Une pompe mue par un moteur triphasé permet d'envoyer l'eau de la partie du réservoir qui a peu de profondeur dans l'autre.

La fig. 60 donne le plan général de l'usine, qui est raccordée par trois voies au réseau général des chemins de fer du Transvaal, auquel est également reliée la mine, de sorte que le charbon arrive directement de cette dernière à l'usine. La dépense en charbon à l'usine, avant la guerre, était d'environ 150 tonnes par jour.

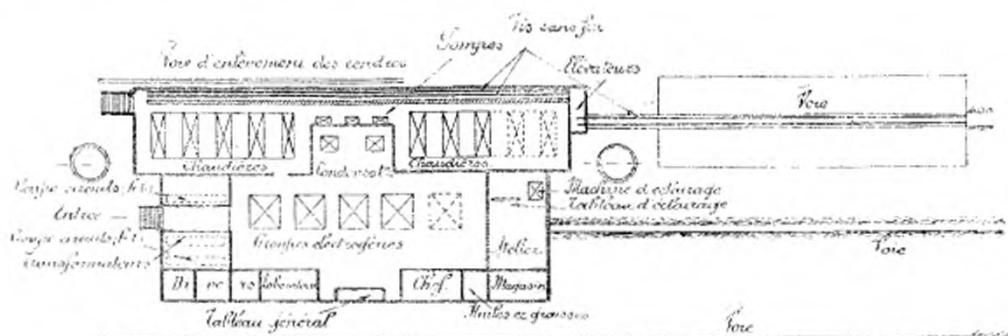


Fig. 60.

Les trains de charbon arrivent par une voie, qui est à 4^m,60 au-dessus du fond des fosses à charbon, placées de part et d'autre ; deux vis sans fin amènent le charbon à deux élévateurs placés contre la façade de l'usine. Ces deux élévateurs aboutissent à l'extrémité d'une plate-forme régnant sur toute la longueur (69 m) de la salle de chauffe, en face des chaudières, à 4^m,50 au-dessus du sol. Tout le long de cette galerie le charbon est entraîné au moyen de deux vis sans fin.

En face de chacune des chaudières est installée une caisse pouvant communiquer avec le couloir de la vis sans fin, muni à cet effet de portes à glissières. Chacune de ces caisses communique par une ouverture (fig. 61) munie d'une fermeture à glissière avec un couloir incliné en tôle par lequel le charbon tombe dans une trémie adaptée à la chaudière, qui est munie d'un chargeur automatique système Leach.

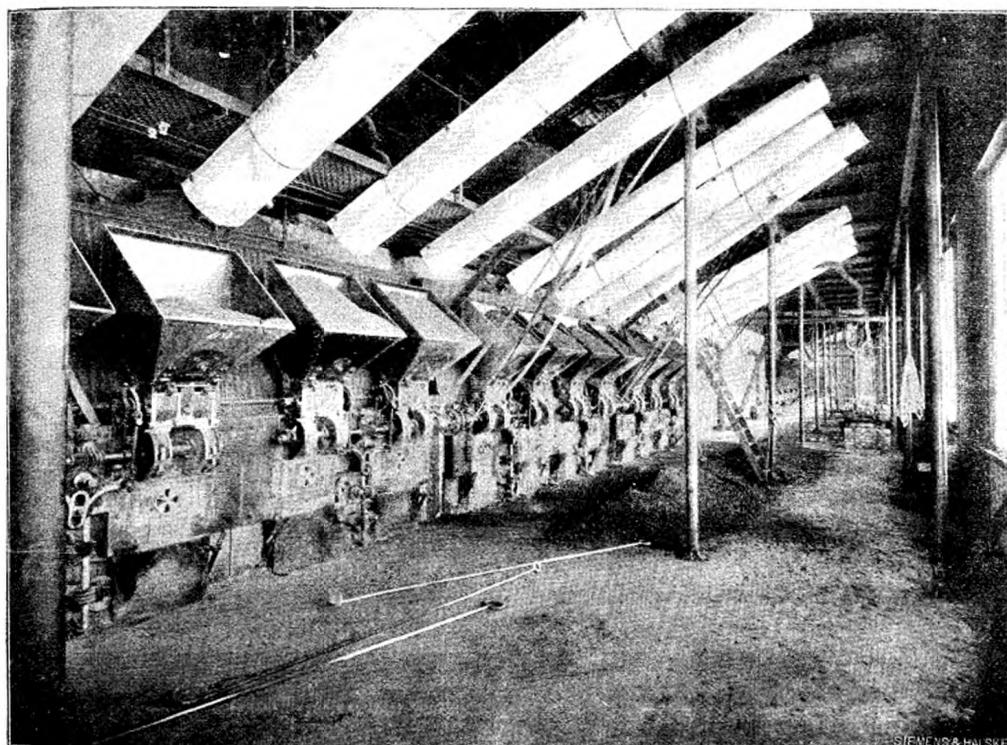


Fig. 61.

Les cendres des chaudières tombent, par un plan incliné, dans une galerie souterraine de 4^m,80 de largeur et 2 m de hauteur, desservie par des wagonnets roulant sur des rails. Le service d'enlevage des cendres est fait par des Cafres.

Il y a actuellement huit chaudières installées, et la place est réservée pour en ajouter deux autres.

Chacune des chaudières à tubes d'eau, et à réservoir supérieur a une surface de chauffe de 303 m², la pression de la vapeur est de 13 atmosphères. Ces chaudières ont été construites par la maison L. et C. Stein-

müller de Gummersbach. Les foyers et les appareils automatiques, du système Leach, ont été construits par la fabrique saxonne de machines.

La puissance nécessaire pour le transport du charbon et le fonctionnement des appareils Leach, est de 40 chevaux; deux moteurs triphasés de 40 chevaux, dont un de réserve, sont installés à cet effet dans la salle de chauffe. L'alimentation est assurée par trois pompes duplex pouvant débiter chacune 23000 lit. à l'heure, installées au milieu de la salle de chauffe.

Tous les bâtiments de l'usine sont construits en tôle ondulée. Les cheminées en tôle placées à chacune des extrémités de l'usine ont une hauteur totale de 33 m. (y compris un socle en pierre de taille de 3 m.) et un diamètre de 3 m. au sommet.

La salle des machines est attenante à la salle des chaudières; actuellement quatre groupes électrogènes de 1 000 — 1 250 chevaux y sont installés et la place est réservée pour un cinquième groupe.

Les machines à vapeur verticales à triple expansion; de la société saxonne de constructions de machines à Chemnitz, tournent à une vitesse de 100 tours à la minute.

Sur l'arbre de chaque machine à vapeur (fig. 62) est monté l'inducteur de l'alternateur triphasé servant de volant, ainsi que l'induit de l'excitatrice à courant continu. L'induit fixe de l'alternateur a un diamètre intérieur de 4 m et une largeur de 1 m environ; il est muni d'un enroulement à barres, la différence de potentiel entre deux phases est de 750 volts, l'intensité du courant de 750 ampères dans chaque phase, la fréquence est de 50 (60 pôles à 100 tours par minute).

Les excitatrices sont du type à pôles intérieurs de la Société Siemens et Halske et ont une puissance de 33 kilowatts, la différence de potentiel est d'environ 120 volts.

Dans le milieu élargi de la salle des machines sont installées deux machines compound de 100 chevaux à 100 tours par minute, actionnant chacune un condenseur à surface, placé dans le sous-sol.

Chacune de ces machines pouvant assurer le service de condensation de quatre groupes électrogènes suffira quand le cinquième groupe (de réserve) sera installé.

La salle des transformateurs, la salle des machines et l'atelier de réparation sont desservis par un pont roulant de 20 tonnes. Les appareils de condensation établis dans le sous-sol sont desservis par un pont roulant de 3,5 tonnes.

L'éclairage de l'usine et de ses annexes est assuré par un moteur

vertical de 50 chevaux à 200 tours à la minute, commandant par courroie un alternateur triphasé donnant 120 — 133 volts à 150 tours à la minute. Un tableau spécial (voir le plan fig. 60) est installé pour cet éclairage; un commutateur permet de desservir au besoin le réseau d'éclairage de l'usine au moyen de courants à 120 volts, obtenus par transformation du courant de la distribution générale.

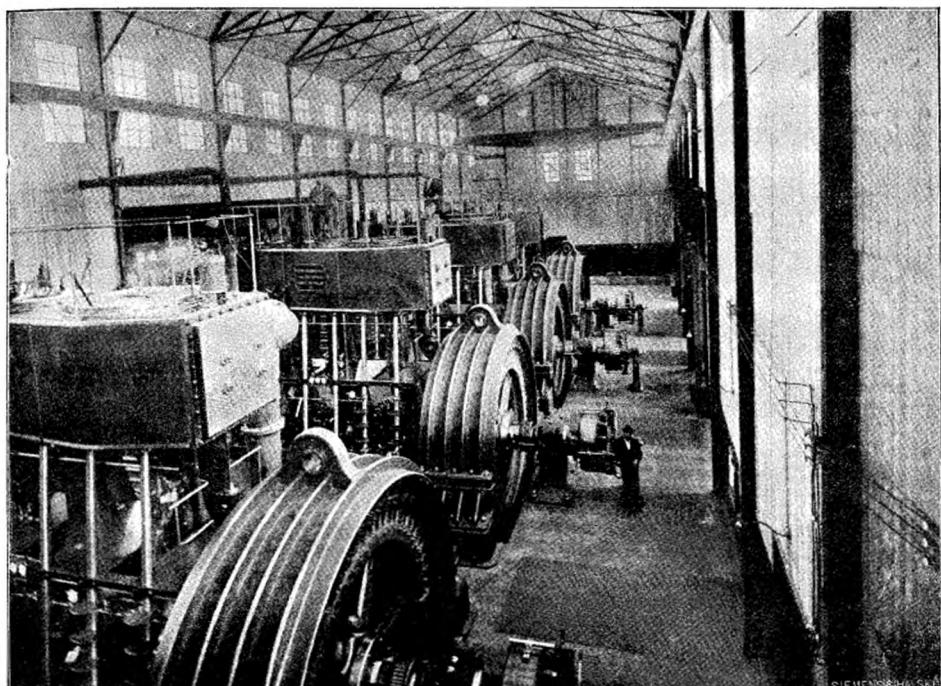


Fig. 62.

Tout autour de la salle des machines sont aménagées diverses salles servant de laboratoires, de magasins, etc. L'atelier de réparation attenant à la salle des machines contient le groupe destiné à l'éclairage de l'usine ainsi que le tableau de distribution; il est desservi par une voie de chemin de fer et contient des machines-outils permettant d'exécuter sur place les réparations nécessaires.

La fig. 63 donne le schéma de distribution général de l'usine. Sur une des phases de chacun des alternateurs, est prise une dérivation de

50 volts, qui forme le circuit primaire d'un transformateur dont le

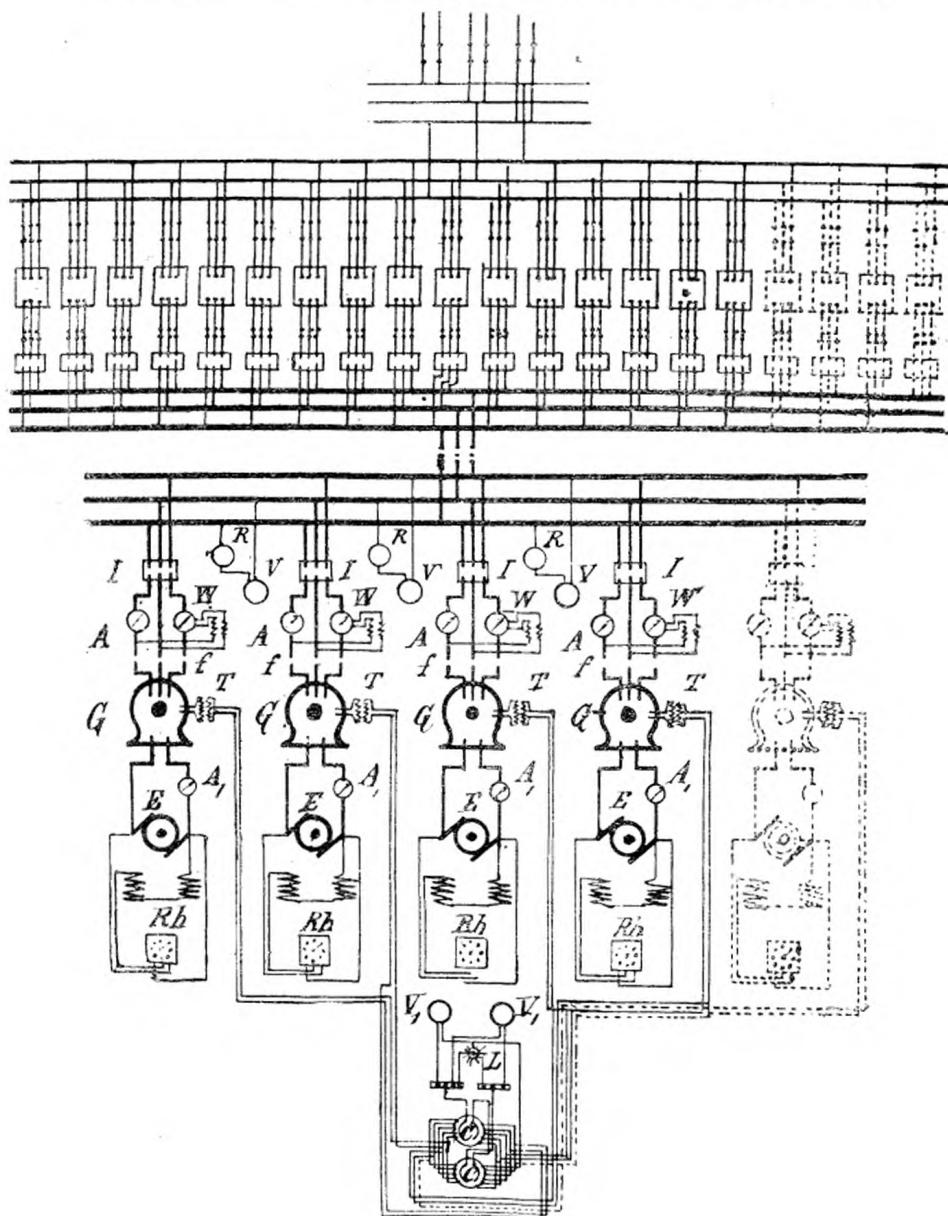


Fig. 63.

rapport de transmission est égal à l'unité, et dont le secondaire est bran-

ché dans le circuit des lampes de phases pour le couplage des alternateurs. Les ampèremètres et les voltmètres sont branchés dans le circuit principal des alternateurs à 750 volts.

Lors du couplage en parallèle des alternateurs, on peut faire varier la position du poids du régulateur de la machine à vapeur du tableau d'après le système indiqué page 159.

Les alternateurs et les excitatrices sont reliés au tableau par des barres isolées placées dans des caniveaux. Le tableau, placé dans la partie centrale de la salle des machines, est divisé en six champs (fig. 64),

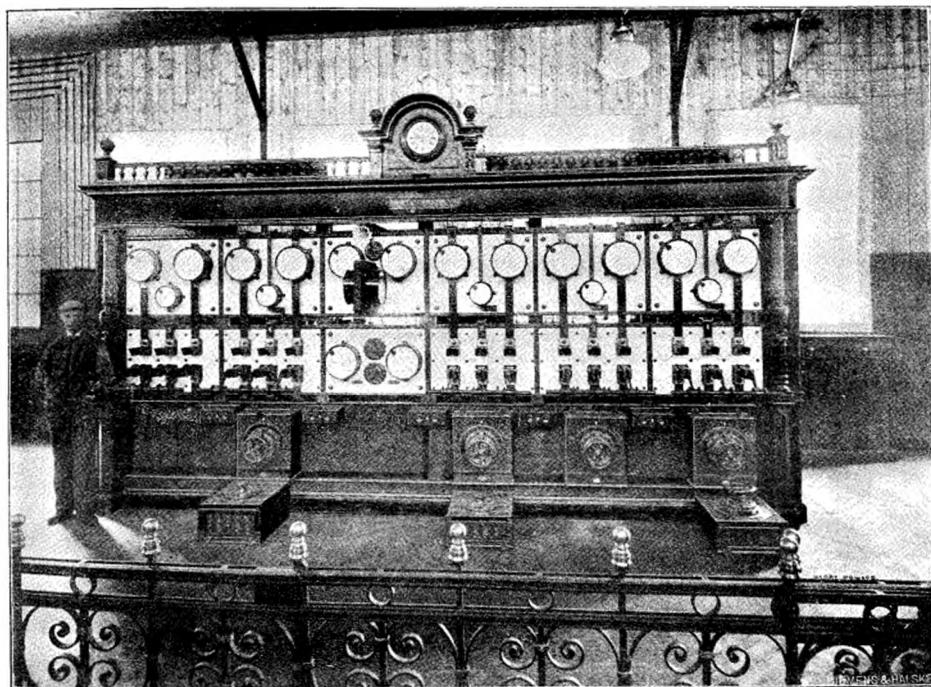


Fig. 64.

cinq pour les machines, et un sixième pour le couplage en parallèle, la partie arrière du tableau, fermée de chaque côté par des portes, forme une salle dans laquelle sont disposées les barres générales, les coupe-circuits, etc.

Pour chaque groupe électrogène sont disposés sur le tableau un

interrupteur I, un ampèremètre A, un voltmètre V, un wattmètre W, pour l'alternateur ainsi que le rhéostat de réglage R_h , de l'excitation de l'excitatrice, et le commutateur du petit moteur permettant le réglage du régulateur de la machine à vapeur.

Les voltmètres et ampèremètres sont branchés directement. Pour le couplage en parallèle, les voltmètres et la lampe de phase, sont branchés pour chaque groupe dans le circuit secondaire d'un petit transformateur T, de rapport de transformation égal à l'unité, dont le primaire est branché dans une dérivation à 50 volts d'une des phases de l'alternateur.

Les barres générales du tableau de distribution sont reliées, par l'intermédiaire de barres isolées, à d'autres barres générales placées dans la salle des coupe-circuits à basse tension, disposée près de la porte d'entrée principale. Les barres générales de cette salle sont reliées, au moyen de conducteurs placés sur des isolateurs, par l'intermédiaire de coupe-circuits fusibles, au primaire de chaque transformateur. L'enlèvement des coupe-circuits correspondant à un transformateur permet d'isoler complètement celui-ci.

Les transformateurs de 200 kilowatts, actuellement au nombre de seize (la place est prévue pour quatre autres), sont disposés dans une salle ayant toute la largeur de la salle des machines et placée au-dessus de l'entrée et des salles des coupe-circuits. Chaque transformateur est muni d'une enveloppe en tôle perforée et les conducteurs primaires et secondaires sont amenés à la partie inférieure.

Les conducteurs des circuits secondaires à 10 000 volts des transformateurs (comme les primaires) sont disposés sur des isolateurs en porcelaine, au-dessous du plancher de la salle des transformateurs, dans un espace laissé libre entre ce plancher et le plafond des salles inférieures et de l'entrée. A la traversée des planchers sont placés des tubes isolants de grand diamètre au milieu desquels passe le fil.

La salle des transformateurs est desservie par un escalier et munie d'une porte fermant à clef.

Les conducteurs secondaires sont reliés, par l'intermédiaire de coupe-circuits à haute tension, à des barres générales disposées dans la salle des coupe-circuits à haute tension, qui se trouve au rez-de-chaussée ; elle est placée symétriquement à la salle des coupe-circuits à basse tension par rapport à l'entrée.

Les coupe-circuits sont dispersés dans des pupitres en bois (fig. 63) dont la partie supérieure est formée par de la gaze incombustible. Pour

isoler un transformateur, un ouvrier, muni de gants et de souliers en caoutchouc, se sert d'une pince isolée.

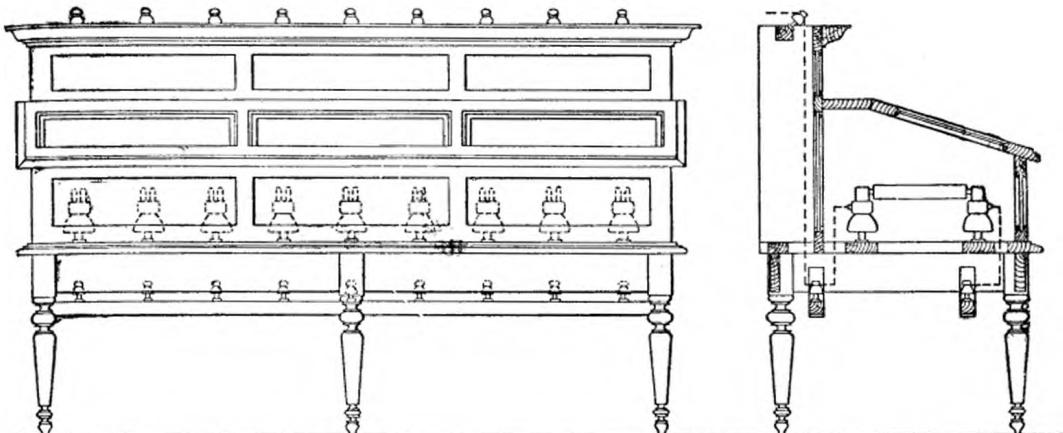


Fig. 65.

Les barres générales sont reliées à trois barres de départ, de chacune desquelles partent deux fils de lignes ; sur chacun des fils de lignes est disposé un coupe-circuit à haute tension ; ces neuf coupe-circuits sont placés comme les autres dans un pupitre.

Au-dessus de ce pupitre partent les fils à haute tension. La sortie de chaque fil s'effectue à l'intérieur d'un tube en porcelaine de grand diamètre, ayant 400 mm de longueur et débordant, par conséquent, de part et d'autre de la paroi en tôle. Les tubes sont inclinés vers l'extérieur à cause de la pluie ; en outre un toit est placé ; au-dessus de l'ensemble des isolateurs à la sortie.

La ligne est formée de câbles nus de 70 mm² de section fixés à des isolateurs en porcelaine à triple cloche. Les deux isolateurs d'une même phase sont placés à côté l'un de l'autre (fig. 66).

Les poteaux sont constitués par des tubes de fer à emboîtement et ont une hauteur totale de 8^m,50, respectivement 9^m,50. D'après les prescriptions administratives, le fil inférieur doit être à une hauteur de 5^m,50 au-dessus du sol, hauteur portée à 6^m,70 à la traversée des routes.

La traverse inférieure porte, de part et d'autre, des tiges de fer verticales, débordant haut et bas, aux extrémités desquelles sont fixés des fils d'acier.

Entre les deux fils inférieurs sont disposés des fils transversaux, de manière à former filet.

Cette disposition a été prise pour mettre la ligne à l'abri des lanières des longs fouets des conducteurs de voitures à bœufs.

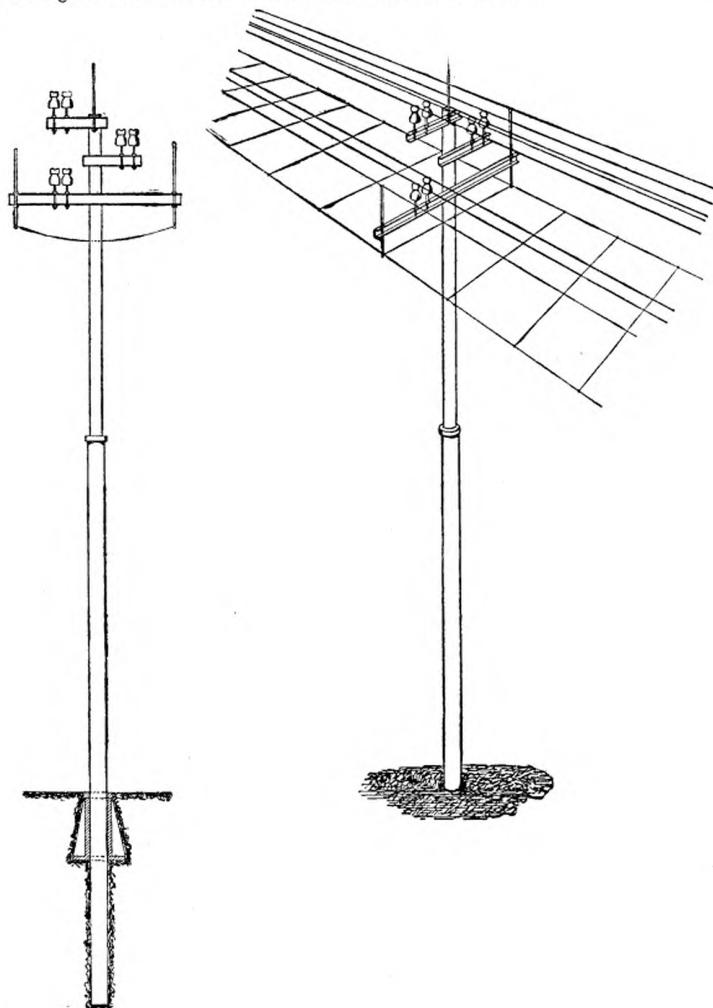


Fig. 66.

Chaque poteau porte à sa partie supérieure une pointe formant paratonnerre. Aux extrémités de la ligne et de chaque dérivation sont disposés des paratonnerres à cornes.

Les fils de ligne sont intervertis en diverses places.

La ligne est divisée en cinq sections au moyen de coupe-circuits à haute tension que l'on peut enlever au besoin. A l'origine de chaque dérivation il y a également des coupe-circuits permettant d'isoler la dérivation pendant le service.

Le service des mines est assuré par des moteurs asynchrones triphasés de 1,5 à 250 chevaux.

Les gros moteurs fonctionnent à la tension de 500 volts, les petits à 250 volts ; l'éclairage se fait presque partout sous 120 volts.

Dans les gares d'Elendfontein et de Johannesburg, ainsi que dans les faubourgs de cette dernière ville, sont installés des transformateurs réduisant la tension à 2 000 ou 2 100 volts. Ce courant est amené au lieu d'emploi et des transformateurs tertiaires l'abaissent à 120 volts pour l'éclairage.

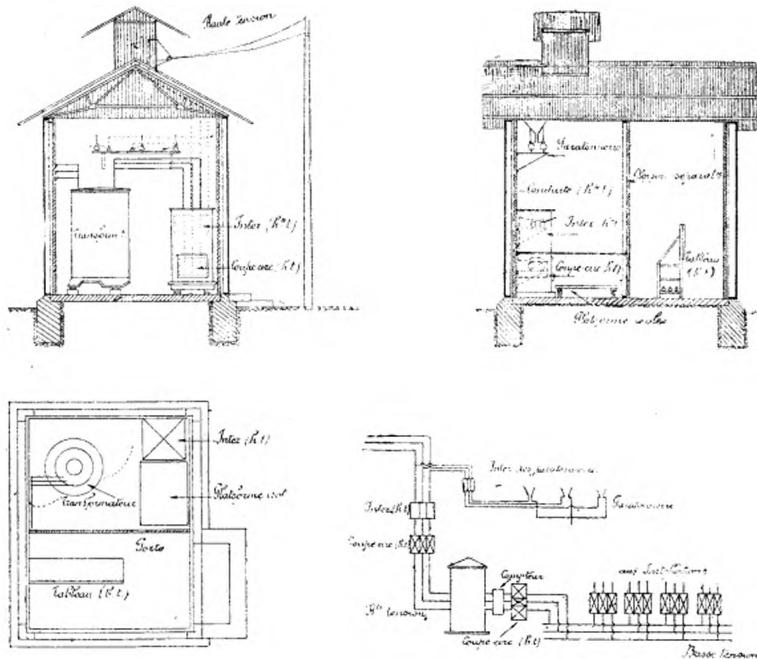


Fig. 67.

Les transformateurs desservant les mines sont installés dans des maisonnettes en tôle ondulée (fig. 67), divisées en trois parties par des cloisons.

Comme le montre le schéma (fig. 67) à l'entrée de chacun des con-

ducteurs est installé un paratonnerre à cornes. Ces paratonnerres sont desservis par des conducteurs reliés aux conducteurs à haute tension, sur chacun desquels est intercalé un coupe-circuit permettant d'isoler au besoin le paratonnerre pendant le service pour l'examiner et le réparer au besoin.

L'interrupteur à haute tension est placé à la partie supérieure d'une armoire, à la partie inférieure de laquelle sont disposés les coupe-circuits. Cette armoire est placée dans une petite salle dont le plancher est porté par des isolateurs en porcelaine. Le transformateur est placé dans une salle voisine et isolé du sol. Le tableau à basse tension est placé dans la salle d'entrée du poste, les conducteurs à basse tension sortant du transformateur passent par un compteur et aboutissent aux barres générales du tableau, d'où partent les dérivations desservant les diverses parties de la mine. Après les barres générales, sur chaque fil des dérivations est installé un coupe-circuit.

Dans le faubourg de Johannesburg, les transformateurs sont installés dans des colonnes.

Le service des chaudières et le graissage des machines est assuré par des Cafres, sous la surveillance de contremaîtres de race européenne.

Les travaux de l'installation ont été commencés en juillet 1895 ; le 27 janvier 1897 l'usine était mise en marche et le 18 septembre 1897 le président Krüger, accompagné des membres des deux Chambres du Transvaal, visitait l'installation complètement terminée.

TRANSPORT D'ÉNERGIE DE SAINT-GEORGES

La Société des Applications industrielles qui a exécuté l'installation du transport de puissance de Vinca à Perpignan (2 500 chevaux transportés à 32 km. par courants triphasés à 8 000 volts de tension composée), expose⁽⁴⁾ les plans et études relatifs au transport de puissance de Saint-Georges (Aude).

On a utilisé une chute de l'Aude ; pour cela, en amont des gorges de Saint-Georges, on a établi un barrage à la côte 525,5 m. Le canal d'aménée de l'eau à la chambre d'eau placée au-dessus de l'usine a une pente de 1,6 mm. par mètre et une longueur de 5500 m. ; il est en grande partie souterrain.

(4) L'installation est actuellement en fonctionnement.

De la chambre, l'eau est amenée aux turbines par des conduites en tôle d'acier.

La hauteur de la chute est de 100 m, la puissance disponible est de 6400 chevaux.

Chaque groupe électrogène de 800 chevaux est constitué par une turbine du genre Pelton, à axe horizontal, commandant directement, par l'intermédiaire d'un manchon d'accouplement élastique isolant, un alternateur à fer tournant de la maison Alioth (fig. 68).

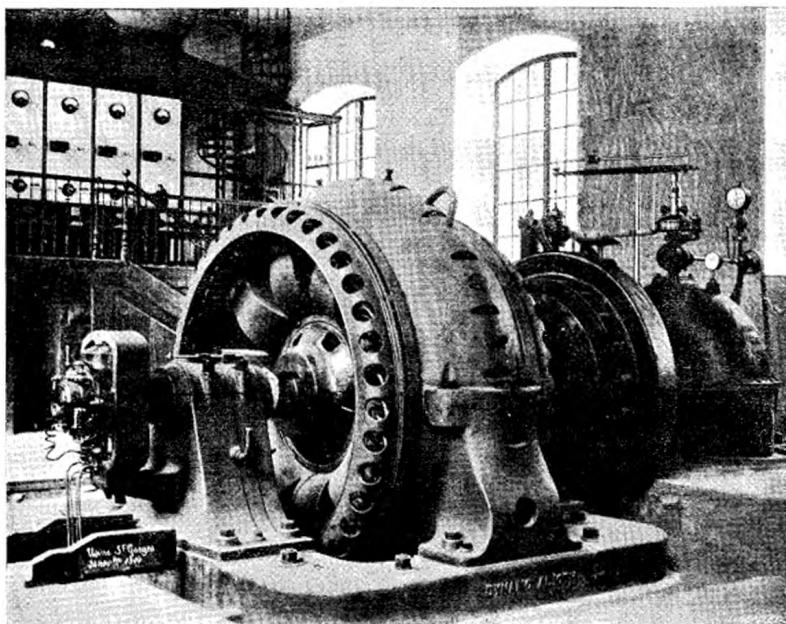


Fig. 68.

Les turbines sont munies de régulateurs automatiques maintenant la vitesse normale de 300 tours à la minute. Chaque alternateur est muni de son excitatrice, dont l'enduit est calé sur son arbre. L'alternateur, à la tension composée de 3 000 v., peut donner 675 kilovoltampères, soit une puissance de 540 kilowatts avec un facteur de puissance de 0,80.

Chaque alternateur dessert trois transformateurs monophasés de 200 kilovoltampères montés en étoile. Ces transformateurs élèvent la tension à 20 000 volts à l'origine de la ligne.

La fig. 69 donne le plan de l'usine génératrice, dans laquelle sont

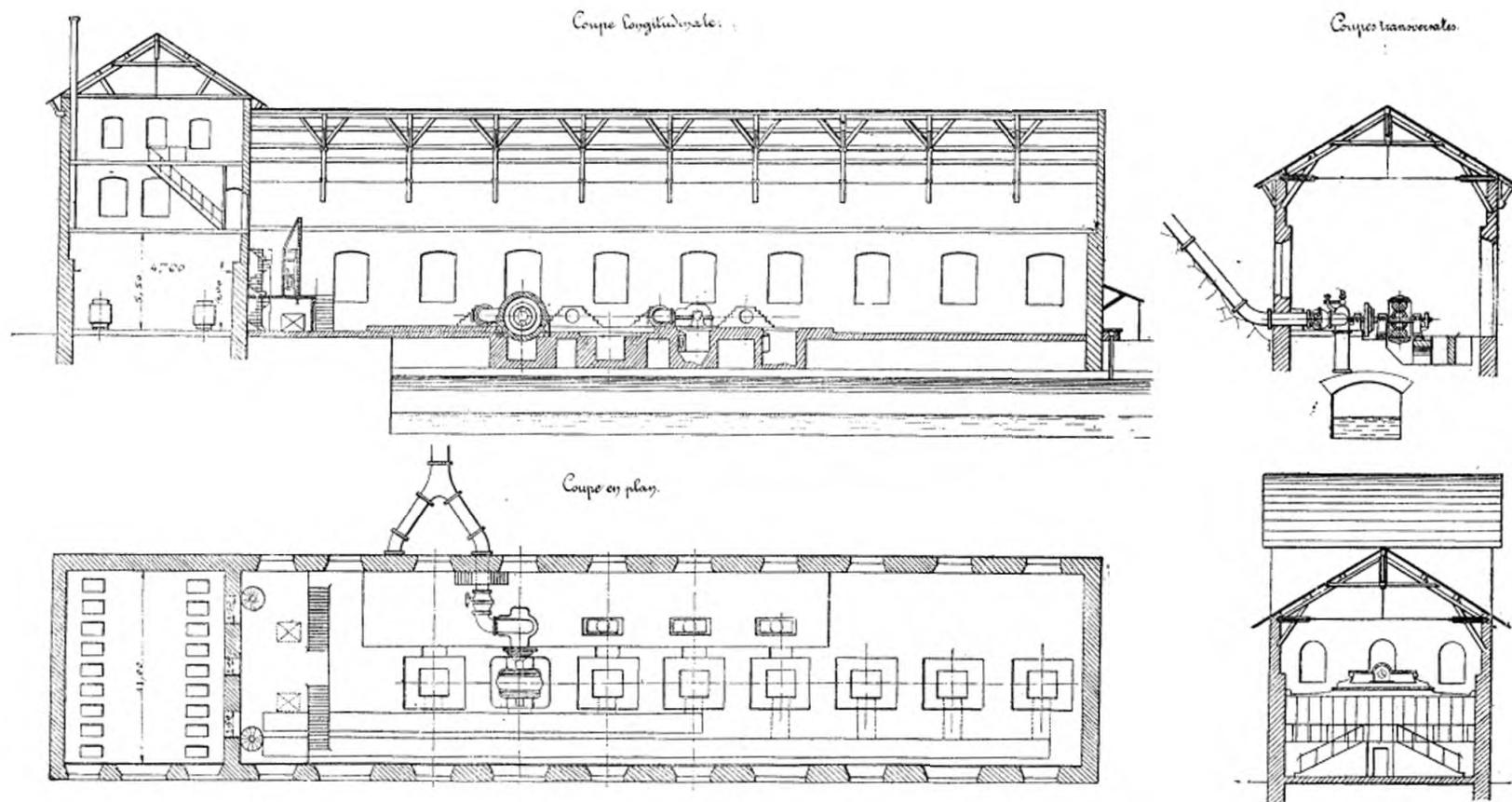


Fig. 69.

installés deux tableaux de distribution, l'un pour la basse tension (3 000 volts), l'autre pour la haute tension.

Le tableau à basse tension porte tous les appareils nécessaires pour le contrôle et la mise en phase des alternateurs ; les interrupteurs à 3 000 volts sont à rotation et à rupture brusque sur charbons.

Le tableau à haute tension, placé près des transformateurs-élévateurs, dans une salle spéciale, porte les interrupteurs et les coupe-circuits à haute tension ; ces appareils sont montés sur des isolateurs identiques à ceux de la ligne.

Les interrupteurs à haute tension sont commandés au moyen d'air comprimé. A cet effet, un petit compresseur d'air est actionné par un moteur triphasé à 3 000 volts et envoie l'air sous pression dans un réservoir. Des robinets de manœuvre, installés à côté des interrupteurs à basse tension des transformateurs, permettent de commander les interrupteurs à haute tension. Le fonctionnement de ces derniers est contrôlé au moyen de lampes de couleur.

Du tableau à haute tension part la ligne aérienne qui relie l'usine au centre à potentiel constant, qui est à Fabrezan à 66 km. de distance.

Des parafoudres Alioth (v. page 147) sont disposés au départ de la ligne, entre les paratonnerres et les transformateurs ; les conducteurs sont enroulés en houdin, pour former bobine à réaction.

La ligne reliant l'usine au centre à potentiel constant est constituée par trois fils de cuivre de 6,6 mm de diamètre. Les isolateurs (fig. 4) ont été fabriqués dans les usines de produits céramiques de Sainte-Foix-l'Argentière, d'après les indications de la Société des Applications industrielles. Ces isolateurs sont placés de part et d'autre des poteaux en bois, de manière à ce que les fils soient disposés aux sommets d'un triangle isocèle de 60 cm de côté (v. fig. 70).

La ligne a été calculée de manière qu'à pleine charge (quand on disposera de la puissance totale de 6 400 chevaux à l'usine), la perte de tension soit de 4 000 v.

La tension est maintenue constante à 16 000 v. à Fabrezan, en agissant sur l'excitation des alternateurs à l'usine.

M. Berton, ingénieur en chef de la Société des Applications industrielles, qui a étudié l'installation, à constaté que, à vide (les extrémités des fils à Fabrezan étant isolées), l'intensité du courant de charge est de 7 ampères, la tension à l'usine étant de 13 300 v. et à Fabrezan de 16 000 v.

De Fabrezan partent deux lignes principales à 16 000 v., alimentant

l'une Narbonne, l'autre Carcassonne. Ces deux villes sont à environ 40 km du centre à potentiel constant.



Fig. 70.

Sur les lignes principales à 16 000 v. sont disposés des postes de transformateur (fig. 71) abaissant la tension à 3 000 v. Le réseau à 3 000 v. dessert les villages, dans lesquels sont installés des postes secondaires de transformateurs abaissant la tension de 3 000 à 125 v.

A Narbonne, le courant à haute tension est abaissé à 300 v. pour desservir des moteurs synchrones actionnant directement des générateurs à courant continu à 125 v. Le démarrage des groupes transformateurs est effectué en envoyant le courant d'une batterie d'accumulateurs dans les génératrices, à courant continu, qui servent à ce moment de moteurs.

L'installation de Carcassonne est semblable à celle de Narbonne.

Les plus grandes précautions ont été prises pour protéger les lignes contre la foudre; en outre des parafoudres Alioth installés au départ de l'usine, 270 parafoudres à cornes ont été disposés le long des lignes et à l'entrée des postes de transformateur.

Le développement total des lignes à haute tension est de plus de 200 km.

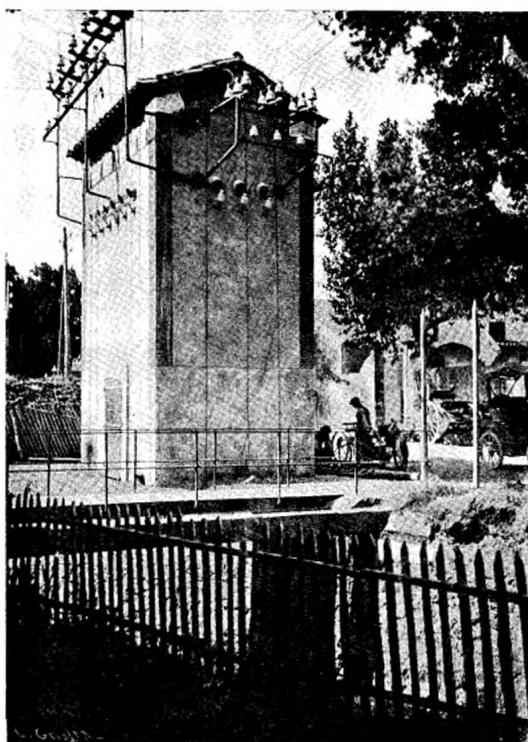


Fig. 71.

L'usine de Saint-Georges dessert deux grandes villes, Narbonne et Carcassonne et soixante-dix petites villes ou villages importants.

*Données statistiques sur les transports de puissance
à très haute tension.*

Nous donnons ci-après une statistique des distributions, à une tension supérieure à 10 000 volts, pour les divers pays du monde. Pour les Etats-Unis, la statistique ne comporte que les distributions à partir de 13 000 volts : il existe en effet dans ce pays plus de 35 installations employant des tensions de 10 000 à 13 000 volts, dont l'énumération serait trop longue.

Pour dresser cette statistique, nous avons consulté les divers journaux techniques et demandé des renseignements aux maisons de construction ; nous n'avons pas la prétention de croire cette statistique absolument complète, mais telle qu'elle est, elle peut donner une idée du développement qu'ont pris les distributions à haute tension.

Distributions à courant continu (1).

Désignation de l'installation.	Pays.	Nature de la puissance motrice.	Puissance en chevaux.	Tension.	Distance de transport en K. m.	Observations.
Rentaria	Espagne	H.	750	10000	13.5	
Gênes	Italie.	H.	600	44000	50.	
Aigle	Suisse.	H.	750	40500	48	
Chaux-de-Fonds, Locle . .	Suisse.	H.	3600	44400	26.	
Saint-Maurice, Lausanne . .	Suisse.	H.	5000	22000	56.	

Distributions à courant alternatif (2).

Désignation des installations.	Pays.	Noms des Constructeurs	Nature de la Puissance motrice.	Puissance en chevaux.	Genre de courant et fréquence.	Aux alternateurs.	Tension	En ligne.	Distance de transport en K. m.	Observations.
Bellegarde, Oyonax	France	Ecl. électr.	H.	440	T 50	1000	10000	10000	28	
Champ (Isère) . . .	Id.	Brown-Boveri.	H.	6750	T 50	3000	26000	60		
Engins	Id.	Ecl. électr.	H.	1000	T 50	120	15000	30		
Grésivaudan	Id.	Id.	H.	700	S 42	125	12000	20		
Nice (Mescla) . . .	Id.	Thomson-Houston.	H.	2000	T 25	10000	10000	20		
Notre-Dame-de-Briançon (3) . .	Id.	Brown-Boveri.	H.	6600	T 42	15000	15000	13		
Saint-Georges . . .	Id.	Société des Applications industrielles	H.	6400	T 50	3000	20000	100		
Véziers-Limoges . .	Id.	Daydé et Pillé.	H.	4000	T 50	8000	20000	83		

(1) H, Moteurs hydrauliques ; V, Moteurs à vapeur ; G, H. F. Moteurs à gaz de hauts-fourneaux.

(2) S, Courant alternatif simple ; D, courants alternatifs diphasés ; T, Courants alternatifs triphasés.

(3) Les transformateurs réducteurs de tension, monophasés de 500 k. w., réunis par trois en triangle, abaissent la tension de 13 500 à 55 volts. Quand ces transformateurs desservent des fours électriques, le facteur de puissance est de 0,95 et l'intensité de 9 600 ampères.

Désignation des installations.	Pays.	Noms des Constructeurs.	Nature de la Puissance motrice.	Puissance en chevaux.	Genre du courant et fréquence.	Tension		Distance de transport en K. m.	Observations.
						Aux alternateurs.	En ligne.		
Diedenhofen (1)...	Allemagne.	Brown Boveri.	G. H. F.	180	T. 50	1000	14600	26	
Eichdorf-Grunberg	Id.	Siemens et Halske.	H. V.		T. 50		10000		
Gersthofen.....	Id.	Lahmeyer.	H.	5000	T. 50	10000	10000		
Lenne.....	Id.	Id.	H. V.	1300	T. 50	500	10000	20	
Marbach.....	Id.	Schuckert.	H.	1200	D. 50	11000	11000		
Oelsnitz.....	Id.	Schuckert.	V.	4050	T. 50	10000	10000	32	
Peine.....	Id.	Id.	V.	2200	T. 50	500	10000	78	
Wiesloch.....	Id.	Lahmeyer.	V.	1000	S. 48	10000	10000		
Isle of Thanet....	Anglet.	Gén. El. Co.	H.	1340	T. 60	2300	13000	72	
Londres (Métropolitain).....	Id.	Westinghouse.	V.	6000	T.		10000		Câbles souterr.
Londres (Charing-Cross).....	Id.	Lahmeyer.	V.	4800	T. 50	10500	10500		Id.
Salto del Lobo (Saragosse).....	Espag.	Brown Boveri.	H.	4500	T. 50	3000	30000	45	
Saragosse (Società teledina mica) ..	Id.	Id.	H.	3000	T. 50	3000	30000	80	
Biela.....	Italie.	Siemens et Halske.	H.	3000	T. 50	420	10000	45	
Bussoleno.....	Id.	Id.	H.	2450	T. 50	420	10000	48	
Come	Id.	Brown-Bov.	H.	3250	T. 42	4000	20000	37	
Lecco.....	Id.	Id.	H.	1650	T. 40	3300	16000	21	
Milan (Galarate) ..	Id.	Gén. El. Co.	H. V.		T.		15000		
Milan (Paderno) ..	Id.	Brown-Bov.	H.	15400	T. 42	16500	16500	32	
Morbogno.....	Id.	Schuckert.	H.		T. 50	20000	20000	37	
Oresca	Id.	Brown-Bov.	H.	3000	T41,7	13000	13000	35	
Pont-Saint-Martin.	Id.	Schuckert.	H.	4350	T. 50	3000	15000		
Vizzola.....	Id.	Id.	H.	20000	T. 50	20000	20000		
Askim.....	Norvège.	Id.	H.	37000	T. 50	5000	20000	90	
Sinaia.....	Roumanie.	Lahmeyer.		700			10000	45	
Lena.....	Russie.	Id.	V.	360	T.		10000		
Trangfors.....	Suède.		H.	1800	T.	800	14000	22	
Beznau.....	Suisse.	Brown-Bov.	H.	6000	T. 40	8000	25000	60	
Kander.....	Id.	Id.	H.	4500	T. 40	3000	16000	50	
Kubel.....	Id.	Lahmeyer.	H.	1650	T.		10000		
Hieromura.....	Japon.	Gén. El. Co.	H.	1000	T. 60	1150	14500	25	
Chambley.....	Canada.		H.	11000	D. 66		12000	29	
Hamilton.....	Id.		H.	3000	D. 66		22500	43	
Imperial Lumber.	Id.		H.	750	T. 60		15000	24	
Jacq. Cartier falls.	Id.		H.	2000	T. 60	2000	20000	128	Transf. Scott.
Lindsay	Id.	Gén. El. Co.	H.	736	T. 60	600	11000	27	

(1) A l'installation de Diedenhofen, les alternateurs commandés par moteurs à gaz ne sont pas couplés. La société Brown-Boveri vient d'installer aux forges et hauts-fourneaux de Dudelange (Luxembourg) une transmission avec moteurs à gaz de hauts-fourneaux, dans laquelle 2 alternateurs triphasés de 600 chevaux et 2 de 1000 chevaux sont couplés en parallèle, la fréquence est de 42 et la tension de 3000 v.

Désignation des installations.	Pays.	Noms des Constructeurs.	Nature de la Puissance motrice.	Puissance en chevaux.	Genre du courant en fréquence.	Aux alternateurs.	Tension En ligne	Distance de transport.	Observations.
Three-Rivers....	Canada		H.	700	D.133	12000	29		
Trenton....	Id.	Gén. El. C°	H.	736	T.60	2300	11000	19	
Victoria....	Id.	Id.	H.	960	T.60	700	10000	20	
West Kookney....	Id.	Gén. El. Co.	H.	3600	T.60	11000	11000	48	
Kingslone....	Ja- maïque	Gén. El. Co.	H.	800	T.40	600	16000	34	
Azura....	Etats- Unis	Westin- ghouse.		2400	D.50		16300	37	
Big Bar Bridge...	Id.			1900	D.60		25000	60	
Butte-City....	Id.	Gén. El. Co.	H.	4000	T.60	800	26000	34	
Colorado-Springs.	Id.	Westingh.	H.	1880	T.30		20000	40	35 installations
Fresno....	Id.	Gén. El. C°.	H.	1400	T.60	700	19000	88	à des tensions variant
Jamestown....	Id.			1300	T.60		15000	66	de 10.000 à
Kalamazoo....	Id.	Gén. El. Co.	H.	2000	T.60	2300	40000	79	15,000 volts,
Lockport....	Id.	Id.	H.	4000	T.60	2200	22000	20	parmi les- quelles celle
Lowville....	Id.			300	D.60		20000		de Manhattan
Marysville....	Id.			1200	D.60		16000	31	(New-York)
New-Castle....	Id.	Westingh.		1733	D.60		15800	43	avec tension de
Ogden....	Id.	Gén. El. Co.	H.	5000	T.60	2300	20000	64	11.000 volts
Red'land....	Id.	Id.	B.	750	T.30	750	33000	128	et câbles souterrains.
Salt-Lake....	Id.	Westingh.		1000	D.60		15650	21	
San Johns-ville....	Id.			240	D.60		15000		
San Paul....	Id.	Gén. El. C°.	H.	4000	T.60	800	30000	45	
Snoqualmie-falls..	Id.			8500	D.60		23000	69	
Staten-Island....	Id.	Gén. El. Co.	V.	800	T.60	800	17500	50	
Telluride (Provo).	Id.	Id.	H.	2000	T.60	800	40000	160	
Tonawanda....	Id.	Westingh.		1300	D.		21000		
C° électrique Mexico	Mexiq.			1500	D.50		17000	32	
Pachuca....	Id.	Gén. El. Co	H.	2000	T.60	700	10000	30	
Puebla....	Id.	Id.	H.	480	T.60	700	10000	15	
Rincon-Grande..	Id.			2000	D.25		10000		
Tlanelante....	Id.	Westingh.		6000			22000		
Toluco....	Id.	Siemens et Halske.	H.	400	T.50	500	10000	18	
San Raphaël....	Id.			1500	T.60		10000		
Santa Teresa....	id.			200	T.60		10000		
Guatemala....	Guate- mala.	Siemens et Halske.	H.	2340	T.50	350	10000	36	
Cordova....	Répub. Argent.	Gén. El. C°.	H.	1440	T.30	700	10000	26	
Johannesburg....	Trans- vaa'	Siemens et Halske.	V.	5000	T.50	700	10000	29	

ÉTABLISSEMENT DES LIGNES AÉRIENNES

DE

TRANSPORT D'ÉNERGIE

PAR

F. LOPPÉ

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

INTRODUCTION

Nous croyons être agréable aux lecteurs de la *Revue* en donnant comme supplément au travail de M. Loppé, sur la transmission de l'énergie à longue distance, une étude du même auteur sur l'établissement des lignes aériennes.

Dans ce travail, l'auteur s'est attaché à donner à la fois des courbes et des tableaux, permettant d'effectuer rapidement et d'une manière simple les calculs.

Les lignes de transport d'énergie à longues distances étant très répandues aux Etats-Unis comme le montre la statistique (p. 226 à 228), et les journaux techniques de ce pays publient fréquemment des articles intéressants et très documentés sur ce sujet, il a semblé utile de donner quelques tables permettant la transformation rapide des mesures anglaises en mesures métriques et vice versa.

Les tableaux relatifs à la conductance et à la résistance électrique des conducteurs permettent d'effectuer rapidement les calculs relatifs à la détermination de la section à leur donner et ceux relatifs à l'inductance des lignes aériennes, calculés d'après les données de M. Blondel,

peuvent servir à déterminer avec facilité la perte de tension dans les lignes aériennes parcourues par des courants alternatifs.

L'ouvrage donne des exemples de calculs de lignes aériennes; avec appuis au même niveau et avec appuis à des niveaux différents, (cas qui se présente souvent dans la pratique, et qui, à notre connaissance n'avait jamais été traité d'une manière complète) et quelques indications sur la résistance des poteaux en bois, ayant les dimensions usuelles du commerce.

PREMIÈRE PARTIE

Détermination des portées des lignes aériennes.

Un fil tendu entre deux appuis et soumis à un effet uniformément réparti par mètre courant, prend la forme d'une chainette. Dans tous les cas de la pratique, la chainette peut être assimilée sans erreur appréciable à une parabole.

Quand les deux points d'attache du fil sont au même niveau, si a est la distance horizontale entre les deux appuis, F la flèche, p l'effort par mètre courant, la tension au point bas, est donnée par la relation.

$$T = \frac{p a^2}{8 F}$$

La tension aux appuis est :

$$T_a = \frac{p a^2}{8 F} + p F.$$

La flèche F et l'effort p par mètre courant étant connus, la portée a se calcule de manière que la tension aux appuis ne dépasse pas une valeur λ par mm^2 , (λ est ordinairement compris entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{6}$ de la charge de rupture).

La portée se calcule de manière que l'on ait :

$$T_a = \lambda s.$$

s étant la section en mm^2 , si λ est la tension admissible par mm^2 . On a :

$$\frac{T_a}{p} = \frac{\lambda s}{p} = \delta.$$

$$a = \sqrt{8 F (\delta - F)}$$

Ordinairement F est très petit par rapport à a et on calcule la portée au moyen de la relation :

$$a = \sqrt{8 F \delta} = \sqrt{8 F \lambda \frac{s}{p}}.$$

Dans le cas où les appuis ne sont pas au même niveau, si h est la

différence de hauteur des appuis et si F désigne la hauteur verticale maximum comprise entre la droite qui joint les points d'attache et la courbe décrite par le fil, et si δ a la valeur indiquée ci-dessus.

On a :

$$a = \sqrt{8F(\delta - F) - 4Fh - \frac{h^2}{2}}.$$

λs étant alors la tension à l'appui supérieur.

Si c est la distance horizontale entre le point bas du fil et l'appui inférieur (c étant pris comme positif dans le cas où le point bas du fil tombe entre les deux appuis fig. 1, et comme négatif dans le cas contraire, fig. 2).

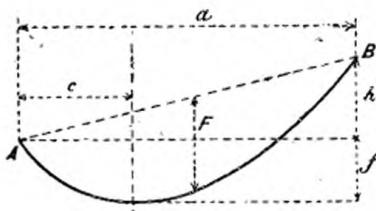


Fig. 1.

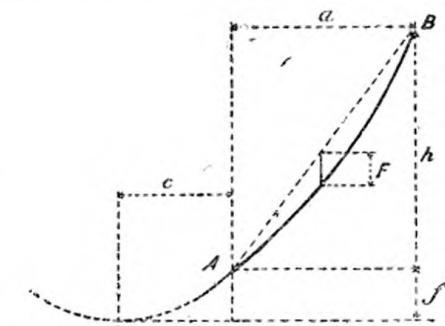


Fig. 2.

On a :

$$c = \frac{4F - h}{8F} a.$$

Si on désigne par f , la distance verticale entre l'appui inférieur et le point bas des fils ($f = F$ pour le cas des appuis de niveau.) On a :

$$f = \frac{c^2 h}{a^2 - 2ac}.$$

La tension au point bas est

$$T = p \cdot \frac{a - 2c}{2h} a.$$

La tension à l'appui inférieur est :

$$T_{ai} = T + pf.$$

La tension à l'appui supérieur est :

$$T_{as} = T + p(f + h).$$

Si au lieu de h , on a comme donnée Φ , la pente de terrain entre les deux appuis, on a :

$$a = 4 \cdot \frac{\sqrt{2F(\delta - F) + F\delta\Phi^2} - F\Phi}{2 + \Phi^2}.$$

On détermine le plus ordinairement la portée (la flèche étant donnée), pour que le conducteur résiste à l'action du vent maximum pouvant régner ; on vérifie ensuite si la ligne résiste bien à l'action du froid combiné avec les surcharges de neige ou de glace.

Si p_1 est le poids du fil par mètre courant, P la pression du vent par mètre carré de section droite de surface cylindrique (environ 0,60 de la pression par mètre carré sur une petite surface plane) d le diamètre du fil, en mm, l'effort du vent, agissant horizontalement sera : 0,001. Pd par mètre courant, et l'effort combiné sera :

$$p = \sqrt{p_1^2 + (0,001 \cdot P d)^2}$$

Si s est la section du fil en millimètres carrés, le poids par mètre courant est :

Bronzes et cuivre.	$p_1 = 0,00890 s$
Aluminium.	$p_1 = 0,00267 s$
Fer.	$p_1 = 0,00775 s$

Pour les câbles, il faudra tenir compte de l'allongement dû au torronnage.

Si d est le diamètre de fil en mm, le poids par mètre courant est :

Cuivre et bronzes.	$p_1 = 0,007 d^2$
Aluminium.	$p_1 = 0,0021 d^2$
Fer.	$p_1 = 0,0061 d^2$

D'après M. Picou (*Canalisations aériennes*) la pression du vent par mètre carré de section droite de surface cylindrique est donnée par la relation :

$$P = 0,081 v^2$$

v étant la vitesse du vent en mètres à la seconde.

La table suivante donne la pression en fonction de la vitesse :

Vitesse	Pression
6 m.	3,0 kg.
10 »	7,2 »
20 »	32,4 »
30 »	72,6 »
40 »	130,0 »

L'effort sur un câble est plus grand que sur un fil de même section à cause de l'augmentation du diamètre.

La table n° 19 (p. 305), empruntée à l'ouvrage de M. John A. Roebling,

donne le facteur par lequel il faut multiplier le diamètre d'un des fils fermant le câble, pour avoir le diamètre total du câble, suivant le nombre de fils.

On calcule le plus ordinairement les portées pour un vent exerçant une pression de 125 kg. par m^2 de section droite de surface cylindrique (voir à ce sujet la 4^e partie p. 275 et suivantes).

La table n° 21 (p. 306) donne les valeurs de p , $\frac{s}{p}$, $\sqrt{\frac{s}{p}}$ pour des fils d'aluminium et de fer, pour un vent de 125 kg.

Les tables n°s 23, 24 et 25 (p. 307), donnent respectivement les valeurs de p , de $\frac{s}{p}$, de $\sqrt{\frac{s}{p}}$ pour des fils de cuivre ou de bronze et diverses pressions de vent.

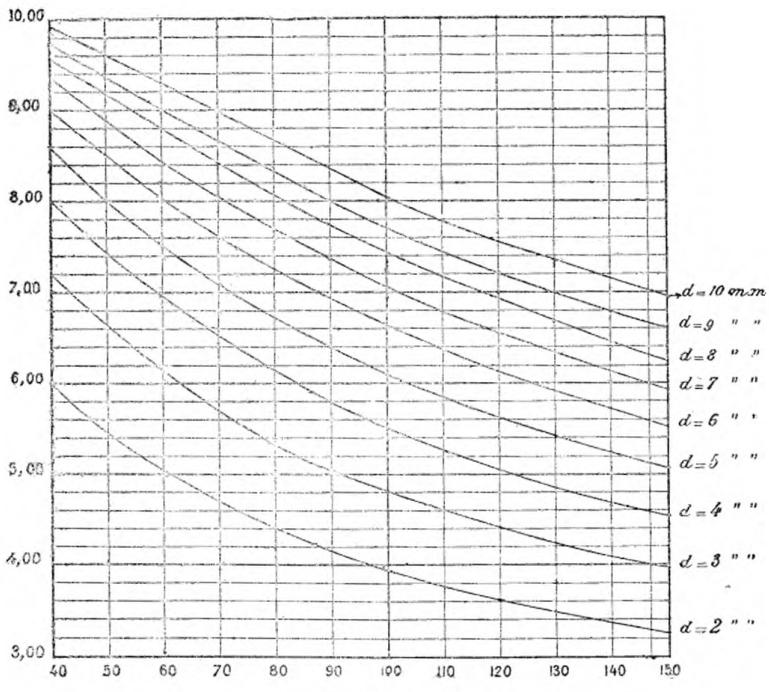


Fig. 3.

Les courbes de la fig. 3 sont la traduction de la table n° 23, elles montrent bien l'influence de la pression du vent sur la portée, qui toutes

chooses égales d'ailleurs est (dans le cas d'appuis horizontaux) proportionnelle à $\sqrt{\frac{s}{p}}$.

Les abscisses donnent la pression du vent en kg. par m² de surface droite de section cylindrique et les ordonnées la valeur de $\sqrt{\frac{s}{p}}$, c'est-à-dire sont proportionnelles à la portée.

La table n° 26 (p. 308) donne les valeurs de s , section en millimètres carrés, p , poids du fil par mètre courant en kilogrammes, de p , effort total par mètre courant, de $\frac{s}{p}$ et de $\sqrt{\frac{s}{p}}$, pour des fils de cuivre et de bronze, la pression du vent étant de 123 kg. par mètre carré de section droite de surface cylindrique.

DEUXIÈME PARTIE

Influence de la variation de la température et de l'effort par mètre courant sur les conducteurs aériens.

Quand il s'agit de déterminer l'influence des variations de la température et de l'effort par mètre courant, sur un conducteur donné, il est plus simple de considérer le conducteur de portée horizontale égale à l'unité placé dans des conditions semblables, c'est-à-dire dont la flèche est $K = \frac{F}{a}$ et la différence de hauteur des appuis $\Phi = \frac{h}{a}$, ce conducteur étant soumis à un effort $p a$ par mètre courant subit au point bas et aux appuis les mêmes tensions que le conducteur de portée a . La tension finale obtenue sera la même dans les deux cas et il suffira de multiplier par a , la flèche finale obtenue pour le conducteur de portée égale à l'unité, pour avoir la flèche finale du conducteur donné.

Pour simplifier, nous examinerons successivement l'influence des variations de température et des variations d'efforts, d'abord pour le cas d'appuis de niveau, puis pour le cas d'appuis placés à des hauteurs différentes.

1^o APPUIS DE NIVEAU

a) Variation de température.

Soient t , la température initiale, t_i la température finale, $t_i - t$ la variation de température, l la longueur initiale du conducteur, l_i la longueur finale, T_m la tension initiale par mm^2 au point bas. T_{m1} la tension finale, K la flèche initiale, K_i la flèche finale, α le coefficient de dilatation linéaire du métal (variation de longueur de 1 m. pour une variation de 1° C), β le coefficient d'allongement élastique (variation de longueur de 1 m. pour une variation de tension de 1 kg. par mm^2) (1).

(1) Le coefficient d'allongement élastique peut se déduire du coefficient ou module d'élasticité du métal. En effet, le coefficient d'élasticité peut être défini comme étant la force fictive qui allongerait d'une quantité égale à sa longueur

La variation totale de longueur du conducteur est, en valeur absolue égale à la variation de longueur due au changement de température, diminuée de la variation de longueur due à l'élasticité du fil.

On a :

$$l_t - l = l \{ \alpha (t_t - t) + \beta (T_{m1} - T_m) \}$$

Cette expression est valable pour tous les cas, car si $t_t > t$ on a $T_{m1} < T_m$ et si $t_t < t$ on a $T_{m1} > T_m$.

La longueur L du conducteur de portée a et de flèche F est

$$L = a + \frac{8 F^2}{3 a}$$

pour :

$$F = K a,$$

on a :

$$L = a \left(1 + \frac{8 K^2}{\varepsilon} \right)$$

Pour $a = 1$, on a :

$$l = 1 + \frac{8 K^2}{3}.$$

Les tensions (pour un même effort par mètre courant) étant en raison inverse des flèches on a :

$$T_{m1} = K \cdot \frac{T_m}{K_1}$$

primitive, une tige de section égale à l'unité (un mm^2), si les allongements restent toujours proportionnels aux forces qui les produisent.

Si E est le coefficient d'élasticité et β le coefficient d'allongement élastique, on a :

$$\beta E = 1 \quad \beta = \frac{1}{E}$$

La valeur de E peut être déterminée très approximativement de la manière suivante :

On prend un bout du fil que l'on encastre à une de ses extrémités, de manière qu'il soit bien horizontal, puis on suspend un poids à l'autre extrémité et l'on mesure la flèche du fil au point de suspension du poids.

Si P est le poids en kg., l la longueur du fil en mm entre l'enca斯特rement et le point où est suspendu le poids, I le moment d'inertie de la section du fil et f. la flèche en mm au point de suspension du poids, on a :

$$E = \frac{P}{f \cdot I} \cdot \frac{l^3}{3}$$

Si d est le diamètre du fil en mm, on a :

$$I = \frac{\pi}{64} d^4$$

$$E = \frac{64}{3\pi} \cdot \frac{P l^3}{f \cdot d^4} = 6,791 \cdot \frac{P l^3}{f \cdot d^4}$$

Dans cet essai, il faut avoir bien soin de ne pas dépasser la limite d'élasticité, c'est-à-dire qu'après enlèvement du poids, le fil doit reprendre l'horizontalité.

et la relation devient :

$$l_1 - l = \frac{8 K_1^2}{3} - \frac{8 K^2}{3} = \left(1 + \frac{8 K^2}{3}\right) \left\{ \alpha (t_1 - t) + \beta (T_m \left(\frac{K}{K_1} - 1\right)\right\}$$

équation de troisième degré, dont on peut tirer la valeur de K_1 .

Il est plus simple, surtout quand on dispose de tables donnant la valeur de l , en fonction de K , de procéder par approximations successives.

On trouve une première limite pour K_1 , en cherchant la valeur K' correspondant à la relation :

$$l' = l + l \alpha (t_1 - t)$$

On trouve K' dans la table, ou on résout l'équation :

$$K = \sqrt{\frac{3}{8} (l' - 1)} = 0,6124 \sqrt{l' - 1}.$$

K_1 est compris entre K et K' .

On détermine alors la valeur de la tension T'_m correspondant à K' , on a :

$$T'_m = \frac{K T_m}{K'}$$

et on prend :

$$l'' = l' + l' \beta (T'_m - T_m)$$

à l'' correspond K'' , et K_1 est compris entre K' et K'' . On détermine T''_m et on prend :

$$l''' = l'' + l'' \beta (T''_m - T_m)$$

On cherche K''' , et K_1 est compris entre K'' et K''' ; on procède ainsi jusqu'à ce que l'on arrive à deux valeurs successives de K , entre lesquelles K_1 est compris, différant aussi peu qu'on le veut, c'est-à-dire que l'on détermine K_1 avec l'approximation désirée (les tables permettent de déterminer K_1 au dix-millième de la portée près).

Dans la plupart des cas de la pratique, l diffère peu de l'unité. α , β et $t_1 - t$ sont faibles (¹) on peut alors remplacer $l \alpha (t_1 - t)$ par $\alpha (t_1 - t)$ et $l \beta (T_m - T_m)$ par $\beta (T_m - T_m)$ c'est-à-dire supposer que les variations de longueur sont égales à celles de l'unité.

Ayant obtenu la valeur de K_1 , on cherche la valeur correspondante de l , dans la table, on a : $T_{m1} = \frac{K T_m}{K_1}$ et on vérifie si la variation totale

(1) Pour le cuivre on a $\alpha = 0,000017$, $\beta = 0,000078$, pour le fer approximativement $\alpha = 0,000012$, $\beta = 0,000034$, pour l'aluminium, $\alpha = 0,000023$, $\beta = 0,000140$ (environ). $(T_{m1} - T_m)$ ne dépasse jamais 14 kg. pour les bronzes et le fer et 5 kg. pour l'aluminium.

est bien égale en valeur absolue à la différence entre la variation due au changement de température et la variation due au changement de tension.

On pourra également vérifier en calculant la flèche $F_t = K_t a$, et en déterminant la tension T_t au point bas pour l'effort p ; on devra avoir $T_{m_t} = \frac{T_t}{s}$, s étant la section du conducteur en millimètres carrés.

La table n° 27 (p. 309 et 310) des valeurs l en fonction de K_t donne les valeurs de l pour des valeurs de K_t variant de 0,0001 à 0,0500, elle suffit pour tous les cas de la pratique ordinaire. La table supplémentaire n° 28 (p. 310) donne les valeurs de l , de 0,050 à 0,0100, avec indication des différences.

EXEMPLES. — Augmentation de température.

On a comme données :

$$K = 0,0210 \quad T_m = 7,50 \text{ kg.}$$

On demande les valeurs de K_t et de T_{m_t} pour une augmentation de température de 30° , le conducteur étant en cuivre, on a :

$$t_t - t = +30^\circ \quad \alpha (t_t - t) = +0,000017 \times 30 = 0,000510$$

la table donne $l = 1,001176$. On voit que l'on peut prendre comme allongement $\alpha (t_t - t)$ au lieu de $l \alpha (t_t - t)$.

$$l' = 1,001176 + 0,000510 = 1,001686$$

La table donne $K' = 0,0251$.

$$T'_{m_t} = K \cdot \frac{T_m}{K'} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0251} = 6,27$$

Variation élastique :

$$\begin{aligned} \beta (T'_{m_t} - T_m) &= 0,000078 (6,27 - 7,50) = -0,000096 \\ l'' &= l' + \beta (T'_{m_t} - T_m) = 1,001686 - 0,000096 = 1,001590 \end{aligned}$$

La table donne :

$K'' = 0,0244$, et K_t est compris entre 0,0244 et 0,0251. On a :

$$T''_{m_t} = \frac{K T_m}{K''} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0244} = 6,45$$

Variation élastique :

$$\begin{aligned} \beta (T''_{m_t} - T'_{m_t}) &= 0,000078 (6,45 - 6,27) = +0,000014 \\ l''' &= l'' + \beta (T''_{m_t} - T'_{m_t}) = 1,001590 + 0,000014 = 1,001604 \\ K''' &= 0,0245. \quad K_t \text{ est compris entre 0,0244 et 0,0245} \end{aligned}$$

En prenant :

$$K_1 = 0,0245, \quad \text{on aura : } T_{m1} = \frac{K_1 T_m}{K_1} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0245} = 6,43$$

La table donne :

$$l_1 = 1,001600$$

Vérification. Variation totale :

$$l_1 - l = 1,001600 - 1,001176 = 0,000424$$

Variation due à la température :

$$\alpha(t_1 - t) = 0,000078 \times 30 = 0,000510$$

Variation due à l'élasticité (en valeur absolue) :

$$\beta(T_m - T_{m1}) = 0,000078 (7,50 - 6,43) = 0,000083$$

$$\alpha(t_1 - t) - \beta(T_m - T_{m1}) = 0,000510 - 0,000083 = 0,000427$$

Diminution de température.

Soient $K = 0,0210$, $T_m = 7,50$, on demande K_1 et T_{m1} pour une diminution de température de 30° .

$$t_1 - t = -30$$

$$\alpha(t_1 - t) = -0,000017 \times 30 = -0,000510$$

$$l' = 1,001176 - 0,000510 = 1,000666$$

$$K' = 0,0158$$

$$T_m = \frac{K_1 T_m}{K'} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0158} = 9,97$$

Variation élastique :

$$\beta(T'_{m1} - T_m) = 0,000078 (9,97 - 7,50) = +0,000193$$

$$l'' = l' + \beta(T'_{m1} - T_m) = 1,000666 + 0,000193 = 1,000859$$

$$K'' = 0,0179 \quad K_1 \text{ est compris entre } 0,0158 \text{ et } 0,0179$$

$$T''_{m1} = \frac{K_1 T_m}{K''} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0179} = 8,80$$

Variation élastique :

$$\beta(T''_{m1} - T'_{m1}) = 0,000078 (8,80 - 9,97) = -0,000091$$

$$l''' = l'' + \beta(T''_{m1} - T'_{m1}) = 1,000859 - 0,000091 = 1,000768$$

$$K''' = 0,0170$$

$$T'''_{m1} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0170} = 9,26$$

Variation élastique :

$$\beta (T''_m - T'_m) = 0,000078 (9,26 - 8,80) = + 0,000036$$

$$l^v = l'' + \beta (T''_m - T'_m) = 1,000768 + 0,000036 = 1,000804$$

$$K^v = 0,0174 \quad K_t \text{ est compris entre } 0,0170 \text{ et } 0,0174$$

$$\text{on peut prendre } K_t = 0,0172, \text{ on a } l_t = 1,000787 \quad T_{m_t} = \frac{0,021 \times 7,50}{0,0172} = 9,16$$

Vérification. Variation totale de longueur (en valeur absolue) :

$$1,001176 - 1,000787 = 0,000389$$

Variation due à la température :

$$30 \times 0,000017 = 0,000510$$

Variation due à l'élasticité :

$$0,000078 (9,16 - 7,50) = 0,000129$$

$$0,000510 - 0,000129 = 0,000381$$

K_t est compris entre 0,0172 et 0,0174, pour $K_t = 0,0173$, on a :

$$T_{m_t} = 9,10 \quad l_t = 1,000797$$

Variation de longueur :

$$0,000379$$

Variation due à la température :

$$0,000510$$

Variation due à l'élasticité :

$$0,000124$$

$$0,000510 - 0,000124 = 0,000386$$

On doit donc, prendre :

$$K_t = 0,0173.$$

Cas particuliers. 1^o Augmentation de température.

Quand on a déterminé $l' = l + \alpha (t_t - t)$ et T'_m , il peut se faire que $(T'_m - T_m)$ qui est négatif, soit plus grand en valeur absolue que $l' - 1$, et dans ce cas on a, $l' < 1$ et la table ne peut plus servir.

On peut alors soit chercher à résoudre directement l'équation du troisième degré, soit procéder comme il suit :

On cherche la valeur T''_m pour laquelle le raccourcissement dû à l'élasticité est égal à l'allongement dû à la température.

$$\beta (T_m - T''_m) = \alpha (t_1 - t)$$

$$T''_m = T_m - \frac{\beta}{\alpha} (t_1 - t)$$

et on détermine la valeur K'' de la flèche, correspondante :

$$K'' = \frac{K T_m}{T''_m}$$

K_1 est inférieur à K'' , et compris entre K et K'' , on prend pour K_1 une valeur un peu inférieure à K'' et on cherche si l'équation se vérifie.

EXEMPLE. On a :

$$K = 0,0050 \quad t_1 - t = 10^\circ \quad T_m = 14$$

La table donne :

$$l = 1,000067 \text{ et } \alpha (t - t_1) = 0,000170.$$

On a donc :

$$l' = 1,000067 + 0,000170 = 1,000237$$

La table donne :

$$K' = 0,0094$$

$$T''_m = \frac{0,0050 \times 14}{0,0094} = 7,44$$

$$\beta (T''_m - T_m) = 0,000078 (7,44 - 14,00) = -0,000512$$

$$l'' = 1,000237 - 0,000512$$

l'' est donc plus petit que 1.

Cherchons la valeur T''_m pour laquelle le raccourcissement dû à l'élasticité est égal à l'allongement dû à l'augmentation de température. On a :

$$T''_m = T_m - \frac{\alpha}{\beta} (t_1 - t) = 14,00 - \frac{0,000017}{0,000078} \cdot 10 = 11,82$$

La flèche correspondante est :

$$K'' = \frac{K_1 T_m}{T''_m} = \frac{14 \times 0,005}{11,82} = 0,0059.$$

K_1 est donc compris entre 0,0030 et 0,0059.

Prenons $K_1 = 0,0038$, on a :

$$l_1 = 1,000090 \quad l_1 - l = 0,000023$$

$$T_{m1} = \frac{14 \times 0,005}{0,0058} = 12,07$$

$$\beta (T_m - T_{m1}) = 0,000078 (14 - 12,07) = 0,000151$$

$$l_1 - l + \beta (T_m - T_{m1}) = 0,000174$$

$$\alpha (t_1 - t) = 0,000170$$

on voit que l'on peut prendre $K_1 = 0,0038$, car pour $K_1 = 0,0037$, on aurait :

$$l_1 - l + \beta (T_m - T_{m1}) = 0,000020 + 0,000078 (14 - 12,28) = 0,000153$$

K_1 est donc plus voisin de 0,0038 que de 0,0037.

2^o *Diminution de température*, il peut arriver que $\alpha (t_1 - t)$ qui est négatif, soit en valeur absolue plus grand que l_1 , on a alors $l' < 1$, et les tables des valeurs de l ne peuvent plus servir.

Dans ce cas, on peut soit chercher à résoudre directement l'équation du troisième degré, soit procéder d'une manière analogue à celle indiquée ci-dessus. On cherche la valeur T''_m de la tension pour laquelle l'allongement dû à l'élasticité est égal au raccourcissement dû à la diminution de température.

$$T''_m = T_m + \frac{\alpha}{\beta} (t - t_1) \quad t - t_1 \text{ étant } > 0$$

On détermine $K'' = \frac{K T_m}{T''_m}$ et on a la valeur minimum pour K , on augmente ensuite peu à peu la valeur, en essayant chaque fois si l'équation est satisfaite.

EXEMPLE. Soient :

$$K = 0,0050 \quad T_m = 10,00 \quad t - t_1 = 40^\circ$$

La table donne $l = 1,000067$, et on a $\alpha (t_1 - t) = 0,000680$, $l' = l + \alpha (t_1 - t)$ est donc plus petit que 1.

$$T''_m = 10 + \frac{\alpha}{\beta} \cdot 40 = 18,72$$

$$K''_m = \frac{0,005 \times 10}{18,72} = 0,0027$$

K_t est donc compris entre 0,0027 et 0,0030.

Prenons ;

$$K_t = 0,0028, \text{ on a : } T_{m1} = 17,86 \quad l - l_t = 1,000067 - 1,000021 = 0,000046$$

$$\beta (T_{m1} - T_m) = 0,000078 \times 7,86 = 0,000613$$

$$l - l_t + \beta (T_{m1} - T_m) = 0,000046 + 0,000613 = 0,000659$$

K_t est compris entre 0,0027 et 0,0028, il est facile de voir que la valeur 0,0028 est plus rapprochée, car pour $K_t = 0,0027$ on a :

$$l - l_t + \beta (T_m - T_m) = 0,000047 + 0,000680 = 0,000727$$

On voit que dans tous les cas, on peut arriver assez rapidement au but en employant la méthode des approximations successives.

Les courbes des fig. 9 à 12 (p. 317 à 319), donnent les augmentations de la flèche ($K_t - K$) pour des conducteurs en cuivre ou en bronze, des tensions initiales de 2, 4, 6, 8.... 14 kg. des flèches initiales de 0 à 0,06 et des augmentations de température, de 10° 20°, 34 et 40° C. La table n° 29 (p. 311) est la traduction de ces courbes.

Les courbes ou la table n° 29 permettent de résoudre par interpolation les problèmes relatifs à l'augmentation de température pour les conducteurs en cuivre.

Soit, par exemple, le problème traité :

$$K = 0,0210 \quad T_m = 7,50 \quad t_t - t = 30^\circ$$

La table pour une augmentation de température de 30° donne :

Pour :

$$K = 0,02 \quad T_m = 8 \quad K_t - K = 0,0036$$

$$K = 0,02 \quad T_m = 6 \quad K_t - K = 0,0037$$

$$K = 0,02 \quad T_m = 7,50 \text{ on prendra } K_t - K = 0,0036$$

Pour :

$$K = 0,025 \quad T_m = 8 \quad K_t - K = 0,0031$$

$$K = 0,025 \quad T_m = 6 \quad K_t - K = 0,0032$$

$$K = 0,025 \quad T_m = 7,50 \text{ on prendra } K_t - K = 0,0031$$

Pour $K = 0,021$ et $T_m = 7,50$ on prendra :

$$K_t - K = 0,0034$$

et on aura :

$$K_t = 0,021 + 0,0034 = 0,0245$$

qui est bien la valeur trouvée directement (voir page 240).

Les courbes des fig. 13 à 16 (p. 320 à 322) donnent les diminutions de flèche des conducteurs en cuivre, pour des abaissements de température de 10, 20, 30, 40°. La table n° 30 (p. 312) se rapporte à ces courbes.

Les courbes des figures 17 à 24 (p. 323 à 328) ainsi que les tables correspondantes n°s 32 et 33 (p. 314 et 315) se rapportent à des conducteurs en fer.

Pour le cuivre et les bronzes nous avons pris :

$$\alpha = 0,000017 \quad \beta = 0,000078$$

Pour le fer :

$$\alpha = 0,000012 \quad \beta = 0,000034$$

Pour l'aluminium, les valeurs de α et de β varient dans de grandes proportions, en moyenne on a :

$$\alpha = 0,000023$$

et

$$\beta = 0,000148.$$

Il y a lieu de remarquer que pour des variations de température ne dépassant pas 40°, à partir d'une flèche $K = 0,03$ pour le cuivre et $K = 0,04$ pour le fer, on peut prendre pour K_t la valeur donnée directement par la relation :

$$l_t = l + l \alpha (t_t - t)$$

La variation de flèche étant si faible, que la variation de tension est négligeable. Les courbes en pointillé des figures ainsi que les tables donnent la valeur de $K_t - K$, pour $T_m = 0$, c'est-à-dire pour K_t déduit de la relation ci-dessus, le fil étant supposé non élastique.

b) Variation de l'effort par mètre courant.

On a comme données K et T_m pour un effort p , et on cherche K_t et T_{mt} pour un effort p_t .

Dans ce cas, la variation de longueur du conducteur est égale à la variation due à l'élasticité.

$$l_t - l = l \beta (T_{mt} - T_m)$$

Or, les tensions étant proportionnelles aux efforts et inversement proportionnelles aux flèches, on a :

$$T_{mt} = \frac{p_t}{p} \cdot \frac{K}{K_t} T_m$$

$$\frac{8 K_t^2}{3} - \frac{8 K^2}{3} = \left(1 + \frac{8 K^2}{3}\right) \beta T_m \left(\frac{p_t}{p} \cdot \frac{K}{K_t} - 1\right)$$

équation du troisième degré, qui permet de déterminer la valeur de K_1 .

On peut encore arriver à déterminer K_1 par approximations successives en procédant de la manière suivante :

Si le conducteur n'était pas élastique, la tension par millimètre carré, après variation de l'effort serait :

$$T'_m = \frac{p_1}{p} \cdot T_m$$

La variation de longueur due à l'élasticité du fil serait :

$$l \beta (T'_m - T_m)$$

En prenant :

$$l'' = l + l \beta (T'_m - T_m)$$

à cette valeur l'' de longueur correspond une valeur K'' de K qui est une limite pour K_1 . On a :

$$T''_m = \frac{K}{K''} T'_m$$

La variation due à l'élasticité est :

$$l'' \beta (T''_m - T'_m)$$

et on a :

$$l''' = l'' + l'' \beta (T''_m - T'_m)$$

longueur à laquelle correspond K''' ; K_1 étant compris entre K'' et K''' .

On procédera ainsi jusqu'à ce que l'on arrive à deux valeurs successives de K entre lesquelles sera compris K_1 , différant entre elles aussi peu qu'on le voudra.

EXEMPLE. On a :

$$K = 0,0210 \quad T_m = 7,50$$

L'effort initial étant $p = 0,640$ kg., et l'effort final p_1 étant de 0,230 kg.. Le conducteur est en cuivre. On a, d'après la table, $l = 1,001176$. l diffère assez peu de l'unité pour que l'on puisse prendre comme variation élastique $\beta (T'_m - T_m)$ au lieu de $l \beta (T'_m - T_m)$.

$$\frac{p_1}{p} = \frac{0,250}{0,640} = 0,391$$

$$T'_m = \frac{p_1}{p} T_m = 0,391 \times 7,50 = 2,93$$

$$\begin{aligned} l'' &= l + \beta (T'_m - T_m) = 1,001176 + 0,000078 (2,93 - 7,50) \\ &= 1,001176 - 0,000356 = 1,000820 \end{aligned}$$

La table donne :

$$K'' = 0,0175, \text{ d'où : } T''_m = \frac{2,93 \times 0,021}{0,0175} = 3,51$$

Variation élastique :

$$\beta (T''_m - T'_m) = 0,000078 (3,51 - 2,93) = 0,000045$$

$$l'' = 1,000820 + 0,000045 = 1,000865$$

$$K'' = 0,0180 \quad K_4 \text{ est compris entre } 0,0175 \text{ et } 0,0180$$

$$T''_m = \frac{2,93 \times 0,021}{0,0180} = 3,42$$

$$\beta (T''_m - T'_m) = 0,000078 (3,42 - 3,51) = -0,000007$$

$$l'' = 1,000865 - 0,000007 = 1,000858$$

$$K'' = 0,0179$$

K_4 est compris entre 0,0179 et 0,0180, on peut prendre 0,0179.

Vérification. La variation totale de longueur doit être égale à la variation due à l'élasticité.

On a :

$$K_4 = 0,0179 \quad T_m = \frac{2,93 \times 0,021}{0,0179} = 3,43 \quad l_4 = 1,000854$$

Variation de longueur :

$$l - l_4 = 1,001176 - 1,000854 = 0,000322$$

Variation due à l'élasticité :

$$\beta (T_m - T'_m) = 0,000078 (7,50 - 3,43) = 0,000317$$

Cas particulier. Dans le cas où on a $\frac{p}{p_4} < 1$, il peut se faire que $\beta (T'_m - T_m)$ qui est alors négatif, soit en valeur absolue plus grand que $l - 1$, dans ce cas on a $l'' < 1$ et la méthode indiquée ci-dessus n'est plus applicable.

Dans ce cas, on peut soit résoudre l'équation du troisième degré, soit procéder par approximations successives, comme il suit.

Pour $K' = \frac{p}{p_4} \cdot K$, on a comme tension T_m , avec un effort p_4 , K' est donc une limite inférieure pour K_4 , qui en est du reste très voisin. On essaie alors avec des valeurs un peu supérieures à K' .

EXEMPLE :

$$K = 0,0050 \quad T_m = 10 \quad \frac{p_4}{p} = 0,30$$

On a :

$$T'_m = \frac{p_4}{p} \cdot T_m = 0,30 \times 10 = 3,00$$

$$\beta (T'_m - T_m) = 0,000078 (3,00 - 10,00) = -0,000546$$

$$l = 1,000067$$

On voit que l'on aurait $l'' = l + \beta (T'_m - T_m) < 1$.

Pour $K' = \frac{p}{p_t} K = 0,30 \times 0,0030 = 0,0015$ on a avec l'effort p_t la tension $T_m = 10$.

Essayons avec $K'_t = 0,0016$, on a :

$$\begin{aligned} l'_t &= 1,000007 \\ l - l'_t &= 1,000067 - 1,000007 = 0,000060 \\ T'_{mt} &= \frac{K T_m}{K'_t} = \frac{0,005 \times 3,00}{0,0016} = 9,38 \\ \beta (T_m - T'_{mt}) &= 0,000078 (10 - 9,38) = 0,000048 \end{aligned}$$

On voit que K_t est supérieur à $K'_t = 0,0016$.

Prenons :

$$K'_t = 0,0017$$

On a :

$$\begin{aligned} l'_t &= 1,000008 \\ l - l'_t &= 1,000067 - 1,000008 = 0,000059 \\ T'_{mt} &= \frac{0,005 \times 3,00}{0,0017} = 8,82 \\ \beta (T_m - T'_{mt}) &= 0,000078 (10 - 8,82) = 0,000092 \end{aligned}$$

K_t est donc inférieur à $K'_t = 0,0017$.

K_t est compris entre 0,0016 et 0,0017 et la valeur 0,0016 est la plus rapprochée.

Les courbes des fig. 25, 26, 27 et 28 (p. 329 à 334) donnent pour des conducteurs en cuivre et des valeurs $\frac{p_t}{p}$ de respectivement 0,20, 0,40, 0,60 et 0,80, des tensions initiales de 2, 4, 6, 8, 10, 12 et 14 kg., les valeurs de la diminution de la flèche ($K - K_t$), pour des flèches initiales comprises entre 0 et 0,06. Ces courbes ainsi que la table n° 31 (p. 313) qui s'y rapporte permettent de résoudre par interpolation les cas de la pratique.

La partie de la table pour $\frac{p_t}{p} = 0$ correspond au cas théorique où l'effort (ainsi que la tension au point bas) deviendrait nul, dans ce cas on a :

$$l_t - l = l \beta T_m.$$

Soit à déterminer K_t comme dans le premier exemple ci-dessus, on a :

$$K = 0,0210 \quad T_m = 7,50 \quad \frac{p_t}{p} = \frac{0,250}{0,640} = 0,391$$

On trouve dans la table 31 pour $\frac{p_1}{p} = 0,40$,

Pour :

$$\begin{array}{lll} K = 0,02 & T_m = 6 & K - K_1 = 0,0025 \\ K = 0,02 & T_m = 8 & K - K_1 = 0,0033 \end{array}$$

Pour :

$$\frac{p_1}{p} = 0,40 \quad K = 0,02 \quad T_m = 7,50 \text{ on aura en interpolant } K - K_1 = 0,0031.$$

Pour $\frac{p_1}{p} = 0,20$, on a :

Pour :

$$\begin{array}{lll} K = 0,02 & T_m = 6 & K - K_1 = 0,0037 \\ K = 0,02 & T_m = 8 & K - K_1 = 0,0049 \end{array}$$

Pour :

$$\frac{p_1}{p} = 0,20 \quad K = 0,02 \quad T_m = 7,50 \text{ on aura } K - K_1 = 0,0046$$

Pour $\frac{p_1}{p} = 0,40$ on prendra $K - K_1 = 0,0032$ et $K = 0,02$.

En procédant de même pour $K = 0,023$, on aura,

Pour :

$$\begin{array}{lll} \frac{p_1}{p} = 0,40 & K = 0,025 & T_m = 6 \quad K - K_1 = 0,0021 \\ & K = 0,025 & T_m = 8 \quad K - K_1 = 0,0027 \end{array}$$

Pour $T_m = 7,50$ on prendra $K - K_1 = 0,0025$.

Pour $\frac{p_1}{p} = 0,20$

$$\begin{array}{lll} K = 0,025 & T_m = 6 & K - K_1 = 0,0030 \\ K = 0,025 & T_m = 8 & K - K_1 = 0,0040 \end{array}$$

Pour $T_m = 7,50$ on prendra $K - K_1 = 0,0038$

Pour $K = 0,025 \quad T_m = 7,50 \quad \frac{p_1}{p} = 0,391$ on prendra :

$$K - K_1 = 0,0027$$

On a donc pour :

$$K = 0,02 \quad K - K_1 = 0,0032$$

Pour :

$$K = 0,025 \quad K - K_1 = 0,0027$$

Pour $K = 0,021$ on prendra $K - K_1 = 0,0031$ et on aura :

$$K_1 = 0,021 - 0,0031 = 0,0179 \text{ ce que l'on avait trouvé.}$$

En pratique on n'a jamais de flèches inférieures à 0,01. La ligne avec

des flèches inférieures serait, ainsi que nous le verrons, trop exposée à l'action du froid.

2^o CAS OU LES APPUIS SONT A DES NIVEAUX DIFFÉRENTS

Si c (fig. 1 et 2, p. 232) est la distance horizontale entre l'appui inférieur A et le point bas de la courbe (c étant positif quand le point bas tombe entre les appuis, fig. 1, négatif dans le cas contraire, fig. 2).

La tension au point bas est :

$$T = p \cdot \frac{a-2c}{2h} \cdot a = \frac{p c^2}{2f}$$

La longueur du conducteur de portée a , avec appuis à une différence de hauteur h est :

$$L = a + \frac{2}{3} h^2 \cdot \frac{a^2 - 3ac + 3c^2}{a(a-2c)^2}$$

Pour les calculs de variation de température et de l'effort, on pourra encore considérer un conducteur de portée horizontale, $a = 1$, soumis à l'effort p . a par mètre courant, en posant :

$$c = n a$$

$$h = \Phi a$$

Φ étant la pente par mètre entre les appuis. On aura :

$$T = p \cdot \frac{1-2n}{2\Phi} a$$

$$l = \frac{L}{a} = 1 + \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n+3n^2}{(1-2n)^2}$$

n étant positif ou négatif suivant le cas.

Quand n est positif sa valeur est toujours inférieure à 0,50, et l tend vers l'infini (excepté pour $\Phi = 0$, cas où les appuis sont de niveau).

Quand n est négatif, la valeur de l tend vers $1 + 0,50 \Phi^2$.

Le valeur de n en fonction de l est donnée par la relation :

$$n = \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{\sqrt{24(l-1)-12\Phi^2}}$$

Les tables n°s 34 et 35 (p. 316) donnant les valeurs de $A = \frac{2}{3} \cdot \frac{1-3n+3n^2}{(1-2n)^2}$ en fonction de n peuvent servir pour déterminer l en fonction de n ou vice versa. Φ étant donné, on a :

$$l = 1 + \Phi^2 A$$

Si l est donné on a :

$$A = \frac{l-1}{\Phi^2}$$

et les tables permettent de déterminer la valeur correspondante de n .

Toutes choses égales d'ailleurs la tension au point bas est proportionnelle à $1 - 2 n$. Si T_m est la tension par millimètre carré correspondant à n et T'_m , celle correspondant à n' , on a :

$$T'_m = \frac{1 - 2 n'}{1 - 2 n} T_m.$$

a) *Variation de température.*

On a comme pour les appuis de niveau :

$$\begin{aligned} l_1 - l &= l \{ \alpha (t_1 - t) + \beta (T_{m1} - T_m) \} \\ l &= 1 + \frac{2}{3} \Phi^2 \frac{1 - 3n + 3n^2}{(1 - 2n)^2} \\ l_1 &= 1 + \frac{2}{3} \Phi^2 \frac{1 - 3n_1 + 3n_1^2}{(1 - 2n_1)^2} \\ T_{m1} &= \frac{1 - 2n_1}{1 - 2n} \cdot T_m. \\ \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1 - 3n_1 + 3n_1^2}{(1 - 2n_1)^2} - \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1 - 3n + 3n^2}{(1 - 2n)^2} &= \left(1 + \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1 - 3n + 3n^2}{(1 - 2n)^2} \right) \\ \left\{ \alpha (t_1 - t) + \beta T_m \cdot \left(\frac{1 - 2n_1}{1 - 2n} - 1 \right) \right\} \end{aligned}$$

équation du 3° qui permet de déterminer n_1 .

On peut également opérer par approximations successives ; on prend :

$$l' = l + l \alpha (t_1 - t)$$

De l' on déduit la valeur de n' (soit directement, en employant la relation indiquée, soit en employant la table des valeurs de A , soit encore en utilisant cette table pour en construire une donnant pour la pente donnée Φ directement l en fonction de n). On a alors :

$$T'_m = \frac{1 - 2 n'}{1 - 2 n} \cdot T_m$$

la variation élastique est :

$$l' \beta (T'_m - T_m)$$

On prend :

$$l'' = l' + l' \beta (T'_m - T_m)$$

On déduit de l'' la valeur de n'' , et n_1 est compris entre n' et n'' . On détermine T''_m , etc....

EXEMPLE. On a pour un conducteur en cuivre :

$$\Phi = 0,20 \quad T_m = 7,50 \quad n = -0,50$$

On demande la valeur de n_1 et de T_{m1} pour une augmentation de température de 40° .

Pour $n = -0,50$ la table 33 donne $A = 0,54167$. On a donc :

$$l = 1 + \Phi^2 A = 1,021667$$

$$l \times (t_1 - t) = 1,021667 \times 0,000017 \times 40 = 0,000695$$

si on avait pris $\alpha (t_1 - t)$, on aurait eu 0,000680).

$$l' = 1,021667 + 0,000695 = 1,022362$$

On a pour cette valeur de l'

$$A' = \frac{l' - 1}{\Phi^2} = \frac{1,022362 - 1}{0,04} = 0,55905$$

La table donne $n' = -0,34$.

On a :

$$T'_{m1} = \frac{1 - 2 n'}{1 + 2 n} T_m = \frac{1 + 2 \times 0,34}{1 + 2 \times 0,50} 7,50 = 6,30$$

Variation élastique :

$$l' \beta (T'_{m1} - T_m) = 1,022362 \times 0,000078 (6,30 - 7,50) = -0,000096$$

$$l'' = 1,022362 - 0,000096 = 1,022266$$

On a :

$$A'' = \frac{1,022266 - 1}{0,04} = 0,55665$$

La table en interpolant donne $n'' = -0,338$. n_1 est donc compris entre $-0,338$ et $-0,30$. On a :

$$T''_{m1} = \frac{1 - 2 n''}{1 + 2 n} T_m = \frac{1 + 2 \times 0,358}{1 + 2 \times 0,50} 7,50 = 6,43$$

$$l'' \beta (T''_{m1} - T'_{m1}) = 1,022266 \times 0,000078 (6,43 - 6,30) = 0,000011$$

$$l''' = 1,022266 + 0,000011 = 1,022277$$

$$A''' = \frac{1,022277 - 1}{0,04} = 0,55692$$

La table donne $n''' = -0,335$. n_1 est compris entre $-0,335$ et $-0,338$ et plus voisin de $-0,335$, on peut prendre $n_1 = -0,336$.

Vérification. En exécutant les calculs, sans se servir de la table, on a pour :

$$\begin{aligned} n &= -0,50 & l &= 1,021667 \\ n_t &= -0,356 & l_t &= 1,022275 \\ T_{mt} &= \frac{1+2 \times 0,356}{1+2 \times 0,50} 7,50 = 6,42 \end{aligned}$$

Variation de longueur :

$$l_t - l = 1,022275 - 1,021667 = 0,000608$$

Variation élastique :

$$1,021667 \times 0,000078 \times (7,50 - 6,42) = 0,000086$$

Variation totale, 0,000694.

Variation due à la température :

$$l \propto (t_t - t) = 1,021667 \times 0,000017 \times 40 = 0,000695$$

b) *Variation de l'effort par mètre courant.*

La variation totale de longueur est égale à la variation due à l'élasticité du fil.

$$\frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n_t+3n_t^2}{(1-2n_t)^2} - \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n+3n^2}{(1-2n)^2} = \left(1 + \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n+3n^2}{(1-2n)^2}\right) \beta (T_{mt} - T_m)$$

Si p est l'effort initial, p_t l'effort final, on aura :

$$T_{mt} = \frac{p_t}{p} \cdot \frac{1-2n_t}{1-2n} \cdot T_m$$

et l'équation devient :

$$\frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n_t+3n_t^2}{(1-2n_t)^2} - \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n+3n^2}{(1-2n)^2} = \left(1 + \frac{2}{3} \Phi^2 \cdot \frac{1-3n+3n^2}{(1-2n)^2}\right) \beta \cdot T_m \left(\frac{1-2n_t}{1-2n} \cdot \frac{p_t}{p} - 1\right)$$

Equation du troisième degré en n_t .

On peut comme dans le cas des appuis de niveau résoudre le problème par approximations successives.

Si le conducteur n'était pas élastique, on aurait :

$$T'_m = \frac{p_t}{p} \cdot T_m$$

La variation correspondante due à l'élasticité est :

$$l \beta (T'_m - T_m)$$

On prendra:

$$l'' = l + l \beta (T'_m - T_m)$$

A l'' correspond une valeur n'' qui est une limite pour n_1 et on a :

$$T''_m = \frac{1-2n''}{1-2n} T'_m$$

la variation due à l'élasticité est :

$$l'' \beta (T''_m - T'_m)$$

on prendra :

$$l''' = l'' + l'' \beta (T''_m - T'_m)$$

On déterminera n''' et on procédera ainsi jusqu'à ce que l'on trouve deux valeurs successives pour n (entre lesquelles est compris n_1) différant l'une de l'autre de la quantité admise.

$$Exemple : \quad \Phi = 0,10 \quad n = -0,12 \quad T_m = 8 \quad \frac{p_1}{p} = 0,25$$

Pour $n = -0,12$ la table 33 donne $A = 0,60839$ on a :

$$l = 1 + \Phi A = 1,0060839$$

$$T'_m = \frac{p_1}{p} \cdot T_m = 0,25 \times 8 = 2,00$$

$$l \beta (T'_m - T_m) = 1,0060839 \times 0,000078 (2-8) = -0,000470$$

$$l'' = 1,0060839 - 0,000470 = 1,0060369$$

On a :

$$A' = 0,60369$$

et la table donne :

$$n' = -0,136$$

$$T''_m = \frac{1-2n'}{1-2n} T'_m = \frac{1+2 \times 0,136}{1+2 \times 0,12} \cdot 2, = 2,05$$

On voit que n_1 sera légèrement inférieur à $-0,136$, on peut prendre $n_1 = -0,134$.

Vérification.

Pour $n_1 = -0,134$ on a :

$$T_{m1} = 2,04$$

On a : $A_1 = 0,60370$.

$$l_1 = 1,0060370$$

$$l - l_1 = 1,0060839 - 1,0060370 = 0,000469$$

La variation élastique est :

$$l \beta (T_m - T_{m1}) = 1,0060839 \times 0,000078 \times (8-2,04) = 0,000468$$

TROISIÈME PARTIE

Considérations générales sur les lignes aériennes.

EXEMPLES DE CALCULS

Il y a naturellement tout intérêt, principalement quand on a affaire à des tensions très élevées, à espacer autant que possible les poteaux, tout isolateur présentant un point faible pour l'isolement.

Toutes choses égales d'ailleurs, la portée est proportionnelle à la racine carrée de la flèche et il faut donc que celle-ci soit aussi grande que possible.

On est arrêté dans l'augmentation de la flèche par les considérations suivantes :

1^o) La crainte de contact entre fils, entraînant des courts circuits.

2^o) L'augmentation de hauteur des poteaux ; en effet le point bas du conducteur doit être à une hauteur au-dessus du sol, fixée par les règlements administratifs, de sorte que plus la flèche est grande, plus la hauteur des poteaux doit être grande.

Pour éviter les chances de contact entre les fils, il faut augmenter leur écartement (on est du reste obligé, quand on emploie des tensions excessivement élevées, d'avoir un grand écartement des fils pour éviter les pertes d'énergie).

En Amérique, on admet comme règle que l'on n'a pas à craindre de contact entre fils, tant que la flèche ne dépasse pas le double de l'écartement entre fils, les appuis de ceux-ci étant placés au même niveau.

Quand les appuis sont à des niveaux différents, on peut certainement dépasser cette limite. La flèche étant la plus grande distance verticale F entre la droite joignant les appuis et le conducteur.

Les exemples suivants montrent que l'on peut même dépasser la limite admise en Amérique.

La ligne téléphonique Paris-Bordeaux, établie le long des voies des chemins de fer de l'Etat, est à double conducteur en cuivre de 4,3 mm de diamètre ; les fils sont espacés de 65 cm au maximum (un fil est porté par un isolateur, à courte tige, placé d'un côté du poteau et un isolateur

à longue tige de l'autre et à peu près au même niveau). La ligne est établie à l'extrémité supérieure des poteaux télégraphiques et les portées atteignent quelquefois 70 à 80 m, c'est-à-dire que la flèche est certainement supérieure à 2 m et cependant il n'y a pas de contacts entre fils, même dans les plaines de la Beauce, où règnent cependant des vents très violents.

On a cité dernièrement comme portée extraordinaire, celle de la ligne triphasée à la traversée du détroit de Carquinet. Les quatre conducteurs (dont un de rechange) ont une portée de 1328 m; ils sont écartés de 6 m et ont une flèche de 30 m; ils sont constitués chacun par un câble en acier de 19 torons de 11,875 mm de diamètre total.

Avec des fils d'un certain diamètre, bien posés, c'est-à-dire ayant des tensions bien égales, on n'a guère à craindre de contacts; la plupart des contacts ou mélanges de fils sont à redouter avec des fils de petit diamètre (2 mm et au-dessous) particulièrement quand à la pose la tension a été trop forte. Par le froid, la limite d'élasticité est alors dépassée, les fils prennent du mou et les mélanges se produisent.

L'augmentation de la hauteur des poteaux due tant à l'augmentation de la flèche, qu'à celle de l'écartement des fils, est à considérer au point de vue de la dépense de premier établissement, mais il y a une certaine compensation car le nombre des poteaux diminue.

L'augmentation de l'écartement des fils a pour conséquence une augmentation de l'impédance de la ligne, mais cette augmentation, comme le montrent les tables que nous donnons plus loin, est de peu d'importance. L'augmentation de la flèche a, par contre, un avantage important au point de vue de la sécurité de la ligne. Le conducteur est placé dans de bien meilleures conditions au point de vue de la résistance à l'action du froid et l'on sait que cette action est souvent plus à craindre que celle du vent pour laquelle on peut calculer très exactement la résistance mécanique du conducteur.

En effet, toutes choses égales d'ailleurs, la portée d'un fil est donnée par la relation :

$$a = c \sqrt{F}$$

On a donc :

$$a^2 = c^2 F$$

$$a = c^2 \frac{F}{a} = c^2 K$$

$$K = \frac{a}{c^2} = \frac{\sqrt{F}}{c}$$

On voit que pour un même effort par mètre courant et une même

tension initiale à la température donnée, la valeur de K (rapport de la flèche à la portée) augmente au fur et à mesure que la flèche et par conséquent la portée augmentent.

Or, on voit d'après les tables, qu'à partir d'une certaine valeur, plus K est grand, moindre est la diminution de flèche pour un refroidissement donné. Le rapport entre la flèche initiale et la flèche finale est d'autant plus grand que la valeur initiale de K est plus faible. La tension, après refroidissement est donc d'autant plus grande que K est plus petit.

Le tableau suivant donne pour des fils de cuivre, des fils de fer et des fils d'aluminium les valeurs de K_1 , et la tension par millimètre carré après un refroidissement de 40 degrés; la tension initiale étant de 4 kg. par mètre carré.

Flèche initiale	CUIVRE		FER		ALUMINIUM	
	flèche finale	tension finale	flèche finale	tension finale	flèche finale	tension finale
0,01	0,0040	10,00	0,0038	12,12	0,0046	8,70
0,02	0,0140	5,71	0,0151	5,30	0,0131	6,11
0,03	0,0258	4,66	0,0269	4,46	0,0245	4,90
0,04	0,0368	4,35	0,0377	4,24	0,0358	4,47
0,05	0,0474	4,22	0,0482	4,15	0,0466	4,30
0,06	0,0578	4,15	0,0585	4,10	0,0572	4,20

En résumé, l'augmentation de la flèche et par conséquent de la portée est donc à recommander tant que les dépenses résultant de l'augmentation de hauteur des poteaux ne dépassent pas une certaine limite; la ligne avec flèches un peu fortes est dans des meilleures conditions au point de vue de l'action du froid et au point de vue de l'isolation (par suite de la diminution du nombre des points d'appui) qu'une ligne avec flèche moindre, la tension étant la même dans les deux cas, pour la température ordinaire.

Au point de vue des mélanges, il vaut mieux placer les points d'attache des fils à des hauteurs différentes que de les placer au même niveau.

Ainsi il est évident que la disposition de montage indiquée sur la fig. 24, pour une ligne triphasée, sera au point de vue des mélanges meilleure que celle représentée sur la fig. 23, qui est employée quelquefois en

(*) Pour le cuivre on a pris . . . $\alpha = 0,000017$ $\beta = 0,000078$.

Pour le fer — . . . $\alpha = 0,000012$ $\beta = 0,000064$.

Pour l'aluminium — . . . $\alpha = 0,000023$ $\beta = 0,000148$.

Amérique. Pour une ligne double triphasée (à 6 fils) il vaudra mieux employer la disposition indiquée fig. 6 que celle indiquée fig. 7. Dans la disposition indiquée fig. 6, les fils voisins sont parcourus par des courants de même phase des deux circuits triphasés, de sorte qu'un contact entre les fils ne peut avoir aucun inconvénient.

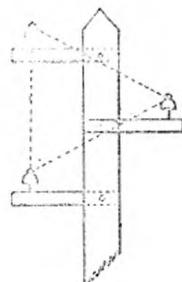


Fig. 4.

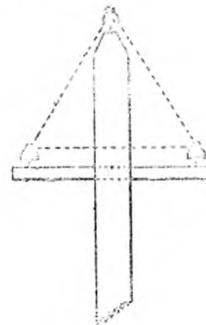


Fig. 5.

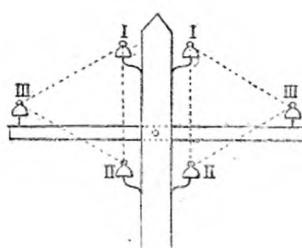


Fig. 6.

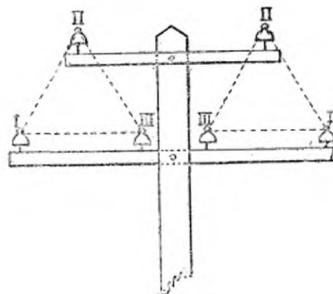


Fig. 7.

A la rencontre d'autres lignes électriques et à la traversée des chemins, on diminue ordinairement les portées (certains règlements administratifs le prescrivent même); il faut avoir soin, dans ce cas, de diminuer la tension de pose des fils en même temps.

En effet, si a et T sont la portée et la tension de pose, on a très approximativement :

$$K = \frac{F}{a} = \frac{p a}{8T}$$

On voit que si on diminue a en conservant la même valeur pour la tension T , on diminue K , de sorte que la ligne est alors plus exposée à l'action du froid. Il faut quand on diminue la portée diminuer la tension, si on la diminue proportionnellement à la diminution de a , on a alors K constant, et la ligne à faible portée sera alors toujours dans de meilleures

conditions au point de vue de la résistance que celle à grande portée.

Comme K reste constant, la flèche ($F = Ka$) diminue en même temps que la portée; on pourra en profiter pour diminuer l'écartement des fils et diminuer ainsi en même temps l'importance des filets de protection.

Il suffira pour éviter les contacts entre fils de prendre de part et d'autre de la portée minimum, des portées égales à la moyenne entre cette portée et la portée normale.

L'exemple suivant montre bien l'inconvénient qu'il y aurait à diminuer la portée, sans diminuer en même temps la tension de pose.

Pour une portée de 50 m. on a une tension de pose de 83,57 kg. à $+10^\circ$ par un temps calme. Le calcul montre que dans ces conditions, sous l'influence d'un froid de -20° , le fil étant recouvert de glace doublant son diamètre, et ne se brisant que sous l'effort d'un vent de 10 kg. de pression par m^2 ., la tension au point bas est de 6,28 kg. Un conducteur placé dans les mêmes conditions et posé avec la même tension pour une portée de 10 m. seulement sera soumis après refroidissement à un effort de 9,37 kg.

On devra donc admettre une tension de pose (variable suivant la température), qui sera proportionnelle à la portée ou *tension de pose par mètre de portée*.

Le chef monteur, suivant la température lors de la pose, n'aura qu'à multiplier la tension par mètre de portée par la portée en mètres, pour avoir la tension à donner.

Nous verrons dans les exemples comment on détermine la tension de pose aux diverses températures pour une portée donnée.

Quand on a à calculer une ligne aérienne, on procède ordinairement de la manière suivante :

On détermine la portée, pour que la tension admise par millimètre carré soit atteinte, lorsque la ligne est soumise à l'action du vent de pression maximum à la température minimum à laquelle ce vent peut régner⁽¹⁾. On vérifie ensuite si le conducteur à la température maximum, et sous l'action du vent, ne prend pas une flèche exagérée et si avec la surcharge admissible de glace, le conducteur peut résister à l'action du froid.

Dans des pays très abrités, on peut admettre comme pression maximum du vent 60 kg. (par mètre carré de section droite de surface cylindrique), dans un pays ordinaire on peut admettre 100 kg., dans

(1) Voir au sujet des efforts du vent la 4^e partie, p. 275 et suivantes.

de grandes plaines et sur certaines côtes on doit admettre jusqu'à 125 kg. Les grands vents ne règnent pas à une température très basse et on peut très bien admettre comme limite inférieure + 5°, dans nos climats. Les surcharges de glace et de neige sont très difficiles à déterminer, on sera dans de bonnes conditions en admettant comme maximum dans nos climats une surcharge de glace triplant le diamètre du fil, avec une densité 0,9 (ce qui double à peu près le poids du fil pour une ligne en cuivre). On peut admettre que cette glace est brisée par un vent de 10 m à la seconde, exerçant une pression de 7,2 kg. par mètre carré. Si d est le diamètre du fil, la pression du vent sera

$$0,003. d. 7,62 = 0,023 d.$$

Comme la flèche à la température maximum ne doit pas dépasser une valeur donnée, il faut pouvoir déterminer approximativement la flèche à la température minimum, à laquelle le vent peut régner ; on peut se servir pour cela de la table n° 22 (p 306) (1), donnant le rapport de la flèche à t° , à la flèche à $(t + t')^\circ$, en fonction de la flèche à $(t + t')^\circ$, et de la tension à t° pour un conducteur en cuivre.

Pour pouvoir employer cette table, on procède de la manière suivante ; on calcule d'abord la portée a' en admettant que l'on a la flèche F , à la température t° , on détermine $K = \frac{F}{a'}$, et on cherche dans la table le facteur par lequel il faut multiplier F . On calcule ensuite définitivement la portée en prenant comme flèche le produit de F par le facteur trouvé.

Dans le projet d'établissement d'une ligne, il faut choisir le métal à employer pour la confection de cette dernière, de manière à concilier autant que possible les conditions de bon isolement avec celles d'économie et dans chaque cas il y a à ce sujet une étude spéciale à faire.

Le tableau suivant donne les propriétés électriques et mécaniques de divers métaux (cuivre pur, bronzes et aluminium) que l'on peut employer dans la construction de lignes aériennes. Les données de ce tableau peuvent être considérées comme des moyennes. Dans chaque cas particulier, il faudra naturellement procéder à l'étude en adoptant les valeurs pour la conductibilité (à la température maximum à laquelle

(1) Cette table a été établie en résolvant l'équation

$$\frac{8}{3}K_1^2 - \frac{8}{3}K^2 = \alpha t_1' + \beta T_m \left(\frac{K}{K_1} - 1 \right)$$

qui est du second degré par rapport à K , K_1 étant donné.

pourra être soumis la ligne pendant son fonctionnement), et pour la résistance mécanique (qui varie souvent avec le diamètre du fil), garanties par les fournisseurs.

DÉSIGNATION	Conductibilité par rapport au cuivre pur	A résistance électrique égale			Résistance à la traction par mm ²	
		Section	Diamètre	Poids	Total	avec un coefficient de sécurité égal à $\frac{4}{6}$
Cuivre pur	100	1.00	1.00	1.00	28	4.67
Bronze A	97	1.03	1.02	1.03	45	7.50
B	85	1.18	1.08	1.18	50	8.33
C	80	1.25	1.13	1.25	56	9.33
D	60	1.67	1.29	1.67	65	10.83
E	42	2.38	1.54	2.38	75	12.50
Aluminium	60	1.67	1.29	0.49	20,5	3.42

La troisième colonne de ce tableau donne à égalité de résistance électrique la section et la quatrième le diamètre ; la section et le diamètre pour le cuivre pur étant pris comme unités.

La cinquième colonne donne le rapport des poids des conducteurs pour la même résistance électrique, le poids du cuivre pur étant pris pour unité (nous avons admis comme densité pour le cuivre et les bronzes 9 et pour l'aluminium 2,67).

Au moyen de ces données nous avons pu dresser le tableau de comparaison de la page suivante.

Dans la première partie, nous avons supposé que les calculs relatifs à la perte de puissance et à la perte de charge en ligne conduisent à l'emploi d'un fil de cuivre de 2 mm de diamètre : les calculs sont établis pour un écartement des fils de 0^m,80 environ, permettant une flèche de 1,60.

Nous avons supposé que le prix du cuivre est de 2 fr. 20 le kg., celui de l'aluminium de 4 francs le kg.; un poteau tout armé et posé revenant à 50 francs.

La ligne est supposée établie pour une ligne triphasée et nous avons

Tableau de comparaison pour l'emploi du cuivre, des bronzes et de l'aluminium.

DÉSIGNATION	Dia- mètres en mm	Poids du fil par mètre kg.	Tension admise par m m ²	Valeur de $8\lambda\frac{s}{P}$	Portées pour une flèche de 4 ^m ,60	Nombre de poteaux par km.	Poids du métal par k. m.	Prix de revient par k. m.			Coefficient maximum d'induc- tance	Rapport des résistances d'isolation
								Poteaux	Métal	Total		
Cuivre pur	2,0	0,028	4,67	465,51	27,30	33	92,4	1900	203	2103	1,01	1,00
Bronze A	2,1	0,031	5,50	783,60	34,30	30	102,3	1500	225	1725	1,01	1,26
— B	2,2	0,034	8,33	914,30	38,30	27	112,2	1350	247	1597	1,01	1,41
— C	2,3	0,037	9,33	1068,10	41,30	25	122,1	1250	269	1519	1,01	1,52
— D	2,6	0,047	12,83	1402,70	47,40	22	155,1	1100	341	1441	1,01	1,74
— E	3,1	0,067	12,50	1921,00	55,40	19	221,1	950	486	1436	1,01	2,04
Aluminium	2,6	0,014	3,42	447,06	26,70	39	46,2	1950	185	2035	1,01	0,96
Cuivre pur	6,0	0,252	4,67	1335,25	45,90	23	831,6	1265	1830	3095	1,20	1,00
Bronze A	6,1	0,260	5,50	2175,60	59,00	17	858,0	935	1888	2823	1,19	1,31
— B	6,5	0,295	8,33	2556,31	63,00	16	973,5	880	2142	3022	1,19	1,40
— C	6,8	0,323	9,33	2981,87	69,00	15	1035,9	825	2345	3170	1,19	1,53
— D	7,7	0,414	10,83	3884,07	78,80	13	1366,2	715	3006	3721	1,18	1,72
— E	9,2	0,592	12,50	5138,00	90,60	12	1953,6	660	4298	4958	1,17	1,98
Aluminium	7,7	0,125	3,42	1313,28	45,80	23	412,5	1265	1650	2915	1,18	1,00

admis, pour tenir compte de l'augmentation de longueur due aux flèches, que la longueur du fil est 1,1 fois celle de la ligne.

On voit que, tant au point de vue de l'isolement (par suite de la diminution du nombre des appuis) que de l'économie d'établissement, l'emploi du bronze E (42 0/0 de conductibilité du cuivre pur) est tout indiqué.

Dans la deuxième partie, nous avons supposé que le calcul conduisait à l'emploi d'un fil de cuivre pur de 6 mm de diamètre et qu'un poteau armé et posé revient à 53 francs, le bronze A (97 0/0 de conductibilité) donne dans ce cas le plus d'économie, mais pour une tension un peu élevée on n'hésitera pas à employer du bronze C (80 0/0 de conductibilité) donnant un meilleur isolement, l'augmentation du prix de revient étant insignifiante.

Les tableaux montrent que l'emploi de l'aluminium conduit à des portées, à des conditions d'isolement et à un prix de revient à peu près identique à ceux du cuivre pur. Mais l'aluminium, au point de vue de l'influence du refroidissement, est placé dans des conditions plus mauvaises que le cuivre et, en outre, les diamètres des fils étant plus grands, les poteaux doivent résister à un effort plus grand, à portée égale (Voir 4^e partie, p. 275 et suivantes). Ni l'un ni l'autre de ces métaux ne peut être employé avec avantage, même avec de gros diamètres, il est préférable, à tous les points de vue, d'employer les bronzes.

EXEMPLES DE CALCUL

a). *Ligne avec appuis au même niveau.*

Données. — Diamètre du fil de bronze : 5 mm.

Tension maximum admise par millimètre carré : = 8 kg.

Température minimum à laquelle règne le vent maximum de 125 kg. par m² de section droite : + 5°.

Température maximum : + 35°.

Température minimum : — 20°,

On admet une surcharge de glace égale au poids du fil et triplant son diamètre, cette glace étant cassée par un vent donnant une pression de 7,2 kg. par mètre carré.

Les fils sont espacés de 60 cm, la flèche maximum ne doit pas dépasser 1^m,20.

Le fil pèse 0,175 kg., la table n° 26 de la page 308 donne avec le vent de 125 kg.

$$p = 0,649 \quad \sqrt{\frac{s}{p}} = 5.50$$

Avec la surcharge de glace, on a comme poids du fil et de la surcharge :

$$2 \times 0,175 = 0,350 \text{ kg.}$$

et comme effort du vent :

$$3 \times 5 \times 0,0072 = 0,108 \text{ kg.}$$

l'effort résultant est

$$\sqrt{0,350^2 + 0,108^2} = 0,367 \text{ kg.}$$

En admettant une flèche de 1,20, on a comme portée :

$$a' = \sqrt{8 \lambda \frac{s}{p} F} = \sqrt{8 \cdot 8 \cdot F} \times 5,50 = 48,19$$

avec cette portée on a :

$$K = \frac{F}{a} = \frac{1,20}{48,19} = 0,025$$

L'augmentation de température est de $35 - 5 = 30^\circ$, et la table n° 22 de la page 306 nous donne pour 30° et $K_t = 0,025$:

$$\frac{K}{K_t} = \frac{0,80 + 0,90}{2} = 0,85$$

La flèche à admettre à 3° sera donc $1,20 \times 0,85 = 1,02$. La portée sera :

$$a = \sqrt{8 \lambda \frac{s}{p} F} = 8 \times 5,50 \sqrt{1,02} = 44,44$$

On prendra :

$$a = 44 \text{ m.}$$

La tension au point bas sera :

$$T = \frac{p a^2}{8 F} = \frac{0,649 \times 44^2}{8 \times 1,02} = 153,97 \text{ kg.}$$

La tension par mm^2 sera :

$$T_m = \frac{T}{s} = \frac{153,97}{19,64} = 7,84 \text{ kg.}$$

La tension aux appuis sera :

$$T_a = T + p F = 153,97 + 0,649 \times 1,02 = 154,63.$$

La tension par mm^2 aux appuis sera de 7,87 kg., inférieure à la limite fixée de 8 kg.

Vérification de la longueur de la flèche à la température maximum.

L'élévation de température est de $35 - 5 = 30^\circ$ et l'effort ne varie pas. On a :

$$K = \frac{1,02}{44} = 0,0232$$

La courbe de la fig. 11 (p. 318) nous donne pour une augmentation de 30° pour :

$$\begin{array}{lll} T_m = 6. & K = 0,0232. & K_1 - K = 0,0033. \\ T_m = 8 & K = 0,0232 & K_1 - K = 0,0032. \end{array}$$

Pour $T_m = 7,84$, nous prendrons $K_1 - K = 0,0032$.

$$K_1 = 0,0232 + 0,0032 = 0,0264 \text{ et on a } T_m = \frac{0,0232 \times 7,84}{0,0264} = 6,89$$

La flèche à 35° avec vent maximum sera :

$$44 \times 0,0264 = 1,1616 \text{ m.}$$

inférieure à la valeur maxima fixée 1,20 m.

La tension au point bas sera :

$$T = \frac{p a^2}{8 F} = 135,28 \text{ kg.}$$

On aura :

$$T_m = \frac{135,28}{19,64} = 6,89 \text{ (vérification)}$$

La tension aux appuis est 136,03 kg.

Action du froid. — Pour trouver la flèche et les tensions à -20° , sous l'action du froid et de la surcharge de glace, c'est-à-dire avec $p_1 = 0,361$ au lieu de $p = 0,649$. Nous chercherons d'abord la flèche à $+5^\circ$ avec $p_1 = 0,361$.

On a :

$$\begin{array}{llll} K = 0,0232 & T_m = 7,84 & p_1 = 0,361 & p = 0,649 \\ & & \frac{p_1}{p} = 0,566 & \end{array}$$

Pour $\frac{p_1}{p} = 0,40$, les courbes de la fig. 26 (p. 330) donnent :

$$\begin{array}{llll} \text{pour } K = 0,0232 & T_m = 6 & K - K_1 = 0,0023 \\ & T_m = 8 & K - K_1 = 0,0029 \end{array}$$

$$\text{pour } \frac{p_1}{p} = 0,40 \text{ et } T_m = 7,84 \text{ on aura } K - K_1 = 0,0029$$

Les courbes de la fig. 27 p. 330) donnent pour $\frac{p_1}{p} = ,060$ et $K = 0,0232$

$$T_m = 6 \quad K - K_1 = 0,0015$$

$$T_m = 8 \quad K - K_1 = 0,0019$$

pour $\frac{p_1}{p} = 0,60$ et $T_m = 7,84$ on aura $K - K_1 = 0,0019$

$$\text{pour } \frac{p_1}{p} = 0,566 \text{ on aura } 0,0029 - \frac{(0,0029 - 0,0019) 0,166}{0,20} = \\ 0,0029 - 0,0009 = 0,0020$$

On aura :

$$K_1 = 0,0232 - 0,0020 = 0,0212$$

$$T_{m1} = \frac{0,0232 \times 7,84}{0,0212} \times 0,566 = 4,85 \text{ kg.}$$

On détermine ensuite pour un abaissement de température de $+ 5^\circ$ à $- 20^\circ$, soit de 25° , la flèche, et la tension :

On a :

$$K = 0,0212 \quad T_{m1} = 4,85$$

On obtient au moyen des tables et des courbes :

$$K_1 = 0,0179 \quad T_{m1} = 5,74$$

La flèche à 20° sera :

$$44 \times 0,0179 = 0,7876 \text{ m}$$

La tension au point bas sera :

$$T = \frac{p a^2}{8 F} = \frac{0,367 \times 44^2}{8 \times 0,7876} = 112,77$$

$$T_m = \frac{112,77}{19,64} = 5,74 \text{ (vérification)}$$

La tension aux appuis est :

$$T_a = T + p F = 113,06 \text{ kg.}$$

La tension est de $5,76$ kg. par mm^2 . On voit donc que l'on est dans de bonnes conditions au point de vue du refroidissement.

On déterminera ensuite les tensions de pose à diverses températures. Pour déterminer la tension à $+ 3^\circ$, on aura comme effort $p_1 = 0,175$ (poids du fil) :

$$K = 0,0232 \quad T_m = 7,84$$

$$\frac{p_1}{p} = \frac{0,175}{0,649} = 0,27$$

On trouve :

$$K_1 = 0,0196 \quad T_m = 2,50$$

$A + 3^\circ$, on aura :

$$F = 44 \times 0,0196 = 0,8624 \text{ m}$$

$$T = \frac{p a^2}{8 F} = \frac{0,175 \times 44^2}{8 \times 0,8624} = 49,17$$

$$T_m = \frac{49,17}{19,64} = 2,50 \text{ (vérification)}$$

La tension aux appuis sera :

$$T_a = T + p F = 49,17 + 0,175 \times 0,8624 = 49,32$$

Ayant la flèche et la tension à $+3^\circ$, par temps calme, on déduira au moyen des tables la flèche et la tension au point bas pour des températures de $5 + 10$, $5 + 15$ degrés, etc., et on déterminera les tensions de pose ainsi que les tensions de pose par mètre de portée aux diverses températures.

CAS DES APPUIS A DES NIVEAUX DIFFÉRENTS

Dans le cas des lignes en pente, on a, si h est la différence de niveau entre les appuis :

$$h = \Phi a$$

Φ étant la pente.

$$c = n a$$

n et c étant les variables auxiliaires (positives quand le point bas tombe entre les appuis, négatives dans le cas contraire).

F la plus grande distance verticale entre la ligne joignant les appuis et la courbe (voir fig. 1 et 2 p. 232) est donnée par la relation :

$$F = \frac{h}{4(a-2c)} a = \frac{\Phi}{4(1-2n)} a.$$

On a en outre :

$$f = \frac{4aF - ah - 2ch}{4a} = \frac{c^2h}{a(a-2c)} = \frac{\Phi n^2}{1-2n} \cdot a.$$

La tension au point bas est :

$$T = \frac{p c^2}{2f} = p \cdot \frac{a-2c}{2h} = p \cdot \frac{1-2n}{2\Phi} \cdot a.$$

La tension à l'appui inférieur est :

$$T_l = T + p f$$

La tension à l'appui supérieur (tension maximum) est :

$$T_s = T \times p (f + h)$$

La distance maximum entre la ligne droite joignant les points d'appui et la courbe décrite par le conducteur (valeur que nous avons désignée par F), joue le même rôle que la flèche, au point de vue de contacts entre fils, c'est-à-dire que cette distance ne doit pas en général dépasser le double de l'écartement entre fils. Pour déterminer la valeur de F à prendre à t^o , pour que F à la température maximum ne dépasse pas la valeur indiquée, on commencera comme dans le cas des lignes avec appuis au même niveau, à calculer la portée a' pour la valeur donnée de F , puis on cherchera dans la table le facteur correspondant à la valeur de $K = \frac{F}{a'}$ (flèche à $\{t+t'\}^o$) et on prendra ensuite pour le calcul définitif de la portée la valeur admise pour F multipliée par ce facteur. On vérifiera naturellement ensuite si l'on est dans de bonnes conditions.

Soit par exemple à étudier la ligne avec le même conducteur que dans le cas précédent (p. 263), et les mêmes conditions d'efforts et de surcharges, la ligne ayant une pente $\Phi = 0,40$ par m.

On commence par déterminer a' pour une valeur de $F = 1,20$; on a :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\lambda s}{p} = 8 \times 30,26 \text{ (Table n}^{\circ} 26 \text{ page 308)} \\ a' &= 4 \cdot \frac{\sqrt{2 F (\delta - F)} + F \delta \Phi^2 - F \Phi}{2 + \Phi^2} = 45,18 \end{aligned}$$

On aura donc :

$$K = \frac{F}{a'} = \frac{1,20}{45,18} = 0,026$$

on prendra comme dans le cas précédent comme facteur 0,85.

La valeur de F , pour le calcul définitif de la portée, sera :

$$F = 0,85 \times 1,20 = 1,02$$

On aura :

$$a = 4 \cdot \frac{\sqrt{2 F (\delta - F)} + F \delta \Phi^2 - F \Phi}{2 + \Phi^2} = 41,92$$

On pourra adopter une portée de 42 m (au lieu de 44 m dans le cas de la ligne avec appuis au même niveau).

La variable c sera donnée par la relation :

$$c = \frac{4 F - a \Phi}{8 F} \quad a = -1,555 \times 42 = -65,310$$

$$\text{et } n = \frac{c}{a} = -1,555 \quad h = a \Phi = 42 \times 0,4 = 16,80$$

On aura :

$$f = \frac{4aF - h(a+2c)}{4a} = \frac{4 \times 42 \times 1,02 - 16,80(42 - 2 \times 65,31)}{4 \times 42} = 9,881$$

La tension au point bas sera :

$$T = \frac{pc^2}{2f} = 0,649 \cdot \frac{65,31^2}{2 \times 9,881} = 140,08$$

La tension par millimètre carré est :

$$T_m = \frac{140,08}{19,64} = 7,13$$

La tension à l'appui supérieur est :

$$T_{as} = T + p(f+h) = 140,08 + 0,649(9,881 + 16,80) = 157,40$$

La tension par millimètre carré à l'appui supérieur est :

$$T_{ma} = \frac{157,40}{19,64} = 8,02$$

Vérification de la flèche maximum.

On a à 5° avec vent maximum :

$$n = -1,555 \quad T_m = 7,13 \quad \Phi = 0,4$$

Dans la table n°35 (p. 316) des valeurs de A en fonction de n, on trouve en interpolant pour $n = -1,555$:

$$A = 0,50986$$

$$l = 1 + \Phi^2 A = 1 + 0,16 \times 0,50986 = 1,081578$$

Pour une augmentation de température de 30° , on aura :

$$l\beta(t_i - t) = 1,081578 \times 0,000017 \times 30 = 0,000552$$

$$l' = l + l\beta(t_i - t) = 1,081578 + 0,000552 = 1,082130$$

on a :

$$A' = \frac{1,082120 - 1}{0,16} = 0,51331$$

La table n° 35 donne :

$$n' = -1,127$$

$$T_{m'} = \frac{1-2n'}{1-2n} T_m = \frac{1+2 \times 1,27}{1+2 \times 1,555} 7,13 = 6,12$$

Variation élastique :

$$l'' \beta (T_m' - T_m) = 1,082130 \times 0,000078 \times (6,12 - 7,13) = -0,000085$$

$$l''' = l' + l'' \beta (T_m' - T_m) = 1,082130 - 0,000085 = 1,082045$$

$$A''' = \frac{1,082045 - 1,0000}{0,16} = 0,51278$$

La table donne $n''' = -1,316$; n_1 est compris entre $-1,27$ et $-1,316$, en continuant les approximations. On aura :

$$T_{m'''} = \frac{1 - 2n''}{1 - 2n} \cdot T_m = \frac{1 + 2 \times 1,316}{1 + 2 \times 1,555} \cdot 7,13 = 6,30$$

Variation élastique :

$$l''' \beta (T_{m'''} - T_m) = 1,082045 \times 0,000078 (6,30 - 6,12) = +0,000015$$

$$l'''' = l''' + l''' \beta (T_{m'''} - T_m) = 1,082045 + 0,000015 = 1,082060$$

$$A'''' = \frac{1,082060 - 1}{0,16} = 0,51287$$

La table donne $n'''' = -1,30$; n_1 est donc compris entre $-1,30$ et $-1,316$; on peut adopter $1,30$. On a :

$$T_{m''''} = \frac{1 - 2n_1}{1 - 2n} T_m = \frac{1 + 2 \times 1,30}{1 + 2 \times 1,555} 7,13 = 6,24$$

On a :

$$c = -1,30 \times 42 = -54,60 \quad h = 42 \times 0,4 = 16,80$$

$$F = \frac{h}{4(a-2c)} a = \frac{16,80}{4(42 + 2 \times 54,60)} 42 = 1,1667$$

On voit donc bien que F , la distance verticale maximum entre la droite qui joint les points d'attache et la courbe décrite par le fil, est inférieure à $1,20$, valeur maximum fixée.

$$f = \frac{4aF - h(a+2c)}{4a} = \frac{c^2h}{a(a-2c)} = \frac{54,60^2 \times 16,8}{42 + 2 \times 54,60} = 7,887$$

La tension au point bas sera :

$$T = \frac{p c^2}{2f} = \frac{0,649 \times 54,60^2}{2 \times 7,887} = 122,65 \text{ kg.}$$

La tension par millimètre carré sera :

$$T_m = \frac{122,65}{19,64} = 6,24 \text{ (vérification)}$$

La tension à l'appui supérieur sera :

$$T_s = T + p (f + h) = 122,65 + 0,649 (16,8 + 7,887) = 138,67 \text{ kg.}$$

(dans le cas des appuis de niveau on avait comme tension aux appuis dans les mêmes conditions, 136,03 kg.)

Action du froid.

A la température de $-\mathbf{5}^{\circ}$ avec $p = 0,649$

on a :

$$n = -1,555 \quad T_m = 7,13 \quad l = 1,081578$$

Pour étudier l'action du froid, nous chercherons d'abord les valeurs de n' et T'_m pour $p_1 = 0,361$, effort avec surcharge de neige et vent. Puis ensuite les valeurs pour un refroidissement de 25° .

$$T'_m = \frac{p_1}{p} T_m = \frac{0,361}{0,649} 7,13 = 3,97$$

$$l \beta (T'_m - T_m) = 1,081578 + 0,000078 (3,97 - 7,13) = -0,000267$$

$$l'' = l' + l \beta (T'_m - T_m) = 1,081578 - 0,000267 = 1,081311$$

$$A'' = \frac{1,081311 - 1}{0,16} = 0,50819$$

Dans la table on trouve :

$$n'' = -1,756$$

$$T''_m = \frac{1 - 2n''}{1 - 2n} T'_m = \frac{1 + 2 \times 1,756}{1 + 2 \times 1,555} 3,97 = 4,35 \text{ kg.}$$

Variation élastique :

$$\beta l'' (T''_m - T'_m) = 1,081311 \times 0,000078 \times (4,35 - 3,97) = 0,000032$$

$$l''' = l'' + \beta l'' (T''_m - T'_m) = 1,081311 + 0,000032 = 1,081343$$

$$A''' = \frac{0,081343}{0,16} = 0,50839$$

La table donne :

$$n'' = -1,730$$

Valeur que l'on peut adopter, on aura :

$$T'''_m = \frac{1 - 2n''}{1 - 2n'''}, T'''_m = 4,10$$

Nous aurons maintenant à déterminer la flèche pour un abaissement de température de 25° , l'effort (0,361 kg. par mètre) ne variant pas.

On a donc :

$$n = -1,73 \quad T_m = 4,30 \quad l = 1,081313$$

$$l \alpha (t_1 - t) = -1,081313 - 0,000017 \times 25 = -0,000459$$

$$l' = l + l \alpha (t_1 - t) = 1,081313 - 0,000459 = 1,080884$$

$$A' = \frac{0,080884}{0,16} = 0,50553. \quad \text{La table donne } n' = -2,245$$

$$T'_m = \frac{1-2n'}{1-2n} T_m = \frac{1+2 \times 2,242}{1+2 \times 1,73} \cdot 4,30 = 5,29$$

Variation élastique :

$$l'' \beta (T'_m - T_m) = 1,080884 \times 0,000078 (5,29 - 4,30) = 0,000083$$

$$l'' = l' + l'' \beta (T'_m - T_m) = 1,080884 + 0,000083 = 1,080967$$

$$A'' = \frac{l'' - 1}{\Phi^2} = \frac{0,080967}{0,16} = 0,50604$$

La table donne $n'' = -2,43$.

$$T''_m = \frac{1-2n''}{1-2n} T'_m = \frac{1+2 \times 2,13}{1+2 \times 1,73} 4,30 = 5,07$$

Variation élastique :

$$l'' \beta (T''_m - T'_m) = 1,080967 \times 0,000078 \times (5,07 - 5,29) = -0,000019$$

$$l''' = l'' + l'' \beta (T''_m - T'_m) = 1,080967 - 0,000019 = 1,080948$$

$$A''' = \frac{0,080948}{0,16} = 0,50593$$

La table donne $n''' = -2,15$, valeur que l'on peut adopter pour n_1 .

$$T_{m1} = \frac{1-2n_1}{1-2n} T_m = \frac{1+2 \times 2,15}{1+2 \times 1,73} 4,30 = 5,11$$

On aura :

$$c = n \alpha = -2,15 \times 42 = -90,30 \quad h = \Phi \alpha = 16,80$$

$$f = \frac{c^2 h}{\alpha (a - 2c)} = \frac{90,30^2 \times 16,80}{42 (42 + 2 \times 90,30)} = 15,09$$

La tension au point bas sera :

$$T = \frac{pc^2}{2f} = \frac{0,341 \times 90,30^2}{2 \times 15,09} = 100,45 \text{ kg.}$$

La tension par millimètre carré au point bas est :

$$T_m = \frac{T}{s} = \frac{100,45}{19,64} = 5,11 \text{ (vérification)}$$

La tension à l'appui inférieur est :

$$T_i = T + p f = 105,60 \text{ kg.}$$

La tension à l'appui supérieur (maximum) est :

$$T_s = T + p(f + h) = 100,45 + 0,341(15,09 + 16,80) = 115,82 \text{ kg.}$$

(Pour le cas des appuis au même niveau, la tension aux appuis dans les mêmes conditions est de 112,77 kg.)

Pour obtenir la tension de pose, à $+5^\circ$ par un temps calme, il faut déterminer la tension pour $p_i = 0,173$ poids du fil, au lieu de $p = 0,649$, la température restant la même.

On a :

$$\begin{aligned} n &= -1,555 & T_m &= 7,13 & p &= 0,649 \\ l &= 1,081578 \end{aligned}$$

Pour $p_i = 0,173$, on aura :

$$T'_m = \frac{p'}{p} T_m = \frac{0,175}{0,649} 7,13 = 1,92$$

Variation élastique :

$$\begin{aligned} l\beta(T'_m - T_m) &= 1,081578 \times 0,000078 \times (1,92 - 7,13) = -0,000437 \\ l + l\beta(T'_m - T_m) &= 1,081578 - 0,000437 = 1,081141 \\ A'' &= \frac{0,081141}{0,16} = 0,50713 \end{aligned}$$

La table donne $n'' = -1,92$.

$$T''_m = \frac{1 - 2n''}{1 - 2n} T_m = \frac{1 + 2 \times 1,92}{1 + 2 \times 1,555} 7,13 = 2,26$$

Variation élastique :

$$\begin{aligned} l''\beta(T''_m - T'_m) &= 1,081141 \times 0,000078 (2,26 - 1,92) = 0,000028 \\ l'' + l''\beta(T''_m - T_m) &= 1,081141 + 0,000028 = 1,081169 \\ A''' &= \frac{0,81169}{0,16} = 0,50730 \end{aligned}$$

La table donne $n''' = -1,89$. Valeur que l'on peut adopter.

On a :

$$\begin{aligned} n_i &= -1,89 & T_m &= \frac{1 - 2n_i}{1 - 2n} T'_m = \frac{1 + 2 \times 1,89}{1 + 2 \times 1,555} 7,13 = 2,23 \\ c &= n a = -1,89 \times 42 = -79,38 & h &= 16,80 \\ f &= \frac{c^2 h}{a(a - 2c)} = \frac{79,38^2 \times 16,8}{42(42 + 2 \times 79,38)} = 12,55 \end{aligned}$$

La tension au point bas est :

$$T = \frac{pc^2}{2f} = \frac{0,175 \times 79,38^2}{2 \times 12,55} = 43,81 \text{ kg.}$$

La tension par millimètre carré est :

$$T_m = \frac{43,81}{19,64} = 2,23 \text{ (vérification)}$$

La tension maximum (à l'appui supérieur) est :

$$T_s = T + p(f+h) = 43,81 + 0,175(12,55 + 16,80) = 48,95 \text{ kg.}$$

(Pour le cas des appuis de niveau, on a comme tension aux appuis à $\pm 5^\circ$ par un temps calme 49,32 kg.).

Les tensions de pose par temps calme, à d'autres températures, se calculent ensuite en cherchant les valeurs de n , de T et T_s pour les augmentations de température correspondantes.

QUATRIÈME PARTIE

Résistance des poteaux.

Quand on a déterminé, d'après les considérations qui précèdent, la portée que l'on peut donner aux conducteurs, il faut naturellement examiner la résistance des poteaux.

Dans le cas des poteaux métalliques, on peut toujours leur donner des dimensions telles que leur résistance soit suffisante ; pour des poteaux en bois des dimensions ordinaires, il faut vérifier si la résistance est suffisante.

Dans une communication faite à la société internationale des électriques (1) au sujet de notre note relative au calcul des portées, M. Brylinski a émis l'avis que la portée est, dans le cas d'emploi de poteaux en bois de dimensions courantes, plutôt limitée par la résistance des poteaux que par celles des conducteurs. Ceci est vrai pour le cas de lignes télégraphiques avec un grand nombre de conducteurs, mais pour le cas de lignes industrielles avec un nombre réduit de fils (dans les exemples que nous avons donnés, nous avons admis des lignes à trois fils) la portée est toujours limitée par la résistance des conducteurs.

Dans sa très intéressante communication, M. Brylinski a établi :

1^o Que la pression du vent sur une surface plane, perpendiculaire à sa direction, est proportionnelle au carré de la vitesse du vent ; le terme de proportionnalité comprenant un coefficient qui descend de 3 pour les grandes surfaces, à 1,86 pour les petites surfaces.

La pression du vent sur de petites surfaces, telles que celles des poteaux et des fils est donc $\frac{1,86}{3} = 0,62$ de celle sur une grande surface.

2^o Que sur une surface cylindrique, la pression du vent n'est que les 0,37 de celle qui serait exercée sur la surface de projection du cylindre.

(1) *Bulletin* de février 1902.

En France, l'administration des postes et télégraphes prévoit que la pression maximum du vent (mesurée sur une grande surface) est de 280 kg. par mètre carré. La pression exercée sur des fils ou des poteaux de section circulaire est donc au maximum de :

$$0,57 \times 0,52 \times 280 = 98,95 \text{ kg par m}^2 \text{ de section droite,}$$

soit 100 kg. par m² de section droite. (1)

Les règlements adoptés par « l'Union des électro-techniciens allemands », admettent une pression maximum du vent de 125 kg. par m². En supposant que cette pression se rapporte à une surface de faibles dimensions, la pression par m² de section droite des poteaux et des fils, est au maximum de $0,57 \times 125 = 71,25 \text{ kg.}$

Ces règlements portent, en outre, que les portées et les flèches doivent être calculées de telle sorte que les supports en bois travaillent avec un coefficient de sécurité de 10, ceux en fer de 5, et les conducteurs à — 20° C. avec un coefficient de 5.

M. Brylinski déduit de considérations pratiques, et de l'examen de lignes installées et résistant bien à l'action du vent, que l'on peut admettre comme pression maximum du vent sur une surface de grandes dimensions 170 kg. par mètre carré, ce qui donne pour les poteaux et fils, une pression de 60 kg. environ par mètre carré de section droite. Il établit que pour qu'un poteau résiste bien on doit avoir :

$$0,06 a. \Sigma d \leq 144.$$

Dans cette relation, a est la portée en mètres et Σd la somme des diamètres des fils portés par le poteau, exprimés en millimètres.

En appliquant cette relation, aux lignes industrielles, comportant, 2, 3, 4 ou 6 fils suivant les cas, on obtient comme portées admissibles (en mètres) les nombres indiqués dans le tableau ci-après.

Ce tableau permet de vérifier rapidement si la portée choisie d'après les considérations précédentes n'est pas trop forte. A ce sujet, il y a lieu de remarquer que la portée déduite des considérations d'économie d'établissement diminue quand le nombre de fils augmente.

Les exemples donnés se rapportent à des lignes à trois fils pour des

(1) Nous pensons cependant, que pour les calculs relatifs à la résistance des fils, quand on admet que le vent ne règne pas à une température inférieure à 0° C., par suite de l'influence du froid et des surcharges de glace et de neige, on fera bien d'admettre une pression de 125 kg. par mètre carré de section droite.

lignes à six fils, on aurait des portées moindres, car le prix des poteaux en bois augmente très peu (prix des isolateurs à installer en plus).

DIAMÈTRE des fils en mm.	NOMBRE DE FILS			
	2	3	4	6
3	400	270	200	133
4	300	200	150	100
5	240	160	120	80
6	200	133	100	66
7	170	114	85	57
8	150	100	75	50
9	133	89	66	44
10	120	80	60	40

Il y a lieu de remarquer que la relation donnée par M. Brylinski ne tient pas compte de la hauteur des poteaux et des fils.

Si l'on veut procéder à une vérification complète de la résistance des poteaux, on peut opérer de la manière suivante :

Le poteau peut être considéré comme une pièce encastrée dans le sol soumise aux moments fléchissants suivants :

1^o Au moment dû à l'effort du vent sur le poteau lui-même :

Si H est la hauteur du poteau en bois au-dessus du sol en mètres, D_1 le diamètre au niveau du sol, D_2 le diamètre au sommet. D_1 et D_2 étant exprimés en centimètres et P l'effort du vent par mètre carré de section droite en kilogrammes.

La pression du vent sur le poteau est :
$$\frac{D_1 + D_2}{200} H P. \text{ kg.}$$

Le point d'application est un peu au-dessous du milieu de la partie libre du poteau (puisque D_1 est plus grand que D_2) de sorte qu'en prenant comme bras de levier $\frac{H}{2}$, le couple ainsi déterminé est un peu plus grand que le couple réel. On peut donc admettre que le couple est :

$$m_p = \frac{D_1 + D_2}{400} H^2 P. \text{ kgm}$$

2^o Au moment dû à l'action du vent sur les fils :

Si L est la longueur du fil, correspondant à la portée a ⁽¹⁾, l'effort

(1) Si les portées sont inégales, a représente la moyenne de deux portées.

du vent sur un fil de d millimètres de diamètre est $0,001 P L d$.

Comme L diffère peu de a , on peut admettre que l'effort est $0,001 P d a$ kilogrammes. Si le point d'attache du fil est à la hauteur de h mètres au-dessus du sol, le couple est pour un fil $0,001 P d h a$.

Le couple total dû à l'action du vent sur les fils sera :

$$m_v = 0,001 P a \Sigma d h \quad \text{kgm}$$

Le poids du fil donne lieu à un couple, qui, si le poids par mètre courant est p , et la distance du point d'attache à l'axe du poteau est de λ mètres, est donné par la relation $p.a.\lambda$, mais il est facile de voir que ce couple est très faible, et que du reste, les couples étant de sens contraires, s'annulent, en partie tout ou moins, car les fils sont disposés de part et d'autre du poteau. On peut donc négliger le moment fléchissant dû au poids des fils.

La section du poteau étant circulaire, si R est la tension par millimètre carré, de la fibre la plus tendue, et M le moment fléchissant, on a :

$$R = \frac{v M}{I} = \frac{32 M}{\pi D_1^3} = \frac{10 M}{D_1^3}$$

D_1 étant exprimé en cm. et M en kgm.

Pour des poteaux en sapin, R résistance à la traction par millimètre carré est comprise entre 7,5 et 11 kg. en prenant un coefficient de sécurité de $\frac{1}{10}$, on peut prendre pour R la valeur 0,75⁽¹⁾ et la valeur maximum admissible pour M sera donnée par la relation :

$$M = 0,075 D_1^3$$

Si m_p est le moment fléchissant dû à l'action du vent sur le poteau le couple, dû à l'action du vent sur les fils pourra avoir au maximum la valeur :

$$m_v = 0,075 D_1^3 - m_p.$$

Le tableau suivant, donne pour des poteaux d'une hauteur totale de 7 à 12 m enfouis dans le sol de 0,2 de leur hauteur, les diamètres (d'après

(1) En Angleterre, l'administration des postes et télégraphes a procédé à des essais sur la résistance des poteaux en bois. Il résulte de ces essais, que le moment auquel peut résister le poteau est exprimé par la relation $M = 0,537 D_1^3$, on voit donc, qu'en adoptant la valeur $M = 0,075 D_1^3$, on est dans de bonnes conditions de sécurité.

les cahiers des charges, c'est-à-dire les diamètres des bois que l'on trouve dans le commerce), la valeur du couple dû au vent, pour une pression de 60 kg. par m^2 de section droite, la valeur de $0,1 RD_i^3$, la valeur de $0,075D_i^3$ (pour $R=0,75$), ainsi que la valeur que peut atteindre le couple dû à l'action du vent sur les fils.

HAUTEUR des poteaux	DIAMÈTRE		Surface soumise à l'action du vent m^2	M O M E N T fléchissant en K. g. m. pour un vent de		VALEUR		Moment fléchissant maximum pour l'action du vent sur les fils	
	en c. m.	au niveau du sol		P kg au m^2	60 kg. au m^2	de			
totale	au-dessus du sol								
7	5,60	16	12	0,784	2,20 P	132	409,6 R	307	175
8	6,40	17	13	0,960	3,07 P	184	491,3 R	368	184
9	7,20	19	14	1,188	4,28 P	257	685,9 R	514	257
10	8,00	21	15	1,440	5,76 P	346	926,1 R	695	349
11	8,80	23	16	1,716	7,55 P	453	1216,7 R	912	459
12	9,60	25	17	2,016	9,68 P	581	1562,5 R	1172	591

Etudions par exemple la résistance d'un poteau de 11 m de hauteur supportant 3 fils de 5 mm. de diamètre avec portée de 60 m, les flèches étant de 2^m,20 et les fils disposés comme il est indiqué sur la fig. 4 (p. 258) aux sommets d'un triangle de 1^m,15 de côté. Le point le plus bas d'un fil devant être à 5^m,50 au-dessus du sol.

D'après les données du tableau ci-dessus, le moment dû à l'action du vent (de 60 kg. par mètre carré de section droite de surface cylindrique) ne doit pas dépasser 459 kgm.

Le point d'attache du fil le plus bas est de $5,50 + 2,20 = 7,70$ m au-dessus du sol ; celui du deuxième fil de $7,70 + \frac{1,15}{2} = 8,28$; celui du troisième fil de $7,70 + 1,15 = 8,85$. Le couple dû à l'action du vent sur les fils sera :

$$m_v = 0,001 P \alpha \cdot \Sigma d h = 0,001 P \cdot ad \Sigma h$$

$$m_v = 0,001 \times 60 \times 60 \times 5 (7,70 + 8,28 + 8,85) = 446,9 \text{ kgm}$$

On voit que l'on est dans de bonnes conditions ; surtout avec un facteur de sécurité de 10.

Il est facile de voir que l'action du couple dû au poids de fils est absolument négligeable, en effet, le poids d'un fil de cuivre de 5 mm de diamètre pour une portée de 60 m est de $60 \times 0,125 = 7,50$ kg. Comme d'un côté du poteau on a deux fils et de l'autre un fil, le couple résultant est dû au poids d'un seul fil. La distance du point d'attache à l'axe du poteau étant de 0^m.50, le couple est $7,50 \times 0,50 = 3,75$ kg. c'est-à-dire absolument négligeable.

Il est bon de pouvoir vérifier si le poteau peut résister à l'action du vent administratif de 280 kg., c'est-à-dire exerçant sur la section droite d'un poteau ou d'un fil une pression de 100 kg. par m².

La tension R par mm² de la fibre la plus fatiguée du poteau est donnée par la relation :

$$R = \frac{10}{D_i^3} (m_p + m_f)$$

Le tableau suivant donne, pour des poteaux de mêmes dimensions (dimensions du commerce) que ceux du tableau précédent, le moment dû à l'action du vent administratif (100 kg. par m² de section droite)

sur le poteau et la valeur $\frac{10}{D_i^3}$.

Hauteur totale du poteau	Moment dû au vent de 100 kg.	Valeur de $\frac{10}{D_i^3}$	Hauteur totale du poteau	Moment dû au vent de 100 kg.	Valeur de $\frac{10}{D_i^3}$
m .	kgm.		m .	kgm.	
7	220	0,002441	10	576	0,001080
8	307	0,002035	11	755	0,000822
9	428	0,001458	12	968	0,000640

Ayant déterminé le moment dû à l'action du vent de 100 kg. sur les fils, on calculera R.

R ne doit en tout cas jamais dépasser la valeur de 2 kg., limite d'élasticité du bois.

Dans l'exemple pris précédemment, on a avec un vent de 100 kg.

$$m_p = 0,001 P \cdot ad \Sigma h = 0,001 \times 100 \times 60 \times 5 (7,70 + 8,28 + 8,85) = 744,9 \text{ kgm}$$

D'après le tableau, pour un poteau de 11 m., $m_p = 775$. On a donc :

$$R = \frac{10}{D_1^3} (m_p + m_v) = 0,000822 (744,9 + 775) = 1,23 \text{ kg.}$$

On voit donc que la tension n'atteint pas 2 kg. par mm^2 , c'est-à-dire que le poteau pourra résister.

Dans le cas où la ligne comporte un grand nombre de fils, on emploie soit des poteaux en bois ayant des diamètres plus grands que ceux que l'on trouve couramment dans le commerce, soit des poteaux métalliques, comme on l'a fait dans les transports d'énergie à haute tension, de la Mescla à Nice, de Champ et Avignonet (Isère), de Paderno à Milan, de Vizzola, de Johannesburg, (Transvaal) (voir page 218) etc., et dans ce cas, comme les poteaux sont d'un prix très élevé, on est amené à adopter des portées aussi grandes que possible.

CINQUIÈME PARTIE

Résistance électrique et échauffement des conducteurs.

La table 5 (p. 297) donne les rapports entre les diverses unités de résistance employées.

Si R est la résistivité d'un métal exprimée en microhm-centimètres, on a :

Résistance en ohms d'un fil de 1 m de longueur, 1 mm ² de section	$r = 0,01 R$
— — — — 1 mm de diamètre	$r = 0,012732 R$
— — de 1 km.	— 1 mm ² de section $r = 10 R$
— — de 1 km.	— 1 mm de diamètre $r = 12,732 R$

Si C est la conductibilité en megamho-centimètres ($C = \frac{1}{R}$), on a :

Conductance en mhos d'un fil de 1 m de longueur 1 mm ² de section	$c = 100 C$
— — — — 1 mm de diamètre	$c = 78,54 C$
— — de 1 km.	— 1 mm ² de section $c = 0,01 C$
— — de 1 km.	— 1 mm de diamètre $c = 0,00785 C$

Le tableau suivant donne la résistivité en microhm-cm. et la conductibilité en megamho-cm. à 0° des cuivres employés ordinairement comme étalons, du fer et de l'aluminium.

DÉSIGNATION	Résistivité en microhm centimètre	Conductibilité en megamho centimètre	Conductibilité en % du cuivre pur
Cuivre pur	4,561	0,6406	100
Echantillon Mathiessen	4,593	0,6277	98
Cuivre normal	1,667	0,60	93,7
Aluminium recuit (moyenne)	2,889	0,3461	54
Fer recuit (moyenne)	9,636	0,4038	46

La table 6 (p. 297 et 298) donne pour des fils de diamètre compris entre 0,1 et 10 mm, le poids en grammes par mètre courant ou en kilogrammes par kilomètre pour le cuivre, le fer et l'aluminium. (On a admis comme densités, pour le cuivre 8,9, pour le fer 7,73 et pour l'aluminium 2,67). Elle donne en outre la résistance en ohms et la conductance en mhos par kilomètre du métal de résistivité (et de conductibilité) égale à l'unité, et du cuivre normal.

Pour avoir la résistance ou la conductance pour un métal donné, il suffira de multiplier la valeur indiquée pour le métal de résistivité un, par la résistivité ou la conductibilité de ce métal.

La résistance du cuivre normal correspond à peu près à la résistance du cuivre pur à 15°. On peut donc adopter les valeurs indiquées dans la table, pour déterminer les sections des fils de cuivre.

On donne souvent pour définir un métal sa conductibilité en 0/0 de celle d'un étalon; la table n° 7 (p. 299) donne le facteur par lequel il faut multiplier la résistivité de l'étalon pour avoir la résistivité de ce métal.

La table 8 (p. 299) donne la résistivité des bronzes, leur conductibilité en 0/0 de celle du cuivre pur, ou de l'échantillon Mathiessen, ou du cuivre normal étant donnée.

Influence de la variation de température.

Pour des températures t variant de 0 à 100° centigrades, la résistance des métaux peut être exprimée par la relation :

$$r = r_0 (1 + \alpha t)$$

r_0 étant la résistance à zéro.

Les valeurs de α sont :

Pour l'aluminium.	0,00388
— cuivre (environ)	0,00400
— fer	0,00490

La table n° 9 (p. 300) donne pour des valeurs de α , comprises entre 0,0038 et 0,0050 et pour diverses élévations de température, le facteur par lequel il faut multiplier la conductance, et la table n° 10 (p. 300) le facteur par lequel il faut multiplier la résistance.

Résistance à +15° d'un fil de 1 km. de longueur et de $s \cdot \text{mm}^2$ de section.

Cuivre pur.	16,55 $\frac{1}{s}$
Échantillon Mathiessen.	16,89 $\frac{1}{s}$
Aluminium recuit.	30,57 $\frac{1}{s}$
Fer recuit	103,49 $\frac{1}{s}$

Résistance à +15° d'un fil de 1 km. de longueur et de d mm de diamètre.

Cuivre pur.	$21,07 \frac{1}{d^2}$
Echantillon Mathiessen.	$21,50 \frac{1}{d^2}$
Aluminium recuit.	$38,92 \frac{1}{d^2}$
Fer recuit.	$136,76 \frac{1}{d^2}$

Conducteurs câblés.

Quand les fils sont tordus en câbles, la longueur de chaque brin est plus longue que celle du conducteur, de sorte que à section égale la résistance est plus grande que pour un fil. Si r est la résistance déterminée pour le fil, la résistance r' pour un câble de même longueur est :

Câble à un seul toron $r' = 1,05 r$

Câble à plusieurs torons $r' = 1,10 r$

Câble à grelin $r' = 1,16 r$

Echauffement des conducteurs aériens.

Les essais de M. Kennely ont porté sur l'échauffement des conducteurs en cuivre d'une résistivité égale à celle de l'échantillon Mathiessen. La colonne 100 de la table n° 11 (p. 300) donne pour des fils de différents diamètres, l'intensité en ampères que le courant peut atteindre sans que la température du fil dépasse de 20° C. celle de l'air ambiant.

Pour un bronze, si K est le rapport de sa conductibilité à celle de l'échantillon Mathiessen, on peut admettre que l'intensité du courant I_t , doit être

$$I_t = \sqrt{K} \cdot I$$

I étant l'intensité du courant pour l'échantillon Mathiessen.

En adoptant la même relation pour les fils de fer et d'aluminium, dont le pouvoir émissif est plus fort que pour le cuivre, on sera sûr que l'élévation de température n'atteindra pas 20° C.

Pour les conducteurs câblés, on pourra également employer une section correspondante au diamètre indiqué pour les fils, car si d'une part, à section égale la résistance pour une longueur déterminée est plus forte que pour le fil, d'autre part la surface de refroidissement est aussi plus grande.

La table donne les intensités admissibles, pour des métaux ayant une conductibilité de 80, 60,... 16 0/0 de celle de l'échantillon Mathiessen. 60 0/0 correspond à peu près à l'aluminium et 16 0/0 au fer.

*Détermination de la section des conducteurs
pour une chute de tension donnée.*

La section s d'un conducteur, pour une chute de tension donnée, est :

$$s = \frac{\rho l i}{e}$$

ρ étant la résistance d'un fil du métal ayant une longueur égale à l'unité et une section égale à l'unité, l la longueur, i l'intensité du courant et e la chute de tension.

Dans le cas de courants triphasés, la chute de tension est mesurée entre deux phases (tension composée), tandis que l'intensité se mesure le plus ordinairement dans une phase. La relation donne la chute de tension simple (ou tension étoilée), pour avoir la chute de tension composée, il faut multiplier par $\sqrt{3}$.

La table n° 12 (p. 301) donne la tension simple dans un circuit triphasé en fonction de la tension composée.

La table n° 13 (p. 301) donne la section en mm^2 d'un conducteur de 1 km. de longueur parcouru par un courant de un ampère pour une chute de tension donnée en volts, pour un métal de conductibilité égale à l'unité et pour le cuivre normal. Dans le cas de courants triphasés, la chute indiquée est la chute de tension composée, l'intensité étant de un ampère dans chaque phase.

Pour avoir la section, pour un métal de résistivité r , une longueur de l km et une intensité de i ampères, il suffit de multiplier le nombre indiqué sur la table pour le métal de résistivité égale à l'unité par $r \cdot l \cdot i$.

Pour le cas du courant continu et du courant alternatif monophasé, l est la longueur du conducteur aller et retour ; pour le cas du courant triphasé, l est la longueur simple.

La table n° 13 s'emploie pour le cas de lignes à haute tension, la table n° 14 (p. 302) peut s'employer pour le cas de distributions à basse tension, l'unité de longueur choisie étant alors le mètre.

Dans le cas du courant alternatif simple, si I est l'intensité du courant en ampères, $\cos \varphi$ le facteur de puissance, E la tension en volts, la puissance en kilowatts est :

$$W = 0,001 E I \cos \varphi$$

On a donc :

$$I = \frac{1,000 \text{ W}}{E \cos \varphi}.$$

La table n° 15 (p. 303) donne la valeur de l'intensité du courant en ampères en fonction de la tension pour une puissance de 1 kilowatt et des facteurs de puissance 1,00, 0,93... 0,70. Pour avoir l'intensité pour une puissance donnée en kilowatts, il suffit de multiplier le nombre indiqué par la table par le nombre de kilowatts. Les nombres correspondants au facteur de puissance 1, donnent également l'intensité dans le cas du courant continu.

La table n° 16 (p. 304) s'applique aux courants triphasés.

Si E est la tension composée (entre deux phases), I l'intensité dans une phase, $\cos \varphi$ le facteur de puissance, la puissance en kilowatts est :

$$W = 0,001 \sqrt{3} \cdot E I \cos \varphi,$$

on a :

$$I = \frac{1,000 \text{ W}}{\sqrt{3} E \cos \varphi}$$

En multipliant le nombre correspondant donné par la table par la puissance en kilowatts, on aura l'intensité en ampères dans chaque phase.

SIXIÈME PARTIE

Détermination de l'inductance des lignes aériennes.

L'inductance de la ligne dans le cas des courants alternatifs détermine une chute de tension, dont on doit pouvoir tenir compte dans un projet.

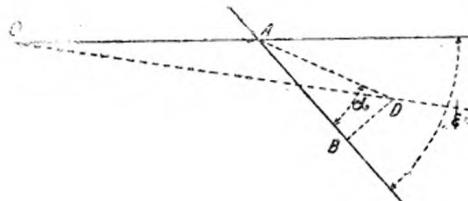


Fig. 8.

Si (fig. 8) OA représente la tension à l'extrémité de la ligne, AB est la direction du courant I faisant un angle φ avec la tension, $BD = \omega L I$, L étant le coefficient d'inductance de la ligne, $AB = rI$, r étant la résistance de la ligne, la tension à l'origine sera OD. On a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L I}{r I} = \frac{\omega L}{r}$$

La chute de tension en ligne sera $OD - OA$;

On voit que l'on a très approximativement

$$OD - OA = \frac{r I \cos(\varphi - \alpha)}{\cos \alpha}$$

La perte proportionnelle de tension en ligne, ou facteur d'impédance ou de réactance sera :

$$\frac{OD - OA}{r I} = \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\cos \alpha}$$

Quand on connaît α , on peut déterminer soit graphiquement, soit par le calcul la valeur du facteur d'impédance. La valeur maximum de ce facteur est $\frac{1}{\cos \alpha}$.

Monsieur Blondel dans l'*Eclairage électrique de 1894*, a donné des formules et des tables, permettant de déterminer le coefficient d'induc-

tion d'une ligne aérienne. L'induction mutuelle est donnée au centimètre en unités C. G. S. par la relation :

$$M = -2 \log_{10} d = -4,605 \log_{10} d.$$

d étant la distance entre fils en cm.

La self-induction en unités C. G. S par centimètre est donnée par la relation

$$L' = \frac{1}{2} - 2 \log_{10} a$$

a étant le rayon du fil en $1/10$ de mm.

L'induction totale au centimètre est pour un fil d'une ligne triphasée avec les trois fils équilatéraux :

$$L = L' - M.$$

Pour une ligne à courant alternatif simple, on a :

$$L = 2(L' - M)$$

Les tables n°s 17 et 18 (p. 303) donnent les valeurs de $2\pi L'$ et de $-2\pi M$ en unités pratiques au kilomètre, pour avoir les valeurs de $\omega L'$ et de ωM , il suffit de multiplier par F , la fréquence du courant, la valeur indiquée dans la table correspondante.

Pour avoir la valeur de ωL , il suffira d'additionner les valeurs données par les deux tables et de multiplier par la fréquence F .

On a aussi bien dans le cas d'une ligne à courant alternatif simple que dans le cas d'une ligne à courants triphasés :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L}{r}$$

r étant la résistance kilométrique du conducteur. Si s est la section de ce dernier en mm^2 , et ρ la résistance d'un km. de fil de un mm^2 de section du métal employé, on a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L}{r} = 2\pi L s \frac{F}{\rho}.$$

La table n° 20 (p. 306) donne les valeurs de $2\pi L s$, pour des diamètres de fil allant de 2 à 10 mm et des écartements de 40 à 400 cm.

Pour avoir la valeur du tang α , il suffit de multiplier la valeur trouvée dans la table par la fréquence F et de diviser par la résistance en ohms d'un fil de 1 km. de longueur et de 1 mm^2 de section du métal donné (ou de multiplier par la conductance d'un fil de 1 km. de longueur et 1 mm^2 de section).

SEPTIÈME PARTIE

Transformation des mesures anglaises en mesures métriques.

Les valeurs adoptées pour les équivalents des mesures anglaises dans le système métrique, sont celles indiquées par le bureau des poids et mesures des Etats-Unis en 1890.

Les tableaux suivants donnent le coefficient par lequel il faut multiplier la valeur en unités, indiquées dans la ligne horizontale pour avoir la valeur en unités indiquées dans la colonne verticale (quelques-uns de ces tableaux ont été empruntés à l'excellent ouvrage « Wire in electrical construction de MM. John A. Roebling sons and C° de Trenton. N.-J. Etats-Unis. »)

Mesures de longueurs

	Inch (pouce)	Foot (pied)	Yard	Mètre	Chain	Kilomètre	Mile	Knot (nœud)
Inch (pouce)	4	0,0833	0,02778	0,0254	0,00126	0,0000234	0,0000158	0,0000137
Foot (pied).	42	4	0,33333	0,304801	0,04545	0,000305	0,000189	0,0001645
Yard.....	36	3	1	0,914402	0,04545	0,000914	0,000568	0,0004934
Mètre	39,37	3,28083	1,09361	1	0,04971	0,001	0,000624	0,00054
Chain	792	66	22	20,4169	1	0,0201169	0,0123	0,010855
Kilomètre..	39 370	3280,83	1093,61	4000	49,740	4	0,62137	0,53961
Mile.....	63 360	5280	1760	1609,35	80	1,60935	1	0,86842
Knot (nœud)	72 960	6080	2026,66	1853,19	92,442	1,85319	1,4513	1
1 mil = 0,001 inch (pouce). 1 inch (pouce) = 1000 mils.								

Mesures de surfaces.

	Circular mil	Square mil	Millimètre carré	Centimètre carré	Square inch.	Square foot	Square yard	mètre carré
Circular mil....	4	0,7854	0,0005067	»	»	»	»	»
Square- mil....	4,2732	4	0,000643	0,0000064	0,000001	»	»	»
Millimètre carré...	1973,50	4 550,40	4	0,01	0,00153	»	»	»
Gentimètre carré. .	497 350	455 040	100	4	0,453	0,001077	0,00012	0,0001
Square inch....	1 273 239	1 000 000	645,20	6,452	4	0,00694	0,00077	0,000645
Square foot....	»	»	92 900	929	144	4	0,44444	0,0929
Square yard...	»	»	836 400	8 361	4 296	9	4	0,836
Mètre carré...	»	»	1 000 000	10 000	4550,016	10,764	1,496	1

1 circular mil = surface d'un cercle de 1 mil (0,001 inch) de diamètre

Mesures de volume.

	Centimètre cube	Cubic inch. (pouce cube)	Décimètre cube (litre)	Gallon	Cubic foot (pied cube)	Cubic yard	Mètre cube
Centimètre cube...	1	0,064	0,001	0,000264	0,000035	0,0000043	0,000004
Cubic inch. Décimètre cube...	46,387	4	0,016387	0,00433	0,000578	0,0000214	0,000016
	4 000	61,023	4	0,26447	0,035314	0,004308	0,004000
Gallon...	3 785,40	231	3,78544	4	0,43368	0,004952	0,003785
Cubic foot	2 8345	4 728	28,345	7,48	4	0,037037	0,028320
Cubic yard	764 532	46 636	764,55	204,97	27	4	0,765000
Mètre cube	4 000 000	6 4023	4 000	264,47	35,344	4,308	4

Mesures de poids.

	Grain	Gramme	Ounce avoir du poids	Pound avoir du poids	Kilogramme
Grain.....	1	0,0647989	0,00228	0,00014223	0,000064
Gramme.....	43,432	4	0,03527	0,002203	0,001
Ounce (avoir du poids)	437,50	28,3495	4	0,062500	0,02835
Pound (avoir du poids)	7000	453,59	46	4	0,45359
Kilogramme.....	43432,36	4000	35,274	2,20462	4

Tous les poids dans les mesures industrielles sont donnés en « pounds avoir du poids ». Dans les mesures physiques et pour peser les métaux précieux, on emploie l'unité « pound troy », valant 373^{gr}, 24.

Toutes les fois que cette dernière unité est employée, le mot troy est indiqué, quand il n'y a que le mot pound, c'est que l'unité choisie est le « pound avoir du poids. »

Mesures de travail et de puissance.

	Petite calorie gramme degré centigrade	Pound degree Fahrenheit	Joule (watt seconde)	kilogram- mètre seconde	Foot pound	Horse power second	Cheval
Petite calorie. Pound degree Fahrenheit..	4	0,0039683	4,43493	0,42354	3,0635	0,00557	0,003647
	252,44	4	4047,03	406,734	772	1,403	1,42308
Joule.	0,2407	0,0009551	4	0,401937	0,737324	0,0043406	0,001359
Kilogrammètre seconde. . . .	2,3610	0,009369	9,81	4	7,23344	0,043451	0,043333
Foot pound. . .	0,3264	0,0042953	4,35626	0,43825	4	0,00484818	0,0048433
Horse power second. . . .	479,50	0,7424	743,94	76,039	530	4	4,043853
Cheval. . . .	477,073	0,702675	733,73	73	542,4855	0,986325	4

Mesures de tension (ou pression).

	Kilogramme par mètre carré	Kilogramme par centi- mètre carré	Kilogramme par milli- mètre carré	Pound on square foot	Pound on square inch
Kilogramme par mètre carré.	4	0,0004	0,000004	0,2048	0,0044223
Kilogramme par centi- mètre carré. . . .	40000	4	0,01	2048	14,223353
Kilogramme par milli- mètre carré. . . .	4000000	400	4	204800	1422,3353
Pound on square foot.	4,883	0,0004883	0,000004883	4	0,006947
Pound on square inch.	702,925	0,0702925	0,000702925	443,946	4

Mesures de résistance électrique.

	Résistance par kilomètre	Résistance per thousand feet (résistance par 1000 pieds)	Résistance par mètre	Résistance per foot (résistance par pied)
Résistance par kilomètre.	4	3,2808	4000	3280,8
Résistance per thousand feet (mille pieds).	0,3048	4	304,80	4000
Résistance par mètre.	0,004	0,0032808	4	3,2808
Résistance per foot.	0,0003048	0,004	0,3048	4

Résistances spécifiques.

	4 ohm per foot per circular mil	4 ohm per foot per square mil	4 microhm par centimètre carré	4 ohm par mètre et pour un millimètre de diamètre	4 ohm par mètre et pour un millimètre carré
4 ohm per foot per circular mil.	4	0,7854	0,16624	0,0021166	0,0016624
4 ohm per foot per square mil.	1,2732	4	0,2166	0,002695	0,0021466
4 microhm par centimètre carré.	6,0152	4,7247	4	0,042732	0,01
4 ohm par mètre et pour un millimètre de diamètre . . .	472,45	374,06	78,540	4	0,7854
4 ohm par mètre et pour un millimètre carré	604,52	472,47	100	1,2732	4

Mesures diverses.

1 kg. par kilomètre = 0,67195 pound per thousand (1 000) feet.

1 pound per thousand feet (1 000 pieds) = 1^{kg},4882 par kilomètre.

Coefficient de dilatation linéaire (par degré centigrade) = 1,80 coefficient of linear expansion for each degree Fahrenheit.

Coefficient of linear expansion for each degree Fahrenheit = 0,55556 coefficient de dilatation linéaire (par degré centigrade).

Variation de 1 degré centigrade = 1,80. Variation de 1 degré Fahrenheit.

Variation de 1 degré Fahrenheit = 0,55556. Variation de 1 degré centigrade.

Si C désigne le nombre de degrés centigrades et F le nombre de degrés Fahrenheit, on a :

$$(F - 32) \frac{5}{9} = C$$

$$\frac{9}{5} C + 32 = F$$

Les tables n°s 1, 2 et 3 (p. 293, 294 et 295) permettront de réduire facilement les principales mesures françaises en mesures anglaises et vice versa ; elles donnent les valeurs des divers multiples.

La table n° 4 (p. 296) donne le diamètre des fils en mm. suivant le numéro des diverses jauge. Aux Etats-Unis on emploie ordinairement la jauge Brown et Sharp (B.S.) et en Angleterre, la jauge standard (S.W.G.)

Table 1

Transformation des mesures de longueurs anglaises et françaises.

kilomètres	Miles	Miles	Kilomètres	Mètres	Feet (pieds)	Feet	Mètres	Mètres ou millimètres	Inches ou mils	Inches ou mils	Mètres ou millimètres
400	62,437	400	460,933	100	328,083	400	30,480	40	393,700	400	2,540
200	124,274	200	321,870	200	656,466	200	60,960	20	787,400	200	5,080
300	186,411	300	482,805	300	984,249	300	91,440	30	1181,400	300	7,620
400	248,548	400	643,740	400	1312,332	400	121,920	40	1374,800	400	10,460
500	310,685	500	804,675	500	1640,445	500	152,401	50	1968,500	500	12,700
600	372,822	600	963,610	600	1968,498	600	182,881	60	2362,200	600	15,240
700	434,959	700	1126,545	700	2296,381	700	213,361	70	2755,900	700	17,780
800	497,096	800	1287,480	800	2624,664	800	243,844	80	3149,600	800	20,320
900	559,233	900	1448,415	900	2952,747	900	274,321	90	3543,300	900	22,860
10	6,214	10	46,094	10	32,808	10	3,048	1	39,370	10	0,234
20	12,427	20	92,187	20	65,617	20	6,096	2	78,740	20	0,508
30	18,641	30	138,281	30	98,425	30	9,444	3	118,410	30	0,762
40	24,855	40	184,374	40	131,233	40	12,492	4	157,480	40	1,016
50	31,069	50	230,468	50	164,042	50	15,240	5	196,850	50	1,270
60	37,282	60	276,561	60	196,850	60	18,288	6	236,220	60	1,524
70	43,496	70	332,655	70	229,658	70	21,336	7	275,590	70	1,778
80	49,710	80	388,748	80	262,466	80	24,384	8	314,960	80	2,032
90	55,923	90	444,842	90	295,275	90	27,432	9	354,330	90	2,286
1	0,621	1	4,609	1	3,281	1	0,305	0,1	3,937	1	0,025
2	1,243	2	9,219	2	6,562	2	0,610	0,2	7,874	2	0,054
3	1,864	3	13,828	3	9,842	3	0,914	0,3	11,841	3	0,076
4	2,485	4	18,437	4	13,123	4	1,219	0,4	15,748	4	0,102
5	3,107	5	23,047	5	16,404	5	1,524	0,5	19,685	5	0,127
6	3,728	6	276,561	6	196,850	6	1,829	0,6	23,622	6	0,152
7	4,350	7	332,655	7	229,658	7	2,134	0,7	27,559	7	0,178
8	4,971	8	388,748	8	262,466	8	2,438	0,8	31,496	8	0,203
9	5,592	9	444,842	9	295,275	9	2,743	0,9	354,330	9	0,229
0,1	0,062	0,1	0,461	0,1	0,328	0,1	0,030	0,01	0,394	0,1	0,003
0,2	0,124	0,2	0,922	0,2	0,656	0,2	0,061	0,02	0,787	0,2	0,005
0,3	0,186	0,3	0,483	0,3	0,984	0,3	0,091	0,03	1,181	0,3	0,008
0,4	0,249	0,4	0,644	0,4	1,312	0,4	0,122	0,04	1,574	0,4	0,010
0,5	0,311	0,5	0,805	0,5	1,640	0,5	0,152	0,05	1,968	0,5	0,013
0,6	0,373	0,6	0,966	0,6	1,968	0,6	0,183	0,06	2,362	0,6	0,015
0,7	0,435	0,7	1,127	0,7	2,297	0,7	0,213	0,07	2,756	0,7	0,018
0,8	0,497	0,8	1,287	0,8	2,625	0,8	0,244	0,08	3,150	0,8	0,020
0,9	0,559	0,9	1,448	0,9	2,953	0,9	0,274	0,09	3,543	0,9	0,023

Table 2

Transformation des mesures de surfaces, anglaises et françaises.

Millimètres carrés	Circular mils		Millimètres carrés		Millimètres carrés		Square mils		Millimètres carrés		Square feet	
	Millimètres	centimètres	Millimètres	centimètres	Millimètres	centimètres	Millimètres	centimètres	Millimètres	centimètres	Millimètres	centimètres
10	49 733,00	100 000	50,670	40	45 501,00	100 000	64,500	10	407,640	400	9,290	
20	39 470,00	200 000	101,340	20	34 002,00	200 000	129,000	20	213,280	200	18,380	
30	39 205,00	300 000	152,010	30	46 503,00	300 000	193,500	30	322,920	300	27,870	
40	78 940,00	400 000	202,680	40	62 004,00	400 000	258,000	40	430,560	400	37,160	
50	98 675,00	500 000	253,350	50	77 505,00	500 000	322,500	50	538,200	500	46,450	
60	148 440,00	600 000	304,020	60	93 006,00	600 000	387,000	60	645,840	600	55,740	
70	138 145,00	700 000	354,690	70	108 507,00	700 000	451,500	70	753,480	700	65,030	
80	157 880,00	800 000	405,360	80	124 008,00	800 000	516,000	80	861,120	800	74,320	
90	177 615,00	900 000	456,030	90	139 509,00	900 000	580,500	90	968,760	900	83,610	
1	4 973,50	10 000	5,067	4	4 530,10	10 000	6,450	1	40,764	40	0,929	
2	3 947,00	20 000	10,134	2	3 400,20	20 000	12,900	2	21,528	20	4,858	
3	5 920,50	30 000	15,201	3	4 650,30	30 000	19,350	3	32,292	30	2,787	
4	7 894,00	40 000	20,268	4	6 200,40	40 000	25,800	4	43,056	40	3,716	
5	9 867,50	50 000	25,335	5	7 750,50	50 000	32,250	5	53,820	50	4,645	
6	11 841,00	60 000	30,402	6	9 300,60	60 000	38,700	6	64,584	60	5,574	
7	13 814,50	70 000	35,469	7	10 850,70	70 000	45,450	7	75,348	70	6,503	
8	15 788,00	80 000	40,336	8	12 400,80	80 000	51,600	8	86,112	80	7,432	
9	17 761,50	90 000	45,603	9	13 950,90	90 000	58,050	9	96,876	90	8,361	
0,1	497,35	1 000	0,507	0,4	455,01	1 000	0,645	0,1	4,076	4	0,093	
0,2	394,70	2 000	1,013	0,2	310,02	2 000	1,290	0,2	2,453	2	0,486	
0,3	392,05	3 000	1,520	0,3	463,03	3 000	1,935	0,3	3,229	3	0,279	
0,4	789,40	4 000	2,027	0,4	620,04	4 000	2,580	0,4	4,306	4	0,372	
0,5	986,75	5 000	2,534	0,5	773,05	5 000	3,225	0,5	5,382	5	0,465	
0,6	11 841,40	6 000	3,040	0,6	930,06	6 000	3,870	0,6	6,458	6	0,557	
0,7	13 814,45	7 000	3,547	0,7	1 083,07	7 000	4,515	0,7	7,535	7	0,630	
0,8	15 788,80	8 000	4,054	0,8	1 240,08	8 000	5,160	0,8	8,611	8	0,743	
0,9	17 761,45	9 000	4,560	0,9	1 395,09	9 000	5,805	0,9	9,688	9	0,836	
0,01	49,74	100	0,081	0,01	45,30	100	0,065	0,01	0,408	0,1	0,009	
0,02	39,47	200	0,404	0,02	31,00	200	0,429	0,02	0,245	0,2	0,019	
0,03	59,21	300	0,452	0,03	46,50	300	0,494	0,03	0,323	0,3	0,028	
0,04	78,94	400	0,203	0,04	62,00	400	0,258	0,04	0,431	0,4	0,037	
0,05	98,68	500	0,253	0,05	77,51	500	0,323	0,05	0,538	0,5	0,046	
0,06	118,41	600	0,304	0,06	93,01	600	0,387	0,06	0,646	0,6	0,056	
0,07	138,43	700	0,355	0,07	108,51	700	0,452	0,07	0,753	0,7	0,065	
0,08	157,88	800	0,405	0,08	124,01	800	0,516	0,08	0,861	0,8	0,074	
0,09	177,62	900	0,456	0,09	139,51	900	0,584	0,09	0,969	0,9	0,084	

Table 3

Transformation des mesures de poids et de pressions anglaises et françaises.

Kilogrammes		Pounds		Kilogrammes		Kilogrammes par kilomètre		Pounds per thousand feet (1000 pieds) (Poids)		Pounds per thousand feet		Kilogrammes par kilomètre (Poids)		Kilogrammes par millimètre carré (Pression ou tension)		Pounds on square inch.		Kilogrammes par millimètre carré (Pression ou tension)	
400	220,462	100	43,359	400	67,495	100	448,820	40	14 223,355	40 000	7,029								
200	440,924	200	90,718	200	134,390	200	297,640	20	28 446,710	20 000	14,039								
300	661,386	300	136,077	300	201,583	300	446,460	30	42 670,065	30 000	21,088								
400	884,848	400	181,436	400	268,780	400	595,280	40	56 893,420	40 000	28,417								
500	1 102,310	500	226,795	500	333,975	500	744,400	50	71 146,775	50 000	35,446								
600	1 322,772	600	272,454	600	403,170	600	892,920	60	85 340,130	60 000	42,476								
700	1 543,234	700	317,513	700	470,365	700	1 041,740	70	99 563,485	70 000	49,205								
800	1 763,696	800	362,872	800	537,560	800	1 190,560	80	113 786,840	80 000	56,234								
900	1 984,458	900	408,231	900	604,755	900	1 339,380	90	128 010,495	90 000	63,263								
10	22,046	40	4,536	40	6,720	40	44,882	4	1 422,336	1 000	0,703								
20	44,092	20	9,072	20	13,439	20	29,764	2	284,674	2 000	4,406								
30	66,139	30	13,608	30	20,159	30	44,646	3	4 267,007	3 000	2,409								
40	88,183	40	18,444	40	26,878	40	59,528	4	5 689,342	4 000	2,812								
50	110,231	50	22,680	50	33,598	50	74,410	5	7 444,678	5 000	3,543								
60	132,277	60	27,245	60	40,347	60	89,292	6	8 534,013	6 000	4,218								
70	154,323	70	31,751	70	47,037	70	104,174	7	9 936,349	7 000	4,921								
80	176,370	80	36,287	80	53,756	80	119,056	8	11 378,684	8 000	5,623								
90	198,416	90	40,823	90	60,476	90	133,938	9	12 801,020	9 000	6,326								
1	2,203	4	0,454	4	0,672	4	4,488	0,1	442,234	400	0,070								
2	4,409	2	0,907	2	1,344	2	9,976	0,2	284,467	200	0,141								
3	6,614	3	1,361	3	2,016	3	4,465	0,3	426,704	300	0,211								
4	8,818	4	1,814	4	2,688	4	5,933	0,4	568,934	400	0,284								
5	11,023	5	2,268	5	3,360	5	7,441	0,5	744,168	500	0,351								
6	13,228	6	2,722	6	4,032	6	8,929	0,6	853,401	600	0,422								
7	15,432	7	3,175	7	4,704	7	10,417	0,7	995,635	700	0,492								
8	17,637	8	3,629	8	5,376	8	11,906	0,8	11 378,686	800	0,562								
9	19,842	9	4,082	9	6,048	9	13,394	0,9	12 801,020	900	0,633								
0,1	0,220	0,1	0,045	0,1	0,067	0,1	0,449	0,01	44,223	40	0,007								
0,2	0,441	0,2	0,091	0,2	0,134	0,2	0,298	0,02	28,447	20	0,014								
0,3	0,661	0,3	0,136	0,3	0,202	0,3	0,446	0,03	42,670	30	0,021								
0,4	0,882	0,4	0,181	0,4	0,269	0,4	0,595	0,04	56,893	40	0,028								
0,5	1,102	0,5	0,227	0,5	0,336	0,5	0,744	0,05	74,447	50	0,035								
0,6	1,323	0,6	0,272	0,6	0,403	0,6	0,893	0,06	85,340	60	0,042								
0,7	1,543	0,7	0,318	0,7	0,470	0,7	1,042	0,07	99,563	70	0,049								
0,8	1,764	0,8	0,363	0,8	0,538	0,8	1,191	0,08	113 787	80	0,056								
0,9	1,984	0,9	0,408	0,9	0,605	0,9	1,339	0,09	128,010	90	0,063								

Table 4

Jauge.

Diamètres en millimètres des fils.

Numéro de la jauge	INDICATION DE LA JAUGE					
	Décimale	Carcasse	Brown et Sharp. B et S	Birmingham ou stubs	British standard S.W.G. Jauge anglaise	Roebling
P	0,5	0,50	»	»	»	»
000000	»	»	»	»	11,785	11,683
00000	»	»	»	»	10,972	10,921
0000	»	»	11,683	11,531	10,160	9,982
000	»	»	10,404	10,794	9,448	9,195
00	»	»	9,266	9,652	8,839	8,407
0	»	»	8,251	8,636	8,229	7,798
1	0,6	»	7,348	7,620	7,620	7,188
2	0,7	»	6,544	7,213	7,010	6,680
3	0,8	»	5,827	6,579	6,401	6,198
4	0,9	»	5,190	6,045	5,893	5,715
5	1,0	»	4,621	5,588	5,385	5,257
6	1,1	»	4,115	5,156	4,877	4,877
7	1,2	»	3,665	4,572	4,470	4,496
8	1,3	»	3,263	4,191	4,064	4,115
9	1,4	»	2,903	3,759	3,657	3,759
10	1,5	»	2,588	3,404	3,251	3,429
11	1,6	»	2,305	3,048	2,947	3,048
12	1,8	0,48	2,052	2,768	2,641	2,667
13	2,0	0,46	1,828	2,413	2,337	2,337
14	2,2	0,44	1,628	2,108	2,032	2,032
15	2,4	0,42	1,449	1,829	1,829	1,829
16	2,7	0,40	1,291	1,651	1,626	1,600
17	3,0	0,38	1,150	1,473	1,422	1,372
18	3,4	0,36	1,024	1,245	1,219	1,194
19	3,9	0,34	0,9116	1,067	1,016	1,041
20	4,4	0,32	0,8118	0,8890	0,9144	0,8890
21	»	0,30	0,7229	0,8128	0,8128	0,8128
22	»	0,28	0,6348	0,7112	0,7112	0,7112
23	»	0,26	0,5733	0,6350	0,6096	0,6350
24	»	0,24	0,5105	0,5588	0,5588	0,5842
25	»	0,23	0,4546	0,5080	0,5080	0,5080
26	»	0,22	0,4049	0,4572	0,4572	0,4572
27	»	0,21	0,3605	0,4064	0,4166	0,4318
28	»	0,20	0,3211	0,3556	0,3759	0,4064
29	»	0,19	0,2859	0,3302	0,3454	0,3810
30	»	0,18	0,2545	0,3048	0,3150	0,3556
31	»	0,17	0,2267	0,2540	0,2946	0,3429
32	»	0,16	0,2019	0,2286	0,2743	0,3302
33	»	0,15	0,1798	0,2032	0,2540	0,2794
34	»	0,14	0,1601	0,1778	0,2337	0,2540
35	»	0,13	0,1426	0,1270	0,2134	0,2413
36	»	0,12	0,1270	0,1016	0,1930	0,2286

Table 5

Unités de résistance.

	Ohm légal 406 cm. mercure	Ohm international 406,3 cm. mercure	British association unit B. A. unité 404,8 cm. mercure	Unité Siemens 400 cm. mercure
Ohm légal. . . .	4	0,99748	4,01445	4,06
Ohm international.	4,00283	4	4,01431	4,063
British association unit	0,9889	0,9859	4	4,048
Unité Siemens. . . .	0,9434	0,94073	0,9342	4

Table 6

Poids des fils de cuivre, de fer et d'aluminium. — Résistance et conductance des fils en métal de résistivité un et en cuivre normal.

Dia- mètre en mm.	Section en mm ² .	Poids en kgs. par km. ou en grammes par m.			Résistance en ohms par km.		Conductance en mhos par km.	
		Cuivre.	Fer.	Alumi- nium.	Métal de résistivité un.	Cuivre normal.	Métal de résistivité un.	Cuivre normal.
0.4	0,01	0,07	0,06	0,02	4273,240	2422,061	0,0008	0,0005
0.2	0,03	0,28	0,24	0,08	348,310	330,316	0,0031	0,0019
0.3	0,07	0,63	0,55	0,19	141,474	235,785	0,0071	0,0043
0.4	0,13	1,12	0,98	0,34	79,577	432,629	0,0126	0,0076
0.5	0,20	1,75	1,52	0,52	50,940	84,883	0,0196	0,0148
0.6	0,28	2,52	2,49	0,75	35,368	58,946	0,0283	0,0170
0.7	0,38	3,43	2,98	1,03	23,983	43,208	0,0383	0,0234
0.8	0,50	4,47	3,90	1,34	19,894	33,084	0,0503	0,0302
0.9	0,64	5,66	4,93	1,70	15,749	26,498	0,0636	0,0382
1.0	0,79	6,99	6,09	2,10	12,732	21,224	0,0785	0,0472
1.1	0,93	8,46	7,36	2,54	10,323	17,538	0,0950	0,0570
1.2	1,13	10,07	8,77	3,02	8,842	14,737	0,1131	0,0679
1.3	1,33	11,81	10,29	3,54	7,534	12,557	0,1327	0,0797
1.4	1,54	13,70	11,93	4,11	6,496	10,802	0,1539	0,0924
1.5	1,77	15,73	13,70	4,72	5,659	9,433	0,1767	0,1060
1.6	2,01	17,90	15,58	5,37	4,974	8,289	0,2044	0,1206
1.7	2,27	20,20	17,59	6,06	4,406	7,343	0,2270	0,1362
1.8	2,54	22,65	19,72	6,79	3,930	6,350	0,2548	0,1527
1.9	2,84	25,23	21,97	7,57	3,527	5,878	0,2833	0,1704
2.0	3,14	27,96	24,33	8,39	3,183	5,303	0,3142	0,1885
2.1	3,46	30,83	26,84	9,25	2,887	4,842	0,3464	0,2078
2.2	3,80	33,83	29,46	10,15	2,631	4,384	0,3804	0,2284
2.3	4,13	36,98	32,20	11,09	2,407	4,012	0,4155	0,2493
2.4	4,52	40,26	35,06	12,08	2,244	3,684	0,4524	0,2714
2.5	4,91	43,69	38,04	13,41	2,037	3,395	0,4909	0,2946
2.6	5,31	47,25	41,45	14,18	4,892	3,439	0,5309	0,3185
2.7	5,73	50,96	44,37	15,29	4,747	2,914	0,5726	0,3433
2.8	6,16	54,80	47,72	16,44	4,624	2,707	0,6158	0,3694
2.9	6,61	58,79	51,19	17,64	4,514	2,523	0,6605	0,3963
3.0	7,07	62,91	54,78	18,87	4,445	2,358	0,7069	0,4244
3.1	7,53	67,47	58,50	20,45	4,323	2,208	0,7548	0,4529
3.2	8,04	71,38	62,33	21,49	4,243	2,072	0,8043	0,4826
3.3	8,55	76,42	66,29	22,84	4,169	4,944	0,8533	0,5132
3.4	9,08	80,80	70,37	24,24	4,096	4,827	0,9079	0,5448
3.5	9,62	85,63	74,56	25,69	4,039	4,732	0,9621	0,5773
3.6	10,18	90,59	78,89	27,48	0,982	4,637	4,0179	0,6107
3.7	10,75	95,69	83,33	28,71	0,980	4,550	4,0732	0,6451
3.8	11,34	100,94	87,90	30,29	0,882	4,476	4,4341	0,6803
3.9	11,93	106,32	92,58	31,90	0,837	4,392	4,4946	0,7467
4.0	12,57	114,84	97,39	33,55	0,796	4,326	4,2566	0,7540

Table 6 (Suite)

Dia- mètre en mm.	Section en mm ² .	Poids en kgs. par km. ou en grammes par m.			Résistance en ohms. par km.		Conductance en mhos par km.	
		Cuivre.	Fer.	Alumi- nium.	Métal de résistivité un.	Cuivre normal.	Métal de résistivité un.	Cuivre normal.
4.4	43,20	417,50	102,32	35,25	0,757	1,262	4,3203	0,7922
4.2	43,85	423,30	107,37	36,99	0,722	1,203	4,3854	0,8313
4.3	44,52	429,24	112,55	38,77	0,689	1,148	4,4322	0,8713
4.4	45,21	435,33	117,84	40,60	0,658	1,094	4,5205	0,9123
4.5	45,90	441,55	123,26	42,46	0,629	1,048	4,5904	0,9342
4.6	46,62	447,94	128,80	43,37	0,602	1,003	4,6619	0,9970
4.7	47,33	454,44	134,46	46,32	0,576	0,961	4,7349	1,0409
4.8	48,10	461,03	140,24	48,34	0,553	0,921	4,8096	1,0858
4.9	48,86	467,83	146,45	50,35	0,530	0,884	4,8857	1,4314
5.0	49,64	474,75	152,17	52,43	0,509	0,849	4,9635	1,4781
5.1	20,43	481,81	158,32	54,54	0,490	0,816	2,0428	1,2257
5.2	21,24	489,01	164,59	56,70	0,471	0,783	2,1237	1,2712
5.3	22,06	496,35	170,98	58,90	0,453	0,756	2,2062	1,3237
5.4	22,90	203,83	177,50	61,43	0,436	0,728	2,2902	1,3744
5.5	23,76	214,45	184,43	63,43	0,421	0,702	2,3758	1,4253
5.6	24,63	219,21	190,89	65,76	0,406	0,677	2,4630	1,4778
5.7	25,52	227,44	197,77	68,43	0,392	0,653	2,5518	1,5311
5.8	26,42	235,14	204,77	70,54	0,379	0,631	2,6421	1,5853
5.9	27,34	243,32	211,89	73,00	0,367	0,610	2,7340	1,6704
6.0	28,27	251,64	219,43	75,49	0,354	0,590	2,8274	1,6964
6.1	29,22	260,40	226,49	78,03	0,342	0,570	2,9225	1,7365
6.2	30,19	268,70	233,98	80,61	0,331	0,552	3,0191	1,8115
6.3	31,17	277,43	241,59	83,23	0,321	0,535	3,1173	1,8704
6.4	32,17	286,31	249,32	85,89	0,311	0,518	3,2170	1,9302
6.5	33,18	295,33	257,48	88,60	0,301	0,502	3,3183	1,9910
6.6	34,21	304,49	265,45	91,35	0,292	0,487	3,4212	2,0528
6.7	35,26	313,78	273,25	94,43	0,284	0,473	3,5257	2,1454
6.8	36,32	323,22	281,46	96,97	0,275	0,459	3,6317	2,1790
6.9	37,39	332,80	289,80	99,84	0,267	0,446	3,7393	2,2436
7.0	38,48	342,51	298,26	102,75	0,260	0,433	3,8485	2,3091
7.1	39,59	352,37	306,85	105,74	0,253	0,421	3,9593	2,3736
7.2	40,72	362,36	315,53	108,74	0,246	0,409	4,0745	2,4429
7.3	41,83	372,50	324,38	111,75	0,239	0,398	4,1854	2,5112
7.4	43,01	382,78	333,32	114,83	0,233	0,388	4,3009	2,5805
7.5	44,18	393,49	342,39	117,96	0,226	0,377	4,4179	2,6307
7.6	45,36	403,74	351,59	121,12	0,220	0,367	4,5365	2,7249
7.7	46,57	414,44	360,90	124,33	0,215	0,358	4,6366	2,7940
7.8	47,78	425,27	370,33	127,58	0,209	0,349	4,7784	2,8670
7.9	49,02	436,25	379,89	130,87	0,204	0,340	4,9017	2,9440
8.0	50,27	447,37	389,55	134,24	0,199	0,332	5,0266	3,0160
8.1	51,53	458,62	399,37	137,58	0,194	0,323	5,1530	3,0918
8.2	52,81	470,01	409,29	144,00	0,189	0,316	5,2810	3,1686
8.3	54,11	481,54	419,33	144,46	0,185	0,308	5,4106	3,2464
8.4	55,42	493,22	429,49	147,96	0,180	0,301	5,5448	3,3251
8.5	56,73	505,03	439,79	151,54	0,176	0,294	5,6745	3,4047
8.6	58,09	516,98	450,49	155,09	0,172	0,287	5,8088	3,4853
8.7	59,43	529,08	460,73	158,72	0,168	0,280	5,9447	3,5669
8.8	60,82	541,31	471,38	162,39	0,164	0,274	6,0821	3,6493
8.9	62,21	553,68	482,45	166,40	0,161	0,268	6,2211	3,7327
9.0	63,62	566,49	493,03	169,86	0,157	0,262	6,3617	3,8170
9.1	65,04	578,83	504,06	173,65	0,154	0,256	6,5039	3,9023
9.2	66,48	591,64	515,20	177,49	0,150	0,251	6,6776	4,9886
9.3	67,93	604,57	526,46	181,37	0,147	0,245	6,7929	4,0757
9.4	69,40	617,64	537,83	185,29	0,144	0,240	6,9398	4,1639
9.5	70,88	630,83	549,34	189,25	0,144	0,235	7,0882	4,2529
9.6	72,38	644,20	560,96	193,26	0,138	0,230	7,2382	4,3430
9.7	73,90	657,69	572,74	197,31	0,135	0,226	7,3898	4,4339
9.8	75,43	671,32	584,58	201,40	0,133	0,221	7,5430	4,5258
9.9	6,98	685,09	596,57	205,53	0,130	0,217	7,6977	4,6186
10.0	78,54	699,00	608,69	209,70	0,127	0,212	7,8540	4,7124

Table 7. — Facteur par lequel il faut multiplier la résistance, la conductibilité en % étant donnée.

Conductibilité en %	Facteur								
400	1,000	80	1,250	60	1,667	40	2,500	20	5,000
99	4,010	79	4,266	59	4,695	39	2,364	49	5,263
98	4,020	78	4,282	58	4,724	38	2,632	48	5,536
97	4,031	77	4,299	57	4,754	37	2,703	47	5,882
96	4,042	76	4,316	56	4,786	36	2,778	46	6,250
95	4,053	75	4,333	55	4,818	35	2,857	45	6,667
94	4,064	74	4,351	54	4,852	34	2,941	44	7,443
93	4,075	73	4,370	53	4,887	33	3,030	43	7,692
92	4,087	72	4,389	52	4,923	32	3,125	42	8,333
91	4,099	71	4,408	51	4,961	31	3,226	41	9,091
90	4,411	70	4,429	50	2,000	30	3,333	40	10,000
89	4,424	69	4,449	49	2,041	29	3,448	9	11,444
88	4,436	68	4,470	48	2,083	28	3,571	8	12,500
87	4,449	67	4,493	47	2,428	27	3,704	7	14,286
86	4,463	66	4,515	46	2,474	26	3,846	6	16,667
85	4,476	65	4,539	45	2,222	25	4,000	5	20,000
84	4,490	64	4,563	44	2,273	24	4,167	4	25,000
83	4,205	63	4,587	43	2,326	23	4,348	3	33,333
82	4,220	62	4,613	42	2,381	22	4,545	2	50,000
81	4,235	61	4,639	41	2,439	21	4,762	1	100,000

Table 8. — Résistivité des bronzes, la conductibilité en % étant connue.

Conductibilité en %	du cuivre			Conductibilité en %	du cuivre		
	pur.	de Mathiessen.	Normal.		pur.	de Mathiessen.	normal.
30	5,203	5,327	5,556	69	2,262	2,316	2,443
31	5,036	5,435	5,377	70	2,230	2,283	2,381
32	4,878	4,994	5,208	71	2,199	2,251	2,347
33	4,730	4,842	5,051	72	2,168	2,220	2,343
34	4,591	4,700	4,902	73	2,138	2,189	2,283
35	4,460	4,566	4,762	74	2,109	2,159	2,232
36	4,336	4,439	4,630	75	2,084	2,131	2,222
37	4,219	4,319	4,503	76	2,054	2,103	2,193
38	4,108	4,203	4,386	77	2,027	2,075	2,165
39	4,003	4,097	4,274	78	2,001	2,049	2,137
40	3,902	3,993	4,167	79	1,976	2,023	2,110
41	3,807	3,898	4,063	80	1,951	1,997	2,083
42	3,747	3,803	3,968	81	1,927	1,973	2,058
43	3,630	3,746	3,876	82	1,904	1,949	2,033
44	3,548	3,632	3,788	83	1,881	1,925	2,008
45	3,469	3,551	3,704	84	1,858	1,902	1,984
46	3,393	3,474	3,622	85	1,837	1,880	1,964
47	3,321	3,400	3,546	86	1,815	1,858	1,938
48	3,252	3,329	3,472	87	1,794	1,837	1,916
49	3,186	3,261	3,401	88	1,774	1,816	1,894
50	3,122	3,196	3,333	89	1,754	1,793	1,873
51	3,061	3,133	3,268	90	1,734	1,776	1,852
52	3,002	3,073	3,203	91	1,715	1,756	1,832
53	2,945	3,043	3,145	92	1,697	1,737	1,812
54	2,894	2,959	3,086	93	1,678	1,718	1,792
55	2,838	2,905	3,030	94	1,661	1,700	1,773
56	2,787	2,854	2,976	95	1,643	1,682	1,754
57	2,738	2,804	2,924	96	1,626	1,665	1,736
58	2,691	2,755	2,874	97	1,609	1,647	1,718
59	2,646	2,709	2,825	98	1,593	1,631	1,704
60	2,602	2,663	2,778	99	1,577	1,614	1,684
61	2,559	2,620	2,732	100	1,561	1,598	1,667
62	2,518	2,577	2,688	101	»	1,582	1,650
63	2,478	2,536	2,642	102	»	1,567	1,634
64	2,439	2,497	2,604	103	»	»	1,618
65	2,402	2,458	2,564	104	»	»	1,602
66	2,365	2,421	2,525	105	»	»	1,587
67	2,330	2,385	2,488	106	»	»	1,572
68	2,296	2,350	2,451				

Table 9

Diminution de la conductance pour une augmentation de température.

Valeurs de a	Facteur par lequel il faut multiplier la conductance à t° pour avoir la conductance à $(t + t_1)^{\circ}$ pour t_1 .								
	40°	45°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0,0038	0,963	0,946	0,929	0,913	0,898	0,883	0,868	0,854	0,840
0,0039	0,962	0,944	0,928	0,911	0,895	0,880	0,865	0,854	0,837
0,0040	0,962	0,943	0,926	0,909	0,893	0,877	0,862	0,847	0,833
0,0041	0,961	0,942	0,924	0,907	0,890	0,874	0,859	0,844	0,830
0,0042	0,960	0,941	0,923	0,905	0,888	0,872	0,856	0,844	0,826
0,0043	0,959	0,939	0,921	0,903	0,886	0,870	0,853	0,838	0,823
0,0044	0,958	0,938	0,919	0,902	0,883	0,867	0,850	0,833	0,820
0,0045	0,957	0,936	0,917	0,900	0,884	0,864	0,847	0,832	0,816
0,0046	0,956	0,935	0,916	0,897	0,879	0,861	0,843	0,829	0,813
0,0047	0,955	0,934	0,914	0,895	0,876	0,859	0,842	0,823	0,810
0,0048	0,954	0,933	0,912	0,893	0,874	0,856	0,839	0,822	0,806
0,0049	0,953	0,932	0,911	0,894	0,872	0,853	0,836	0,819	0,803
0,0050	0,952	0,930	0,909	0,889	0,870	0,854	0,833	0,816	0,800

Table 10

Augmentation de la résistance pour une augmentation de température.

Valeur de a	Facteur par lequel il faut multiplier la résistance à t° pour avoir la résistance à $(t + t_1)^{\circ}$ pour $t_1 =$								
	40°	45°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0,0038	4,038	4,057	4,076	4,095	4,114	4,133	4,152	4,171	4,190
0,0039	4,039	4,059	4,078	4,098	4,117	4,137	4,156	4,176	4,195
0,0040	4,040	4,060	4,080	4,100	4,120	4,140	4,160	4,180	4,200
0,0041	4,041	4,062	4,082	4,103	4,123	4,144	4,164	4,185	4,205
0,0042	4,042	4,063	4,084	4,103	4,126	4,147	4,168	4,189	4,210
0,0043	4,043	4,065	4,086	4,108	4,129	4,151	4,172	4,194	4,215
0,0044	4,044	4,066	4,088	4,110	4,132	4,154	4,176	4,198	4,220
0,0045	4,045	4,068	4,090	4,113	4,135	4,158	4,180	4,203	4,225
0,0046	4,046	4,069	4,092	4,113	4,138	4,161	4,184	4,207	4,230
0,0047	4,047	4,071	4,094	4,118	4,141	4,163	4,188	4,212	4,235
0,0048	4,048	4,072	4,096	4,120	4,144	4,168	4,192	4,216	4,240
0,0049	4,049	4,074	4,098	4,122	4,147	4,172	4,196	4,221	4,245
0,0050	4,050	4,075	4,100	4,125	4,150	4,173	4,200	4,225	4,250

Table 11

Intensité en ampères, pour une élévation de température de 20°, au-dessus de la température de l'air ambiant.

Diamètre en mm.	Section en mm ²	Intensité du courant en ampères pour une conductibilité en % de celle de l'échantillon Mathiessen					
		100	80	60	40	30	16
2	3,14	40	36	31	25	22	16
3	7,07	72	64	56	46	39	29
4	12,57	100	89	77	63	55	40
5	19,64	136	121	105	86	74	54
6	28,27	175	156	135	111	96	70
7	38,49	220	196	170	139	120	88
8	50,27	268	239	207	169	146	107
9	63,62	316	281	245	200	173	126
10	78,54	367	327	284	232	201	147
12	113,10	478	425	370	302	262	191
14	153,94	602	536	466	380	330	241
16	201,06	728	648	564	460	399	291
18	254,47	870	774	674	550	476	348
20	314,16	1010	899	782	638	553	404
22	380,13	1160	1032	899	733	635	464
24	452,39	1300	1157	1007	822	712	520

Table 12. — *Tension simple dans un circuit triphasé en fonction de la tension composée.*

Tension composée.	Tension simple.	Tension composée.	Tension simple.	Tension composée.	Tension simple	Tension composée.	Tension simple.
40000	5773,5	4000	2309,4	700	404,4	4	0,6
20000	44547,0	5000	2886,8	800	461,9	2	1,2
30000	47320,5	6000	3464,4	900	519,6	3	4,7
40000	23094,0	7000	4041,5	10	5,8	4	2,3
50000	28867,5	8000	4618,8	20	41,5	5	2,9
60000	34644,0	9000	5196,2	30	47,3	6	3,5
70000	40444,5	100	57,8	40	23,4	7	4,0
80000	46488,0	200	115,5	50	28,9	8	4,6
90000	51961,5	300	173,2	60	34,6	9	5,2
4000	577,4	400	230,9	70	40,4		
2000	4454,7	500	288,7	80	46,2		
3000	4732,4	600	346,4	90	52,0		

Table 13. — *Section en mm^2 d'un conducteur de 1 km. de longueur, parcouru par un courant de 1 ampère pour une chute de tension donnée en volts.*

Chute de tension en volts.	Métal de conductibilité 1.		Cuivre normal.		Chute de tension en volts.	Métal de conductibilité 1.		Cuivre normal.	
	Continu.	Triphasé.	Continu.	Triphasé.		Continu.	Triphasé.	Continu.	Triphasé
50	0,2000	0,3464	0,3333	0,5773	2050	0,0049	0,0083	0,0084	0,0444
100	0,1000	0,4732	0,4667	0,2887	2100	0,0048	0,0083	0,0079	0,0137
150	0,0667	0,4455	0,4411	0,4924	2150	0,0047	0,0081	0,0078	0,0134
200	0,0500	0,0866	0,0833	0,4443	2200	0,0046	0,0079	0,0076	0,0131
250	0,0400	0,0693	0,0667	0,4155	2250	0,0044	0,0077	0,0073	0,0129
300	0,0333	0,0577	0,0555	0,0961	2300	0,0044	0,0075	0,0073	0,0126
350	0,0286	0,0495	0,0476	0,0825	2350	0,0043	0,0074	0,0071	0,0123
400	0,0250	0,0433	0,0417	0,0722	2400	0,0042	0,0072	0,0069	0,0120
450	0,0222	0,0385	0,0370	0,0641	2450	0,0041	0,0071	0,0068	0,0118
500	0,0200	0,0346	0,0333	0,0577	2500	0,0040	0,0069	0,0067	0,0116
550	0,0182	0,0315	0,0303	0,0525	2550	0,0039	0,0068	0,0066	0,0114
600	0,0167	0,0289	0,0278	0,0482	2600	0,0039	0,0067	0,0064	0,0111
650	0,0151	0,0266	0,0257	0,0444	2650	0,0038	0,0066	0,0063	0,0109
700	0,0143	0,0248	0,0238	0,0412	2700	0,0037	0,0064	0,0062	0,0107
750	0,0133	0,0230	0,0222	0,0384	2750	0,0036	0,0063	0,0061	0,0105
800	0,0125	0,0217	0,0208	0,0361	2800	0,0036	0,0062	0,0060	0,0103
850	0,0118	0,0204	0,0196	0,0341	2850	0,0035	0,0061	0,0039	0,0102
900	0,0111	0,0192	0,0183	0,0321	2900	0,0035	0,0060	0,0058	0,0100
950	0,0106	0,0182	0,0176	0,0304	2950	0,0034	0,0059	0,0057	0,0098
1000	0,0100	0,0173	0,0167	0,0289	3000	0,0033	0,0058	0,0056	0,0096
1050	0,0093	0,0165	0,0159	0,0273	3050	0,0033	0,0057	0,0055	0,0095
1100	0,0091	0,0158	0,0151	0,0262	3100	0,0032	0,0056	0,0054	0,0093
1150	0,0087	0,0151	0,0145	0,0251	3150	0,0032	0,0055	0,0053	0,0092
1200	0,0083	0,0144	0,0139	0,0240	3200	0,0032	0,0054	0,0052	0,0090
1250	0,0080	0,0139	0,0133	0,0231	3250	0,0031	0,0053	0,0051	0,0089
1300	0,0077	0,0133	0,0128	0,0222	3300	0,0030	0,0053	0,0051	0,0088
1350	0,0074	0,0128	0,0124	0,0214	3350	0,0030	0,0052	0,0050	0,0086
1400	0,0071	0,0124	0,0119	0,0206	3400	0,0029	0,0051	0,0049	0,0085
1450	0,0069	0,0120	0,0113	0,0199	3450	0,0029	0,0051	0,0048	0,0084
1500	0,0067	0,0116	0,0111	0,0192	3500	0,0029	0,0050	0,0048	0,0083
1550	0,0065	0,0112	0,0108	0,0187	3550	0,0028	0,0049	0,0047	0,0082
1600	0,0063	0,0108	0,0104	0,0181	3600	0,0028	0,0048	0,0046	0,0080
1650	0,0061	0,0105	0,0101	0,0176	3650	0,0027	0,0048	0,0046	0,0079
1700	0,0059	0,0102	0,0098	0,0170	3700	0,0027	0,0047	0,0045	0,0078
1750	0,0057	0,0099	0,0096	0,0163	3750	0,0027	0,0046	0,0045	0,0077
1800	0,0056	0,0096	0,0093	0,0160	3800	0,0026	0,0046	0,0044	0,0076
1850	0,0054	0,0094	0,0091	0,0156	3850	0,0026	0,0045	0,0044	0,0075
1900	0,0053	0,0091	0,0088	0,0152	3900	0,0026	0,0044	0,0043	0,0074
1950	0,0051	0,0089	0,0086	0,0148	3950	0,0025	0,0043	0,0042	0,0073
2000	0,0050	0,0087	0,0083	0,0144	4000	0,0025	0,0043	0,0042	0,0072

Table 14

Section en mm^2 d'un conducteur de 1 m. de longueur parcouru par un courant de 1 ampère pour une chute de tension donnée en volts.

Chute de tension en volts.	Métal de conductibilité 1		Cuivre normal.		Chute de tension en volts.	Métal de conductibilité 1		Cuivre normal.	
	Continu.	Triphasé.	Continu.	Triphasé.		Continu.	Triphasé.	Continu.	Triphasé.
0,40	0,49000	0,47324	0,46667	0,28869	4,70	0,00243	0,00369	0,00355	0,00614
0,45	0,66667	0,41547	0,41444	0,49243	4,80	0,00208	0,00361	0,00347	0,00602
0,50	0,50000	0,08661	0,08333	0,44434	4,90	0,00204	0,00354	0,00340	0,00589
0,55	0,40000	0,06928	0,06667	0,41548	5,00	0,00200	0,00346	0,00333	0,00577
0,60	0,03333	0,05774	0,05555	0,09622	5,20	0,00192	0,00333	0,00321	0,00555
0,65	0,02857	0,04949	0,04762	0,08248	5,40	0,00183	0,00321	0,00309	0,00535
0,70	0,02500	0,04331	0,04167	0,07247	5,60	0,00179	0,00309	0,00298	0,00516
0,75	0,02222	0,03849	0,03703	0,06414	5,80	0,00172	0,00299	0,00287	0,00498
0,80	0,02000	0,03464	0,03333	0,05773	6,00	0,00167	0,00289	0,00278	0,00481
0,85	0,01667	0,02887	0,02777	0,04811	6,20	0,00161	0,00278	0,00269	0,00466
0,90	0,01429	0,02475	0,02381	0,04124	6,40	0,00156	0,00272	0,00261	0,00452
0,95	0,01250	0,02163	0,02084	0,03609	6,60	0,00152	0,00262	0,00253	0,00437
1,00	0,01114	0,01924	0,01852	0,03207	6,80	0,00147	0,00255	0,00243	0,00424
1,10	0,01000	0,01732	0,01667	0,02887	7,00	0,00143	0,00248	0,00238	0,00412
1,20	0,00909	0,01575	0,01434	0,02624	7,20	0,00139	0,00241	0,00232	0,00401
1,30	0,00833	0,01443	0,01388	0,02404	7,40	0,00135	0,00234	0,00223	0,00390
1,40	0,00769	0,01332	0,01282	0,02224	7,60	0,00132	0,00228	0,00219	0,00379
1,50	0,00715	0,01238	0,01194	0,02062	7,80	0,00128	0,00222	0,00213	0,00370
1,60	0,00667	0,01155	0,01144	0,01924	8,00	0,00123	0,00217	0,00208	0,00361
1,70	0,00625	0,01083	0,01042	0,01803	8,50	0,00118	0,00204	0,00196	0,00339
1,80	0,00588	0,01019	0,00980	0,01698	9,00	0,00111	0,00192	0,00183	0,00321
1,90	0,00556	0,00962	0,00926	0,01604	9,50	0,00106	0,00182	0,00176	0,00305
2,00	0,00526	0,00912	0,00877	0,01549	10,00	0,00100	0,00173	0,00167	0,00289
2,10	0,00500	0,00866	0,00833	0,01443	11,00	0,00091	0,00158	0,00151	0,00262
2,20	0,00476	0,00825	0,00794	0,01374	12,00	0,00083	0,00144	0,00139	0,00240
2,30	0,00455	0,00788	0,00758	0,01312	13,00	0,00077	0,00133	0,00128	0,00222
2,40	0,00433	0,00753	0,00725	0,01255	14,00	0,00072	0,00124	0,00119	0,00206
2,50	0,00417	0,00722	0,00694	0,01202	15,00	0,00067	0,00116	0,00111	0,00192
2,60	0,00400	0,00693	0,00667	0,01155	16,00	0,00063	0,00108	0,00104	0,00184
2,70	0,00385	0,00666	0,00641	0,01144	17,00	0,00059	0,00102	0,00098	0,00170
2,80	0,00370	0,00642	0,00647	0,01069	18,00	0,00056	0,00096	0,00093	0,00160
2,90	0,00358	0,00619	0,00596	0,01034	19,00	0,00053	0,00091	0,00088	0,00152
3,00	0,00345	0,00597	0,00575	0,00993	20,00	0,00050	0,00087	0,00083	0,00144
3,10	0,00333	0,00577	0,00555	0,00962	21,00	0,00048	0,00082	0,00079	0,00137
3,20	0,00323	0,00559	0,00538	0,00934	22,00	0,00046	0,00079	0,00076	0,00131
3,30	0,00313	0,00542	0,00521	0,00903	23,00	0,00044	0,00075	0,00072	0,00125
3,40	0,00303	0,00525	0,00503	0,00875	24,00	0,00042	0,00072	0,00069	0,00120
3,50	0,00294	0,00509	0,00490	0,00849	25,00	0,00040	0,00069	0,00067	0,00116
3,60	0,00286	0,00495	0,00476	0,00825	26,00	0,00038	0,00067	0,00064	0,00114
3,70	0,00278	0,00484	0,00463	0,00802	27,00	0,00037	0,00064	0,00062	0,00107
3,80	0,00270	0,00468	0,00451	0,00780	28,00	0,00036	0,00062	0,00060	0,00103
3,90	0,00263	0,00456	0,00439	0,00760	29,00	0,00034	0,00060	0,00057	0,00100
4,00	0,00256	0,00444	0,00427	0,00740	30,00	0,00033	0,00058	0,00055	0,00096
4,10	0,00250	0,00433	0,00417	0,00722	35,00	0,00029	0,00050	0,00048	0,00083
4,20	0,00244	0,00422	0,00407	0,00704	40,00	0,00025	0,00043	0,00042	0,00072
4,30	0,00238	0,00412	0,00397	0,00687	45,00	0,00022	0,00039	0,00037	0,00064
4,40	0,00233	0,00403	0,00388	0,00671	50,00	0,00020	0,00035	0,00033	0,00058
4,50	0,00228	0,00394	0,00379	0,00656	55,00	0,00018	0,00031	0,00030	0,00052
4,60	0,00222	0,00385	0,00370	0,00641	60,00	0,00017	0,00029	0,00028	0,00048

Table 15. — *Courant alternatif simple.*
Intensité du courant en ampères pour une puissance de 1 kilowatt.

Tension en volts.	Facteur de puissance.						
	4,00 continu.	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
100	10,0000	10,5263	11,1111	11,7647	12,5000	13,3333	14,2857
110	9,0909	9,5693	10,4040	10,6952	11,3636	12,1244	12,9870
115	8,6937	9,4533	9,6619	10,2302	10,8696	11,5942	12,4224
120	8,3333	8,7749	9,2592	9,8040	10,4166	11,4144	11,9049
125	8,0000	8,4211	8,8889	9,4418	10,0000	10,6667	11,4286
130	7,6923	8,0972	8,5470	9,0498	9,6154	10,2364	10,9890
140	7,4429	7,5188	7,9363	8,4034	8,9288	9,5238	10,2040
150	6,6667	7,0476	7,4074	7,8434	8,3333	8,8889	9,5239
160	6,2300	6,5790	6,9444	7,3529	7,8125	8,3333	8,9286
170	5,8824	6,1919	6,5360	6,9205	7,3530	7,8431	8,4034
180	5,5356	5,8480	6,4729	6,5359	6,9443	7,4074	7,9366
190	5,2632	5,5402	5,8480	6,4919	6,5790	7,0176	7,5189
200	5,0000	5,2632	5,5536	5,8824	6,2500	6,6667	7,4429
210	4,7619	5,0125	5,2910	5,6022	5,9524	6,3492	6,8027
220	4,5433	4,7847	5,0503	5,3476	5,6819	6,0606	6,4936
225	4,4444	4,6784	4,9382	5,2988	5,5556	5,9259	6,3492
230	4,3479	4,5766	4,8309	5,4451	5,4349	5,7971	6,2143
240	4,1667	4,3860	4,6296	4,9020	5,2084	5,5556	5,9524
250	4,0000	4,2105	4,4444	4,7059	5,0000	5,3333	5,7143
300	3,3333	3,5088	3,7037	3,9216	4,1666	4,4444	4,7614
350	2,8572	3,0075	3,1746	3,3613	3,5743	3,8095	4,0817
400	2,5000	2,6316	2,7778	2,9442	3,4230	3,3333	3,5714
450	2,2222	2,3392	2,4691	2,6444	2,7778	2,9630	3,4746
500	2,0000	2,4053	2,2222	2,3529	2,5000	2,6667	2,8374
550	1,8182	1,9139	2,0202	2,4390	2,2728	2,4242	2,5974
600	1,6667	1,7544	1,8519	1,9608	2,0834	2,2222	2,3810
700	1,4286	1,5037	1,5873	1,6807	1,7857	1,9048	2,0409
800	1,2300	1,3458	1,3889	1,4706	1,5625	1,6667	1,7857
900	1,1111	1,4696	1,2343	1,3072	1,3889	1,4845	1,5873
1000	1,0000	1,0327	1,1144	1,4763	1,2500	1,3333	1,4286
1100	0,9091	0,9369	1,0101	1,0695	1,4364	1,2121	1,2987
1200	0,8333	0,8772	0,9239	0,9804	1,0417	1,1111	1,4905
1300	0,7692	0,8097	0,8347	0,9030	0,9615	1,0256	1,0989
1400	0,7143	0,7519	0,7936	0,8403	0,8929	0,9324	1,0204
1500	0,6667	0,7018	0,7407	0,7843	0,8333	0,8889	0,9524
1600	0,6250	0,6579	0,6944	0,7353	0,7812	0,8333	0,8929
1700	0,5882	0,6192	0,6536	0,6921	0,7353	0,7843	0,8403
1800	0,5556	0,5848	0,6173	0,6536	0,6944	0,7407	0,7937
1900	0,5263	0,5540	0,5848	0,6492	0,6579	0,7018	0,7549
2000	0,5000	0,5263	0,5536	0,5882	0,6250	0,6667	0,7143
2100	0,4762	0,5013	0,5291	0,5602	0,5932	0,6349	0,6803
2200	0,4545	0,4783	0,5050	0,5348	0,5682	0,6061	0,6494
2300	0,4348	0,4577	0,4831	0,5143	0,5433	0,5797	0,6244
2400	0,4167	0,4386	0,4630	0,4902	0,5208	0,5556	0,5952
2500	0,4000	0,4210	0,4444	0,4706	0,5000	0,5333	0,5714
3000	0,3333	0,3509	0,3704	0,3922	0,4167	0,4444	0,4761
3500	0,2857	0,3007	0,3175	0,3361	0,3574	0,3809	0,4082
4000	0,2300	0,2632	0,2778	0,2944	0,3125	0,3333	0,3571
4500	0,2222	0,2339	0,2469	0,2614	0,2778	0,2963	0,3475
5000	0,2000	0,2105	0,2222	0,2353	0,2500	0,2667	0,2857
6000	0,1667	0,1754	0,1852	0,1961	0,2083	0,2222	0,2381
7000	0,1429	0,1504	0,1587	0,1681	0,1786	0,1905	0,2041
8000	0,1230	0,1316	0,1389	0,1471	0,1563	0,1667	0,1786
9000	0,1111	0,1470	0,1234	0,1307	0,1389	0,1481	0,1587
10000	0,1000	0,1033	0,1111	0,1177	0,1250	0,1333	0,1429
11000	0,0909	0,0957	0,1010	0,1070	0,1136	0,1212	0,1299
12000	0,0833	0,0877	0,0926	0,0980	0,1042	0,1111	0,1190
13000	0,0769	0,0810	0,0855	0,0905	0,0962	0,1026	0,1099
14000	0,0714	0,0752	0,0794	0,0840	0,0893	0,0952	0,1020
15000	0,0667	0,0702	0,0741	0,0784	0,0833	0,0889	0,0932
16000	0,0625	0,0658	0,0694	0,0733	0,0781	0,0833	0,0893
17000	0,0588	0,0619	0,0654	0,0692	0,0733	0,0784	0,0840
18000	0,0556	0,0585	0,0617	0,0654	0,0694	0,0744	0,0794
19000	0,0526	0,0554	0,0585	0,0619	0,0658	0,0702	0,0752
20000	0,0500	0,0526	0,0556	0,0588	0,0625	0,0667	0,0714
25000	0,0400	0,0421	0,0444	0,0471	0,0500	0,0533	0,0571
30000	0,0333	0,0351	0,0370	0,0392	0,0417	0,0444	0,0476
35000	0,0286	0,0304	0,0317	0,0336	0,0357	0,0381	0,0408
40000	0,0250	0,0263	0,0278	0,0294	0,0313	0,0333	0,0357
45000	0,0222	0,0234	0,0247	0,0261	0,0278	0,0296	0,0317
50000	0,0200	0,0211	0,0222	0,0235	0,0250	0,0267	0,0286
55000	0,0182	0,0191	0,0202	0,0214	0,0227	0,0242	0,0260
60000	0,0167	0,0175	0,0185	0,0196	0,0208	0,0222	0,0238

Table 16. — *Courants triphasés. — Intensité en ampères par phase pour une puissance de 1 kilowatt.*

Tension composée volts.	Facteur de puissance.						
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
400	5,7735	6,0774	6,4150	6,7924	7,2169	7,6980	8,2479
410	5,2486	5,5249	5,8319	6,4749	6,5608	6,9982	7,4980
413	5,0204	5,2847	5,3783	5,9064	6,2756	6,6939	7,1721
420	4,8142	5,0645	5,3458	5,6603	6,0144	6,4450	6,8732
425	4,6188	4,8619	5,4320	5,4339	5,7735	6,4584	6,5983
430	4,4414	4,6749	4,9346	5,2249	5,5314	5,9213	6,3445
440	4,1240	4,3410	4,5821	4,8517	5,1549	5,4986	5,8913
450	3,8490	4,0516	4,2767	4,5283	4,8112	5,1320	5,4986
460	3,6084	3,7984	4,0094	4,2453	4,3103	4,8412	5,4549
470	3,3962	3,5749	3,7733	3,9953	4,2453	4,5282	4,8317
480	3,2073	3,3763	3,5639	3,7733	4,0094	4,2767	4,3821
490	3,0287	3,4986	3,3763	3,5749	3,7984	4,0316	4,3410
200	2,8867	3,0387	3,2073	3,3962	3,6084	3,8490	4,1239
210	2,7493	2,8940	3,0348	3,2345	3,4366	3,6657	3,9276
220	2,6243	2,7624	2,9459	3,0874	3,2804	3,4992	3,7490
225	2,5660	2,7010	2,8311	3,0188	3,2073	3,4213	3,6657
230	2,5102	2,6423	2,7891	2,9532	3,1378	3,3470	3,5860
240	2,4056	2,5322	2,6729	2,8301	3,0070	3,2073	3,4366
250	2,3094	2,4310	2,5660	2,7170	2,8867	3,0792	3,2992
300	1,9245	2,0258	2,4384	2,2642	2,4056	2,5660	2,7493
350	1,6196	1,7364	1,8328	1,9406	2,0620	2,4994	2,3566
400	1,4434	1,5194	1,6038	1,6981	1,8042	1,9243	2,0620
450	1,2830	1,3505	1,4236	1,5094	1,6037	1,7107	1,8329
500	1,4347	1,2135	1,2830	1,3585	1,4434	1,5396	1,6496
550	1,0497	1,1030	1,1664	1,2350	1,3121	1,3996	1,4996
600	0,9622	1,0429	1,0692	1,1321	1,2028	1,2830	1,3746
700	0,8248	0,8682	0,9164	0,9703	1,0310	1,0997	1,1783
800	0,7247	0,7597	0,8019	0,8491	0,9021	0,9623	1,0310
900	0,6445	0,6753	0,7128	0,7547	0,8019	0,8553	0,9164
1000	0,5774	0,6077	0,6445	0,6792	0,7217	0,7698	0,8248
1100	0,5249	0,5525	0,5832	0,6175	0,6561	0,6998	0,7498
1200	0,4841	0,5064	0,5346	0,5660	0,6014	0,6415	0,6873
1300	0,4441	0,4673	0,4935	0,5225	0,5531	0,5922	0,6344
1400	0,4124	0,4341	0,4582	0,4852	0,5155	0,5499	0,5894
1500	0,3849	0,4052	0,4277	0,4528	0,4841	0,5132	0,5499
1600	0,3608	0,3798	0,4009	0,4243	0,4544	0,4841	0,5153
1700	0,3396	0,3575	0,3774	0,3996	0,4243	0,4528	0,4852
1800	0,3207	0,3376	0,3564	0,3773	0,4009	0,4277	0,4382
1900	0,3039	0,3199	0,3376	0,3575	0,3798	0,4052	0,4344
2000	0,2887	0,3039	0,3207	0,3396	0,3608	0,3849	0,4124
2100	0,2749	0,2894	0,3053	0,3234	0,3437	0,3666	0,3928
2200	0,2624	0,2762	0,2916	0,3087	0,3280	0,3499	0,3749
2300	0,2510	0,2642	0,2789	0,2953	0,3138	0,3347	0,3586
2400	0,2406	0,2532	0,2673	0,2830	0,3007	0,3208	0,3437
2500	0,2309	0,2431	0,2566	0,2717	0,2887	0,3079	0,3299
3000	0,1924	0,2026	0,2138	0,2264	0,2406	0,2666	0,2749
3500	0,1650	0,1736	0,1833	0,1944	0,2062	0,2199	0,2357
4000	0,1443	0,1519	0,1604	0,1698	0,1804	0,1924	0,2062
4500	0,1283	0,1350	0,1426	0,1509	0,1604	0,1711	0,1833
5000	0,1153	0,1216	0,1283	0,1358	0,1443	0,1540	0,1650
6000	0,0962	0,1013	0,1069	0,1132	0,1203	0,1283	0,1375
7000	0,0825	0,0868	0,0946	0,0970	0,1031	0,1100	0,1178
8000	0,0722	0,0760	0,0802	0,0849	0,0902	0,0962	0,1031
9000	0,0641	0,0675	0,0743	0,0755	0,0802	0,0855	0,0916
10000	0,0577	0,0608	0,0642	0,0679	0,0722	0,0770	0,0825
11000	0,0525	0,0552	0,0583	0,0617	0,0636	0,0700	0,0750
12000	0,0481	0,0506	0,0535	0,0566	0,0601	0,0642	0,0687
13000	0,0444	0,0467	0,0493	0,0522	0,0555	0,0592	0,0634
14000	0,0412	0,0434	0,0458	0,0485	0,0515	0,0550	0,0589
15000	0,0385	0,0405	0,0428	0,0453	0,0481	0,0513	0,0550
16000	0,0361	0,0380	0,0404	0,0423	0,0451	0,0481	0,0515
17000	0,0340	0,0357	0,0377	0,0399	0,0425	0,0453	0,0485
18000	0,0321	0,0338	0,0356	0,0377	0,0401	0,0428	0,0458
19000	0,0304	0,0320	0,0338	0,0357	0,0380	0,0405	0,0434
20000	0,0289	0,0304	0,0324	0,0340	0,0361	0,0385	0,0412
23000	0,0231	0,0243	0,0257	0,0272	0,0289	0,0308	0,0330
30000	0,0192	0,0203	0,0214	0,0226	0,0241	0,0257	0,0273
35000	0,0165	0,0174	0,0183	0,0194	0,0206	0,0220	0,0236
40000	0,0144	0,0152	0,0160	0,0170	0,0180	0,0192	0,0206
45000	0,0128	0,0135	0,0143	0,0151	0,0160	0,0174	0,0183
50000	0,0115	0,0122	0,0128	0,0136	0,0144	0,0154	0,0165
55000	0,0103	0,0114	0,0117	0,0124	0,0131	0,0140	0,0150
60000	0,0096	0,0104	0,0107	0,0113	0,0120	0,0128	0,0137

Table 17. — Valeurs de $2\pi L'$.

Diamètres en mm.	Valeurs de $2\pi L'$ en unités pratiques au km.	Diamètre en mm.	Valeurs de $2\pi L'$ en unités pratiques au km.	Diamètre en mm.	Valeurs de $2\pi L'$ en unités pratiques au km.	Diamètre en mm.	Valeurs de $2\pi L'$ en unités pratiques au km.
2,0	0,00321	4,0	0,00234	6,0	0,00183	8,0	0,00147
2,2	0,00310	4,2	0,00227	6,2	0,00178	8,2	0,00144
2,4	0,00300	4,4	0,00222	6,4	0,00174	8,4	0,00141
2,6	0,00290	4,6	0,00217	6,6	0,00170	8,6	0,00138
2,8	0,00280	4,8	0,00212	6,8	0,00167	8,8	0,00135
3,0	0,00270	5,0	0,00206	7,0	0,00163	9,0	0,00132
3,2	0,00262	5,2	0,00201	7,2	0,00159	9,2	0,00129
3,4	0,00254	5,4	0,00196	7,4	0,00156	9,4	0,00126
3,6	0,00247	5,6	0,00192	7,6	0,00153	9,6	0,00123
3,8	0,00240	5,8	0,00187	7,8	0,00150	9,8	0,00121

Table 18. — Valeurs de $-2\pi M$.

Écartement des fils en cm.	Valeurs de $-2\pi M$ en unités pratiques au km.	Écartement des fils en cm.	Valeurs de $-2\pi M$ en unités pratiques au km.	Écartement des fils en cm.	Valeurs de $-2\pi M$ en unités pratiques au km.	Écartement des fils en cm.	Valeurs de $-2\pi M$ en unités pratiques au km.
20	0,00376	100	0,00578	260	0,00698	450	0,00768
30	0,00427	120	0,00601	280	0,00708	500	0,00781
40	0,00462	140	0,00621	300	0,00716	600	0,00803
50	0,00491	160	0,00637	320	0,00725	700	0,00823
60	0,00514	180	0,00652	340	0,00732	800	0,00840
70	0,00533	200	0,00665	360	0,00740	900	0,00855
80	0,00550	220	0,00677	380	0,00747	1000	0,00868
90	0,00565	240	0,00688	400	0,00753		

Table 19. — Facteur par lequel il faut multiplier le diamètre d'un fil pour avoir le diamètre d'un câble formé de ce fil.

Nombre de fils	Facteur						
3	2,25	37	7	75	10,25	169	15
7	3	48	8,25	91	11	192	16,25
12	4,25	61	9	108	12,25	217	17
19	5	7×7	9	127	13		
27	6,25	7×19	15	147	14,25		

Table 20. — Inductance des lignes aériennes. Valeurs de $2\pi Ls$.

Diamètre en mm.	ÉCARTEMENT DES FILS EN CENTIMÈTRES										
	40	60	80	100	120	140	160	180	200	300	400
2,0	0,025	0,026	0,027	0,028	0,029	0,029	0,030	0,030	0,031	0,033	0,034
2,5	0,037	0,040	0,042	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047	0,047	0,050	0,052
3,0	0,052	0,055	0,058	0,060	0,061	0,063	0,064	0,065	0,066	0,070	0,072
3,5	0,069	0,074	0,078	0,080	0,082	0,084	0,086	0,087	0,088	0,094	0,097
4,0	0,087	0,094	0,099	0,102	0,105	0,107	0,109	0,111	0,113	0,119	0,124
4,5	0,107	0,116	0,123	0,127	0,131	0,134	0,137	0,139	0,141	0,149	0,154
5,0	0,131	0,141	0,148	0,153	0,158	0,162	0,166	0,169	0,171	0,181	0,188
5,5	0,156	0,168	0,177	0,184	0,189	0,194	0,198	0,202	0,205	0,217	0,225
6,0	0,182	0,196	0,207	0,215	0,222	0,227	0,232	0,237	0,241	0,254	0,265
6,5	0,210	0,227	0,240	0,249	0,257	0,263	0,269	0,275	0,279	0,295	0,312
7,0	0,241	0,260	0,274	0,284	0,294	0,301	0,308	0,314	0,319	0,338	0,362
7,5	0,273	0,295	0,311	0,323	0,334	0,342	0,351	0,357	0,362	0,385	0,408
8,0	0,306	0,332	0,350	0,364	0,376	0,385	0,394	0,401	0,408	0,434	0,458
8,5	0,341	0,371	0,391	0,407	0,420	0,431	0,441	0,449	0,457	0,486	0,510
9,0	0,378	0,412	0,434	0,451	0,466	0,478	0,489	0,499	0,507	0,539	0,563
9,5	0,416	0,452	0,479	0,497	0,514	0,528	0,540	0,551	0,560	0,596	0,621
10,0	0,456	0,494	0,525	0,545	0,565	0,580	0,594	0,605	0,616	0,656	0,685

Table 21. — Valeurs de p , $\frac{s}{p}$ et $\sqrt{\frac{s}{p}}$ pour des fils de fer et d'aluminium pour un vent de 125 kg.

Diamètre en mm.	ALUMINIUM				FER			
	poids du fil par mètre kg.	effort par mètre kg.	$\frac{s}{p}$	$\sqrt{\frac{s}{p}}$	poids du fil par mètre kg.	effort par mètre kg.	$\frac{s}{p}$	$\sqrt{\frac{s}{p}}$
2	0,0084	0,250	12,56	3,54	0,0244	0,251	12,51	3,54
3	0,0189	0,375	18,85	4,34	0,0548	0,378	18,70	4,33
4	0,0336	0,501	25,08	5,00	0,0974	0,509	24,70	4,97
5	0,0524	0,627	31,31	5,59	0,1522	0,643	30,54	5,53
6	0,0755	0,754	37,50	6,12	0,2191	0,781	36,20	6,02
7	0,1028	0,881	43,68	6,61	0,2983	0,940	40,93	6,40
8	0,1342	1,009	49,81	7,05	0,3896	1,073	46,85	6,84
9	0,1699	1,137	55,95	7,48	0,4930	1,228	51,81	7,20
10	0,2097	1,267	61,99	7,87	0,6087	1,390	56,50	7,52

Table 22. — Fils de cuivre.
Rapport de la flèche à t^o à la flèche à $(t+t^o)^o$.

Flèche à $(t+t^o)^o$	Valeurs de t' pour $T_m = 4$ kg			Valeurs de t' pour $T_m = 8$ kg			Valeurs de t' pour $T_m = 12$ kg		
	20°	30°	40°	20°	30°	40°	20°	30°	40°
0,01	0,53	0,19	0	0,68	0,50	0,30	0,76	0,63	0,49
0,02	0,85	0,77	0,68	0,87	0,80	0,72	0,88	0,83	0,76
0,03	0,93	0,89	0,85	0,97	0,90	0,87	0,94	0,94	0,87
0,04	0,96	0,94	0,91	0,98	0,92	0,91	0,96	0,94	0,92
0,05	0,98	0,96	0,95	1,00	0,98	0,97	0,98	0,96	0,95

Table 23 — *Fils de cuivre.**Valeur de p , effort par mètre courant, pour différentes pressions du vent.*

Diamètre en mm.	PRESSION DU VENT PAR MÈTRE CARRÉ DE SECTION DROITE DE SURFACE CYLINDRIQUE						
	0 poids du fil Air calme	40	60	80	100	125	150
2	0,028	0,086	0,123	0,163	0,242	0,252	0,301
3	0,063	0,136	0,191	0,248	0,365	0,380	0,454
4	0,112	0,195	0,265	0,339	0,493	0,513	0,611
5	0,175	0,266	0,347	0,436	0,625	0,649	0,770
6	0,252	0,348	0,440	0,542	0,763	0,791	0,935
7	0,343	0,443	0,542	0,657	0,907	0,940	1,105
8	0,447	0,550	0,646	0,781	1,059	1,096	1,281
9	0,566	0,671	0,782	0,916	1,219	1,260	1,464
10	0,699	0,805	0,921	1,062	1,389	1,432	1,655

Table 24. — *Fils de cuivre.**Valeurs de $\frac{s}{p}$ pour différentes pressions du vent.*

Diamètre du fil en mm.	PRESSION DU VENT PAR MÈTRE CARRÉ DE SECTION DROITE DE SURFACE CYLINDRIQUE						
	0 Air calme	40	60	80	100	125	150
2	111,11	36,52	25,54	19,27	13,00	12,46	10,47
3	»	52,00	37,00	28,50	19,34	18,61	15,57
4	»	64,44	47,40	37,07	25,50	24,50	20,57
5	»	73,82	56,60	45,08	31,10	30,26	25,50
6	»	81,23	64,26	52,17	37,05	35,74	30,24
7	»	86,87	71,00	58,73	42,42	40,93	34,83
8	»	91,40	76,62	64,36	47,46	45,88	39,24
9	»	94,80	81,09	69,45	52,19	50,49	43,45
10	»	97,56	85,27	74,00	56,54	56,84	47,46

Table 25. — *Fils de cuivre.**Valeurs de $\sqrt{\frac{s}{p}}$ pour différentes pressions du vent.*

Diamètre du fil en mm.	PRESSION DU VENT PAR MÈTRE CARRÉ DE SECTION DROITE DE SURFACE CYLINDRIQUE						
	0 Air calme	40	60	80	100	125	150
2	10,54	6,04	5,05	4,39	3,94	3,53	3,24
3	»	7,21	6,09	5,34	4,81	4,31	3,94
4	»	8,00	6,89	6,07	5,50	4,95	4,53
5	»	8,59	7,52	6,71	6,07	5,50	5,05
6	»	9,01	8,02	7,22	6,60	5,98	5,50
7	»	9,32	8,43	7,66	7,02	6,40	5,90
8	»	9,56	8,75	8,02	7,41	6,77	6,26
9	»	9,72	9,00	8,33	7,73	7,11	6,59
10	»	9,87	9,23	8,60	8,03	7,41	6,89

Table 26

Fils de cuivre.

Valeurs de p , $\frac{s}{p}$ et $\sqrt{\frac{s}{p}}$ pour un vent de 125 kg.

Diamètre mm.	s section en mm ²	p_1 poids du fil par mètre courant kg.	p effort total par mètre kg.	$\frac{s}{p}$	$\sqrt{\frac{s}{p}}$	Diamètre mm.	s section en mm ²	p_1 poids du fil par mètre courant kg.	p effort total par mètre kg.	$\frac{s}{p}$	$\sqrt{\frac{s}{p}}$
1	0,785	0,007	0,125	6,28	2,50	5,6	24,630	0,219	0,734	33,56	5,79
1,1	0,950	0,008	0,137	6,89	2,63	5,7	25,518	0,227	0,748	34,12	5,84
1,2	1,131	0,010	0,150	7,54	2,75	5,8	26,421	0,235	0,762	34,67	5,89
1,3	1,327	0,012	0,163	8,14	2,86	5,9	27,340	0,243	0,777	35,19	5,93
1,4	1,539	0,014	0,176	8,74	2,96	6,0	28,274	0,252	0,791	35,74	5,98
1,5	1,767	0,016	0,188	9,40	3,07	6,1	29,225	0,260	0,806	36,26	6,02
1,6	2,011	0,018	0,201	10,00	3,17	6,2	30,191	0,269	0,821	36,77	6,06
1,7	2,270	0,020	0,213	10,66	3,26	6,3	31,173	0,277	0,835	37,33	6,11
1,8	2,545	0,023	0,226	11,21	3,35	6,4	32,170	0,286	0,850	37,85	6,15
1,9	2,835	0,025	0,239	11,86	3,44	6,5	33,183	0,295	0,865	38,36	6,19
2,0	3,142	0,028	0,252	12,46	3,53	6,6	34,212	0,304	0,880	38,87	6,23
2,1	3,464	0,031	0,265	13,06	3,61	6,7	35,257	0,314	0,895	39,39	6,27
2,2	3,801	0,034	0,277	13,72	3,70	6,8	36,317	0,323	0,910	39,95	6,32
2,3	4,155	0,037	0,290	14,31	3,78	6,9	37,393	0,333	0,925	40,42	6,36
2,4	4,524	0,040	0,303	14,92	3,86	7,0	38,485	0,343	0,940	40,94	6,40
2,5	4,909	0,044	0,316	15,54	3,94	7,1	39,593	0,352	0,955	41,45	6,44
2,6	5,309	0,047	0,328	16,19	4,02	7,2	40,715	0,362	0,970	41,98	6,48
2,7	5,726	0,051	0,341	16,80	4,10	7,3	41,854	0,373	0,986	42,43	6,52
2,8	6,158	0,055	0,354	17,40	4,17	7,4	43,009	0,383	1,001	42,96	6,55
2,9	6,605	0,059	0,367	18,01	4,24	7,5	44,179	0,393	1,017	43,44	6,59
3,0	7,069	0,063	0,380	18,60	4,31	7,6	45,365	0,404	1,032	43,95	6,63
3,1	7,548	0,067	0,393	19,21	4,38	7,7	46,566	0,414	1,048	44,43	6,67
3,2	8,043	0,072	0,407	19,75	4,44	7,8	47,784	0,425	1,064	44,91	6,70
3,3	8,553	0,076	0,420	20,36	4,51	7,9	49,017	0,436	1,080	45,39	6,74
3,4	9,079	0,081	0,433	20,97	4,58	8,0	50,266	0,447	1,096	45,86	6,77
3,5	9,621	0,086	0,446	21,57	4,64	8,1	51,530	0,459	1,112	46,34	6,81
3,6	10,179	0,091	0,459	22,18	4,71	8,2	52,810	0,470	1,128	46,82	6,84
3,7	10,752	0,096	0,472	22,78	4,77	8,3	54,106	0,482	1,144	47,30	6,88
3,8	11,341	0,101	0,486	23,33	7,83	8,4	55,418	0,493	1,160	47,77	6,91
3,9	11,946	0,106	0,499	23,95	4,89	8,5	56,745	0,505	1,177	48,21	6,94
4,0	12,566	0,112	0,513	24,50	4,95	8,6	58,088	0,517	1,193	48,69	6,98
4,1	13,203	0,118	0,526	25,10	5,01	8,7	59,447	0,529	1,209	49,17	7,01
4,2	13,854	0,123	0,539	25,68	5,07	8,8	60,821	0,541	1,226	49,61	7,04
4,3	14,522	0,129	0,553	26,26	5,12	8,9	62,211	0,553	1,243	50,05	7,08
4,4	15,205	0,135	0,567	26,83	5,18	9,0	63,617	0,566	1,260	50,49	7,11
4,5	15,904	0,142	0,580	27,41	5,24	9,1	65,039	0,579	1,277	50,93	7,14
4,6	16,619	0,148	0,594	27,98	5,29	9,2	66,476	0,592	1,294	51,38	7,17
4,7	17,349	0,154	0,607	28,58	5,34	9,3	67,929	0,605	1,311	51,82	7,20
4,8	18,096	0,161	0,621	29,14	5,40	9,4	69,398	0,618	1,328	52,26	7,23
4,9	18,857	0,168	0,635	29,70	5,45	9,5	70,882	0,631	1,345	52,70	7,26
5,0	19,635	0,175	0,649	30,26	5,50	9,6	72,382	0,644	1,362	53,14	7,29
5,1	20,428	0,182	0,663	30,81	5,55	9,7	73,898	0,658	1,380	53,55	7,32
5,2	21,237	0,189	0,677	31,37	5,60	9,8	75,430	0,671	1,397	54,00	7,35
5,3	22,062	0,196	0,691	31,89	5,65	9,9	76,977	0,685	1,415	54,40	7,38
5,4	22,902	0,204	0,705	32,48	5,70	10,0	78,540	0,699	1,432	54,84	7,41
5,5	23,758	0,211	0,719	33,04	5,75						

Table 27. — Appuis de niveau.

Valeurs de l en fonction de k .

k .	l	k .	l .						
0,0004	4,000000	0,0063	4,000442	0,0429	4,000444	0,0193	4,000993	0,0257	4,004764
0,0002	1,000006	0,0066	4,000446	0,0430	4,000451	0,0194	4,004103	0,0258	4,004775
0,0003	1,000000	0,0067	4,000449	0,0431	4,000457	0,0193	4,004103	0,0259	4,004789
0,0004	4,000000	0,0068	4,000453	0,0432	4,000464	0,0196	4,004104	0,0260	4,004803
0,0003	1,000001	0,0069	4,000457	0,0433	4,000474	0,0197	4,004104	0,0264	4,004847
0,0006	4,000004	0,0070	4,000454	0,0434	4,000479	0,0198	4,004105	0,0262	4,004831
0,0007	1,000004	0,0071	4,000454	0,0435	4,000486	0,0199	4,004106	0,0263	4,004845
0,0008	1,000002	0,0072	4,000458	0,0436	4,000493	0,0200	4,004107	0,0264	4,004859
0,0009	4,000002	0,0073	4,000452	0,0437	4,000500	0,0201	4,004107	0,0265	4,004873
0,0040	1,000003	0,0074	4,000456	0,0438	4,000508	0,0202	4,004108	0,0266	4,004887
0,0044	4,000003	0,0075	4,000450	0,0439	4,000515	0,0203	4,004109	0,0267	4,004901
0,0042	1,000004	0,0076	4,000454	0,0440	4,000523	0,0204	4,004110	0,0268	4,004915
0,0043	1,000004	0,0077	4,000458	0,0441	4,000530	0,0205	4,004120	0,0269	4,004929
0,0044	4,000005	0,0078	4,000463	0,0442	4,000538	0,0206	4,004134	0,0270	4,004944
0,0045	1,000006	0,0079	4,000467	0,0443	4,000545	0,0207	4,004142	0,0271	4,004958
0,0046	4,000007	0,0080	4,000474	0,0444	4,000553	0,0208	4,004153	0,0272	4,004973
0,0047	4,000008	0,0081	4,000475	0,0445	4,000560	0,0209	4,004164	0,0273	4,004987
0,0048	1,000009	0,0082	4,000479	0,0446	4,000568	0,0210	4,004176	0,0274	4,005002
0,0049	4,000010	0,0083	4,000483	0,0447	4,000576	0,0211	4,004187	0,0275	4,005016
0,0020	1,000044	0,0084	4,000488	0,0448	4,000584	0,0212	4,004198	0,0276	4,002031
0,0021	4,000042	0,0085	4,000492	0,0449	4,000592	0,0213	4,004209	0,0277	4,002046
0,0022	4,000043	0,0086	4,000497	0,0450	4,000600	0,0214	4,004224	0,0278	4,002061
0,0023	1,000044	0,0087	4,000502	0,0451	4,000608	0,0215	4,004232	0,0279	4,002076
0,0024	4,000045	0,0088	4,000507	0,0452	4,000616	0,0216	4,004244	0,0280	4,002091
0,0023	1,000046	0,0089	4,000514	0,0453	4,000624	0,0217	4,004253	0,0281	4,002406
0,0026	4,000048	0,0090	4,000516	0,0454	4,000632	0,0218	4,004267	0,0282	4,002421
0,0027	4,000049	0,0091	4,000521	0,0455	4,000640	0,0219	4,004279	0,0283	4,002436
0,0028	1,000021	0,0092	4,000526	0,0456	4,000649	0,0220	4,004294	0,0284	4,002451
0,0029	4,000022	0,0093	4,000524	0,0457	4,000657	0,0221	4,004302	0,0285	4,002466
0,0030	1,000024	0,0094	4,000526	0,0458	4,000666	0,0222	4,004314	0,0286	4,002481
0,0031	4,000025	0,0095	4,000524	0,0459	4,000674	0,0223	4,004326	0,0287	4,002496
0,0032	1,000027	0,0096	4,000524	0,0460	4,000683	0,0224	4,004338	0,0288	4,002212
0,0033	1,000029	0,0097	4,000524	0,0461	4,000691	0,0225	4,004350	0,0289	4,002227
0,0034	4,000034	0,0098	4,000526	0,0462	4,000700	0,0226	4,004362	0,0290	4,002243
0,0035	1,000033	0,0099	4,000526	0,0463	4,000708	0,0227	4,004374	0,0291	4,002258
0,0036	4,000035	0,0100	4,000527	0,0464	4,000717	0,0228	4,004386	0,0292	4,002274
0,0037	1,000037	0,0101	4,000527	0,0465	4,000726	0,0229	4,004398	0,0293	4,002289
0,0038	4,000039	0,0102	4,000527	0,0466	4,000733	0,0230	4,004441	0,0294	4,002305
0,0039	1,000044	0,0103	4,000528	0,0467	4,000743	0,0231	4,004423	0,0295	4,002320
0,0040	4,000043	0,0104	4,000528	0,0468	4,000752	0,0232	4,004433	0,0296	4,002336
0,0041	4,000045	0,0105	4,000529	0,0469	4,000764	0,0233	4,004447	0,0297	4,002352
0,0042	4,000047	0,0106	4,000529	0,0470	4,000774	0,0234	4,004460	0,0298	4,002368
0,0043	1,000049	0,0107	4,000530	0,0471	4,000779	0,0235	4,004472	0,0299	4,002384
0,0044	4,000052	0,0108	4,000534	0,0472	4,000787	0,0236	4,004485	0,0300	4,002400
0,0043	4,000054	0,0109	4,000537	0,0473	4,000797	0,0237	4,004497	0,0301	4,002446
0,0046	4,000056	0,0110	4,000533	0,0474	4,000807	0,0238	4,004510	0,0302	4,002432
0,0047	4,000058	0,0111	4,000529	0,0475	4,000816	0,0239	4,004523	0,0303	4,002448
0,0048	4,000061	0,0112	4,000533	0,0476	4,000826	0,0240	4,004536	0,0304	4,002464
0,0049	4,000064	0,0113	4,000534	0,0477	4,000835	0,0241	4,004549	0,0305	4,002480
0,0050	4,000067	0,0114	4,000537	0,0478	4,000845	0,0242	4,004562	0,0306	4,002497
0,0051	4,000069	0,0115	4,000533	0,0479	4,000854	0,0243	4,004574	0,0307	4,002513
0,0052	4,000072	0,0116	4,000539	0,0480	4,000864	0,0244	4,004587	0,0308	4,002530
0,0053	1,000075	0,0117	4,000535	0,0481	4,000873	0,0245	4,004600	0,0309	4,002546
0,0054	4,000078	0,0118	4,000537	0,0482	4,000883	0,0246	4,004614	0,0310	4,002563
0,0053	4,000084	0,0119	4,000537	0,0483	4,000893	0,0247	4,004627	0,0311	4,002579
0,0056	4,000084	0,0120	4,000538	0,0484	4,000903	0,0248	4,004640	0,0312	4,002596
0,0057	4,000087	0,0121	4,000539	0,0485	4,000912	0,0249	4,004653	0,0313	4,002612
0,0058	4,000090	0,0122	4,000537	0,0486	4,000922	0,0250	4,004667	0,0314	4,002629
0,0059	4,000093	0,0123	4,000540	0,0487	4,000932	0,0251	4,004680	0,0315	4,002646
0,0060	4,000096	0,0124	4,000540	0,0488	4,000942	0,0252	4,004693	0,0316	4,002663
0,0061	4,000099	0,0125	4,000546	0,0489	4,000952	0,0253	4,004706	0,0317	4,002680
0,0062	4,000103	0,0126	4,000543	0,0490	4,000963	0,0254	4,004720	0,0318	4,002697
0,0063	4,000106	0,0127	4,000540	0,0491	4,000973	0,0255	4,004733	0,0319	4,002714
0,0064	4,000109	0,0128	4,000547	0,0492	4,000983	0,0256	4,004747	0,0320	4,002734

Table 27 (Suite)
Valeurs de l en fonction de k

k.	l.								
0,0321	1,002748	0,0337	1,003399	0,0393	4,004419	0,0429	1,004908	0,0463	4,005766
0,0322	1,002763	0,0338	1,003448	0,0394	4,004440	0,0430	1,004931	0,0466	4,005791
0,0323	1,002782	0,0339	1,003437	0,0395	4,004461	0,0431	1,004954	0,0467	4,005816
0,0324	1,002799	0,0360	1,003456	0,0396	4,004482	0,0432	4,004977	0,0468	4,005844
0,0325	1,002816	0,0361	1,003475	0,0397	4,004203	0,0433	1,005000	0,0469	4,005866
0,0326	1,002834	0,0362	1,003494	0,0398	4,004224	0,0434	4,005023	0,0470	4,005891
0,0327	1,002851	0,0363	1,003514	0,0399	4,004245	0,0435	4,005046	0,0471	4,005916
0,0328	1,002869	0,0364	1,003533	0,0400	4,004267	0,0436	4,005069	0,0472	4,005944
0,0329	1,002886	0,0365	1,003553	0,0401	4,004288	0,0437	4,005093	0,0473	4,005966
0,0330	1,002904	0,0366	1,003572	0,0402	4,004309	0,0438	4,005116	0,0474	4,005994
0,0331	1,002921	0,0367	1,003592	0,0403	4,004334	0,0439	4,005139	0,0475	4,006017
0,0332	1,002939	0,0368	1,003614	0,0404	4,004352	0,0440	4,005162	0,0476	4,006042
0,0333	1,002957	0,0369	1,003631	0,0405	4,004374	0,0441	4,005185	0,0477	4,006067
0,0334	1,002975	0,0370	1,003651	0,0406	4,004395	0,0442	4,005209	0,0478	4,006093
0,0335	1,002993	0,0371	1,003670	0,0407	4,004417	0,0443	4,005233	0,0479	4,006149
0,0336	1,003014	0,0372	1,003690	0,0408	4,004439	0,0444	4,005257	0,0480	4,006144
0,0337	1,003029	0,0373	1,003710	0,0409	4,004461	0,0445	4,005281	0,0481	4,006169
0,0338	1,003047	0,0374	1,003730	0,0410	4,004483	0,0446	4,005304	0,0482	4,006193
0,0339	1,003064	0,0375	1,003750	0,0411	4,004503	0,0447	4,005328	0,0483	4,006221
0,0340	1,003082	0,0376	1,003770	0,0412	4,004526	0,0448	4,005352	0,0484	4,006247
0,0341	1,003400	0,0377	1,003790	0,0413	4,004548	0,0449	4,005376	0,0485	4,006273
0,0342	1,003419	0,0378	1,003840	0,0414	4,004570	0,0450	4,005400	0,0486	4,006299
0,0343	1,003437	0,0379	1,003830	0,0415	4,004593	0,0451	4,005424	0,0487	4,006325
0,0344	1,003456	0,0380	1,003851	0,0416	4,004615	0,0452	4,005448	0,0488	4,006351
0,0345	1,003474	0,0381	1,003871	0,0417	4,004637	0,0453	4,005472	0,0489	4,006377
0,0346	1,003492	0,0382	1,003891	0,0418	4,004659	0,0454	4,005496	0,0490	4,006403
0,0347	1,003210	0,0383	1,003912	0,0419	4,004681	0,0455	4,005524	0,0491	4,006429
0,0348	1,003229	0,0384	1,003932	0,0420	4,004704	0,0456	4,005553	0,0492	4,006453
0,0349	1,003248	0,0385	1,003953	0,0421	4,004726	0,0457	4,005569	0,0493	4,006481
0,0350	1,003267	0,0386	1,003973	0,0422	4,004749	0,0458	4,005593	0,0494	4,006507
0,0351	1,003285	0,0387	1,003994	0,0423	4,004774	0,0459	4,005618	0,0495	4,006534
0,0352	1,003304	0,0388	1,004014	0,0424	4,004794	0,0460	4,003643	0,0496	4,006560
0,0353	1,003323	0,0389	1,004035	0,0425	4,004816	0,0461	4,005667	0,0497	4,006586
0,0354	1,003342	0,0390	1,004056	0,0426	4,004839	0,0462	4,005694	0,0498	4,006613
0,0355	1,003361	0,0391	1,004077	0,0427	4,004862	0,0463	4,005716	0,0499	4,006640
0,0356	1,003380	0,0392	1,004098	0,0428	4,004883	0,0464	4,005744	0,0500	4,006667

Table 28. — Appuis de niveau.
Table supplémentaire des valeurs de l en fonction de k.

k.	l.	Déférences.	k.	l.	Déférences.	k.	l.	Déférences.
0,050	4,006667	0,000269	0,067	4,014974	0,000360	0,084	4,018816	0,000454
0,051	4,006936	0,000275	0,068	4,012331	0,000365	0,085	4,019267	0,000456
0,052	4,007211	0,000280	0,069	4,012696	0,000371	0,086	4,019723	0,000461
0,053	4,007491	0,000285	0,070	4,013067	0,000376	0,087	4,020484	0,000467
0,054	4,007776	0,000294	0,071	4,013443	0,000381	0,088	4,020651	0,000472
0,055	4,008067	0,000296	0,072	4,013824	0,000387	0,089	4,021423	0,000477
0,056	4,008363	0,000301	0,073	4,014241	0,000392	0,090	4,021600	0,000483
0,057	4,008664	0,000307	0,074	4,014603	0,000397	0,091	4,022083	0,000488
0,058	4,008974	0,000312	0,075	4,015000	0,000403	0,092	4,022574	0,000493
0,059	4,009283	0,000317	0,076	4,015403	0,000408	0,093	4,023064	0,000499
0,060	4,009600	0,000323	0,077	4,015811	0,000413	0,094	4,023563	0,000504
0,061	4,009923	0,000328	0,078	4,016224	0,000419	0,095	4,024067	0,000509
0,062	4,010231	0,000333	0,079	4,016643	0,000424	0,096	4,024576	0,000513
0,063	4,010584	0,000339	0,080	4,017067	0,000429	0,097	4,025094	0,000520
0,064	4,010923	0,000344	0,081	4,017496	0,000433	0,098	4,025644	0,000525
0,065	4,011267	0,000349	0,082	4,017931	0,000440	0,099	4,026436	0,000531
0,066	4,011616	0,000355	0,083	4,018374	0,000443	0,100	4,026667	0,000534

Table 29. — Conducteurs en cuivre.
Augmentation de la flèche pour un accroissement de température.

Accroissement de température.	Tension initiale kgs.	Flèche initiale.												
		0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050	0,060
10°	0	0,0040	0,0035	0,0030	0,0025	0,0022	0,0019	0,0017	0,0016	0,0013	0,0011	0,0008	0,0006	0,0005
	2	0,0034	0,0028	0,0024	0,0021	0,0019	0,0018	0,0017	0,0015	0,0013	0,0011	0,0008	0,0006	0,0005
	4	0,0023	0,0022	0,0020	0,0019	0,0018	0,0017	0,0016	0,0014	0,0012	0,0011	0,0008	0,0006	0,0005
	6	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014	0,0012	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005	
	8	0,0014	0,0013	0,0013	0,0013	0,0014	0,0014	0,0014	0,0013	0,0012	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005
	10	0,0012	0,0013	0,0013	0,0014	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0010	0,0007	0,0006	0,0005
	12	0,0010	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0011	0,0010	0,0007	0,0006	0,0005
	14	0,0009	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0012	0,0014	0,0014	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006	0,0004
20°	0	0,0068	0,0056	0,0050	0,0045	0,0040	0,0037	0,0033	0,0030	0,0025	0,0021	0,0016	0,0012	0,0011
	2	0,0058	0,0050	0,0045	0,0040	0,0036	0,0034	0,0034	0,0028	0,0024	0,0021	0,0016	0,0012	0,0010
	4	0,0048	0,0044	0,0040	0,0036	0,0034	0,0032	0,0029	0,0027	0,0023	0,0020	0,0016	0,0012	0,0010
	6	0,0038	0,0037	0,0035	0,0033	0,0030	0,0029	0,0027	0,0025	0,0022	0,0019	0,0015	0,0012	0,0010
	8	0,0031	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026	0,0024	0,0022	0,0019	0,0015	0,0012	0,0010
	10	0,0026	0,0027	0,0028	0,0027	0,0026	0,0025	0,0025	0,0023	0,0021	0,0018	0,0015	0,0012	0,0010
	12	0,0023	0,0023	0,0025	0,0026	0,0023	0,0024	0,0023	0,0022	0,0020	0,0018	0,0014	0,0012	0,0010
	14	0,0020	0,0022	0,0024	0,0024	0,0024	0,0023	0,0022	0,0021	0,0019	0,0017	0,0014	0,0012	0,0010
30°	0	0,0090	0,0079	0,0074	0,0064	0,0058	0,0052	0,0048	0,0043	0,0036	0,0034	0,0023	0,0018	0,0014
	2	0,0080	0,0072	0,0064	0,0058	0,0054	0,0049	0,0043	0,0042	0,0035	0,0030	0,0023	0,0018	0,0014
	4	0,0071	0,0066	0,0060	0,0054	0,0050	0,0046	0,0043	0,0040	0,0033	0,0029	0,0023	0,0018	0,0014
	6	0,0059	0,0056	0,0052	0,0049	0,0046	0,0043	0,0040	0,0037	0,0032	0,0028	0,0022	0,0018	0,0014
	8	0,0050	0,0049	0,0047	0,0045	0,0042	0,0040	0,0038	0,0036	0,0031	0,0027	0,0022	0,0017	0,0014
	10	0,0042	0,0043	0,0043	0,0044	0,0040	0,0038	0,0036	0,0035	0,0030	0,0027	0,0022	0,0017	0,0014
	12	0,0036	0,0038	0,0039	0,0038	0,0037	0,0037	0,0035	0,0033	0,0030	0,0026	0,0021	0,0017	0,0014
	14	0,0032	0,0034	0,0035	0,0036	0,0035	0,0035	0,0034	0,0032	0,0029	0,0026	0,0024	0,0017	0,0014
40°	0	0,044	0,0400	0,0090	0,0080	0,0074	0,0065	0,0060	0,0055	0,0046	0,0040	0,0034	0,0023	0,0024
	2	0,0400	0,0090	0,0080	0,0072	0,0066	0,0062	0,0057	0,0053	0,0045	0,0039	0,0031	0,0025	0,0024
	4	0,0390	0,0082	0,0075	0,0068	0,0063	0,0058	0,0054	0,0051	0,0044	0,0038	0,0030	0,0025	0,0021
	6	0,0079	0,0074	0,0068	0,0063	0,0059	0,0055	0,0052	0,0049	0,0042	0,0037	0,0030	0,0024	0,0020
	8	0,0069	0,0066	0,0063	0,0060	0,0056	0,0052	0,0050	0,0047	0,0041	0,0036	0,0029	0,0024	0,0020
	10	0,0060	0,0060	0,0058	0,0056	0,0052	0,0050	0,0047	0,0045	0,0040	0,0035	0,0028	0,0024	0,0020
	12	0,0052	0,0054	0,0053	0,0051	0,0050	0,0047	0,0043	0,0043	0,0038	0,0034	0,0028	0,0023	0,0020
	14	0,0048	0,0051	0,0051	0,0050	0,0048	0,0046	0,0044	0,0042	0,0037	0,0033	0,0027	0,0023	0,0020

Table 30. — *Conducteurs en cuivre.*
Diminution de la flèche pour une diminution de température.

Diminution de la température.	Tension initiale kgs.	Flèche initiale.													
		0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06	
40°	0	0,0060	0,0080	0,0040	0,0030	0,0026	0,0023	0,0020	0,0017	0,0013	0,0014	0,0008	0,0006	0,0005	
	2	0,0048	0,0022	0,0024	0,0024	0,0023	0,0020	0,0018	0,0016	0,0012	0,0014	0,0008	0,0006	0,0005	
	4	0,0044	0,0016	0,0018	0,0048	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014	0,0012	0,0014	0,0008	0,0006	0,0005	
	6	0,0044	0,0044	0,0043	0,0045	0,0045	0,0045	0,0014	0,0043	0,0014	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005	
	8	0,0009	0,0042	0,0043	0,0014	0,0014	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0014	0,0010	0,0007	0,0006	0,0005
	10	0,0008	0,0040	0,0041	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0010	0,0007	0,0006	0,0005
	12	0,0007	0,0009	0,0010	0,0044	0,0014	0,0014	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006	0,0005
	14	0,0006	0,0007	0,0009	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0009	0,0009	0,0007	0,0006	0,0005
20°	0	0,0060	0,0080	0,0100	0,0079	0,0057	0,0047	0,0040	0,0035	0,0027	0,0022	0,0016	0,0013	0,0014	
	2	0,0033	0,0044	0,0048	0,0047	0,0044	0,0039	0,0035	0,0032	0,0026	0,0024	0,0016	0,0013	0,0014	
	4	0,0027	0,0033	0,0036	0,0037	0,0036	0,0034	0,0032	0,0029	0,0023	0,0020	0,0016	0,0013	0,0010	
	6	0,0023	0,0028	0,0030	0,0034	0,0034	0,0030	0,0029	0,0027	0,0023	0,0020	0,0015	0,0012	0,0010	
	8	0,0019	0,0023	0,0026	0,0028	0,0028	0,0027	0,0027	0,0025	0,0022	0,0019	0,0015	0,0012	0,0010	
	10	0,0017	0,0021	0,0023	0,0025	0,0025	0,0025	0,0024	0,0023	0,0021	0,0019	0,0015	0,0012	0,0010	
	12	0,0013	0,0019	0,0024	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0022	0,0020	0,0018	0,0014	0,0012	0,0010	
	14	0,0013	0,0017	0,0019	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0021	0,0019	0,0017	0,0014	0,0012	0,0010	
30°	0	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0118	0,0080	0,0065	0,0057	0,0042	0,0034	0,0025	0,0020	0,0016	
	2	0,0045	0,0056	0,0064	0,0067	0,0063	0,0060	0,0054	0,0050	0,0039	0,0032	0,0024	0,0019	0,0016	
	4	0,0036	0,0045	0,0051	0,0053	0,0053	0,0054	0,0048	0,0045	0,0037	0,0034	0,0024	0,0019	0,0016	
	6	0,0029	0,0036	0,0042	0,0043	0,0043	0,0044	0,0043	0,0044	0,0035	0,0030	0,0023	0,0019	0,0016	
	8	0,0025	0,0031	0,0036	0,0039	0,0040	0,0040	0,0039	0,0038	0,0033	0,0029	0,0023	0,0018	0,0016	
	10	0,0022	0,0028	0,0032	0,0033	0,0037	0,0037	0,0036	0,0035	0,0032	0,0028	0,0022	0,0018	0,0016	
	12	0,0020	0,0025	0,0029	0,0032	0,0033	0,0034	0,0034	0,0033	0,0030	0,0027	0,0022	0,0018	0,0016	
	14	0,0018	0,0023	0,0026	0,0029	0,0030	0,0034	0,0034	0,0029	0,0026	0,0024	0,0018	0,0016		
40°	0	0,0060	0,0080	0,0400	0,0420	0,0440	0,0160	0,0097	0,0079	0,0058	0,0046	0,0033	0,0026	0,0022	
	2	0,0051	0,0066	0,0075	0,0082	0,0084	0,0081	0,0075	0,0069	0,0055	0,0044	0,0032	0,0026	0,0022	
	4	0,0039	0,0051	0,0060	0,0063	0,0068	0,0067	0,0064	0,0060	0,0050	0,0042	0,0032	0,0026	0,0022	
	6	0,0034	0,0042	0,0050	0,0055	0,0058	0,0059	0,0058	0,0055	0,0047	0,0044	0,0032	0,0025	0,0024	
	8	0,0034	0,0039	0,0045	0,0050	0,0052	0,0053	0,0052	0,0050	0,0045	0,0040	0,0034	0,0025	0,0024	
	10	0,0028	0,0035	0,0040	0,0045	0,0047	0,0048	0,0048	0,0047	0,0043	0,0039	0,0034	0,0025	0,0024	
	12	0,0025	0,0034	0,0037	0,0044	0,0044	0,0045	0,0045	0,0045	0,0044	0,0037	0,0030	0,0022	0,0024	
	14	0,0023	0,0029	0,0033	0,0037	0,0040	0,0044	0,0042	0,0042	0,0040	0,0036	0,0029	0,0024	0,0024	

Table 31. — Conducteurs en cuivre.
Diminution de la flèche pour une diminution de l'effort par mètre courant.

Diminution proportionnelle de l'effort.	Tension initiale.	Flèche initiale.												
		0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06
$\frac{p_1}{p} = 0$	2	0,0060	0,0056	0,0035	0,0028	0,0023	0,0020	0,0017	0,0015	0,0012	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005
	4	0,0060	0,0080	0,0100	0,0068	0,0051	0,0042	0,0036	0,0032	0,0025	0,0020	0,0015	0,0012	0,0010
	6	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0093	0,0070	0,0058	0,0050	0,0038	0,0034	0,0022	0,0048	0,0045
	8	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0140	0,0143	0,0085	0,0074	0,0052	0,0042	0,0030	0,0024	0,0020
	10	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0140	0,0160	0,0124	0,0096	0,0068	0,0033	0,0038	0,0030	0,0025
	12	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0140	0,0160	0,0180	0,0130	0,0084	0,0066	0,0046	0,0036	0,0030
	14	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0140	0,0160	0,0180	0,0200	0,0103	0,0078	0,0055	0,0043	0,0035
$\frac{p_1}{p} = 0,20$	2	0,0033	0,0032	0,0025	0,0021	0,0018	0,0016	0,0014	0,0013	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005	0,0004
	4	0,0042	0,0056	0,0048	0,0041	0,0036	0,0031	0,0027	0,0024	0,0020	0,0017	0,0013	0,0009	0,0008
	6	0,0046	0,0060	0,0061	0,0060	0,0054	0,0047	0,0044	0,0037	0,0030	0,0024	0,0019	0,0014	0,0011
	8	0,0046	0,0060	0,0068	0,0070	0,0068	0,0063	0,0056	0,0049	0,0040	0,0032	0,0024	0,0019	0,0016
	10	0,0046	0,0060	0,0072	0,0076	0,0078	0,0076	0,0070	0,0062	0,0050	0,0040	0,0032	0,0025	0,0020
	12	0,0046	0,0060	0,0076	0,0082	0,0085	0,0087	0,0083	0,0075	0,0060	0,0049	0,0038	0,0030	0,0024
	14	0,0046	0,0060	0,0076	0,0083	0,0091	0,0093	0,0086	0,0070	0,0057	0,0043	0,0034	0,0028	
$\frac{p_1}{p} = 0,40$	2	0,0027	0,0022	0,0018	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003	0,0003
	4	0,0031	0,0032	0,0029	0,0027	0,0024	0,0022	0,0019	0,0017	0,0014	0,0012	0,0009	0,0007	0,0006
	6	0,0033	0,0037	0,0038	0,0036	0,0034	0,0031	0,0028	0,0025	0,0021	0,0018	0,0014	0,0010	0,0009
	8	0,0033	0,0041	0,0043	0,0043	0,0042	0,0039	0,0036	0,0033	0,0027	0,0023	0,0019	0,0014	0,0013
	10	0,0033	0,0044	0,0048	0,0049	0,0048	0,0047	0,0044	0,0041	0,0035	0,0029	0,0023	0,0018	0,0016
	12	0,0033	0,0044	0,0051	0,0053	0,0054	0,0053	0,0051	0,0047	0,0044	0,0035	0,0026	0,0021	0,0018
	14	0,0033	0,0044	0,0053	0,0057	0,0058	0,0058	0,0057	0,0054	0,0047	0,0040	0,0030	0,0024	0,0021
$\frac{p_1}{p} = 0,60$	2	0,0043	0,0012	0,0044	0,0010	0,0008	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002
	4	0,0047	0,0017	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014	0,0012	0,0012	0,0010	0,0008	0,0006	0,0004	0,0004
	6	0,0049	0,0021	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019	0,0017	0,0017	0,0014	0,0012	0,0009	0,0007	0,0006
	8	0,0021	0,0023	0,0025	0,0025	0,0025	0,0024	0,0022	0,0021	0,0018	0,0013	0,0012	0,0009	0,0008
	10	0,0021	0,0027	0,0028	0,0029	0,0028	0,0028	0,0025	0,0025	0,0022	0,0018	0,0014	0,0014	0,0010
	12	0,0021	0,0028	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034	0,0029	0,0029	0,0025	0,0024	0,0017	0,0013	0,0011
	14	0,0021	0,0028	0,0032	0,0033	0,0035	0,0034	0,0032	0,0032	0,0028	0,0024	0,0019	0,0015	0,0013
$\frac{p_1}{p} = 0,80$	2	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001
	4	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002
	6	0,0009	0,0010	0,0010	0,0010	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003	0,0002
	8	0,0010	0,0014	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010	0,0009	0,0008	0,0006	0,0004	0,0003
	10	0,0011	0,0012	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0011	0,0009	0,0007	0,0005
	12	0,0011	0,0013	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0011	0,0009	0,0006
	14	0,0012	0,0014	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0013	0,0012	0,0007	0,0006

Table 32. — *Conducteurs en fer.**Augmentation de la flèche pour un accroissement de la température.*

Accroissement de la température.	Tension initiale. kgs.	Flèche initiale.													
		0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050	0,060	
40°	0	0,0030	0,0025	0,0020	0,0017	0,0015	0,0013	0,0012	0,0011	0,0009	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	
	2	0,0026	0,0022	0,0019	0,0016	0,0014	0,0013	0,0012	0,0011	0,0009	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	
	6	0,0049	0,0048	0,0047	0,0045	0,0043	0,0042	0,0041	0,0040	0,0038	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	
	10	0,0045	0,0044	0,0044	0,0043	0,0042	0,0041	0,0041	0,0040	0,0038	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	
	14	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0044	0,0040	0,0040	0,0039	0,0038	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	
20°	0	0,0054	0,0043	0,0038	0,0034	0,0030	0,0026	0,0024	0,0022	0,0018	0,0015	0,0011	0,0009	0,0007	
	2	0,0047	0,0044	0,0036	0,0032	0,0028	0,0025	0,0023	0,0021	0,0018	0,0015	0,0011	0,0009	0,0007	
	6	0,0038	0,0035	0,0034	0,0028	0,0026	0,0024	0,0022	0,0020	0,0017	0,0014	0,0011	0,0009	0,0007	
	10	0,0031	0,0029	0,0027	0,0025	0,0024	0,0022	0,0020	0,0019	0,0016	0,0014	0,0011	0,0009	0,0007	
	14	0,0025	0,0025	0,0024	0,0023	0,0021	0,0020	0,0019	0,0018	0,0015	0,0013	0,0011	0,0009	0,0007	
30°	0	0,0070	0,0061	0,0053	0,0047	0,0042	0,0038	0,0034	0,0032	0,0026	0,0022	0,0017	0,0013	0,0011	
	2	0,0066	0,0057	0,0050	0,0044	0,0040	0,0037	0,0033	0,0031	0,0025	0,0022	0,0016	0,0013	0,0011	
	6	0,0060	0,0052	0,0046	0,0044	0,0037	0,0034	0,0031	0,0028	0,0024	0,0022	0,0016	0,0013	0,0011	
	10	0,0047	0,0044	0,0041	0,0037	0,0034	0,0032	0,0029	0,0027	0,0023	0,0021	0,0016	0,0013	0,0011	
	14	0,0040	0,0039	0,0037	0,0034	0,0031	0,0030	0,0027	0,0026	0,0022	0,0020	0,0016	0,0013	0,0011	
40°	0	0,0086	0,0076	0,0066	0,0059	0,0053	0,0048	0,0044	0,0041	0,0034	0,0029	0,0022	0,0017	0,0015	
	2	0,0080	0,0070	0,0062	0,0056	0,0051	0,0046	0,0043	0,0040	0,0033	0,0028	0,0022	0,0017	0,0015	
	6	0,0074	0,0065	0,0059	0,0054	0,0048	0,0044	0,0041	0,0038	0,0032	0,0028	0,0022	0,0017	0,0015	
	10	0,0065	0,0060	0,0053	0,0050	0,0046	0,0042	0,0039	0,0037	0,0034	0,0027	0,0022	0,0017	0,0015	
	14	0,0054	0,0051	0,0048	0,0045	0,0042	0,0040	0,0038	0,0036	0,0034	0,0027	0,0021	0,0017	0,0015	

Table 33. — *Conducteurs en fer**Diminution de la flèche pour une diminution de la température.*

Diminution de la température.	Tension initiale. kgs.	Flèche initiale.												
		0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050	0,060
40°	0	0,0060	0,0036	0,0026	0,0022	0,0018	0,0015	0,0013	0,0014	0,0009	0,0008	0,0006	0,0004	0,0003
	2	0,0026	0,0024	0,0024	0,0018	0,0016	0,0014	0,0012	0,0014	0,0009	0,0008	0,0006	0,0004	0,0003
	6	0,0046	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014	0,0013	0,0012	0,0010	0,0009	0,0008	0,0006	0,0004	0,0003
	10	0,0043	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0014	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003
	14	0,0010	0,0011	0,0014	0,0014	0,0011	0,0011	0,0010	0,0009	0,0008	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003
20°	0	0,0060	0,0080	0,0068	0,0046	0,0037	0,0032	0,0027	0,0024	0,0019	0,0015	0,0014	0,0009	0,0007
	2	0,0040	0,0047	0,0045	0,0040	0,0035	0,0030	0,0026	0,0024	0,0019	0,0015	0,0014	0,0009	0,0007
	6	0,0028	0,0031	0,0032	0,0031	0,0030	0,0027	0,0025	0,0022	0,0018	0,0014	0,0010	0,0009	0,0007
	10	0,0021	0,0024	0,0026	0,0027	0,0026	0,0025	0,0023	0,0021	0,0017	0,0014	0,0010	0,0009	0,0007
	14	0,0017	0,0020	0,0023	0,0024	0,0024	0,0023	0,0022	0,0020	0,0017	0,0014	0,0010	0,0009	0,0007
30°	0	0,0060	0,0080	0,0100	0,0090	0,0062	0,0054	0,0042	0,0037	0,0028	0,0023	0,0017	0,0013	0,0011
	2	0,0048	0,0060	0,0065	0,0062	0,0054	0,0046	0,0039	0,0035	0,0027	0,0023	0,0017	0,0013	0,0011
	6	0,0034	0,0042	0,0046	0,0046	0,0044	0,0040	0,0037	0,0033	0,0026	0,0022	0,0016	0,0013	0,0011
	10	0,0027	0,0034	0,0037	0,0038	0,0037	0,0036	0,0033	0,0031	0,0026	0,0022	0,0016	0,0013	0,0011
	14	0,0023	0,0028	0,0031	0,0032	0,0032	0,0032	0,0030	0,0029	0,0025	0,0022	0,0016	0,0013	0,0011
40°	0	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120	0,0100	0,0073	0,0060	0,0052	0,0039	0,0032	0,0023	0,0018	0,0015
	2	0,0033	0,0070	0,0077	0,0077	0,0074	0,0065	0,0056	0,0049	0,0038	0,0031	0,0023	0,0018	0,0015
	6	0,0039	0,0054	0,0058	0,0059	0,0058	0,0055	0,0051	0,0046	0,0037	0,0031	0,0023	0,0018	0,0015
	10	0,0033	0,0044	0,0046	0,0048	0,0049	0,0047	0,0045	0,0042	0,0036	0,0030	0,0022	0,0018	0,0015
	14	0,0029	0,0036	0,0040	0,0044	0,0042	0,0042	0,0041	0,0039	0,0034	0,0029	0,0022	0,0018	0,0015

Table 34

Lignes en pente.

Valeurs de A. pour n positif.

0,00	0,66667	0,41	0,77394	0,21	0,99544	0,31	1,65420	0,41	5,64403
0,01	0,67334	0,42	0,78855	0,22	1,03146	0,32	1,78604	0,42	7,01042
0,02	0,68085	0,43	0,80434	0,23	1,07460	0,33	1,94475	0,43	9,00340
0,03	0,68862	0,44	0,82150	0,24	1,11637	0,34	2,12435	0,44	12,04617
0,04	0,69694	0,45	0,84014	0,25	1,16667	0,35	2,34074	0,45	17,48000
0,05	0,70576	0,46	0,86044	0,26	1,22338	0,36	2,62285	0,46	26,51042
0,06	0,71549	0,47	0,88261	0,27	1,28765	0,37	2,96551	0,47	46,79630
0,07	0,72533	0,48	0,90648	0,28	1,36088	0,38	3,39352	0,48	104,66667
0,08	0,73626	0,49	0,93358	0,29	1,44482	0,39	3,94352	0,49	417,16667
0,09	0,74786	0,20	0,96296	0,30	1,54467	0,40	4,66667	0,50	∞
0,40	0,76042								

Table 35

Lignes en pente.

Valeurs de A. pour n négatif.

n	A	n	A	n	A	n	A	n	A
0,00	0,66667	0,33	0,56048	0,82	0,52391	1,48	0,54063	2,70	0,50406
0,01	0,66019	0,34	0,55904	0,84	0,52320	1,50	0,54042	2,80	0,50383
0,02	0,65409	0,35	0,55767	0,86	0,52233	1,52	0,54021	2,90	0,50360
0,03	0,64833	0,36	0,55633	0,88	0,52188	1,54	0,54000	3,00	0,50340
0,04	0,64289	0,37	0,55505	0,90	0,52126	1,56	0,53982	3,20	0,50304
0,05	0,63774	0,38	0,55380	0,92	0,52066	1,58	0,53963	3,40	0,50273
0,06	0,63286	0,39	0,55258	0,94	0,52008	1,60	0,53945	3,60	0,50247
0,07	0,62824	0,40	0,55144	0,96	0,51954	1,62	0,53927	3,80	0,50225
0,08	0,62383	0,41	0,55034	0,98	0,51902	1,64	0,53909	4,00	0,50206
0,09	0,61969	0,42	0,54923	1,00	0,51852	1,66	0,53892	4,20	0,50189
0,10	0,61574	0,43	0,54817	1,02	0,51803	1,68	0,53876	4,40	0,50174
0,11	0,61198	0,44	0,54716	1,04	0,51757	1,70	0,53861	4,60	0,50160
0,12	0,60839	0,45	0,54617	1,06	0,51712	1,72	0,53846	4,80	0,50148
0,13	0,60498	0,46	0,54521	1,08	0,51669	1,74	0,53831	5,00	0,50138
0,14	0,60172	0,47	0,54429	1,10	0,51628	1,76	0,53816	6,00	0,50098
0,15	0,59862	0,48	0,54339	1,12	0,51588	1,78	0,53802	7,00	0,50074
0,16	0,59564	0,49	0,54251	1,14	0,51439	1,80	0,53788	8,00	0,50058
0,17	0,59282	0,50	0,54167	1,16	0,51342	1,82	0,53774	9,00	0,50046
0,18	0,59041	0,52	0,54005	1,18	0,51276	1,84	0,53760	10,00	0,50038
0,19	0,58752	0,54	0,53852	1,20	0,51142	1,86	0,53747	12,00	0,500267
0,20	0,58503	0,56	0,53708	1,22	0,51049	1,88	0,53735	14,00	0,500191
0,21	0,58263	0,58	0,53572	1,24	0,51077	1,90	0,53723	16,00	0,500153
0,22	0,58038	0,60	0,53443	1,26	0,51036	1,92	0,53711	18,00	0,500122
0,23	0,57819	0,62	0,53321	1,28	0,51016	1,94	0,53699	20,00	0,500099
0,24	0,57609	0,64	0,53206	1,30	0,51027	1,96	0,53688	30,00	0,500043
0,25	0,57407	0,66	0,53096	1,32	0,51038	1,98	0,53677	40,00	0,500025
0,26	0,57214	0,68	0,52992	1,34	0,51030	2,00	0,53667	50,00	0,500013
0,27	0,57027	0,70	0,52893	1,36	0,51024	2,10	0,53646	60,00	0,500011
0,28	0,56848	0,72	0,52799	1,38	0,51018	2,20	0,53631	70,00	0,500009
0,29	0,56676	0,74	0,52709	1,40	0,51014	2,30	0,53621	80,00	0,500007
0,30	0,56540	0,76	0,52624	1,42	0,51010	2,40	0,53611	90,00	0,500003
0,31	0,56334	0,78	0,52544	1,44	0,51006	2,50	0,53604	100,00	0,500004
0,32	0,56197	0,80	0,52466	1,46	0,51003	2,60	0,53603		

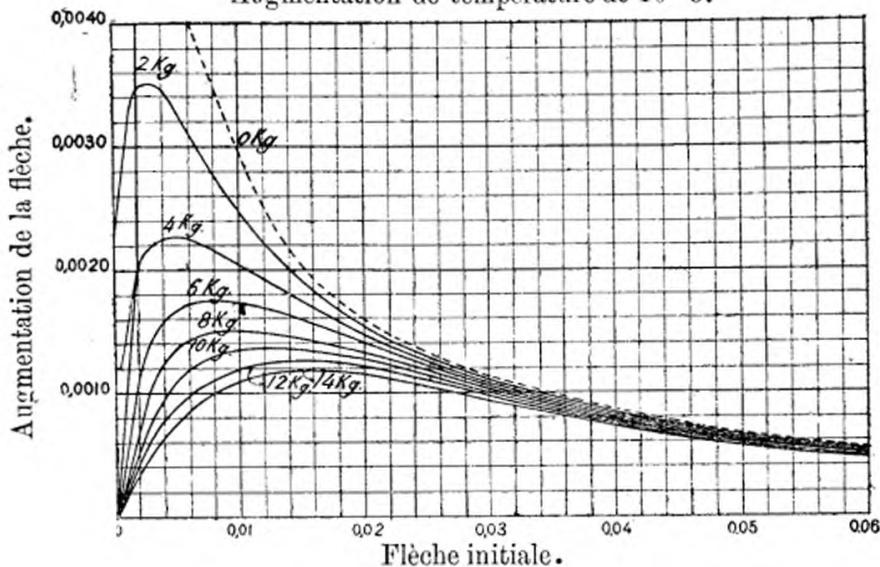
*Conducteurs en cuivre.*Augmentation de température de 10° C.

Fig. 9.

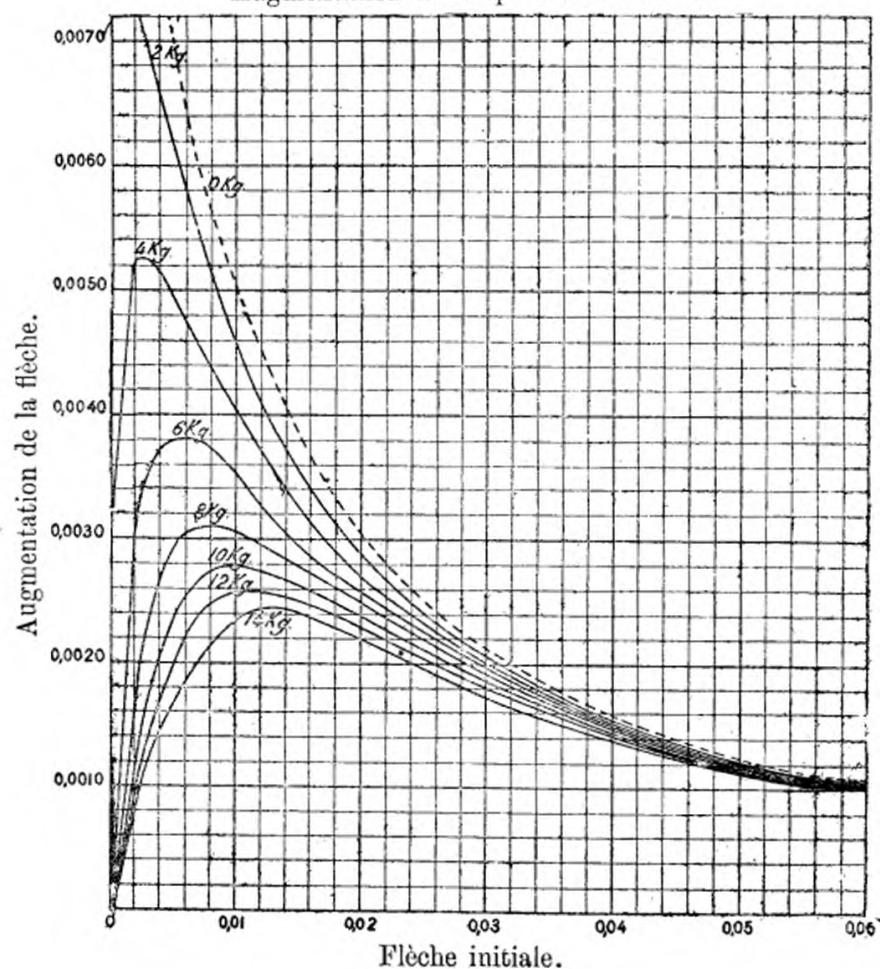
*Conducteurs en cuivre.*Augmentation de température de 20° C.

Fig. 10.

Conducteurs en cuivre.

Augmentation de température de 30° C.

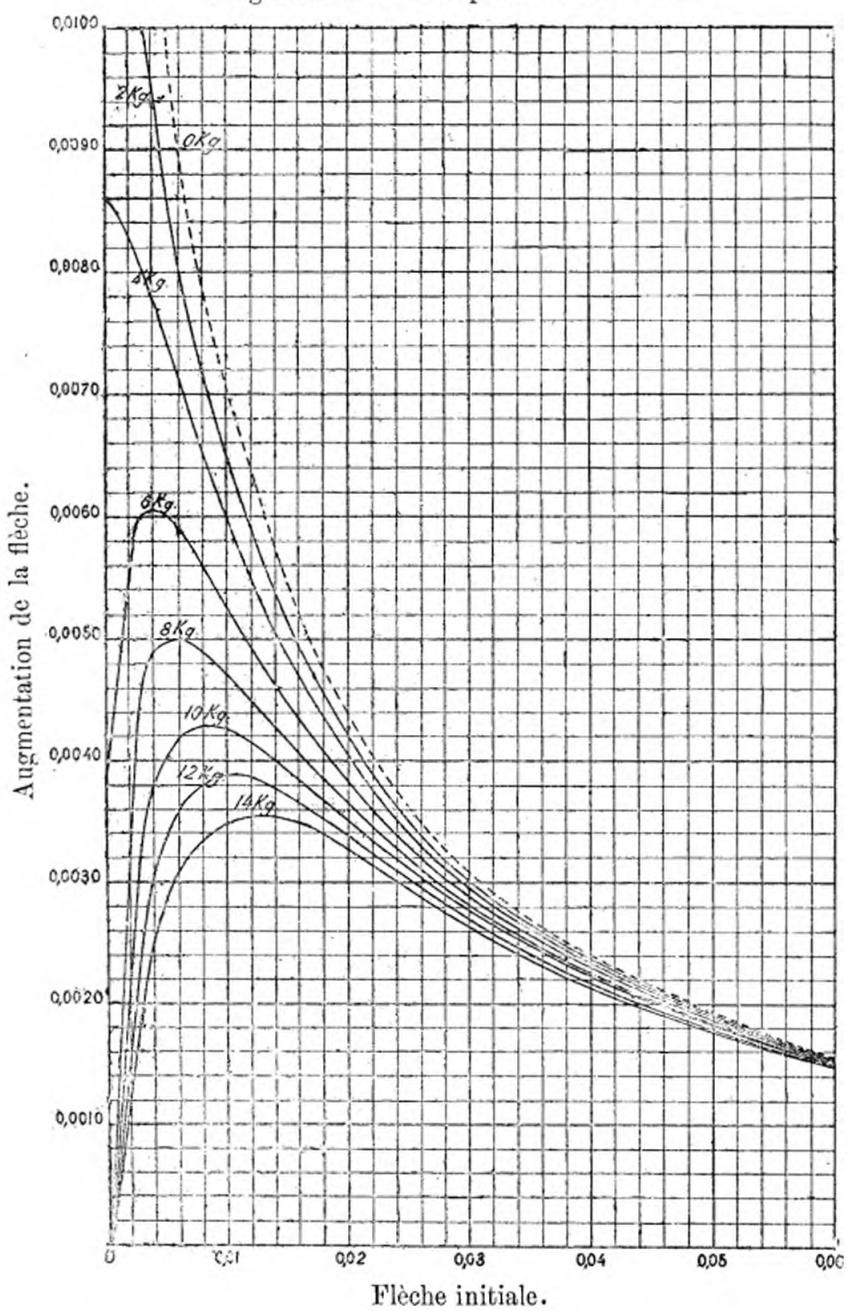


Fig. 11.

Conducteurs en cuivre.

Augmentation de température de 40° C.

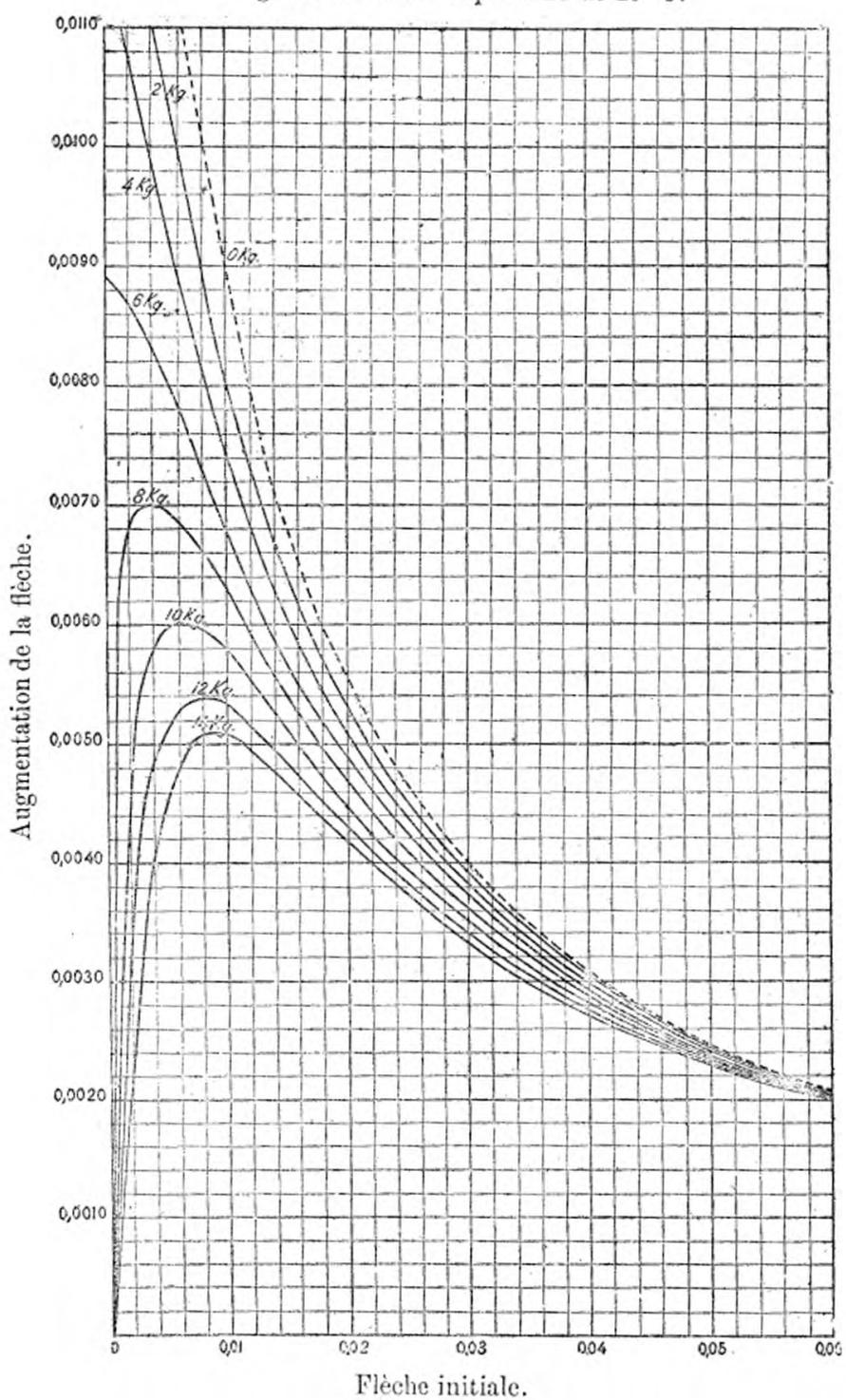


Fig. 12.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de température de 10° C.

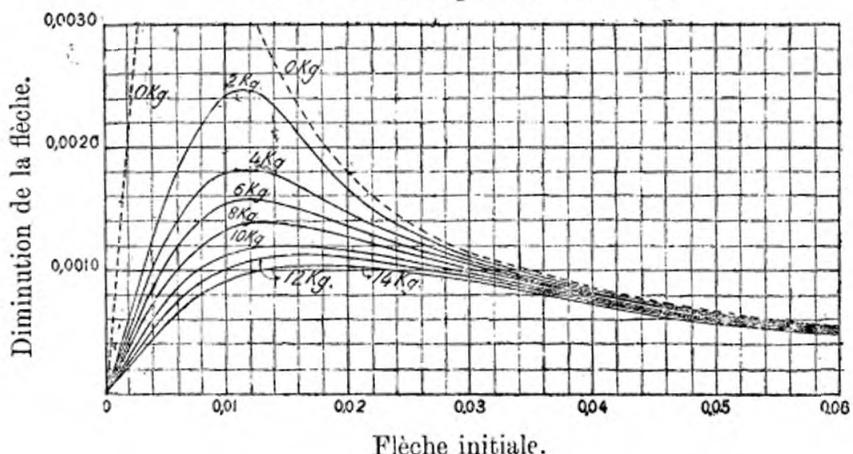


Fig. 13.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de température de 20° C.

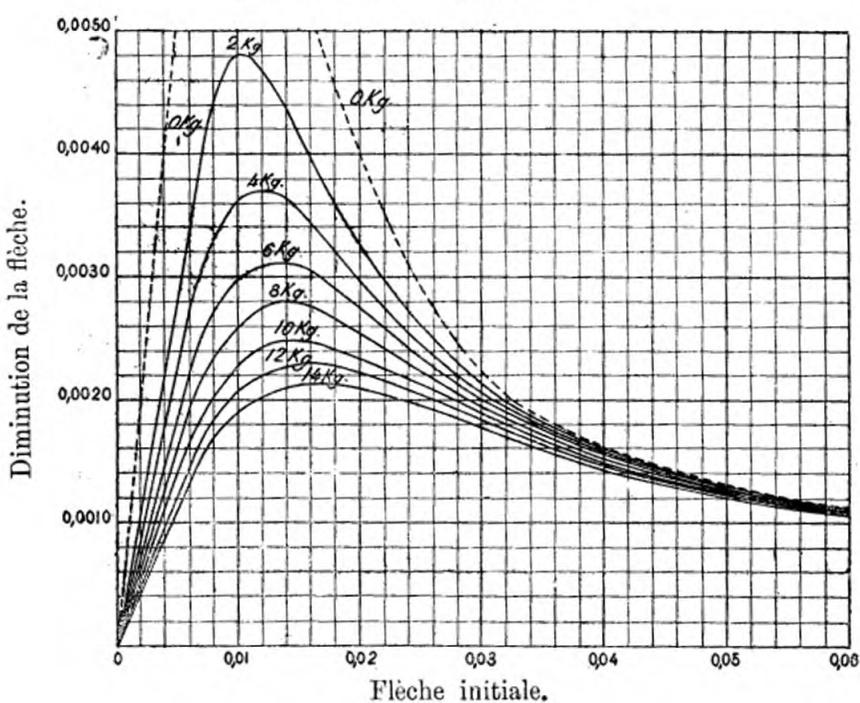


Fig. 14.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de température de 30° C.

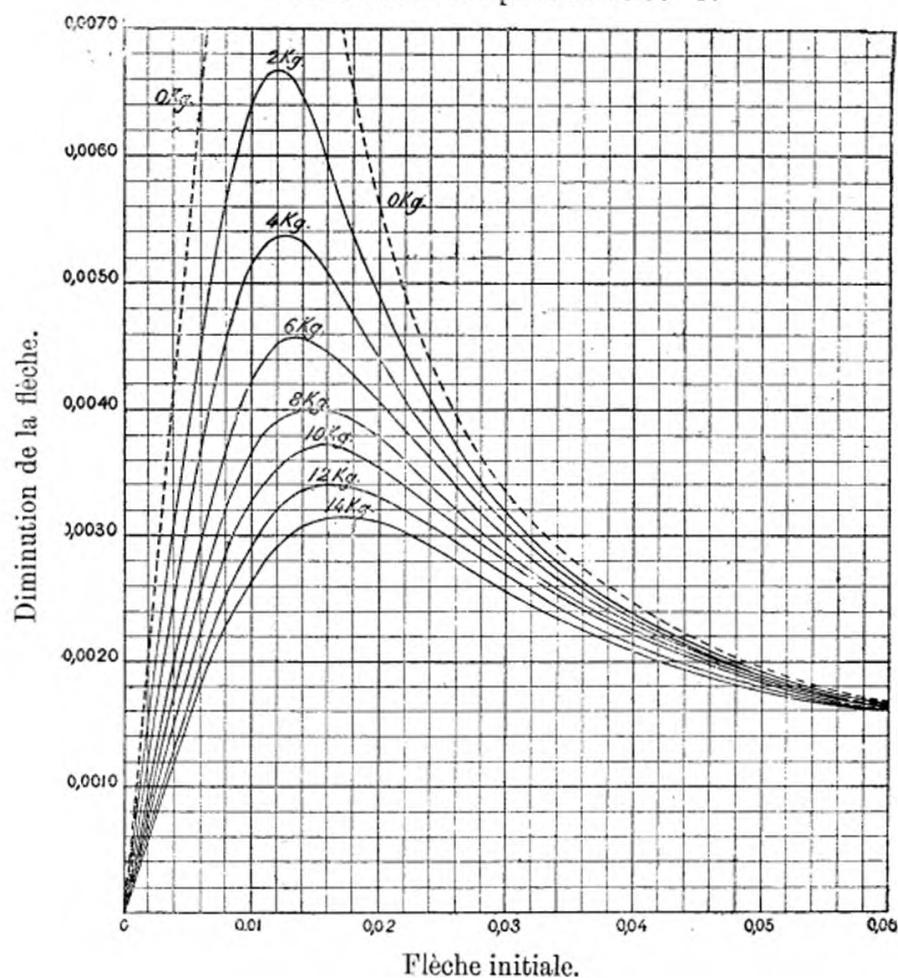


Fig. 15.

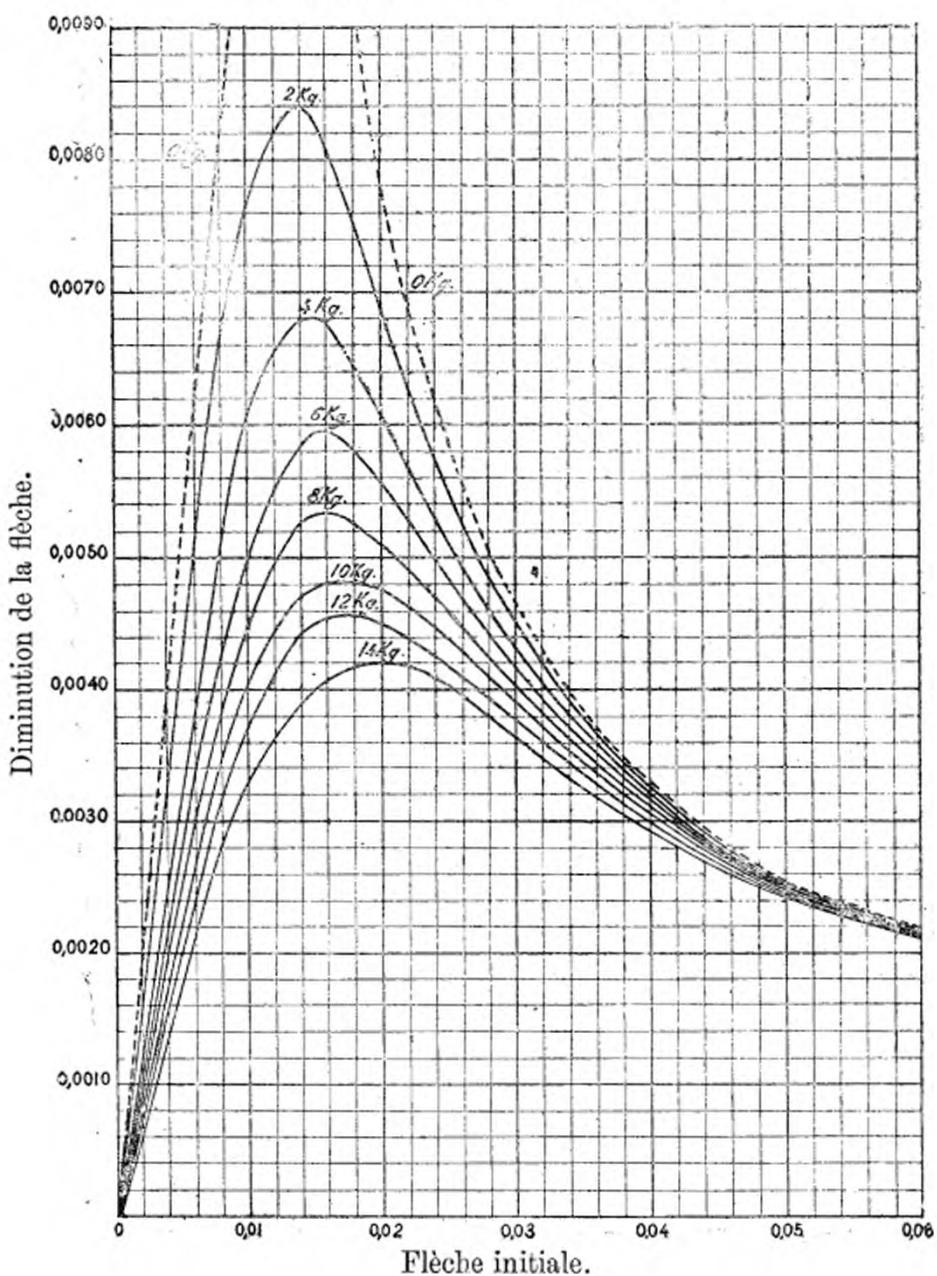
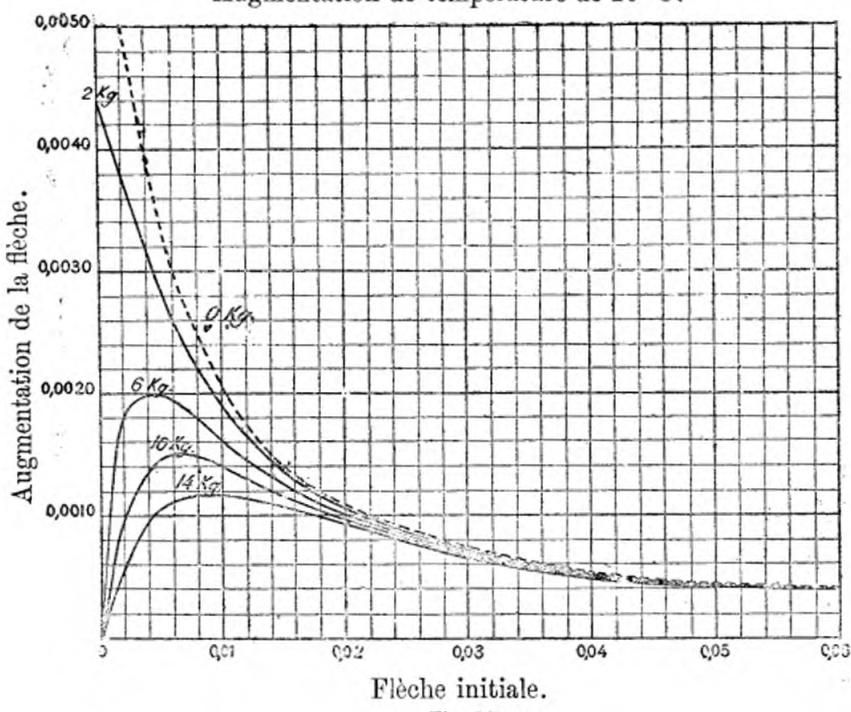
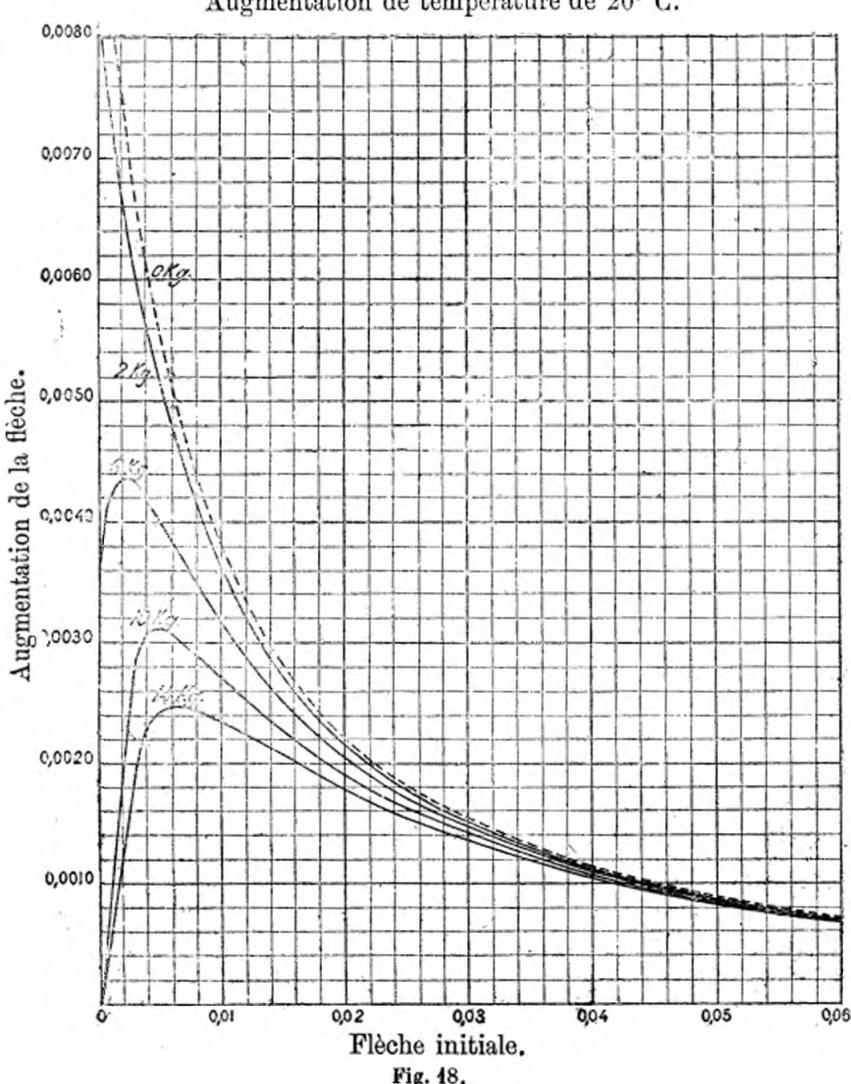
*Conducteurs en cuivre.*Diminution de température de 40° C.

Fig. 16.

*Conducteurs en fer.*Augmentation de température de 10° C. *Conducteurs en fer.*Augmentation de température de 20° C. 

Conducteurs en fer

Augmentation de température de 30° C.

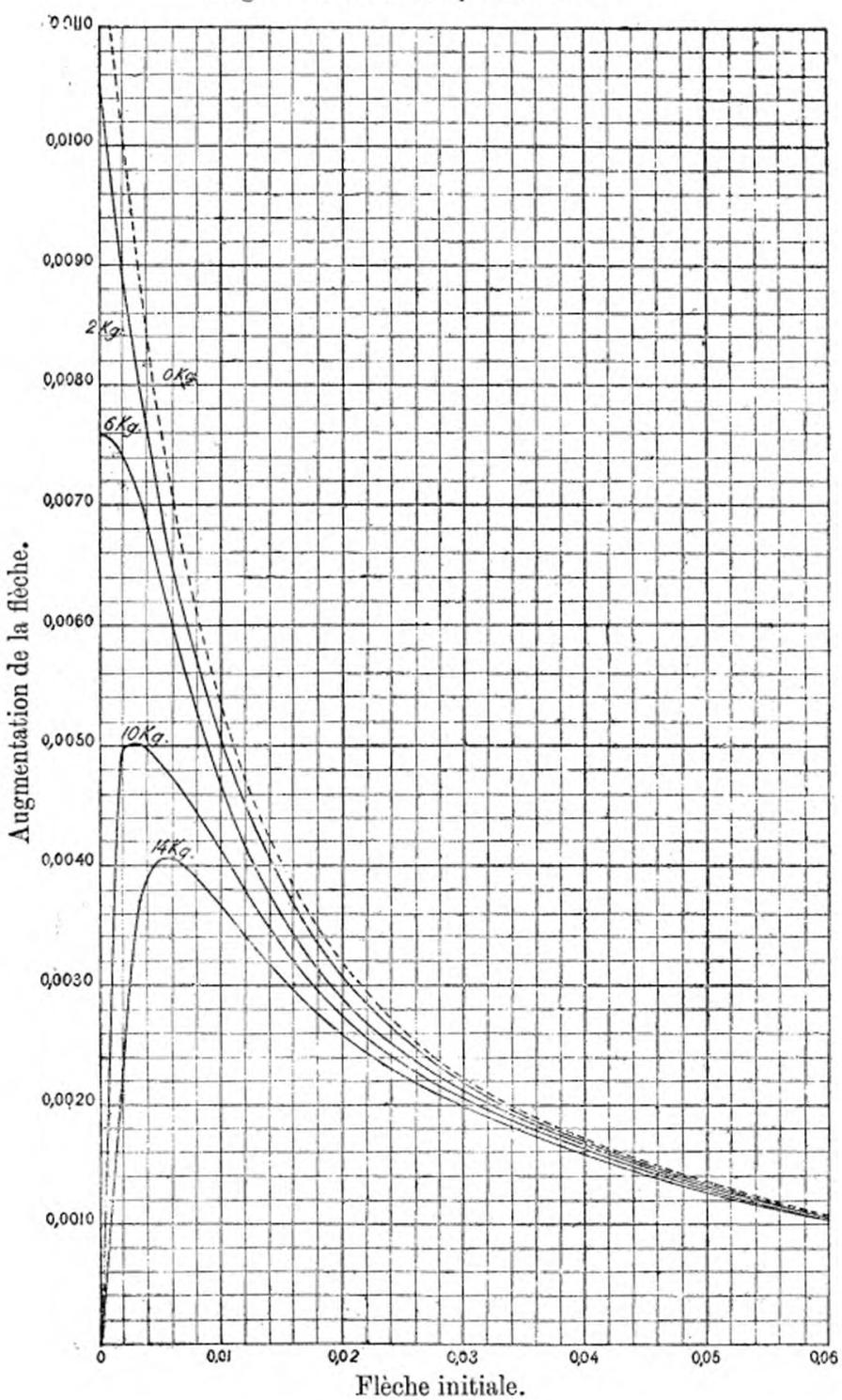


Fig. 19.

Conducteurs en fer.

Augmentation de température de 40° C.

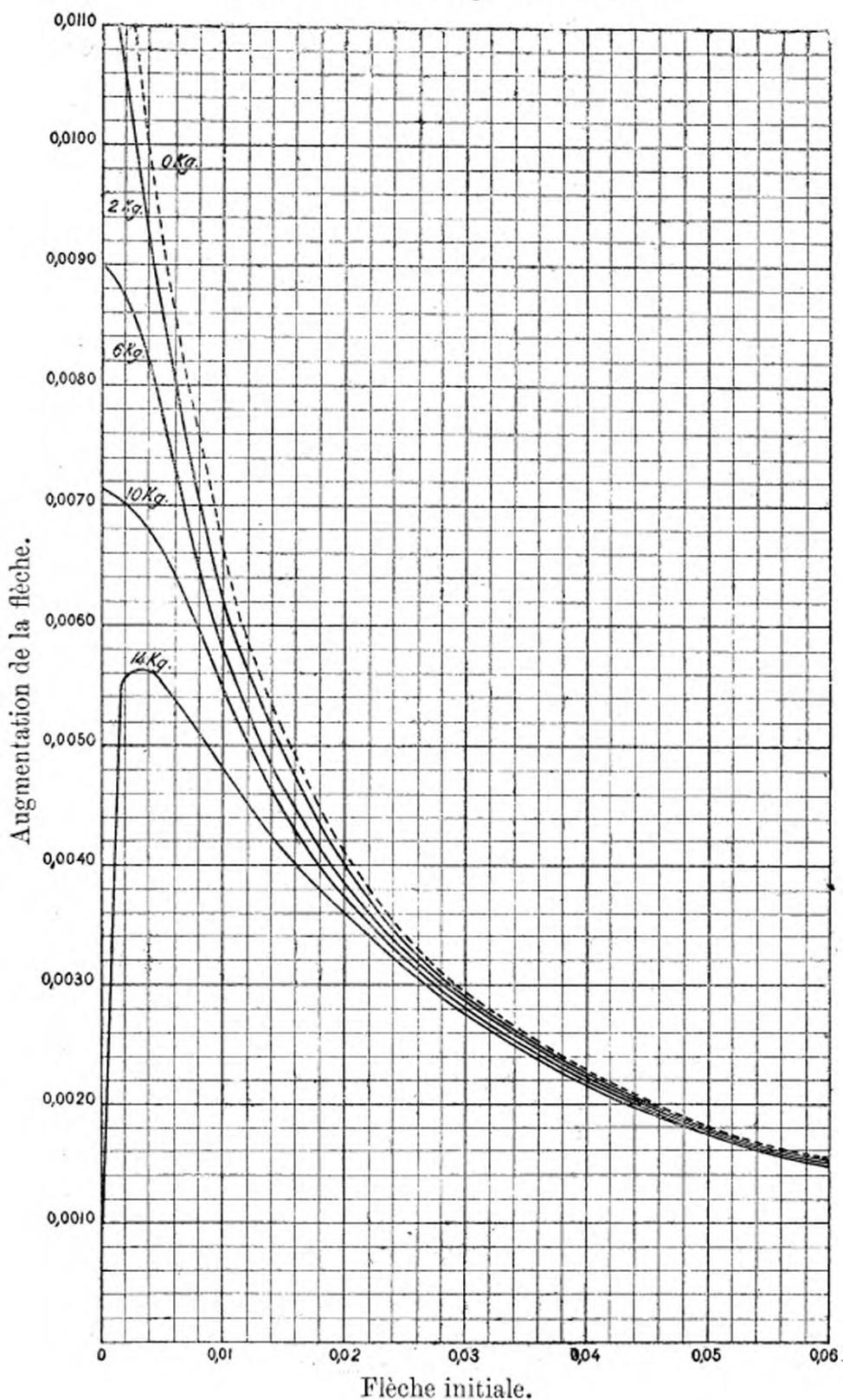


Fig. 20.

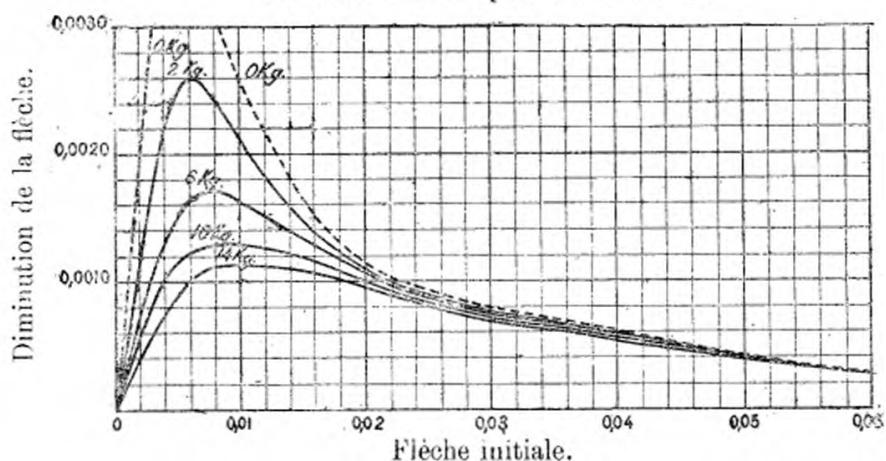
*Conducteurs en fer.*Diminution de température de 10°C .

Fig. 21.

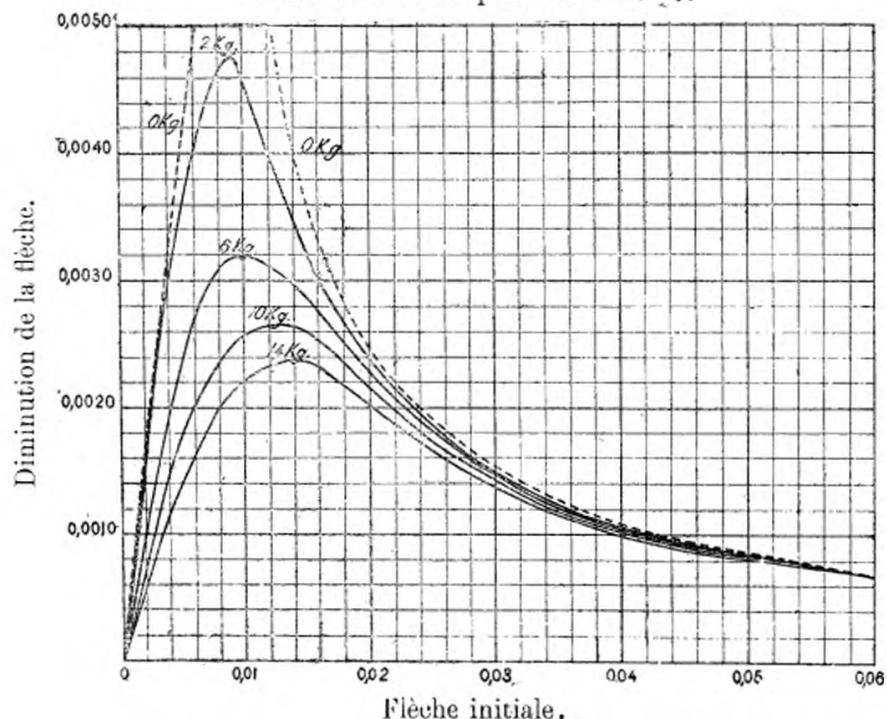
*Conducteurs en fer.*Diminution de température de 20°C .

Fig. 22.

Conducteurs en fer.

Diminution de température de 30° C.

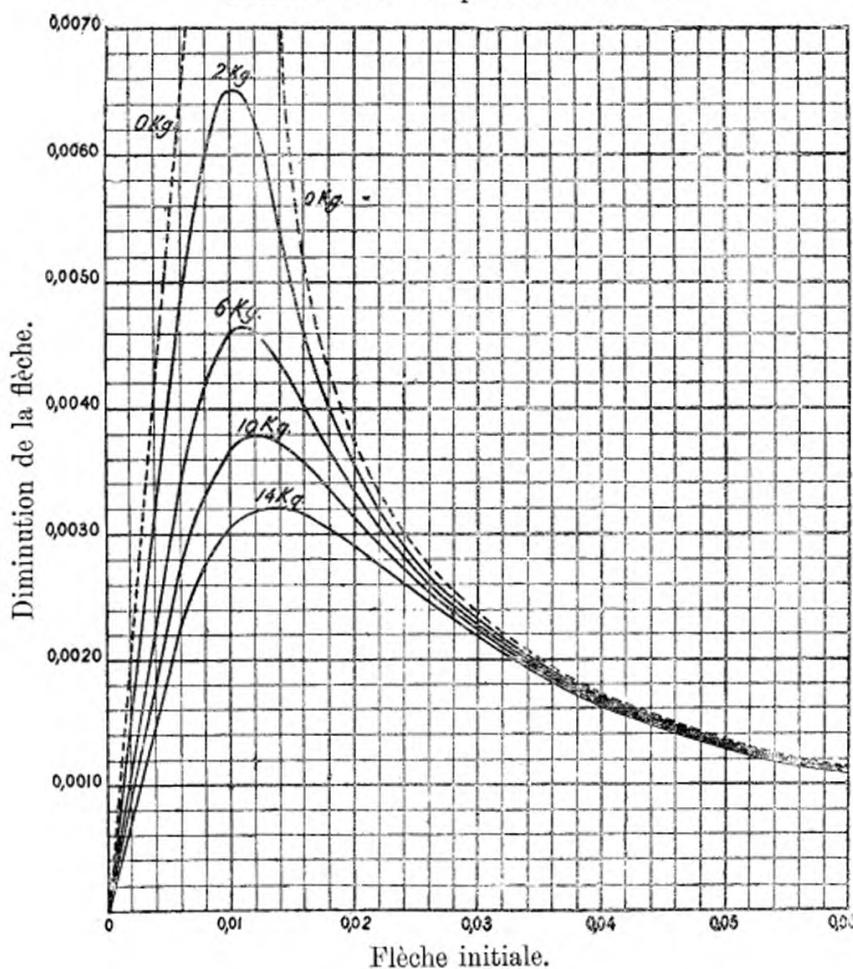


Fig. 23.

Conducteurs en fer.

Diminution de température de 40° C.

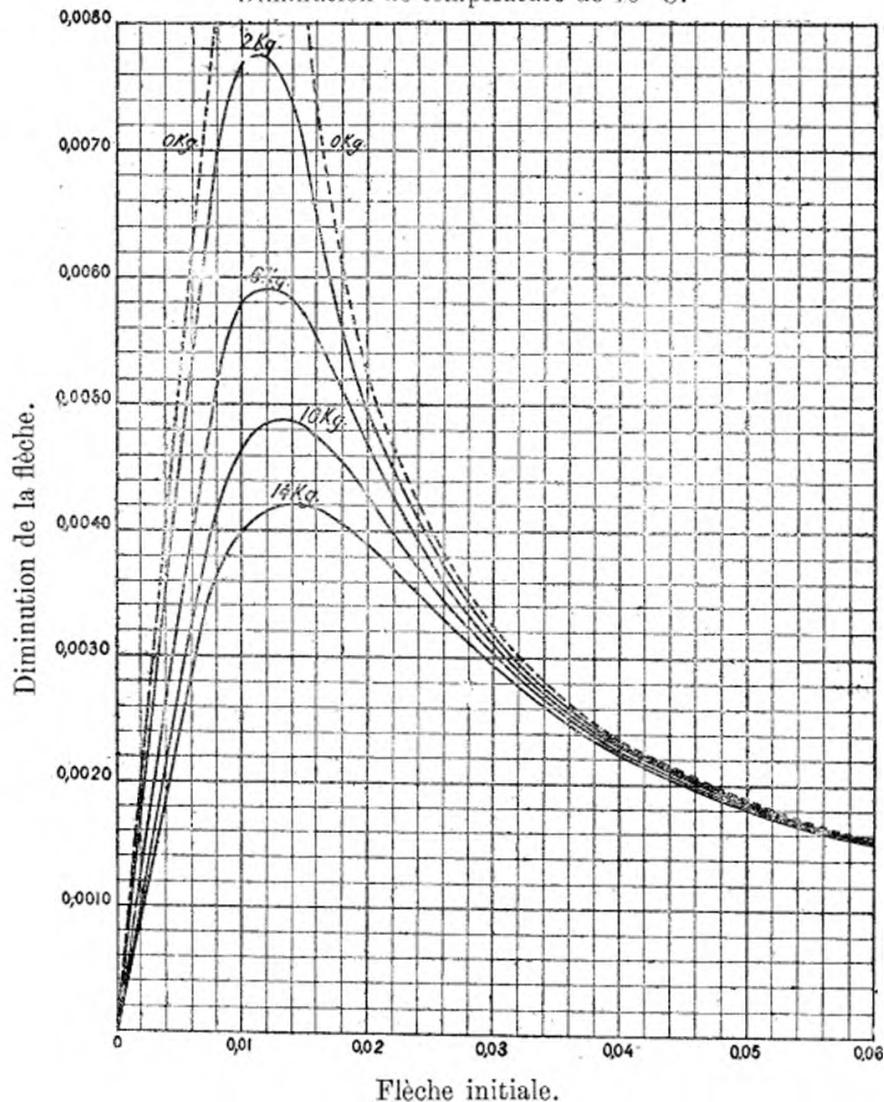


Fig. 24.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de l'effort par mètre courant $\left(\frac{p_t}{p} = 0,20 \right)$

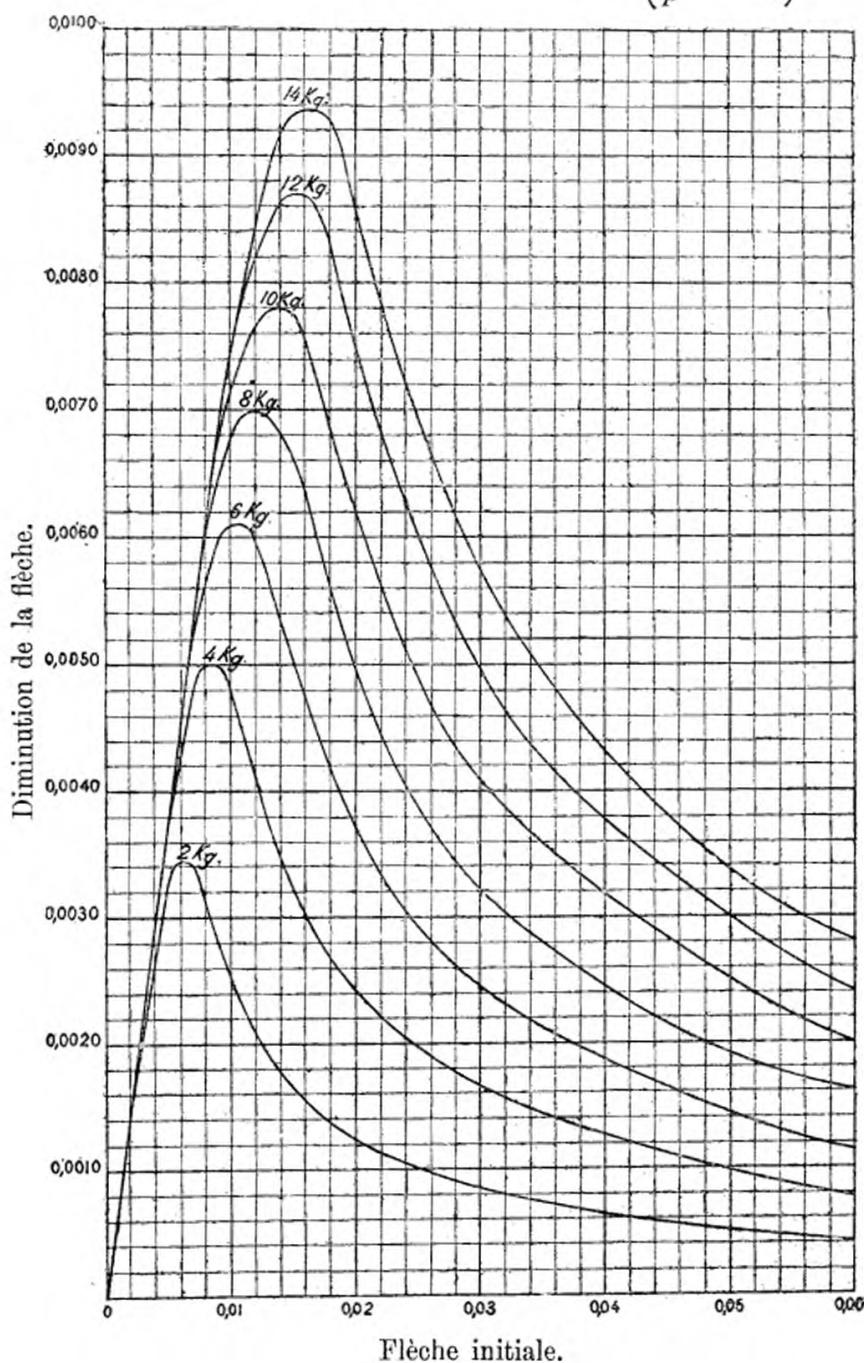
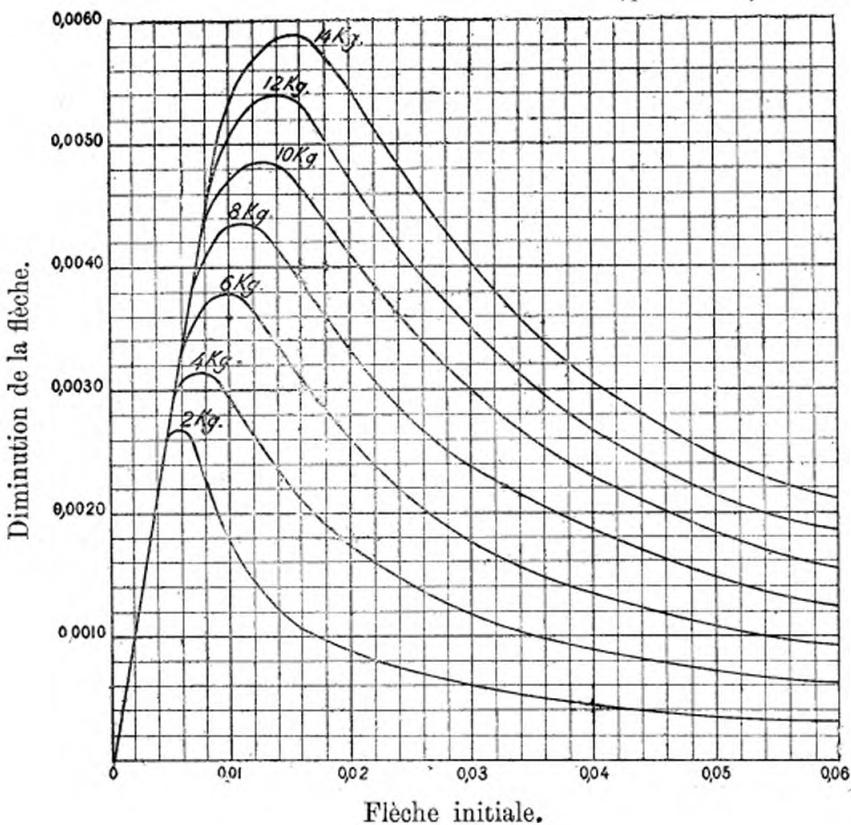


Fig. 25.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de l'effort par mètre courant $\left(\frac{p_t}{p} = 0,40 \right)$



Flèche initiale.

Fig. 26.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de l'effort par mètre courant $\left(\frac{p_t}{p} = 0,60 \right)$

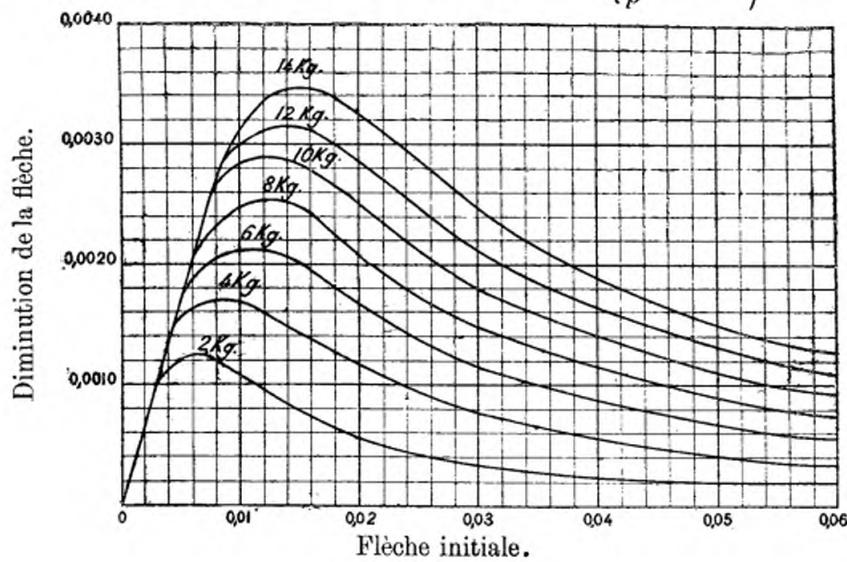


Fig. 27.

Conducteurs en cuivre.

Diminution de l'effort par mètre courant $\left(\frac{p_i}{p} = 0,80 \right)$

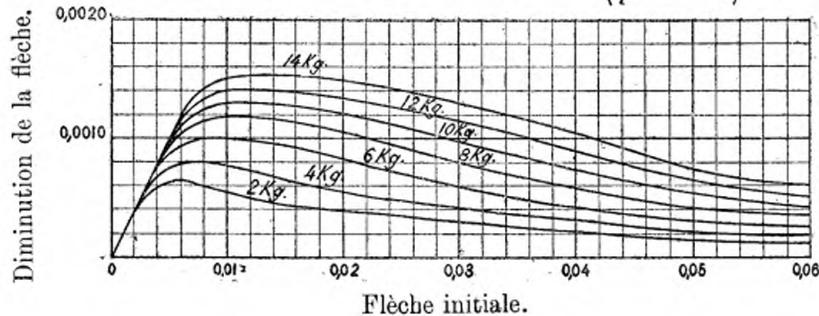


Fig. 28.