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 nº 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 - http://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

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 passible 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

Auteur(s)	**Vigneron, Henri (18..-19..)**
Titre	**L'électricité et ses applications : théorie, production, distribution, lumière, force, chaleur, traction, T. S. F., téléphone, électricité médicale**
Adresse	**Paris : Masson et Cie, éditeurs, libraires de l'Académie de médecine, 1928**
Collation	**1 vol. (VII-812 p.) : ill., couv. ill. en coul. ; 25 cm**
Nombre d'images	**834**
Cote	**CNAM-BIB 8 Ca 626**
Sujet(s)	**Électricité** **Électrotechnique** **Électrothérapie**
Thématique(s)	**Technologies de l'information et de la communication**
Typologie	**Ouvrage**
Langue	**Français**
Date de mise en ligne	**21/01/2021**
Date de génération du PDF	**20/01/2021**
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?8CA626

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'ÉLECTRICITÉ

ET SES

APPLICATIONS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A LA MÊME LIBRAIRIE

Précis de Chimie physique, par H. VIGNERON. Paris, 1926, 2e *édition*. 1 vol. de 448 pages avec 123 figures..... 45 fr.

Traité de Chimie physique, par WILLIAM C. MAC-LEWIS, professeur de chimie physique à l'Université de Liverpool, traduit sur la 3e édition anglaise, par H. VIGNERON, licencié ès sciences physiques et chimiques.

Tome I. — *Théorie cinétique*. Paris, 1920. 1 vol. in-8 de 416 pages, avec 52 figures. *Épuisé*.

Tome II. — *Thermodynamique*. Paris, 1921. 1 vol. in-8 de 411 pages, avec 56 fig. 70 fr.

Tome III. — *Théories modernes. Théorie des quanta*..... 42 fr.

Chimie industrielle, par PAUL BAUD. *La grande Industrie chimique. — Les Métalloïdes et leurs composés. — Les métaux et leurs sels. — Industries organiques.* 2e *édition entièrement refondue*. Paris, 1927. 1 vol. gr. in-8 de 1022 pages avec 331 figures. 100 fr.

Cours d'Électricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique, par G. BRUHAT, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Lille. Paris, 1924, 1 vol. de 700 pages avec 518 figures..... 70 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8°Ca.626

H. VIGNERON

L'ÉLECTRICITÉ

ET SES

APPLICATIONS

THÉORIE = PRODUCTION = DISTRIBUTION
LUMIÈRE = FORCE = CHALEUR = TRACTION
T. S. F. = TÉLÉPHONE = ÉLECTRICITÉ MÉDICALE



8°Ca626.
Mars 1928

MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 120, PARIS (VIe)
1928

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

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

Copyright, 1928, by Masson et Cie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PRÉFACE

On a dit avec juste raison que le XX^e siècle serait le siècle de l'électricité comme le XIX^e avait été celui de la vapeur. Il semble bien que cette prédiction soit exacte, car le développement et surtout l'extension des installations électriques sont extrêmement considérables, surtout dans nôtre pays. Il suffit de parcourir la France pour se rendre compte de l'effort industriel énorme qui s'accomplit actuellement pour réaliser le vaste programme, conçu avant guerre, de l'électrification des campagnes. Partout se dressent les grêles pylônes supportant les lignes de transmission aérienne, et il est bien peu de paysages dans lesquels on ne puisse découvrir la présence de l'électricité. Ce sont, de distance en distance, les postes secondaires de transformation ; de place en place, une sous-station étale le long de la route ses batteries de transformateurs et d'appareils de protection ; plus loin, ce sont les lignes haute tension accompagnant la route pendant de nombreux kilomètres pour brusquement enjamber une colline et disparaître vers une usine hydro-électrique lointaine. Les chemins de fer eux-mêmes ne restent plus exclusivement fidèles à la traction à la vapeur, et la silhouette du train, si familière, avec sa grosse locomotive couronnée d'un panache de fumée traînant dans le ciel en volutes floconneuses, s'est modifiée : sur de nombreuses lignes, sans bruit, sans halètement, sans fumée, le convoi progresse ; la cheminée a disparu, et à sa place une grêle charpente articulée s'appuie obstinément sur un fil qui semble arachnéen et qui, cependant, fournit toute l'énergie nécessaire à la propulsion de l'énorme masse en mouvement.

De même, si l'on fixe l'attention sur les environs immédiats, on trouve encore partout les témoins de l'activité électrique, sous des formes infiniment variées, qui déjà nous sont devenues familières, et les antennes qui surmontent tant de maisons, même en des lieux qui semblent perdus dans les campagnes lointaines, montrent que là encore l'électricité a réussi à pénétrer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'importance, la multiplicité et l'ampleur des applications de l'électricité sont telles que l'on peut dire sans exagération que toute la vie économique moderne repose sur elles. Si, par une fiction à la Wells, on supposait qu'à un moment donné toutes les sources d'énergie électrique soient taries, il en résulterait une véritable catastrophe mondiale.

* * *

Nous avons cherché, dans le présent volume, à présenter une vue d'ensemble des applications multiples de l'électricité et en même temps un résumé aussi complet que possible des connaissances théoriques actuelles sur les diverses manifestations de l'énergie électrique.

Il nous a semblé, en effet, qu'entre les ouvrages purement didactiques établis pour les élèves, et les ouvrages spéciaux destinés aux techniciens, il y avait place pour un exposé s'adressant aux « Français moyens », à tous ceux qui, ayant chaque jour sous les yeux les applications de l'électricité, désirent en comprendre le fonctionnement et le mécanisme.

Les difficultés de réalisation de ce programme étaient considérables, car il fallait éviter un double écueil : trop élémentaire, le livre n'avait aucune valeur ; trop technique, il risquait de rebuter le lecteur non spécialiste. Le lecteur jugera si nous avons réussi dans notre entreprise.

Afin de ne pas donner au volume une importance exagérée, nous avons délibérément supprimé, non seulement toute la partie historique, sans intérêt pratique, mais également toutes les descriptions d'appareils que l'on rencontre encore dans beaucoup d'excellents traités, bien qu'ils ne soient plus en service depuis de nombreuses années. Tous les exemples, toutes les descriptions, toutes les figures sont relatives à des installations modernes actuellement en service et donnent ainsi une exacte représentation de l'état actuel de l'industrie électrique. Nous n'avons fait intervenir que le plus rarement possible les développements mathématiques, toujours élémentaires et ne nécessitant pas de connaissances spéciales.

Nous avons divisé le volume en trois parties distinctes. Dans chacune d'elles, chaque chapitre peut, sans inconvénient, être lu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seul, et ne nécessite pas, pour sa compréhension, l'obligation de se reporter au chapitre précédant.

La première partie traite de l'électricité théorique. Nous avons essayé de condenser en quelques chapitres tout l'essentiel de nos connaissances actuelles sur le sujet. Dès le début, nous avons introduit la notion fondamentale de l'électron, qui domine toute la science moderne. Nous nous sommes étendu avec quelques détails sur les phénomènes de découverte récente : rayons X, radioactivité, oscillations électriques, émissions thermo-ioniques, etc., sur lesquelles le lecteur ne pourrait se renseigner qu'en se reportant à des ouvrages spéciaux, trop détaillés ou trop difficiles à suivre.

Dans la seconde partie, les divers modes de production de l'énergie électrique ont été successivement passés en revue, avec toutes les indications utiles pour en comprendre le principe, et les caractéristiques essentielles. Nous avons également traité dans cette partie des moyens de transport et de distribution de l'électricité à distance.

Enfin, dans la troisième partie, on trouvera exposées, en quelques chapitres rédigés comme des monographies séparées, les applications principales de l'énergie électrique.

Nous tenons à remercier les nombreux constructeurs qui ont bien voulu nous faciliter notre tâche en mettant à notre disposition leur documentation industrielle, nous permettant ainsi de présenter au lecteur des documents exacts sur l'état actuel de l'industrie électrique.

H. VIGNERON.

Paris, septembre 1927.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'ÉLECTRICITÉ
ET SES APPLICATIONS

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES GÉNÉRAUX, LOIS ET MESURES

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTROSTATIQUE

Électricité statique et courant. — Conception de Coulomb. — Conception de Maxwell. — Les deux sortes d'électricité. — Corps conducteurs et corps isolants. — La loi de Coulomb. — L'unité de charge électrique. — Le coulomb. — Le champ électrique. — Lignes de force du champ électrique. — Nature des charges électriques. — La tension ou potentiel. — La capacité des conducteurs. — La différence de potentiel — Le volt. — L'unité de capacité. — Le farad. — Les surfaces équipotentielles. — La densité électrique. — Le pouvoir des pointes. — Les phénomènes d'influence. — Charge par influence. — Fonctionnement des paratonnerres. — Variation de la capacité d'un conducteur. — Condensateurs. — Capacité des condensateurs. — Formes des condensateurs. — Rôle du diélectrique. — Polarisation des diélectriques. — Localisation de l'énergie dans le diélectrique. — L'éther. — Principe des machines électriques. — Le replenisher de Kelvin. — Le courant électrique. — L'électricité de contact. — Expérience de Galvani. — Loi des contacts de Volta. — La pile. — Piles thermo-électriques. — Effet Peltier. — Pyromètres. — Pyro-électricité. — Piézo-électricité. — Applications. — Ultra-sons.

Les phénomènes électriques les plus anciennement connus se rapportent aux propriétés qu'acquièrent certains corps tels l'ambre (en grec : *elektron*), l'ébonite, le verre, etc., lorsqu'on les frotte avec un morceau de drap ou une peau de chat. En particulier, ils sont capables d'exercer des efforts d'attraction sur des corps légers placés à leur voisinage, petits morceaux de papier ou légères boules de moelle de sureau.

On dit, pour caractériser cet état particulier des corps, qu'ils sont ***électrisés*** ou qu'ils sont chargés d'***électricité***.

Entre ces phénomènes, curieux sans doute, et ceux que l'on observe dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les machines électriques modernes, il semble qu'il y ait un abîme et qu'autant l'étude de ces derniers soit d'une importance capitale, autant les premiers paraissent désuets, sans intérêt pratique. Il y a quelques années seulement, cette tendance d'esprit était extrêmement répandue, même dans l'enseignement, et, dans beaucoup d'excellents traités, on commençait délibérément l'étude de l'électricité par celle du courant électrique, n'accordant qu'une place secondaire à ce que l'on appelait dédaigneusement « les vertus de l'ambre et de la peau de chat ». La notion de *courant* l'emportait sur celle de *charges* électriques, le dynamique triomphait du statique

Bien plus même, les conceptions théoriques fondamentales étaient radicalement différentes. Au lieu de considérer, comme les anciens physiciens de l'école de Coulomb, que le phénomène électrique consistait en l'apparition de *charges* d'une substance mystérieuse et impondérable appelée électricité, sur les corps matériels, les physiciens modernes, à la suite de Maxwell, admettaient que le phénomène électrique réside essentiellement dans une *modification du milieu* environnant les corps matériels rempli d'une substance hypothétique appelée éther. Le phénomène électrique est une modification de l'éther, la charge électrique constatée sur les corps matériels étant simplement une conséquence de cette modification.

Mais les découvertes récentes des rayons X, de l'émission d'électricité par les corps chauffés, de la radioactivité, l'étude de la conductibilité des gaz, etc., dont nous aurons l'occasion de parler en détail, redonnèrent à la charge électrique l'importance et la réalité qu'elle semblait avoir perdues définitivement, en mettant en évidence l'existence d'un véritable atome d'électricité, l'*électron*, élément fondamental de toute matière.

Aussi commencerons-nous l'exposé théorique très succinct des lois générales de l'électricité par l'étude des phénomènes électrostatiques, en introduisant dès le début la notion moderne fondamentale de l'électron, demandant au lecteur d'accepter *a priori* cette conception, dont il trouvera, dans les derniers chapitres de la première partie de ce livre, les nombreuses preuves expérimentales.

* * *

Une observation un peu approfondie du phénomène d'électrisation par frottement montre immédiatement qu'il est moins simple qu'on peut le penser à première vue. En effet, si, à l'aide d'une baguette de verre frottée, on touche deux petites boules de moelle de sureau suspendues à une potence, on constate que les boules s'électrisent, se repoussent aussitôt et restent écartées l'une de l'autre. Si on approche de nouveau la baguette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de verre, elles sont également repoussées par elle. Le même phénomène se produit si, au lieu d'employer une baguette de verre frotté comme source d'électricité, on se sert d'un bâton de cire à cacheter. Mais approchons maintenant, des deux boules électrisées par la baguette de verre, le bâton de cire à cacheter frotté : immédiatement, il y a attraction au lieu de répulsion.

L'effet n'est donc pas le même lorsqu'on emploie des substances différentes comme sources d'électricité. Un bâton de cire frotté est électrisé d'une autre façon qu'une baguette de verre frottée. On a été conduit ainsi à distinguer deux sortes d'électricité : l'*électricité vitreuse* ou ***positive*** et l'*électricité résineuse* ou ***négative***.

Il est déjà possible d'énoncer une première loi : *les corps électrisés de même nom se repoussent, les corps électrisés de noms contraires s'attirent.* Nous verrons plus loin l'expression quantitative de cette loi.

* * *

Auparavant, nous devons remarquer que les corps que nous pouvons électriser par frottement et qui conservent ensuite pendant un certain temps leur état d'électrisation sont les corps *non métalliques*. Au contraire, les *métaux* et un grand nombre d'autres substances, beaucoup de liquides, le bois humide, la terre, etc., se comportent différemment. Ils s'électrisent bien quand on les frotte, ainsi que l'on a pu le mettre en évidence, mais l'électricité produite, au lieu de rester localisée à l'endroit frotté, se répartit immédiatement sur tout le métal ; si celui-ci est tenu à la main, elle se communique aux doigts, au corps de l'homme, par son intermédiaire aux murs et à la terre. On dit dans ce cas que *l'électricité est mise à la terre*.

Si, au contraire, le morceau de métal est *isolé*, en le fixant sur un manche en ébonite par exemple, on peut l'électriser en le frottant ; l'électricité développée se répartit bien encore sur toute la surface du métal, mais ne peut s'écouler à l'extérieur.

Ainsi donc, de même que nous avons été amenés à distinguer deux sortes d'électricités, nous devons ranger les corps en deux classes : les corps ***isolants*** (verre, résine, etc.), qui retiennent l'électricité sur eux au point de production, et les corps ***conducteurs*** (métaux et substances analogues) sur lesquels l'électricité se répartit immédiatement sur toute la surface.

Naturellement, la distinction pratique n'est pas aussi nettement tranchée, et, entre les isolants et les conducteurs, on peut placer une classe intermédiaire de substances médiocres isolants, mais que l'on ne peut cependant appeler des conducteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Nous avons vu que les corps électrisés exercent des actions mutuelles attractives ou répulsives ; il nous reste à chercher l'expression de la valeur des forces ainsi développées en fonction de la charge que portent les corps et de la distance qui les sépare.

C'est la loi de **Coulomb**, découverte en 1785. Elle s'énonce : la force que deux petits corps électrisés exercent l'un sur l'autre est égale au produit de leurs quantités d'électricité divisé par le carré de leur distance. Cette force est répulsive si les deux corps sont chargés d'électricité de même signe, et attractive s'ils sont chargés d'électricité de nom contraire.

Cette loi, identique à la loi de Newton qui régit l'attraction des corps matériels, nous permet immédiatement de définir l'*unité de charge électrique*. Ce sera une charge qui, placée à 1 centimètre (unité de longueur) d'une charge égale, exercera sur cette charge une force d'une dyne (la dyne étant l'unité de force) (1). On l'appelle unité électrostatique C. G. S. d'électricité.

En pratique, on prend une unité 3×10^{10} fois plus grande, que l'on appelle le *coulomb*. Nous verrons plus loin les raisons qui ont conduit à prendre ce multiple comme unité usuelle.

Remarquons que cette unité est très grande, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte immédiatement. Supposons que l'on charge un corps d'un *microcoulomb*, c'est-à-dire d'un millionième de coulomb, et qu'on le pose sur le plateau d'une balance. En approchant au-dessous du plateau, à une distance de 1 centimètre, un corps portant la même charge de 1 microcoulomb (mais de signe contraire), il faudrait, pour compenser l'attraction électrique, mettre dans l'autre plateau un poids de 10 kilogrammes, environ.

* * *

Une notion extrêmement importante, celle de **champ électrique**, découle tout naturellement de ce que nous venons de dire.

Supposons que nous chargions un petit corps d'une unité électrostatique d'électricité positive et que nous placions ce corps en différents points de l'espace entourant un corps portant une charge d'électricité. En chaque

(1) Rappelons que la force d'attraction exercée par la terre sur 1 kilogramme (c'est à dire le *poids* de un kilogramme) est 981.000 dynes. La dyne est donc sensiblement équivalente à la force avec laquelle la terre attire un milligramme, en d'autres termes une dyne représente le poids de 1 milligramme environ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

point, suivant la loi de Coulomb, cette charge-unité positive sera soumise à une force que l'on peut calculer. On dit alors que cette charge est située dans un *champ électrique*, dont la valeur, ou *intensité*, en chaque point est égale à la force exercée sur la charge-unité positive placée en un point, la *direction* du champ étant celle de la force.

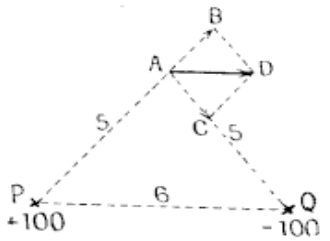


Fig. 1.

Afin de mieux faire saisir au lecteur ce qu'est le champ électrique, nous allons prendre un exemple numérique simple. Cherchons la valeur du champ électrique en un point A situé à 5 centimètres de deux charges de 100 unités, l'une positive, l'autre négative, placées en deux points P et Q distants de 6 centimètres (fig. 1).

Plaçons en A une charge-unité positive. La force exercée sur A par la charge P est dirigée suivant PA et a pour valeur :

$$\frac{100 \times 1}{5^2} = 4 \text{ dynes.}$$

La force due à la charge Q est dirigée suivant AQ et a la même valeur. La résultante des deux forces AB, AC est AD et a pour valeur 4,8 unités C. G. S., ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte. C'est l'intensité du champ électrique au point A, dirigée suivant AD.

* * *

Si l'on calcule pour chaque point de l'espace la valeur du champ et sa direction, et que l'on trace ensuite les courbes telles que leur direction est en chaque point la même que celle du champ électrique, on obtient ce que l'on appelle les ***lignes de force du champ électrique.***

La figure 2, *a*, montre les lignes de force électrique dues à deux charges d'électricité égales et de sens contraire, et la figure 2, *b*, celles dues à deux charges d'électricité égales et positives. Les flèches indiquent le *sens* des lignes de force, c'est-à-dire la direction dans laquelle se déplacerait une charge positive mobile sous l'influence du système des deux charges fixes. On voit que les lignes de force commencent sur la charge positive et se terminent sur la charge négative.

Les lignes de force, notion due à Faraday, sont de la plus grande importance dans l'étude des phénomènes électriques. Par exemple, il est possible grâce à elles, de déduire les forces qui pourront s'exercer sur les charges électriques placées dans le champ, en les considérant comme des sortes de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fils élastiques en tension. C'est ainsi que, dans le cas étudié plus haut (fig. 2, *a*), les lignes de force, en se raccourcissant, tendront à rapprocher les deux charges l'une de l'autre, tandis que, dans la figure 2, *b*, les lignes de force, qui doivent aboutir quelque part sur des charges négatives, comme nous le verrons plus loin, cherchent à éloigner l'une de l'autre les deux charges positives.

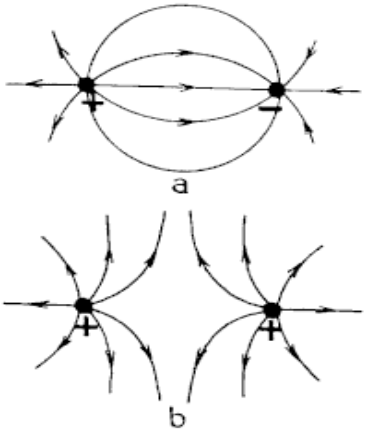


Fig. 2.

* * *

Si, au lieu de raisonner sur des points matériels chargés, nous considérons des conducteurs de dimensions finies, il est évident qu'il faut que les lignes de force partent de la surface des conducteurs dans une direction *normale* à cette surface. S'il n'en était pas ainsi, en effet, le champ électrique pourrait être décomposé en deux composantes, l'une normale à la surface, l'autre tangente à cette surface qui aurait pour effet de déterminer le déplacement des charges à la surface du conducteur.

* * *

D'autre part, les expériences de Faraday ont montré que toute la charge électrique communiquée à un conducteur se répartit uniquement sur sa surface, et qu'à l'intérieur il n'existe aucune charge libre.

La question qui se présente immédiatement à l'esprit est alors : comment se répartissent sur la surface des conducteurs les charges que nous leur communiquons? Pour y répondre d'une façon satisfaisante, il faut que nous disions un mot de la nature même de ces charges électriques. Ce n'est que depuis quelques années que l'on a pu arriver à une conception simple, vérifiée par de nombreux phénomènes dont nous parlerons plus loin. Les deux électricités sont en réalité deux matières bien définies, constituées, comme toutes les matières que nous connaissons, par des particules séparées, des atomes. Il existe des atomes d'électricité positive et des atomes d'électricité négative, que l'on appelle des ***électrons*** positifs ou négatifs.

Dans les isolants, ces électrons sont plus ou moins solidaires des molécules matérielles, tandis que dans les conducteurs ils peuvent se mouvoir librement et, comme nous venons de le voir, ils s'accumulent sur la surface, formant ainsi une sorte de pellicule élastique. L'élasticité est due au fait que les électrons de même signe se repoussent mutuellement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

De même que dans un ballon de caoutchouc la pression de l'air distend la membrane élastique, de même la répulsion mutuelle des électrons distend à la surface du conducteur la charge qu'on lui a communiquée.

L'analogie peut être poursuivie plus loin. Dans le cas du ballon de caoutchouc, la membrane possède une tension uniforme égale à celle nécessaire pour équilibrer la pression de l'air emprisonné. De même, la même pellicule électrique possède une tension qui équilibre les forces de répulsion mutuelle des électrons.

Cette tension porte en électricité le nom de *potentiel*, et elle est la même en tous les points de la surface du conducteur.

* * *

Nous allons maintenant définir une grandeur fondamentale, qui est la ***capacité*** des conducteurs.

Si on communique la même charge électrique à une petite boule et à une boule plus grosse, la tension électrique, le potentiel, n'est pas la même dans les deux cas. Elle est plus grande sur la petite boule, car les électrons sont à une distance plus considérable les unes des autres sur la grande boule et, par suite, leur répulsion mutuelle est moins forte. D'une façon générale, si on communique la même charge à différents conducteurs, chacun d'eux possédera une tension déterminée, dépendant de sa forme et de sa grandeur. Si, pour un même conducteur, on double, triple, etc., la charge électrique, la tension deviendra deux, trois, etc., fois plus grande.

Une comparaison permet de se rendre compte du phénomène. Si on envoie dans un récipient clos une certaine quantité de gaz, il s'établira à l'intérieur une pression dont la valeur dépendra de la forme du récipient. Le rapport entre la quantité de gaz introduit et la capacité du récipient détermine la valeur de la pression.

De même, pour un conducteur électrique, le rapport entre la quantité d'électricité répartie sur sa surface et la tension de cette électricité est la *capacité* du conducteur.

* * *

Lorsque l'on réunit par un fil métallique deux corps conducteurs A, B chargés, dont les tensions sont en général différentes, ils ne forment plus qu'un seul conducteur et, par suite, comme nous avons vu que la tension est la même en tous les points d'un conducteur, il devra nécessairement se produire une égalisation de tension entre A et B qui correspond à une nouvelle répartition de la pellicule d'électrons, c'est-à-dire qu'il y aura dépla-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cement d'électricité d'un corps sur l'autre jusqu'à ce que le nouvel état d'équilibre soit atteint.

Ainsi donc, chaque fois que de l'électricité passera d'un corps A sur un corps B, nous pourrons affirmer qu'il existait entre ces deux conducteurs une différence de tension, ou *différence de potentiel*, et que le potentiel de A était supérieur à celui de B.

* * *

Le passage de l'électricité de A vers B produit toujours un certain ***travail***, en particulier un échauffement du conducteur de jonction, que l'on peut mettre en évidence expérimentalement et qui peut servir à mesurer la différence de potentiel existant primitivement entre les deux conducteurs.

Une analogie hydraulique très simple permet de concrétiser ce point. Si une quantité donnée d'eau tombe sous l'influence de l'attraction de la terre d'un niveau A à un niveau B moins élevé, le travail que fournit la pesanteur est égal au produit de la quantité d'eau par la différence de hauteur.

Si nous revenons au cas de conducteurs électrisés, nous dirons, de même, que, lorsqu'une quantité d'électricité se meut d'un conducteur chargé sur un autre conducteur sous l'influence des forces électriques, celles-ci fournissent un travail qui est égal au produit de la quantité d'électricité par la différence de tension entre les deux conducteurs.

La hauteur de chute en hydraulique est remplacée ici par la différence de tension ou de potentiel entre les deux conducteurs.

Sitôt que nous pourrons mesurer le travail (par la quantité de chaleur dégagée, par exemple) accompli lorsqu'une charge donnée d'électricité passe d'un corps A sur un corps B, nous aurons la mesure de la ***différence de potentiel*** entre ces deux conducteurs.

Il est facile de définir maintenant l'unité de différence de tension. Ce sera la différence de tension existant entre deux conducteurs, telle que lorsqu'un coulomb d'électricité passe d'un conducteur à l'autre, il y a production d'un travail égal à 1 kilogrammètre.

En pratique, l'unité choisie, le ***volt***, est égale à cette unité divisée par $\frac{1}{9,81}$.

On a donc finalement :

$$1 \text{ volt} \times 1 \text{ coulomb} = \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre.}$$

Remarquons immédiatement que l'on ne peut jamais mesurer que des *différences* de potentiel entre deux corps. Mais, si on choisit la terre pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'un d'eux, comme toute quantité d'électricité que nous y conduirons formera une pellicule infiniment grande pratiquement, les tensions réciproques des électrons pourront être considérées comme nulles, et par suite on dira que le potentiel de la terre est nul. En prenant la terre comme corps de référence, il est par suite possible de parler du *potentiel d'un corps*.

* * *

L'*unité de capacité* peut maintenant être très simplement définie. En effet, nous avons dit que la capacité d'un conducteur est le rapport entre la quantité d'électricité qu'il porte et sa tension. Il s'ensuit immédiatement que, lorsqu'un corps chargé de 1 coulomb aura un potentiel de 1 volt, sa capacité sera égale à l'unité. Cette unité porte le nom de ***farad***.

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}.$$

En pratique, le farad est une unité beaucoup trop grande, et on prend comme unité le *microfarad*, qui est la millionième partie du farad.

* * *

Une notion très importante qui vient compléter celle des lignes de force dont nous avons parlé plus haut est celle de ***surfaces équipotentielles.*** Une surface de niveau ou surface équipotentielle est le lieu des points du champ électrique qui ont même potentiel. Par suite, le travail accompli en déplaçant une charge d'électricité le long de cette surface est nul ; il en résulte qu'une surface de niveau coupe normalement les lignes de force du champ. De plus, deux surfaces équipotentielles différentes ne peuvent évidemment se couper, mais une même surface peut se composer de deux ou plusieurs nappes.

Nous donnons, figure 3, les lignes de force et les surfaces de niveau du système constitué par deux charges + 20 placée en A et — 5 placée en A′ à une distance de $2^{cm},5$ (1). La surface de potentiel nul est une sphère S

(1) On démontre facilement que le potentiel dû à une charge m en un point A situé à une distance r est donné par la formule :

$$V = \frac{m}{r}.$$

Par suite, dans le cas particulier, le potentiel V en un point P situé à r de A et r' de A′ sera donné par :

$$V = \frac{m}{r} - \frac{m}{r'}.$$

En donnant à V une valeur constante, cette équation est celle de la surface équipotentielle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entourant le point A′. A l'intérieur de cette sphère, le potentiel est négatif ; il est positif partout ailleurs.

Parmi les surfaces de niveau, il en est une, S_1, formée de deux nappes qui se coupent au point I, où la force est nulle (1). On montre facilement que I est le symétrique de A par rapport à A′ et que cette surface équipotentielle correspond au potentiel 2. Toutes les surfaces à potentiel supérieur à 2 sont des surfaces fermées entourant simplement le point A. Les surfaces à potentiel inférieur à 2 sont également fermées et entourent

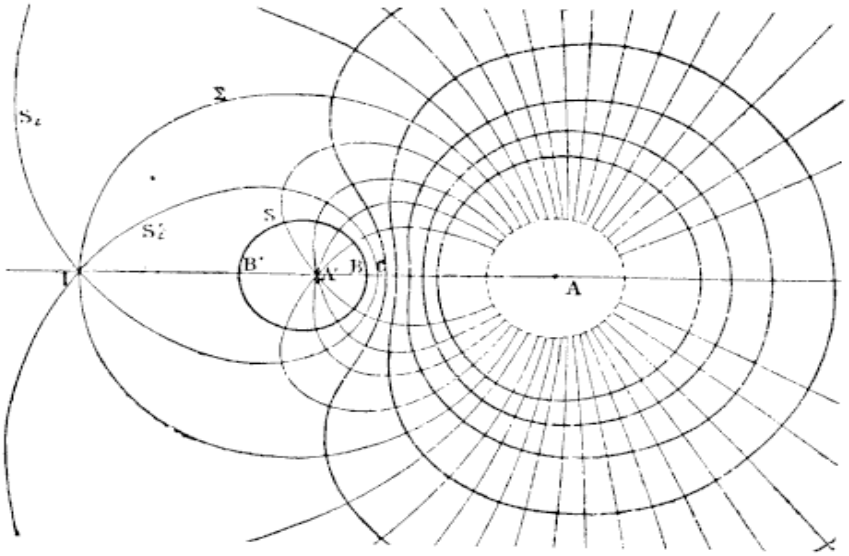


Fig. 3.

les deux points A et A′. Mais elles sortent toutes des limites de la figure.

On voit également que le quart seulement des lignes de force émises par A viennent aboutir sur A′ ; le reste se perd à l'infini.

* * *

Revenons maintenant au problème de la répartition des charges électriques sur un conducteur. Puisque toute la charge est uniquement répartie sur la surface et que, d'autre part, la tension est la même en tous les points, il s'ensuit que la quantité d'électricité que porte une surface donnée, 1 centimètre carré par exemple, ne peut être identique en tous les points. Plus la surface sur laquelle se trouve une quantité donnée d'électricité est petite, plus la ***densité électrique*** (définie simplement comme la charge

(1) C'est-à-dire au point où $\frac{m}{r^2} - \frac{m'}{r'^2} = 0$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portée par une surface de 1 centimètre carré) est grande. Si, en particulier, le conducteur est terminé par une pointe, la densité électrique sur cette pointe sera beaucoup plus élevée qu'en tout autre point du conducteur.

Mais alors, les électrons qui sont ainsi entassés sur la pointe, extrêmement voisins les uns des autres, se repousseront avec une grande énergie, qui peut parfois même surmonter la résistance des isolants. C'est ce qui se produit en particulier si l'isolant est l'air : les électrons s'échappent de la pointe.

Ils viennent alors heurter les molécules d'air sur lesquelles ils se fixent. Ces molécules d'air électrisées se repoussent mutuellement et sont également repoussées par la pointe chargée du même signe, et elles déterminent par leur déplacement un courant d'air qu'on a désigné sous le nom de *vent électrique*.

Ainsi donc, le *pouvoir des pointes* de produire un déplacement d'air est dû à l'échappement d'électrons par ces pointes à l'extérieur du conducteur. Il en résulte immédiatement, ce que l'expérience vérifie, que le conducteur se décharge progressivement. Nous verrons plus loin que c'est sur cette propriété que repose le fonctionnement des paratonnerres.

* * *

Nous allons maintenant examiner une nouvelle propriété de l'électricité : celle de créer l'état électrique sur un corps conducteur uniquement par son approche. C'est l'***influence*** électrique.

Il est très facile de mettre cette propriété en évidence : si nous approchons du pendule double à boules de moelle de sureau, dont nous avons parlé au début de ce chapitre, un bâton de verre frotté par exemple, nous constatons que les boules s'écartent et restent divergentes aussi longtemps que le bâton est maintenu à proximité. Si on l'éloigne, les deux boules retombent.

Si on recherche la nature de l'électricité produite par influence sur un corps conducteur, on constate qu'elle est constituée par les *deux électricités*, positive et négative, mais qu'elles existent *séparées* sur sa surface, la partie la plus rapprochée du corps électrisé qui influence étant toujours chargée d'électricité de signe contraire à celle de ce corps. Quand l'état d'équilibre est atteint, la tension est comme toujours la même sur toute la surface du corps, mais elle est alors due en partie aux forces issues du corps influençant, et en partie aux forces des particules électriques produites par influence sur lui. La considération du potentiel permet d'expliquer très simplement ces résultats. Rappelons que la présence d'une charge électrique positive accroît le potentiel des points situés à son voisinage,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'autant plus qu'ils sont plus rapprochés. Une charge négative, de la même façon, diminue le potentiel dans son voisinage. Enfin, la surface d'un corps étant toujours au même potentiel en tous les points, les charges s'y déplaceront à sa surface, les charges positives des régions à haut potentiel vers celles à potentiel inférieur, jusqu'à ce que l'état d'équilibre soit atteint.

Ces notions fondamentales étant posées, considérons un conducteur AB (fig. 4, *a*) monté sur un support isolant, et approchons un bâton C, de verre par exemple, électrisé positivement. La charge positive de C augmente le potentiel de AB, comme nous l'avons dit plus haut, mais beaucoup plus dans la région A, voisine de C, qu'à l'autre extrémité B. Par suite, il y

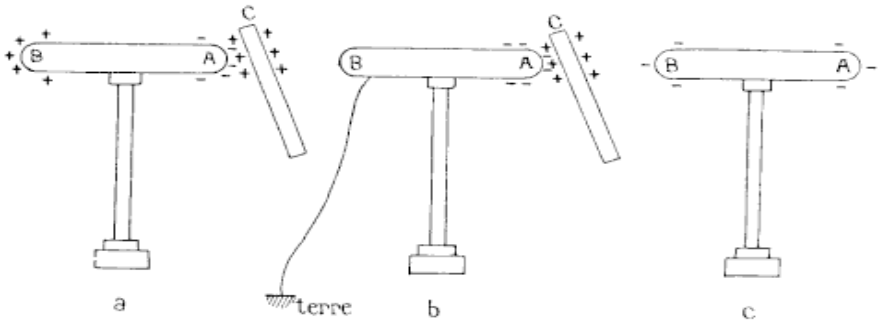


Fig. 4.

aura déplacement d'électricité positive de A vers B et d'électricité négative de B vers A jusqu'à ce que le transport ait accumulé une charge négative en A et une charge positive en B suffisantes pour que le potentiel du conducteur soit le même en tous les points.

* * *

Grâce à la propriété que nous venons de mettre en évidence, il est possible de ***charger un corps par influence.*** En effet, supposons que nous réunissions l'extrémité B du conducteur à la terre par un fil conducteur (fig. 4, *b*). AB étant à un potentiel supérieur à celui de la terre (par suite de la présence dans son voisinage de la charge positive portée par C), il s'écoulera une charge positive de AB vers la terre, jusqu'à ce que le potentiel de AB (qui, maintenant, fait électriquement partie de la terre) soit celui de la terre. Il en résultera donc que sur le conducteur AB nous avons maintenant un excès d'électricité négative. Si on interrompt alors la communication avec la terre et qu'on éloigne le corps C, il restera sur AB la charge négative. Le potentiel de AB diminuera par suite de l'éloignement de la charge positive sur C. Nous avons chargé AB négativement par influence (fig. 4, *c*).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est sur cette propriété que repose le fonctionnement des paratonnerres. En effet, considérons (fig. 5) un corps chargé positivement, par exemple (A), et plaçons en regard une pointe P reliée à la terre. La pointe se charge négativement par influence et le flot d'électrons qui s'en échappe (pouvoir des pointes), attiré par la charge positive de A, vient la neutraliser progressivement.

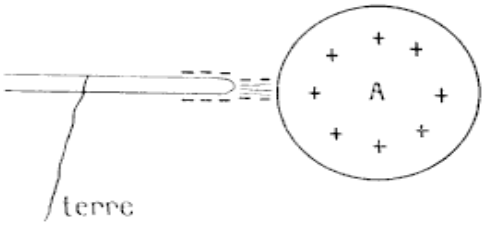


Fig. 5.

Les paratonnerres sont constitués par des conducteurs reliés au sol et terminés par des pointes situées aux sommets des édifices. Les nuages orageux porteurs d'électricité chargent par influence les constructions terrestres et, par les pointes des paratonnerres, cette électricité s'écoule progressivement dans l'atmosphère, tandis qu'en leur absence, les charges de signe contraire en présence auraient pu s'accumuler jusqu'au moment où, l'isolement de l'air n'étant plus suffisant, elles se seraient recombinées dans un éclair destructeur. C'est pour la même raison que la foudre tombe moins souvent sur les pins, dont les feuilles sont pointues, que sur les chênes, aux feuilles de forme arrondie.

* * *

Nous avons supposé que le corps influençant C était un isolant, un bâton de verre sur lequel l'électricité ne peut se déplacer. Si le corps C est un *conducteur* chargé, une boule métallique par exemple, qui doit naturellement être montée sur un support isolant, le phénomène est plus compliqué, mais il en est cependant facile de l'interpréter.

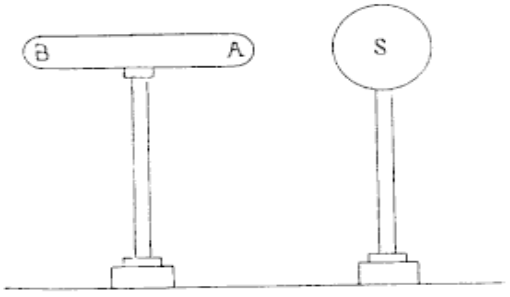


Fig. 6.

La boule S (fig. 6) développe comme précédemment une charge de nom contraire en A et une charge de même signe en B. Mais, en même temps, ces charges réagissent sur celle que porte S, et finalement l'électricité se répartit sur chacun des corps de façon à être en équilibre sur leur surface sous l'action des charges portées par l'autre corps. Il en résulte que la densité électrique sur S est modifiée, et on en conclut que *la présence d'un corps influencé fait varier la densité électrique sur le corps qui influence.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Il est facile de montrer que le corps influencé, surtout s'il est relié à la terre, a pour effet d'abaisser la tension du corps influençant, et ce résultat est d'une grande importance pratique, comme nous allons le voir.

Reprenons notre système boule-cylindre (fig. 7). Supposons la boule chargée positivement et le cylindre relié à la terre en B. Par définition, la tension ou le potentiel de S est le travail qu'il faut effectuer pour amener une charge d'électricité unité d'un point au potentiel zéro (celui de la terre) jusque sur cette boule (électrisée positivement) en surmontant les forces de répulsion dues à sa charge. Or, dans ce cas particulier, si nous considérons une charge positive qui s'approche de S, elle est bien repoussée par la charge de S, mais elle est attirée par la charge négative qui se trouve en A au voisinage immédiat de S. Par suite, le travail à effectuer sera moindre que si S était le seul conducteur présent. Mais dire que le travail pour amener une charge unité du potentiel zéro jusque sur la boule est moindre, cela veut dire, par définition, que le potentiel de la boule a diminué.

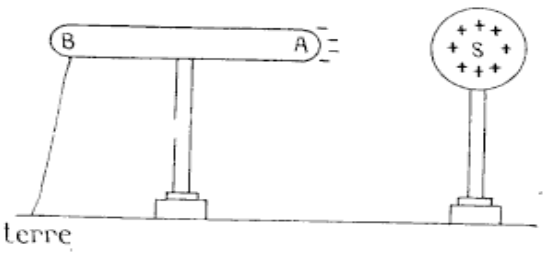


Fig. 7.

D'autre part, la charge de S est restée la même, bien que son potentiel ait diminué. Or, nous avons vu que le rapport de la charge au potentiel est ce que nous avons appelé la capacité du corps. Il s'ensuit donc que la capacité de la boule a *augmenté*, c'est-à-dire que, pour porter la boule au potentiel primitif qu'elle avait lorsqu'elle était isolée, il faut lui communiquer une charge plus grande.

Ainsi, en approchant d'un corps conducteur S un autre corps conducteur AB, on augmente la capacité de S, l'effet étant surtout marqué lorsque AB est relié au sol. L'ensemble des deux conducteurs constitue un ***condensateur***.

* * *

Un ***condensateur*** est donc constitué en principe par deux corps conducteurs appelés « armatures », rapprochés l'un de l'autre, l'un d'eux étant relié au sol. La ***capacité*** du condensateur est définie par le rapport entre la quantité d'électricité qui existe sur le corps isolé et la tension de cette électricité quand l'autre armature est à la terre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'expérience a montré très rapidement que la capacité d'un condensateur dépend de divers facteurs :

1° *Grandeur et forme des armatures.* — Il est évident que plus la surface des armatures sera grande, plus la capacité du condensateur sera élevée. Mais, d'autre part, on ne peut, sans inconvénient pratique, augmenter indéfiniment les dimensions linéaires des appareils. Aussi est-on conduit à leur donner une forme plus ramassée.

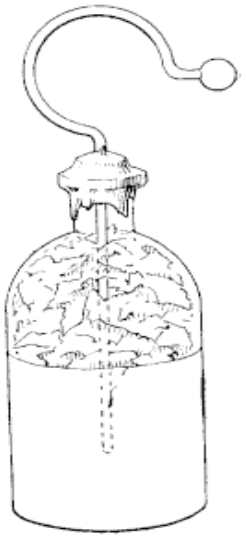


Fig. 8. — Bouteille de Leyde.

La *bouteille de Leyde* (fig. 8), l'un des premiers condensateurs imaginés, est constituée par une feuille d'étain (jouant le rôle d'armature à la terre) collée sur la surface extérieure d'une bouteille dont l'intérieur est rempli de feuilles de clinquant constituant la seconde armature du condensateur. Une tige métallique traversant un bouchon isolé communique avec l'armature interne et est terminée par une boule pour éviter la décharge spontanée par les pointes que nous avons signalée plus haut.

Sous sa forme moderne, la bouteille de Leyde donne le *condensateur cylindrique*, très employé dans les grosses installations de télégraphie sans fil. Les armatures adhérentes au verre (ou à la porcelaine) sont constituées par un dépôt d'argent cuivré électrolytiquement ; le col du condensateur est soit très long et plus épais que les parois, soit noyé dans une masse isolante pour éviter que l'étincelle ne jaillisse autour de lui entre les deux électrodes. Un isolateur en porcelaine à gorges et une enveloppe métallique renfermant un liquide servant à refroidir l'appareil le complètent généralement (fig. 9). Ainsi constitué, le condensateur peut être chargé à de très hauts voltages, 50 000 volts par exemple.

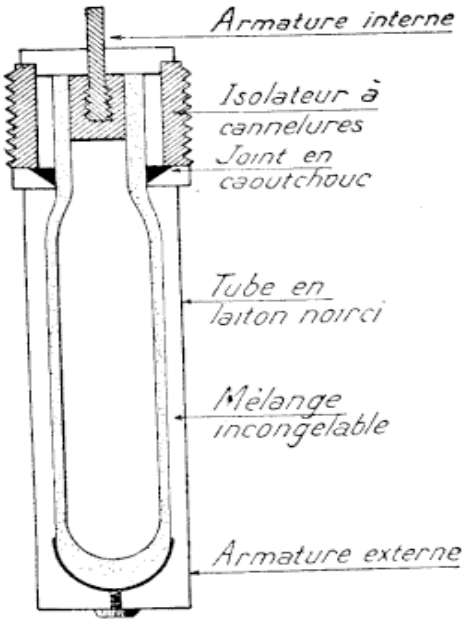


Fig. 9. — Condensateur industriel.

Le *condensateur plan* primitif, constitué par deux feuilles métalliques collées de part et d'autre d'une lame de verre, a sa capacité augmentée en multipliant par juxtaposition des éléments semblables. C'est ainsi que, dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les installations téléphoniques, on empile alternativement des feuilles d'étain et des feuilles de papier paraffiné comme l'indique la figure 10. Toutes les feuilles d'étain de rang pair communiquent ensemble, et forment une des armatures ; toutes les feuilles d'étain impaires réunies ensemble constituent la seconde armature.

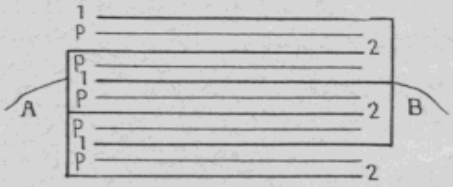
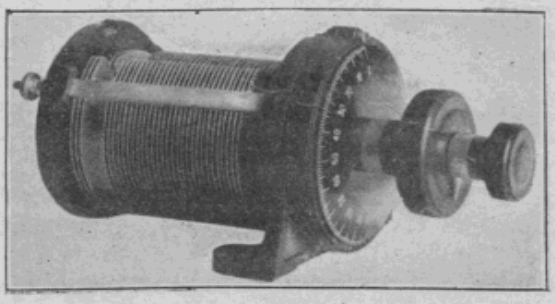


Fig. 10. — Condensateur plan de grande surface.

En télégraphie sans fil, pour réaliser des condensateurs réglables, on utilise un dispositif analogue, mais alors les feuilles d'étain sont remplacées par des lames métalliques parallèles. Les deux armatures peuvent tourner l'une par rapport à l'autre autour d'un axe perpendiculaire, de façon à faire varier les surfaces en présence, par suite la capacité. Il n'y a alors aucune substance solide entre les deux armatures, qui sont séparées seulement par un très petit intervalle d'air (fig. 11).

2° *Distance des armatures.* — Plus les armatures des condensateurs sont proches l'une de l'autre, plus la capacité de l'ensemble est augmentée. Aussi réduit-on cette distance au minimum compatible avec la condition d'éviter que l'étincelle ne puisse jaillir spontanément d'une armature à l'autre lorsqu'on charge l'appareil à un certain potentiel.


Fig. 11. — Condensateur variable à air.

L'épaisseur des parois de la bouteille de Leyde ou du condensateur cylindrique doit être aussi faible que possible. On remplace le verre par le mica, susceptible de se débiter en lamelles extrêmement minces ; on emploie du papier aussi peu épais que possible, etc.

3° *Nature de l'isolant.* — Enfin, la nature de l'isolant qui sépare les deux armatures joue un rôle considérable et sur lequel il est important de s'arrêter avec quelques détails.

* * *

Dans l'exposé qui précède, nous n'avons jamais rien supposé sur la nature du milieu qui sépare les corps électrisés, et nous avons implicitement admis que ce milieu était l'air, en particulier lorsque nous avons énoncé la loi de Coulomb.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, en 1837, plus de cinquante ans après la découverte de Coulomb, Faraday montra que la matière interposée entre deux corps chargés est influencée par ces corps et, par réaction, provoque des modifications dans les actions qu'ils exercent l'un sur l'autre. En fait, la force attractive ou répulsive diminue quand on remplace l'air par un autre milieu.

C'est ainsi que, si on prend deux boules électrisées qui se repoussent dans l'air avec une force F, si l'on plonge ces deux boules dans du pétrole par exemple, sans changer leur charge, on constate que la force qu'elles exercent l'une sur l'autre est $\frac{F}{2,2}$. Si, au lieu du pétrole, on utilise de l'huile de ricin comme milieu interposé, la force n'est plus que $\frac{F}{4,3}$, etc.

On arrive donc à la conclusion suivante : toute substance isolante interposée entre deux corps électrisés réduit dans une certaine proportion les forces qu'ils exercent entre eux. Les chiffres 2,2 ou 4,3 des exemples précédents ont reçu le nom de ***constante diélectrique*** du corps considéré.

Ceci dit, si nous revenons au cas d'un condensateur dans lequel le milieu séparant les armatures n'est plus l'air, puisque les forces qui s'exercent entre les armatures sont plus faibles, la tension de l'armature chargée est plus petite, à charge égale, que lorsque le milieu interposé est l'air. Comme, d'autre part, la capacité est le rapport entre la charge et la tension, on voit donc que *la capacité du condensateur est augmentée* lorsque l'on remplace l'air par un autre isolant.

Au lieu d'appeler les corps non conducteurs des *isolants*, rappelant ainsi la propriété qui les distingue des corps conducteurs, on les nomme également *diélectriques* pour tenir compte de l'influence qu'ils exercent sur la distribution de l'électricité. La *constante diélectrique* d'un isolant, que nous avons définie plus haut, exprime donc le rapport entre la capacité d'un condensateur dont les armatures sont séparées par cet isolant et la capacité du même condensateur dont les armatures sont séparées par l'air. Voici quelques valeurs de constantes diélectriques :

Paraffine	2,3	Mica	8
Caoutchouc	2,9	Verre	6 à 10
Ébonite	2,6	Huiles	2 à 5

* * *

On peut donner une ***explication des effets diélectriques*** par des considérations analogues à celles que nous avons exposées précédemment pour la répartition des charges sur les corps conducteurs.

Nous avons supposé, en effet, que les corps renferment des atomes d'élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tricité, des électrons, positifs ou négatifs, constituant des sortes de molécules neutres électriquement. Chaque molécule matérielle comprend un certain nombre de charges positives et négatives. Dans le cas des diélectriques des condensateurs, les atomes positifs d'une molécule du diélectrique attirés fortement vers la plaque négative, les atomes négatifs attirés par la plaque négative ne sont pas, comme dans les conducteurs, libres d'obéir entièrement à ces attractions. Ils ne peuvent que se déplacer très peu, faisant tourner plus ou moins les molécules et les orientant en lignes approximativement parallèles, tandis que normalement elles se trouvent dans des directions quelconques. En un mot, il y a *polarisation* du diélectrique, *déformation* de torsion de l'isolant.

* * *

Ainsi donc, tandis que les corps conducteurs ne sont pas modifiés lorsqu'ils sont chargés d'électricité, le milieu isolant dans lequel ils sont plongés a ses propriétés affectées par le fait qu'il est le siège d'un champ électrique. Par suite, le diélectrique possède une certaine énergie due à sa polarisation.

Maxwell, après Faraday, poussant plus loin les conséquences de cette notion, admet que l'énergie est effectivement localisée dans l'espace où agit le champ électrique et qu'il doit être possible de la recueillir au loin. On sait que les expériences de Hertz et la télégraphie sans fil ont apporté la preuve éclatante de la théorie de Maxwell.

Une comparaison simple permet de comprendre le point de vue de Maxwell. Supposons que l'on torde fortement un ressort compris entre deux mâchoires. On peut, si on fait abstraction du ressort, dire que les deux mâchoires sont attirées l'une vers l'autre par une certaine force (hypothèse analogue à celle de Coulomb). On peut au contraire, considérant alors uniquement le ressort, dire que l'énergie du système est renfermée dans le ressort par suite de sa torsion (hypothèse Faraday-Maxwell) (1).

(1) Il est très facile de montrer dans un cas simple la traduction mathématique de ces deux modes de raisonnement.

Considérons un condensateur plan, formé de deux plaques de surface S situées à une distance e, séparées par un diélectrique de pouvoir inducteur i. La capacité d'un tel condensateur est $C = \frac{iS}{4\pi e}$.

D'autre part, l'énergie W emmagasinée dans ce condensateur chargé au potentiel V est égale à $\frac{1}{2} CV^2$.

On a donc : $W = \frac{1}{2} \frac{iS}{4\pi e} V^2$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les expériences ont montré que les phénomènes électriques se propagent dans les isolants, et en particulier le vide, avec une vitesse égale à celle de la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde.

On est donc amené à admettre que, si les molécules matérielles des diélectriques sont le support des électrons, qui s'orientent sous l'action des charges d'influence, la ***transmission des actions électriques*** des électrons s'effectue par l'intermédiaire d'une substance ténue et élastique, analogue à celle dont on a admis l'existence par l'explication des phénomènes lumineux et à laquelle on a donné le nom d'***éther***.

L'éther est un milieu continu, le seul milieu continu même, qui occupe non seulement les espaces libres, mais existe également dans tous les corps, entre les électrons qui les constituent.

Ce sont les compressions et les tractions que les électrons exercent sur l'éther qui produisent les forces qui se manifestent entre les corps électrisés.

* * *

Par l'utilisation des phénomènes d'influence, il est possible de ***produire de l'électricité***. En réalité, on opère simplement la séparation des électrons des deux signes qui existent dans tous les corps. Sans passer en revue les diverses machines qui permettent ce résultat, Wimshurst, Holtz Ramsden, etc., nous donnerons le principe commun de ces appareils en décrivant le *replenisher* de Kelvin.

Il est constitué par deux conducteurs isolés A, B (fig. 12), portions de cylindre ayant même axe O, que l'on charge légèrement au début du fonctionnement. A l'intérieur du cylindre peut tourner un bras isolant portant deux lames conductrices C, D, qui peuvent venir en contact, pendant la rotation, avec les quatre ressorts *a*, *b* (solidaires de A et B), *c*, *d* communiquant entre eux.

Le champ électrique E entre les plateaux est par définition égal à $\frac{V}{e}$. On a donc :

$$W = \frac{i}{8\pi} E^2 S e .$$

Or Se est le volume v du diélectrique, soumis à l'action du champ E. C'est-à-dire que :

$$W = \frac{i}{8\pi} E^2 v$$

et, par suite, si on suppose que chaque élément de volume de diélectrique possède une énergie $\frac{iE^2}{8\pi}$, on voit que l'on arrive, pour l'énergie du condensateur, à la même valeur qu'en considérant simplement les charges apparentes sur les armatures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand C occupe la position de la figure, il se charge par influence d'électricité négative. Au cours de la rotation, C vient au contact du ressort *b* et communique à B une charge négative. En touchant ensuite le ressort *d*, C, dans sa rotation, se charge positivement par influence et abandonne, un quart de tour plus tard, cette charge positive à A lorsqu'il vient au contact du ressort *a*. Les mêmes phénomènes se produisent en même temps, au signe près, pour la lame D.

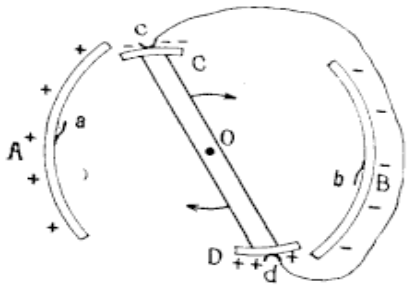


Fig. 12.— Replenisher de Kelvin.

Dans ces conditions, la charge sur A et sur B augmente progressivement. Toutes les machines statiques fonctionnent d'une façon analogue.

* * *

Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que les phénomènes électriques dans lesquels l'électricité était en équilibre ou au repos, d'où le nom d'électricité statique sous lequel nous les avons groupés.

Mais, si nous réunissons deux conducteurs chargés d'électricités différentes par un fil métallique, nous savons qu'il se produira une nouvelle répartition des charges, celles-ci se déplaçant en suivant le conducteur métallique du corps chargé positivement, où la tension est plus élevée, vers le conducteur chargé négativement, où la tension est inférieure. Le mouvement dure jusqu'à ce que la tension de l'ensemble se soit uniformisée Par suite de la facilité de déplacement des électrons le long des conducteurs métalliques, il ne dure qu'un temps extrêmement court. Si nous mettons les corps conducteurs en communication avec les pôles d'une machine statique en fonctionnement qui produit continuellement de l'électricité, l'état d'équilibre entre ces deux corps ne pourra jamais être atteint, et il y aura toujours déplacement d'électrons le long du fil de jonction, dans lequel nous dirons qu'***il passe un courant électrique***. Nous reviendrons plus loin sur l'étude de ce phénomène.

* * *

Pendant longtemps, on ne sut produire de l'électricité que par le frottement de deux corps ou par influence, ce qui nécessite une électrisation préalable d'un corps. C'est seulement en 1789 que Galvani, puis ensuite Volta, découvrirent un autre mode de ***production de l'électricité par voie chimique***. Nous allons donner quelques détails sur ces découvertes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fondamentales, car elles constituent un remarquable exemple d'application des méthodes de la recherche scientifique. En effet, le phénomène que Volta avait à expliquer était complexe et confus, surtout étant données les idées admises à l'époque. Rappelons les faits essentiels.

Galvani avait fixé une cuisse de grenouille par les extrémités des nerfs à un crochet de *cuivre*, lui-même suspendu à un barreau de *fer* d'un balcon. Quand, sous l'action du vent, l'extrémité inférieure de la cuisse venait au contact du fer, celle-ci se contractait violemment.

Tel était le phénomène observé. De nombreuses discussions scientifico-philosophiques eurent lieu à son sujet, certains, Galvani le premier, y voyant une manifestation de la force vitale. Ce fut Volta qui, en étudiant scientifiquement la question, en trouva l'explication physique exacte.

Il reconnut d'abord que la cuisse de grenouille ne se contractait que si elle était en contact avec *deux métaux différents*, cuivre et fer dans l'expérience initiale de Galvani, mais pouvant être remplacés par deux métaux quelconques. Avec un seul métal, l'expérience ne réussissait pas.

D'autre part, il faut que les deux métaux différents réunis par l'intermédiaire de la cuisse de grenouille soient également en contact l'un avec l'autre, en un mot, que les trois corps intervenant dans l'expérience forment une chaîne continue. Si le crochet de cuivre n'est pas en contact avec la barre de fer du balcon, même si l'extrémité de la cuisse de grenouille touche cette barre, il n'y a pas contraction.

Enfin, Volta reconnut que la cuisse de grenouille n'était pas indispensable pour la production du phénomène mystérieux qu'elle avait servi à déceler; en un mot, sa nature organique ne jouait aucun rôle, il n'y avait pas à faire intervenir la force vitale que cherchait Galvani. La cause du phénomène est qu'un liquide (comme l'eau salée contenue dans la cuisse) se trouve en contact avec deux métaux différents également reliés l'un à l'autre.

Galvani et Volta avaient, dès le début de leurs études, reconnu que l'électricité entrait en jeu dans l'expérience, car l'étincelle d'une machine électrique éclatant à proximité provoquait la contraction. Galvani assimilait la grenouille à un condensateur chargé par influence, les nerfs formant l'armature interne et les muscles l'armature externe.

C'est dans la présence indispensable de deux *métaux en contact* que Volta, au contraire, trouva l'origine même de l'électricité mise en évidence par les contractions de la grenouille, et il fut ainsi amené à énoncer une loi fondamentale que l'on peut exprimer :

Le contact de deux métaux, ou, plus généralement, de deux corps hétérogènes quelconques, suffit pour établir entre ces deux corps une différence de potentiel

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indépendante de la dimension, de la forme, de l'étendue des surfaces en contact.

* * *

De nombreuses expériences permettent de vérifier ce résultat, dont une conséquence extrêmement importante est la suivante.

Si on constitue une chaîne de métaux A, B, C..., soudés à la suite les uns des autres, on constate que la différence de potentiel entre les deux métaux extrêmes est la même que si ces deux métaux étaient directement en contact. Si les deux métaux terminaux sont identiques, il n'y a pas de différence de potentiel. C'est ce qu'on appelle la ***loi des contacts successifs***.

Dans le cas où la chaîne comprend des liquides conducteurs, tels que l'eau renfermant en dissolution des acides, des bases ou des sels, il n'en est plus de même. La loi des contacts successifs est en défaut. Par exemple, dans une chaîne formée de zinc, d'eau acidulée et de cuivre, la différence de potentiel qui existe entre le cuivre et le zinc n'est plus la même que celle qui existerait si ces deux métaux étaient en contact. Il en résulte que, si on ferme le circuit en réunissant les deux métaux par un fil de cuivre par exemple, au point de jonction de ce fil et du zinc, il existera une différence de potentiel qui ne sera plus compensée, comme dans le cas des chaînes entièrement métalliques, par la différence de potentiel existant entre le cuivre et le zinc plongés dans l'eau acidulée. Un *mouvement continu d'électricité* se produira donc dans le système, entraînant d'ailleurs des modifications chimiques profondes. On a réalisé une *pile*, et nous avons ainsi à notre disposition une nouvelle source d'électricité, source qui n'est d'ailleurs pas gratuite, car on achète l'électricité produite au prix de transformations chimiques.

Nous consacrerons dans la seconde partie de ce volume un chapitre spécial aux piles et aux accumulateurs. Dans le chapitre sur la théorie des ions, nous développerons également l'étude théorique de leur fonctionnement et le calcul de la force électromotrice des diverses chaînes que l'on peut réaliser.

* * *

Dans l'énoncé de la loi des contacts successifs, nous avons implicitement admis que tous les éléments de la chaîne étaient à la même ***température.*** Nous avons vu que, dans ce cas, lorsque la chaîne est fermée, il n'existe aucun courant. Il n'en est plus de même, ainsi que l'a montré Seebeck en 1821, si la température n'est plus uniforme.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par exemple, considérons deux métaux, cuivre et fer, soudés en deux points A, B (fig. 13). La soudure B étant à la température ordinaire t_1, si on chauffe la soudure A à une température t_2, on constate qu'un courant se produit, qui va du cuivre au fer en passant par la soudure chaude. On dit que le cuivre est *positif* par rapport au fer ou que le fer est *négatif* par rapport au cuivre. Dans la liste suivante, chaque métal est positif par rapport à ceux qui le suivent et négatif par rapport à ceux qui le précèdent :

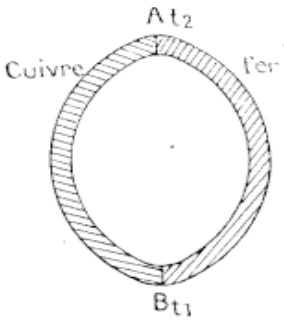


Fig. 13.

Bismuth.	Manganèse.	Or.
Nickel.	Argent.	Zinc.
Platine.	Etain.	Fer.
Palladium.	Plomb.	Arsenic.
Cobalt.	Cuivre.	Antimoine.

Ajoutons d'ailleurs que ces différences de potentiel sont toujours extrêmement faibles. C'est ainsi que, pour le couple bismuth-antimoine, qui est le plus puissant, entre 0 et 100° la différence de potentiel croît de 0, 000 057 volt par degré. Néanmoins, comme la résistance électrique de ces piles au passage du courant est extrêmement faible, elles peuvent donner des courants relativement intenses.

On ne se sert guère de ces piles que dans les recherches de laboratoire pour l'étude des radiations infra-rouges, tous les essais d'industrialisation du phénomène n'ayant pas donné de résultats satisfaisants.

* * *

Une ***pile thermo-électrique*** est constituée, en principe, par un certain nombre d'éléments disposés schématiquement comme l'indique la figure 14, une série de barres d'un métal A étant soudées à une série de barres d'un métal B, une barre A étant toujours située entre deux barres B. Si on chauffe alors les soudures du même côté, à droite par exemple, le courant s'écoule toujours de A vers W, par exem-

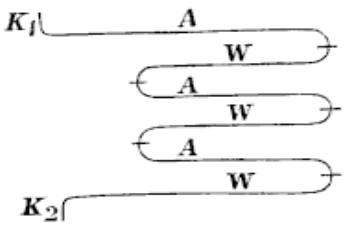


Fig. 14. — Constitution d'une pile thermo-électrique.

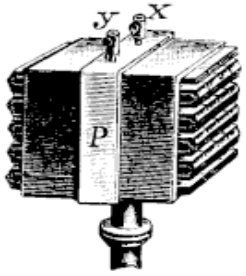


Fig. 15. — Pile thermo-électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ple, à travers les soudures chaudes et, les tensions s'ajoutant ainsi, on aura finalement une tension triple de celle d'un seul élément dans le cas de la figure. La figure 15 représente une pile constituée d'un grand nombre d'éléments.

* * *

Ici encore, la production d'électricité n'est pas gratuite, car l'expérience montre que si l'échauffement (ou le refroidissement) du point de soudure de deux métaux différents réunis par un circuit fermé donne naissance à un courant électrique, inversement, le passage d'un courant électrique dans le même sens à travers cette même soudure détermine le refroidissement (ou l'échauffement) de cette soudure. C'est ce que l'on appelle l'*effet Peltier*.

En sorte que, dans la pile thermo-électrique, la soudure chauffée tend à se refroidir et, si l'on veut que le courant continue à passer, il faut lui apporter sans cesse de nouvelles calories pour maintenir sa température constante.

On achète donc l'énergie électrique au prix d'une dépense d'énergie calorifique.

* * *

Si les piles thermo-électriques n'ont aucun usage comme sources pratiques de courants électriques, elles ont reçu des applications intéressantes comme ***appareils de mesure de la température***, et c'est pourquoi nous ouvrirons ici une parenthèse pour en dire quelques mots.

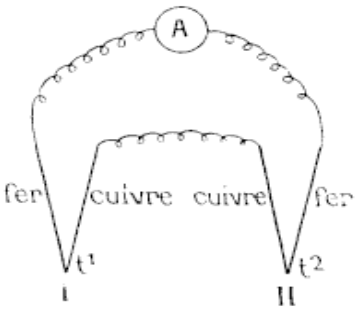


Fig. 16.

Si on considère deux *couples thermo-électriques* identiques, formés chacun, par exemple, d'une lame de fer soudée à une lame de cuivre et réunis comme l'indique la figure 16, les deux lames de cuivre ensemble et les deux lames de fer ensemble, il ne passera dans le circuit ainsi constitué aucun courant en temps normal, lorsque la température du système sera la même en tous les points.

Au contraire, portons les deux soudures à des températures t_1, t_2, différentes. D'après ce que nous venons de voir, il passera un courant dans le circuit, que l'on pourra déceler par un appareil approprié A. Laissant la température t_1 fixe (celle de la glace fondante, par exemple), on peut, en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portant la soudure II à des températures t_2, t'_2, t''_2, noter chaque fois l'indication de l'appareil A et, par suite, graduer celui-ci en degrés thermométriques. On a alors constitué un *pyromètre*. Inversement, si l'on veut mesurer une température inconnue T, il suffira d'y porter la soudure II et de lire l'indication correspondante sur le cadran de A.

L'avantage de ce mode de mesure est le suivant : pour certains couples, la force électromotrice varie proportionnellement à la température, ce qui simplifie l'étalonnage de l'appareil. De plus, comme les éléments constitutifs sont métalliques, ils sont plus robustes et peuvent être portés à des températures très élevées auxquelles ne peuvent résister les thermomètres ordinaires, à mercure par exemple (les thermomètres ordinaires ne peuvent dépasser 300 à 350°). Aussi se sert-on de ces appareils pour la mesure des hautes températures, jusqu'à 1 500° et plus. On les construit pratiquement sous la forme de ***cannes pyrométriques*** et, comme la force électromotrice est alors notable, on n'utilise qu'une seule soudure, platine-platine iridié en général (fig. 17). Le tube protecteur est en fer ou en porcelaine. La soudure E est placée dans l'enceinte dont on veut connaître la température (four industriels, par exemple) et la température est directement lue en A.

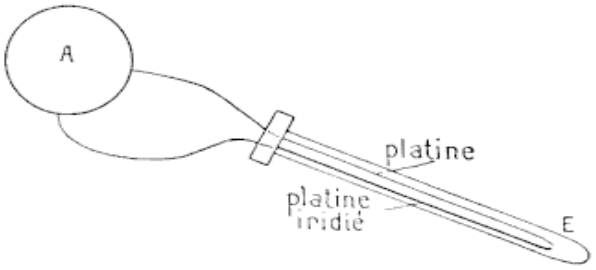


Fig. 17.

* * *

D'autres phénomènes s'accompagnent de dégagement de charges électriques et méritent d'être signalés.

La ***pyro-électricité*** est le nom donné à la propriété qu'ont certains cristaux, lorsqu'ils sont chauffés, de se charger d'électricité de nom contraire à leurs extrémités. C'est ainsi que, si on saupoudre à travers une mousseline, avec un mélange d'oxyde rouge de plomb et de soufre, un cristal de tourmaline chauffé, on constate que le soufre adhère à une des extrémités et l'oxyde de plomb à l'autre. L'explication est la suivante : le tamisage électrise positivement l'oxyde de plomb qui adhère sur l'extrémité du cristal chargée négativement ; c'est l'inverse qui a lieu pour le soufre.

* * *

La ***piézo-électricité*** est la production d'électricité par certains cristaux lorsqu'ils sont soumis à la *pression*. Ce phénomène est peut-être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans son essence le même que la pyro-électricité, celle-ci étant due à la dilatation ou à la contraction du cristal sous l'influence de la température, au lieu de celle de la pression.

La piézo-électricité a été étudiée en particulier par Curie sur le quartz. Si on comprime suivant son axe un cristal de quartz compris entre deux faces métalliques, on constate que ces faces se chargent de quantités d'électricité de signe opposé qui sont proportionnelles à la pression exercée.

Cette propriété a été utilisée pour la production et la transmission des sons et, plus récemment, par Langevin, pour la production des ultra-sons; aussi, étant donné l'intérêt de ces applications, en dirons-nous ici quelques mots.

Si on communique les vibrations d'une aiguille de phonographe à une des faces d'un cristal dont l'autre face est fixée rigidement, les compressions infiniment petites du cristal développent des charges électriques sur ses faces. Chacune d'elles est reliée à un des deux fils d'un téléphone, et les charges électriques qui circulent alors dans le téléphone, allant de la face chargée positivement à la face chargée négativement, déterminent un courant suffisamment intense pour actionner le téléphone. On peut même actionner ainsi plusieurs écouteurs situés en différents endroits.

Nous venons de voir que, lorsque l'on comprime un cristal de quartz, par exemple, des charges électriques apparaissent sur ses faces ; inversement, si on charge les faces opposées d'un cristal de quartz, celui-ci se contracte.

Il est possible de charger et décharger successivement, 500 fois par seconde par exemple, les deux faces du cristal, en utilisant un dispositif analogue au trembleur de la bobine de Ruhmkorff. Dans ces conditions, les faces du cristal « vibrent » 500 fois par seconde. Mais, avec des dispositifs mécaniques, on ne peut dépasser commodément des fréquences de plusieurs milliers de vibrations par seconde, tandis que la piézo-électricité nous fournit le moyen de produire des vibrations dont la fréquence sera de 50 000 ou 100 000 par seconde, ce que l'on appelle des ***ultra-sons***. En effet, nous verrons que, dans certaines conditions, la décharge électrique d'un condensateur dont on réunit les deux armatures par un fil conducteur prend un caractère oscillatoire, le courant se renversant et changeant de sens un grand nombre de fois par seconde ; on obtient ainsi ce que l'on appelle les courants de haute fréquence.

Si on se sert de ces courants pour charger et décharger les faces du quartz piézo-électrique, on fera donc effectuer à ces faces des vibrations de même fréquence, qu'il serait impossible de provoquer par un système matériel quelconque.

L'intérêt pratique de ces ultra-sons (parfaitement imperceptibles à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'oreille) est le suivant. Ils ont des longueurs d'onde extrêmement petites (1), ce qui diminue les effets de diffusion et d'éparpillement que l'on constate avec les sons ordinaires. On ne peut avec ceux-ci obtenir un *rayon sonore* ou un *faisceau sonore*, comme on réalise avec la lumière des rayons lumineux ou des faisceaux lumineux. Au contraire, avec les ultra-sons il est possible d'envoyer un faisceau sonore dans une direction déterminée. Langevin a fondé sur cette propriété une méthode extrêmement ingénieuse de reconnaissance des fonds sous-marins. Le quartz piézo-électrique, mis en vibration ultra-rapide par un procédé électrique identique en principe à celui rapporté plus haut, communique ses vibrations à l'eau de mer dans lequel il se trouve plongé, déterminant ainsi dans ce milieu incompressible un faisceau ultra-sonore que l'on dirige verticalement vers le bas. Ce faisceau, rencontrant le fond de la mer, s'y réfléchit, tout comme un faisceau lumineux est réfléchi par un miroir, et il est renvoyé vers le poste émetteur. Les vibrations de l'eau dues à ce rayon de retour peuvent alors agir sur un second quartz qui, lui, fonctionne comme quartz piézo-électrique : des charges d'électricité se développent sur ses faces chaque fois qu'une onde ultra-sonore vient le frapper. On conçoit, sans qu'il soit besoin d'entrer dans le détail des méthodes employées, qu'il soit possible, par la comparaison des deux phénomènes d'émission d'ondes directes et de réception d'ondes de retour, de déterminer la distance du centre d'émission à laquelle a eu lieu la réflexion, c'est-à-dire la profondeur de la mer en cet endroit.

* * *

Nous venons de passer rapidement en revue un certain nombre de phénomènes permettant de produire des charges d'électricité, et par cela même de provoquer dans des conducteurs métalliques ce que nous avons appelé un ***courant électrique***. Le seul mode de production pratique est celui par voie chimique (piles). Nous verrons plus loin qu'il en est un autre, infiniment plus économique, plus puissant et grâce auquel l'électricité a pu se développer jusqu'au point de perfection actuel, fondé sur les phénomènes électro-magnétiques.

(1) Rappelons que la longueur d'onde, qui est la distance séparant dans l'espace deux points dans le même état de vibration, est liée à la fréquence par la relation :

$$l = \frac{v}{n},$$

l étant la longueur d'onde, n la fréquence et v la vitesse de propagation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

LE COURANT ÉLECTRIQUE

Phénomènes détecteurs des courants : effets calorifiques ; effet Peltier ; actions chimiques ; effets lumineux, actions électro-magnétiques. — Intensité du courant. — Ampère. — Facteurs de l'intensité. — Force électromotrice, résistance. — Loi d'Ohm. — Expression de la résistance. — La résistance spécifique. — Ohm. — Force électromotrice et différence de potentiel. — Circuits dérivés. — Lois. — Application : pont de Wheatstone. — Effets calorifiques du courant. — Loi de Joule. — Conservation de l'énergie.

Dans le chapitre précédent, nous sommes arrivés finalement à la conception du courant électrique et nous avons même indiqué, très succinctement, les divers moyens qui permettent sa production. Nous allons maintenant étudier les propriétés de ce courant électrique, abstraction faite de son mode de génération que nous supposerons une fois pour toutes, afin de simplifier les figures et les raisonnements, être une pile voltaïque.

* * *

Tout d'abord, ***comment peut être mis en évidence le courant électrique*** qui traverse un conducteur ; en d'autres termes, quelles sont les manifestations extérieures du courant électrique? L'intérêt de cette question est non seulement de renseigner sur l'existence du courant, mais également de fournir des méthodes de mesure de son importance par celle des effets qu'il produit.

1° Le courant électrique *échauffe les conducteurs* dans lesquels il circule ; il se manifeste donc par des ***effets calorifiques*** qu'il est très facile de constater même avec les courants faibles des machines statiques. Ces effets sont assez intenses pour porter, dans certains cas, les corps traversés à l'incandescence.

2° Le courant électrique parcourant un circuit constitué par des conducteurs métalliques de matière différente détermine un échauffement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou un refroidissement du point de soudure de deux métaux différents. C'est l'***effet Peltier***, qui est l'inverse du phénomène des courants thermo-électriques que nous avons examiné au chapitre premier.

3° Le courant électrique, lorsqu'il traverse des conducteurs liquides, détermine des ***décompositions chimiques*** soumises à des lois parfaitement définies que nous étudierons en détail dans un chapitre spécial.

4° Le courant électrique détermine des ***effets lumineux*** lorsqu'on lui fait traverser des intervalles gazeux dans certaines conditions. On observe soit des arcs électriques, soit des effluves lumineux, dont l'importance pratique est considérable.

5° Tous les effets précédents se manifestent suivant le chemin même du courant électrique. Mais, dans l'espace environnant un conducteur parcouru par un courant, celui-ci exerce des actions auxquelles on a donné le nom d'***actions électro-magnétiques*** et dont la plus simple est la déviation d'une aiguille aimantée placée à son voisinage.

Nous commencerons par étudier les manifestations du courant dans le conducteur lui-même.

* * *

Lorsqu'un courant circule dans un circuit quelconque, formé de conducteurs de forme, de dimensions et de nature différentes, il est bien évident qu'il passe à chaque instant à travers une section quelconque de ce circuit la même quantité d'électricité, sans quoi il devrait se produire en certains points des accumulations impossibles à justifier. Tout se passe comme dans le cas d'un réseau de conduites d'eau; quel que soit le diamètre de la conduite, il passe dans chaque section toujours la même quantité d'eau. On appellera ***intensité*** du courant le nombre de coulombs d'électricité qui passent en une seconde par une section déterminée.

S'il passe un coulomb par seconde, on dira que l'intensité du courant est de un ***ampère***. L'ampère est l'unité d'intensité de courant.

* * *

De quels ***facteurs*** dépend l'***intensité*** du courant?

Il est évident que plus la force électromotrice de la pile qui produit le courant sera grande, plus l'intensité sera grande, toutes choses étant égales d'ailleurs. Si on reprend la comparaison hydraulique, qui rend de grands services afin de concrétiser les faits, plus la pression de l'eau est grande, plus le débit est intense.

D'autre part, le circuit dans lequel passe le courant intervient aussi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il comprend non seulement les conducteurs extérieurs à l'appareil générateur, mais celui-ci également, puisque le courant se *ferme* par lui, de façon à réaliser une circulation continue d'électricité. Si cet ensemble oppose une résistance plus ou moins grande au passage de l'électricité, l'intensité du courant sera plus ou moins forte, de la même façon que le débit d'un circuit hydraulique dépend de la résistance qu'opposent les tuyaux au passage de l'eau.

Pour les deux facteurs que nous venons de mettre en évidence : force électromotrice du générateur et résistance totale du circuit, les lois reliant ces facteurs à l'intensité du courant sont très simples : si la force électromotrice est double, triple, etc., l'intensité est double ou triple aussi ; si la résistance est deux ou trois fois plus grande, l'intensité est deux ou trois fois plus petite.

La formule traduisant ces résultats, appelée ***loi d'Ohm***, s'énonce donc : ***l'intensité du courant en circuit fermé est égale au quotient de la force électromotrice par la résistance,*** et s'écrit :

$$I = \frac{E}{R},$$

I étant l'intensité, E la force électromotrice et R la résistance.

* * *

Il nous faut maintenant définir la ***résistance***, grandeur nouvelle que nous venons d'introduire. Nous ne considérerons que le cas des fils métalliques, d'un emploi général en électricité (1). La résistance d'un fil est évidemment essentiellement fonction de sa nature, de sa longueur et de sa section. Un raisonnement simple montre que la résistance est proportionnelle à la longueur. Elle est inversement proportionnelle à la section. En effet, un fil de section double peut être considéré comme formé de deux fils de section simple, et, de même qu'une conduite de section double d'une autre permet le passage d'un débit double d'eau (donc oppose une résistance moitié), le gros fil laisse plus facilement s'écouler l'électricité. Enfin, à longueur et section égale, la résistance d'un fil dépend de la nature du métal le constituant. Si on prend comme terme de comparaison le cuivre par exemple, on trouve qu'un fil de mêmes dimensions en fer est 6,10 fois plus résistant, un fil de maillechort 18,8 fois plus résistant, etc. Ces nombres 6,1, 18,8, etc., qui caractérisent chaque métal ont reçu le nom de ***résistances spécifiques.***

(1) Lorsque le conducteur est un liquide, on peut toujours l'assimiler à un certain conducteur métallique ayant la forme d'un fil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si on réunit ces résultats sous la forme d'une loi, on arrive à l'énoncé suivant : *la résistance d'un conducteur est égale à sa résistance spécifique multipliée par sa longueur et divisée par sa section*, qui se traduit par la formule :

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

R étant la résistance, ρ la résistance spécifique, l la longueur et s la section (1).

* * *

Revenons maintenant à la loi d'Ohm. Son énoncé nous permet de définir l'***unité de résistance***.

En effet, si nous supposons que la force électromotrice soit de 1 volt et que le courant produit ait une intensité de 1 ampère, la résistance a alors la valeur unité d'après la formule. C'est l'***ohm***, qui est donc défini comme la résistance d'un conducteur dans lequel circule un courant de 1 ampère sous une force électromotrice de 1 volt appliquée à ses extrémités.

Cette unité est représentée matériellement par une colonne de mercure de 106cm,3 de long et de 1 millimètre carré de section, à la température de 0°.

On a choisi le mercure, car il est possible d'obtenir ce métal à un grand degré de pureté chimique et il n'y a pas à tenir compte, comme dans un solide, de son état physique (écrouissage, recuit, hétérogénéité interne).

* * *

Grâce à la loi d'Ohm, il est facile d'expliquer la différence extrêmement importante, au point de vue pratique, entre deux grandeurs qui, bien que mesurées avec la même unité, le volt, ne doivent cependant pas être confondues : nous voulons parler de la ***force électromotrice*** et de la ***tension aux bornes*** ou ***différence de potentiel*** d'un générateur dont les deux bornes sont réunies par un circuit conducteur.

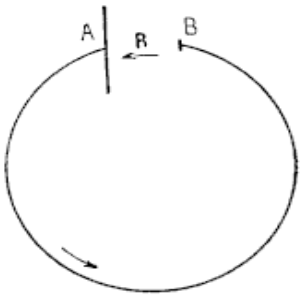


Fig. 18.

Considérons un générateur d'électricité, une pile par exemple, dont la force électromotrice est

(1) Si nous supposons un conducteur ayant une longueur de 1 centimètre (unité) et une section de 1 centimètre carré (section unité), l et s sont égaux à 1 et, par suite, la formule donne $R = \rho$.

La résistance spécifique d'un métal est donc la résistance d'un conducteur de ce métal ayant 1 centimètre de long et 1 centimètre carré de section.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

E. Elle a une résistance intérieure r, et le circuit extérieur qui réunit ses deux bornes une résistance R (fig. 18).

D'après la loi d'Ohm, l'intensité I du courant dans le circuit est donnée par le quotient de la force électromotrice E par la résistance totale $R + r$ du circuit. On a donc :

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

D'autre part, si nous considérons le *conducteur extérieur* AB de résistance R, il est parcouru par un courant d'intensité I et, d'après la loi d'Ohm, il existe entre ses extrémités une différence de potentiel E′ donnée par la formule :

$$I = \frac{E'}{R},$$

c'est-à-dire :

$$E' = IR = \frac{ER}{R + r}$$

en remplaçant I par sa valeur.

On voit donc que E′ est différent de E.

On peut donc encore écrire :

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{r}{R}}.$$

Si R est très grand, $\frac{r}{R}$ est négligeable, et alors $E' = E$. Par suite, la force électromotrice est la différence de potentiel entre les deux bornes du générateur quand la résistance du circuit extérieur est infiniment grande, c'est-à-dire quand le circuit est ouvert et qu'il ne passe aucun courant. On appelle parfois E la différence de potentiel ou la force électromotrice *en circuit ouvert*, et E′ la différence de potentiel ou la force électromotrice *en circuit fermé*. On voit que, tandis que E est une grandeur bien définie, caractéristique du générateur, E′ dépend essentiellement du circuit extérieur.

On peut encore exprimer le résultat précédent d'une autre façon et dire que la force électromotrice E est égale à la somme de la tension aux bornes (E′) et de la perte de tension à l'intérieur du générateur (1).

(1) En effet, en raisonnant comme précédemment, à l'intérieur du générateur circule le courant d'intensité I dans la résistance r, et la chute de tension entre les bornes B et A du générateur est $e = Ir = \frac{Er}{R + r}$.

On voit immédiatement que $e + E' = E$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le courant s'écoulait dans un circuit fermé unique, c'est-à-dire sans ***dérivations***. Nous allons maintenant examiner le cas d'un circuit complexe dans lequel le courant se ramifie et se distribue entre plusieurs conducteurs.

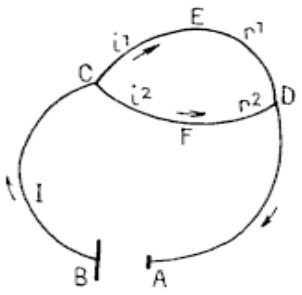


Fig. 19.

Considérons par exemple le circuit représenté figure 19, et supposons que le courant se propage dans le sens indiqué par les flèches. Si nous considérons le point C, par exemple, comme il n'y a pas en ce point d'accumulation d'électricité, on a forcément :

$$I = i_1 + i_2. \qquad (1)$$

D'autre part, entre les points C et D existe une certaine différence de tension e qui fait passer l'électricité aussi bien à travers CED que CFD. On a donc :

$$i_1 = \frac{e}{r_1}; \qquad i_2 = \frac{e}{r_2},$$

c'est-à-dire que :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}. \qquad (2)$$

Les intensités sont en raison inverse des résistances. Si la branche CED a une résistance moitié de celle de la branche CFD, il y passera un courant d'intensité double de celui circulant dans CFD.

Ce résultat est général, quel que soit le nombre des conducteurs disposés comme CFD et CED, c'est-à-dire ayant même point de départ et même point d'arrivée, que l'on appelle des conducteurs montés *en quantité* ou *en parallèle* (tandis que, lorsque les conducteurs sont disposés à la suite les uns des autres, on les dit disposés *en série* ou *en tension*).

Une conséquence intéressante est la suivante : si les deux conducteurs sont identiques, ils fonctionnent donc, au point de vue de la résistance totale, comme un conducteur unique de section double, c'est-à-dire de résistance *moitié*.

Une comparaison hydraulique permet de comprendre immédiatement ce résultat, qui est très important pour les applications pratiques. Si on a deux conduites identiques en parallèle entre deux points, il est évident que le débit total sera doublé, c'est-à-dire équivaudra à celui d'une con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duite unique de section double, et par suite opposant une résistance moindre au passage de l'eau.

* * *

Les deux égalités (1) et (2), que nous avons déduites par simple application des lois d'Ohm, permettent de résoudre tous les problèmes de calcul des intensités dans les circuits dérivés. Nous traiterons un seul exemple, celui du ***pont de Wheatslone*** que l'on emploie dans de nombreux montages électriques.

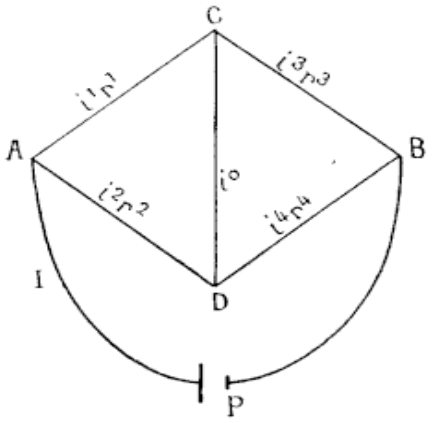


Fig. 20. — Pont de Wheatstone.

La figure 20 montre la disposition réalisée. Une pile P débite dans un circuit bifurqué formé de deux branches ACB, ADB constituées chacune de deux conducteurs de résistance différente AC, CB, AD, DB. Un conducteur relie les deux points C et D. Le problème à résoudre est le suivant. A quelle condition ne passe-t-il aucun courant dans la branche CD (que l'on appelle le *pont*) ?

Lorsque cette condition est remplie, on a évidemment :

$$i_1 = i_3 \qquad i_2 = i_4 \qquad i_0 = 0$$
$$I = i_1 + i_2,$$

et la différence de potentiel entre les points C et D est nulle, puisqu'il ne passe aucun courant dans le conducteur CD.

Par conséquent la différence de potentiel e_1 entre A et C est la même qu'entre A et D, ce qui se traduit par :

$$e_1 = i_1 r_1 = i_2 r_2.$$

De même, la différence de potentiel e_2 entre C et B est la même qu'entre D et B, et par suite :

$$e_2 = i_1 r_3 = i_2 r_4.$$

On en tire immédiatement :

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$

C'est la condition cherchée.

* * *

Nous avons dit que, lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, il donne lieu à des ***effets colorifiques***. Le conducteur s'échauffe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cherchons comment ce dégagement de chaleur est lié à l'intensité du courant qui le produit.

C'est Joule qui a formulé les lois du phénomène, que nous nous contenterons d'énoncer :

1° La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au temps pendant lequel le courant passe ;

2° La quantité de chaleur dégagée pendant un temps donné est proportionnelle au carré de l'intensité du courant circulant dans le conducteur ;

3° La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la résistance du conducteur traversé par le courant.

Ces trois lois peuvent se résumer dans la formule suivante :

$$Q = K + I^2 R t,$$

Q étant la quantité de chaleur dégagée pendant le temps t par un courant d'intensité I circulant dans un conducteur de résistance R, K étant le facteur numérique de proportionnalité.

* * *

La loi de Joule est une conséquence directe du principe de la ***conservation de l'énergie***, principe extrêmement général qui domine toute la physique moderne. Aussi allons-nous en dire quelques mots.

Ce principe affirme que, dans tous les phénomènes physiques, on ne peut ni créer, ni détruire de l'énergie. Par suite, si un phénomène physique exige une certaine dépense de travail, l'annihilation de ce phénomène doit en libérer une quantité égale.

Appliquons ce principe au cas présent. Nous avons défini la différence de potentiel entre deux conducteurs comme le travail fourni par les forces électriques pour porter un coulomb d'électricité de la tension la plus élevée à la tension inférieure. S'il ne s'agit plus d'un coulomb, mais d'une charge de C coulombs, passant d'un corps à un certain potentiel à un corps à un potentiel inférieur de V volts, le travail fourni par le système électrique sera égal à CV volts-coulombs, ou, puisque nous savons que :

$$1 \text{ volt} \times 1 \text{ coulomb} = \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre},$$

le travail fourni sera :

$$\frac{CV}{9,81} \text{ kilogrammètres.}$$

Or, dans un circuit parcouru par un courant, l'électricité se déplace d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

point à un certain potentiel à un point à plus bas potentiel. Chaque seconde, si l'intensité est I ampères, cela veut dire qu'il s'écoule I coulombs par seconde, et si, entre les deux extrémités du conducteur, il existe une différence de potentiel de V volts, le travail accompli par le courant électrique et par seconde est donné par le produit IV. En d'autres termes, la puissance du courant électrique est IV.

Or la puissance s'exprime en ***watts*** et un watt est la puissance qui fournit par seconde $\frac{1}{9,81}$ kilogrammètre. Cette unité est donc égale à un volt × un ampère, et la puissance dans le circuit considéré est W = IV watts.

L'intensité du courant, d'après la loi d'Ohm, est égale à $\frac{V}{R}$, et par suite V = IR, c'est-à-dire que l'on peut écrire :

$$W = IV = \frac{V^2}{R} = I^2R.$$

C'est ce qu'énonce la ***loi de Joule***, que l'on a ainsi déduite du principe de la conservation de l'énergie.

* * *

Dans la pratique, on exprime souvent les énergies en ***kilowatts*** (1 000 watts) et également en ***chevaux-vapeur*** équivalant à 75 kilogrammètres par seconde. Comme 1 kilowatt fournit $\frac{1\ 000}{9,81} = 102$ kilogrammètres, on voit immédiatement que 1 kilowatt équivaut à 1,36 cheval-vapeur.

Inversement, un cheval-vapeur équivaut à 0,736 kilowatt.

La physique nous apprend d'autre part qu'un travail de 427 kilogrammètres correspond au dégagement d'une quantité de chaleur égale à 1 calorie (quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un litre d'eau de 1 degré). Il est facile d'en déduire qu'une énergie électrique de 1 kilowatt correspond à la libération de 0,239 calorie par seconde. On a donc :

$$Q = 0,239\ VIt = 0,239\ I^2Rt = \frac{0,239}{R}\ V^2t$$

pour expression de la quantité de chaleur Q dégagée pendant un temps t dans un conducteur de résistance R parcouru par un courant I sous l'influence d'une différence de potentiel V.

Nous verrons les applications pratiques extrêmement importantes de l'effet Joule, en éclairage, chauffage et électro-métallurgie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Le principe de la conservation de l'énergie nous permet dès maintenant de prévoir une partie des phénomènes qui se produisent lorsque l'énergie électrique passant dans un conducteur n'est pas uniquement employée à échauffer ce conducteur, mais encore à produire dans l'espace environnant des modifications du champ magnétique (que nous étudierons plus loin) ou tout autre phénomène pouvant produire un travail mécanique. Dans ce cas, la quantité de chaleur Q′ dégagée dans le conducteur ne correspond plus à l'énergie totale du courant, et on a $Q' < Q$, Q étant la quantité de chaleur que donne l'application de la loi de Joule. Or, si nous prenons la formule $Q = \frac{KV^2}{R} t$, puisqu'on trouve une valeur inférieure de Q, comme K est une constante et que R est une caractéristique du conducteur indépendante du courant électrique qui le traverse, nous sommes conduits à dire que V a une valeur V′, inférieure à V, aux bornes du conducteur, ou, en d'autres termes, que la force électromotrice apliquée a été diminuée d'une certaine quantité, que l'on appelle la ***force contre-électromotrice*** afin de bien indiquer son rôle et qui correspond à la partie de l'énergie électrique qui a été dépensée à l'extérieur du conducteur.

* * *

Nous sommes ainsi conduits à l'étude des actions du courant électrique extérieures au conducteur même qu'il parcourt. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

MAGNÉTISME — ÉLECTROMAGNÉTISME ÉLECTRODYNAMIQUE

SOMMAIRE. — *Aimants. — Pôles. — Masses magnétiques. — Loi de Coulomb. — Influence ou induction magnétique. — Champ magnétique. — Spectres magnétiques. — Lignes de force magnétiques. — Intensité du champ magnétique. — Gauss. — Représentation du champ magnétique. — Induction et perméabilité magnétique. — Aimantation par les courants. — Règle d'Ampère. — Intensité d'aimantation. — Susceptibilité magnétique. — Saturation. — Théorie d'Ewing. — Variation de la susceptibilité. — Loi de Curie. — Magnétisme rémanent. — Force coercitive. — Hystérésis. — Substances ferro-magnétiques, paramagnétiques, diamagnétiques. — Moment magnétique. — Champ des courants. — Feuillet magnétique. — Puissance d'un feuillet. — Définition électro-magnétique de l'intensité de courant. — Loi de Biot et Savart. — Champ intérieur d'un solénoïde. — Circuit magnétique. — Réluctance. — Force magnétomotrice. — Actions mutuelles des champs et des courants. — Règle des trois doigts. — Loi de Laplace. — Attraction du fer par les solénoïdes. — Actions entre courants. — Formule d'Ampère. — Action d'un courant sur lui-même. — Rotations continues ; roue de Barlow. — Théorie du magnétisme d'Ampère.*

Avant d'étudier les actions magnétiques dues au courant électrique, il nous faut résumer brièvement les phénomènes présentés par les aimants.

* * *

On sait qu'on donne le nom d'***aimants*** à certains échantillons d'oxyde de fer naturel qui jouissent de la propriété d'attirer la limaille de fer.

Par simple frottement, et sans rien perdre de cette propriété, l'aimant naturel peut la communiquer à l'acier, donnant ainsi ce que l'on appelle des *aimants artificiels* auxquels il est facile de donner une forme géométrique simple, barreau allongé, fer à cheval ou aiguille, permettant l'étude plus commode des propriétés magnétiques.

* * *

Un barreau aimanté plongé dans de la limaille de fer se recouvre de parcelles métalliques, surtout aux extrémités, comme si la propriété d'attraction y était concentrée. On donne aux extrémités le nom de ***pôles***.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'étude des attractions et répulsions mutuelles des aimants a montré que les deux pôles ne sont pas identiques. Lorsque le barreau est suspendu autour d'un axe vertical, une des extrémités se dirige toujours vers le nord, l'autre vers le sud. On a appelé les deux pôles *pôle nord* et *pôle sud*. L'expérience a montré que si l'on approche un second aimant du barreau suspendu, les pôles de même nom se repoussent, les pôles de nom contraire s'attirent.

Cette dualité d'essence du magnétisme et l'analogie de leur façon de se comporter mutuellement avaient conduit les premiers expérimentateurs à admettre, par similitude avec l'électricité statique, l'existence de ***masses magnétiques***, jouant un rôle correspondant à celui des masses électriques en électrostatique, et comme elles de deux signes différents.

Guidé par ce parallélisme apparent des deux séries de phénomènes, Coulomb chercha si la même loi d'action ne s'appliquait pas dans les deux cas. Il trouva que tel était bien le cas. Les attractions et répulsions F qui s'exercent entre deux pôles varient en raison inverse du carré de leur distance d et sont proportionnelles à leurs masses magnétiques m_1, m_2.

$$F = \frac{m_1 m_2}{d^2}.$$

Malheureusement, il est impossible de mettre en évidence et d'isoler les masses magnétiques. Si on sectionne un barreau aimanté, il donne deux aimants complets, et toujours une masse magnétique positive est associée à une masse magnétique négative égale en valeur absolue. Ceci montre d'ailleurs que le magnétisme est un phénomène dont la cause réside dans la molécule même, en un mot un phénomène particulaire. On arrive ainsi à la conception suivante : un corps susceptible d'être aimanté est constitué par une infinité de petits aimants élémentaires (probablement les molécules elles-mêmes qui sont polarisées) et disposés dans toutes les directions (fig. 21, *a*). Sous l'influence d'une action magnétisante qui transforme le corps en un aimant, tous ces petits aimants élémentaires, que l'on appelle des *doublets magnétiques*, s'orientent suivant la même direction, et tout l'ensemble se comporte comme un aimant ordinaire (fig. 21, *b*).

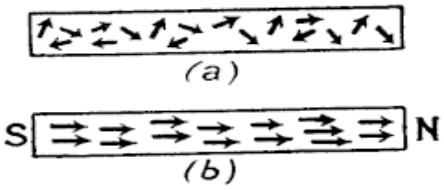


Fig. 21.

* * *

L'analogie avec ce que l'on observe en électricité statique se poursuit d'ailleurs plus loin. C'est ainsi qu'un aimant n'exerce pas des forces attrac-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tives et répulsives seulement sur d'autres aimants, mais également sur certains métaux, le fer en particulier, qu'il attire dans tous les cas en le transformant en un aimant. Le phénomène est absolument comparable à l'électrisation par influence au voisinage d'un corps chargé d'électricité. On dit qu'un aimant produit du magnétisme dans un morceau de fer non magnétique par *influence* ou ***induction magnétique***.

C'est par ce mécanisme que l'on explique l'attraction d'une pièce de fer par un aimant. Chaque pôle produit dans la partie de la pièce de fer la plus rapprochée un pôle de signe opposé et repousse le pôle de même nom à l'autre extrémité. L'attraction des deux pôles les plus rapprochés (et de signe opposé) l'emporte donc, et la pièce de fer influencée est attirée.

Si on éloigne la pièce influencée, elle perd son magnétisme induit, en totalité si c'est du fer doux, partiellement seulement si c'est de l'acier. C'est ainsi que l'on peut réaliser des aimants permanents.

* * *

Si l'on examine les phénomènes produits par un barreau aimanté dans l'espace environnant, on est conduit à dire que cet espace est le siège d'un ***champ magnétique*** (puisqu'un morceau de fer doux qui s'y trouve s'aimante) de même qu'un champ électrique est produit par un corps chargé d'électricité. Mais, dans le cas du magnétisme, il est possible de matérialiser les lignes de force du champ magnétique, ce que nous n'avons pu faire dans le cas du champ électrique.

A cet effet, il suffit de disposer au-dessus de l'aimant une feuille de papier que l'on saupoudre de limaille de fer. Cette limaille se dispose de telle façon que deux grains voisins s'orientent toujours dans la direction de la force magnétique. On obtient ainsi un ***spectre magnétique***. Comme on peut donner à l'aimant des formes diverses : barreau rectiligne, fer à cheval, et qu'on peut les disposer soit parallèlement, soit perpendiculairement à la feuille de papier, qu'on peut en disposer plusieurs côte à côte, etc., il est possible d'obtenir des représentations complètes des spectres dans les divers cas.

D'autre part, comme le spectre se forme aussi bien, que la feuille sur laquelle on répartit la limaille soit en papier, en verre, en métal quelconque, on arrive à la conclusion extrêmement importante qu'*il n'existe pas d'écrans pour le magnétisme* (exception faite cependant pour le fer sous très forte épaisseur). C'est donc une différence fondamentale d'avec les phénomènes électriques qui, ainsi que nous l'avons vu, sont complètement arrêtés dans certaines conditions. Par contre, le magnétisme se rapproche, à ce point de vue, de la pesanteur qui se transmet à travers tous les milieux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous donnons dans les figures 22 quelques spectres qu'il est extrêmement facile de réaliser expérimentalement. On remarque que, même au-dessus

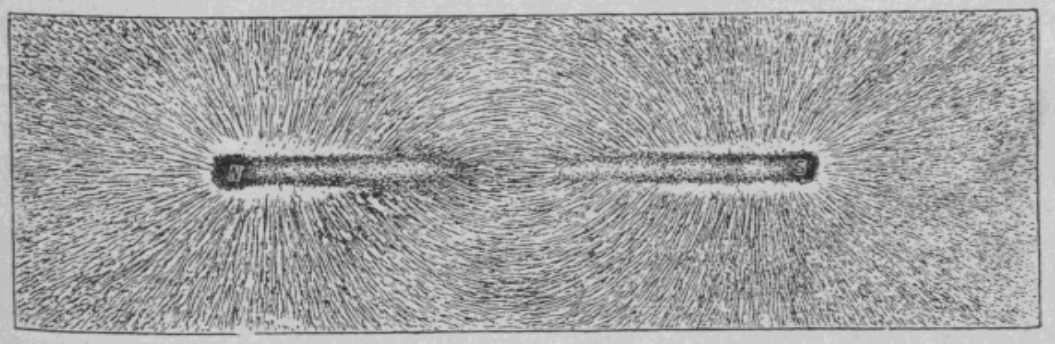


Fig. 22, *a*. — Spectre magnétique d'un aimant.

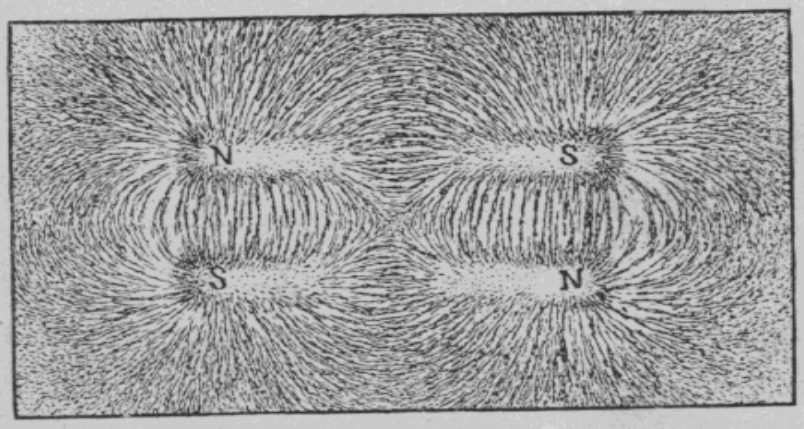


Fig. 22, *b*. — Spectre magnétique de deux aimants parallèles inverses.

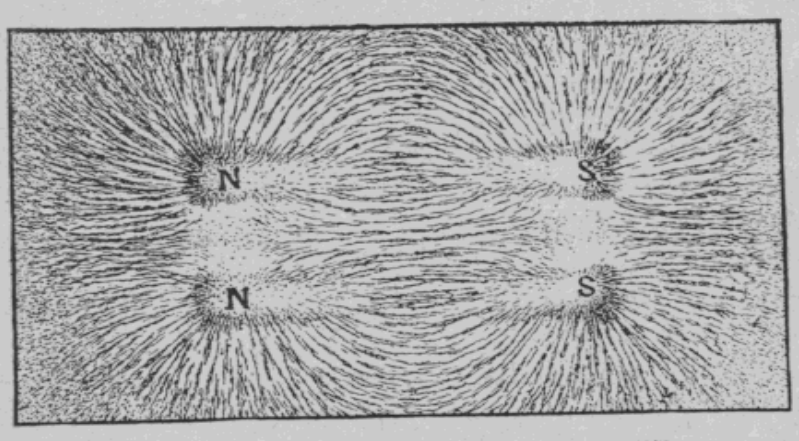


Fig. 22, *c*. — Spectre de deux aimants parallèles.

de l'aimant proprement dit, la limaille de fer s'oriente également, de sorte que, si l'on suppose que les lignes de force magnétique partent du pôle N

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et vont aboutir au pôle S, on est conduit à admettre qu'elles se ferment à l'intérieur de l'aimant, en allant alors du pôle S vers le pôle N.

On obtient alors, en tenant compte de ces remarques, les représentations schématiques reproduites dans la figure 23 pour le faisceau des ***lignes de force magnétiques*** dans le cas correspondant à la figure 22, *a*.

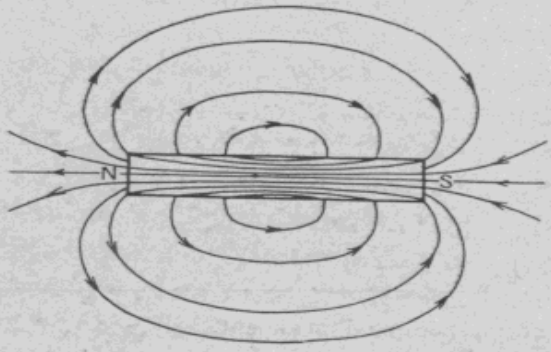


Fig. 23.

Si on se sert de barreaux aimantés assez longs et minces que l'on place normalement sous la feuille de papier, on aura, dans le cas d'un seul aimant, sensiblement le spectre correspondant à une masse ponctuelle (fig. 24, *a*) à deux masses ponctuelles de nom contraire (en plaçant deux barreaux verticalement sous la feuille les pôles de nom contraire en regard) (fig. 24, *b*) ou de deux masses ponctuelles de même nom (les deux barreaux ont leurs pôles de même nom en regard) (fig. 24, *c*).

* * *

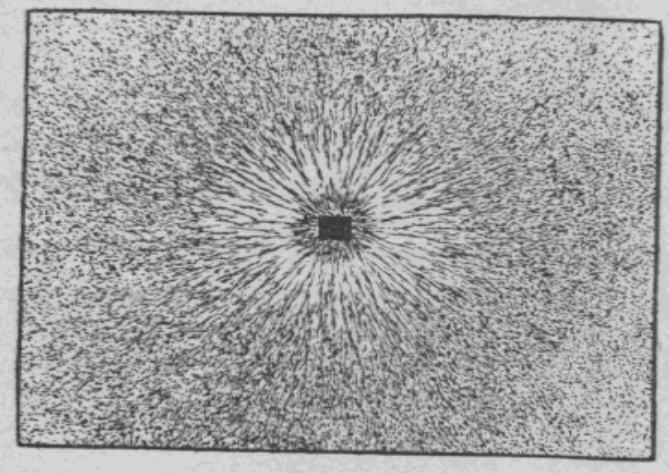


Fig. 24, *a*. — Spectre magnétique d'une masse ponctuelle.

On peut, à l'aide de la notion de lignes de force magnétiques, *interpréter les propriétés des corps magnétiques*.

Nous avons vu qu'un morceau de fer doux approché d'un aimant se trouve soumis à l'induction ; comme il se forme un pôle sud par exemple en regard du pôle nord de l'aimant, les lignes de force seront beaucoup plus serrées, beaucoup plus nombreuses, entre le pôle nord et la pièce induite A (fig. 25) qu'en toute autre partie du champ de l'aimant. On peut donc dire que *les lignes de force sont attirées par le fer doux*.

Si le fer doux induit a la forme d'un anneau (fig. 26), les lignes de force se concentrent dans cet anneau et créent un pôle sud à l'endroit où elles entrent dans l'anneau et un pôle nord à leur région de sortie, puisque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nous avons posé en principe que les lignes de force d'un aimant vont extérieurement du pôle nord au pôle sud.

Les lignes de force nous permettent également de définir l'***intensité des champs magnétiques***. Supposons que nous explorions le champ

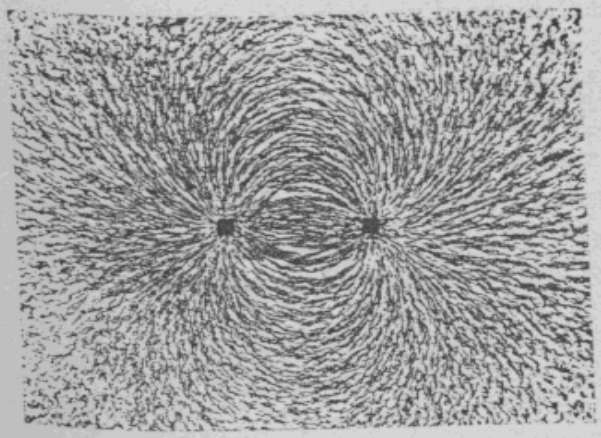


Fig. 24, *b*. — Spectre magnétique de deux masses ponctuelles égales de signe contraire.

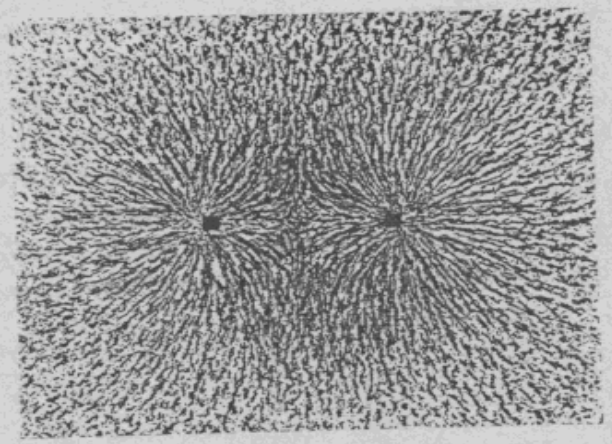


Fig. 24, *c*. — Spectre magnétique de deux masses ponctuelles égales de même signe.

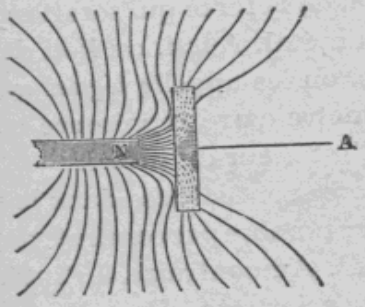


Fig. 25.

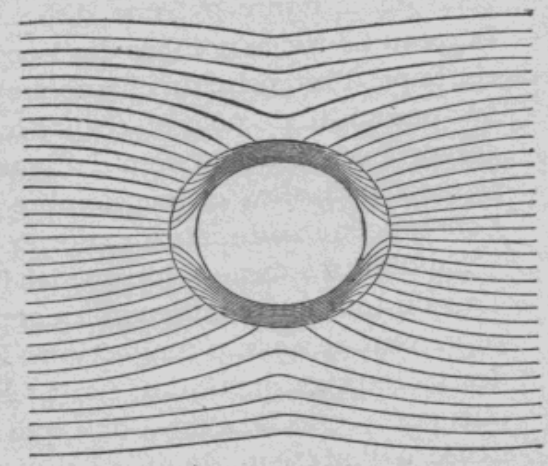


Fig. 26.

magnétique à l'aide d'un pôle nord pris égal à l'unité (1). En chaque point de l'espace, la force qui s'exerce sur cette unité de magnétisme est la mesure de l'intensité du champ en ce point (2). L'unité d'intensité

(1) Par analogie avec l'électrostatique, on choisira pour unité de magnétisme une quantité de magnétisme telle que, placée à une distance de 1 centimètre d'une quantité égale et de même nature, elle la repousse avec une force égale à une dyne. Ceci découle de la loi de Coulomb pour le magnétisme : $F = \frac{m_1 m_2}{d^2}$.

(2) Par exemple à une distance de 10 centimètres d'un pôle magnétique de masse 500, le champ est : $H = \frac{m_1 m_2}{d^2} = \frac{1 \times 500}{100} = 5$ degrés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a reçu le nom de ***gauss***. Un champ de un gauss exerce une force de une dyne sur l'unité de magnétisme placé en un point.

* * *

En traçant les lignes de force dans le cas d'un barreau aimanté par exemple, on constate qu'aux points où le champ magnétique est intense, les lignes de force sont très voisines ; là où il est faible, elles sont très éloignées les unes des autres. Cette considération a conduit à chercher à relier le nombre des lignes de force à l'intensité du champ magnétique. Le calcul montre que l'*on peut représenter numériquement l'intensité du champ magnétique en un point par le nombre de lignes de force magnétiques traversant une surface de* 1 *centimètre carré placée en ce point et normalement à la direction du champ.*

* * *

Si nous nous reportons maintenant aux spectres magnétiques tels que celui de la figure 23, une difficulté se présente, car, à l'intérieur d'un barreau de fer, le nombre des lignes de force par unité de surface ne représente pas l'intensité du champ magnétique ou de la force qui serait exercée sur une unité de pôle placée à l'intérieur du métal. Aussi, au lieu de conserver à ces lignes le nom de lignes de force, on les appelle *lignes magnétiques d'induction*, et leur nombre par centimètre carré représente ce que l'on appelle l'***induction magnétique*** B à l'intérieur du métal.

En d'autres termes, lorsque les lignes de force sont situées dans le vide, l'air ou tout autre milieu non magnétique, leur nombre par centimètre carré représente le champ magnétique H, et H = B. Au contraire, à l'intérieur des métaux magnétiques, fer, nickel, cobalt, acier, etc., B est beaucoup plus grand que H, c'est-à-dire que la force qui s'exerce sur l'unité de pôle située à l'intérieur du métal est beaucoup plus petite que le nombre de lignes d'induction par centimètre carré. Le rapport $\frac{B}{H}$ définit ce que l'on appelle la ***perméabilité magnétique*** μ du milieu. On a donc :

$$B = \mu H.$$

* * *

On peut présenter sous une autre forme la relation précédente. Considérons le cas de la figure 26. En un point de l'espace où se trouve le corps A

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

existait auparavant un champ H. Quand on a placé en cette région le corps A, le nombre de lignes de force par centimètre carré, qui était H, est devenu μ fois plus grand. Le nombre μH représente ce que nous avons appelé l'induction magnétique.

* * *

Enfin, la perméabilité magnétique peut être introduite à partir de la loi de Coulomb du magnétisme d'une manière analogue à celle qui nous a amenés à la notion du pouvoir diélectrique en électrostatique.

En effet, lorsque nous écrivons :

$$F = \frac{m_1 m_2}{d_2},$$

nous ne supposons rien sur le milieu séparant les pôles magnétiques, ou plutôt nous admettons implicitement qu'il n'intervenait pas. Or, il n'en est pas ainsi en réalité. Si les pôles sont séparés par du fer, du nickel ou du cobalt, leurs actions mutuelles sont beaucoup plus faibles que lorsqu'ils sont séparés par l'air, et on écrit alors :

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu d^2}$$

μ est la ***perméabilité magnétique***.

* * *

Les aimants naturels ou ceux qu'ils permettent de créer par frottement ou induction ne donnent que des actions magnétiques peu intenses. Au contraire, en se servant d'une propriété du courant électrique que nous allons examiner maintenant, il est possible d'obtenir des effets très intenses qui ont permis de compléter l'étude du magnétisme en mettant en évidence de nouvelles propriétés de ces corps.

C'est Arago qui, en 1820, constata que, lorsqu'on enroule un fil parcouru par un courant autour d'un cylindre de fer doux par exemple, celui-ci s'aimante extrêmement fortement et présente un pôle nord à une extrémité, un pôle sud à l'autre. On a ce que l'on appelle un ***électro-aimant***.

* * *

La première question qui se pose est de savoir à quelle extrémité se créera le pôle nord. La réponse est donnée par la ***règle d'Ampère*** : si on suppose un observateur couché sur le fil de la bobine de façon que le cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant entre par les pieds et sorte par la tête, et regardant le barreau situé à l'intérieur de la bobine, l'extrémité qui se trouve à sa gauche est le pôle nord.

Au lieu d'un barreau rectiligne, on peut utiliser un barreau ayant la forme d'un U (fig. 27) ; on obtient un électro-aimant en fer à cheval et, si on

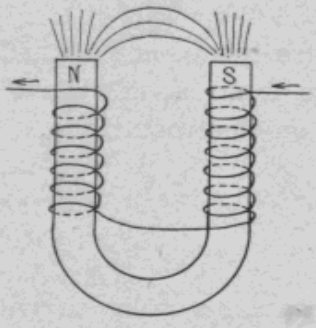


Fig. 27.

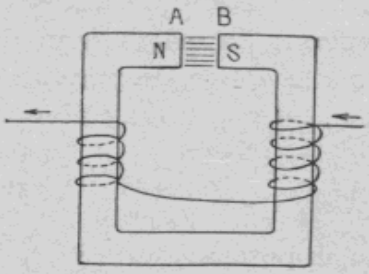


Fig. 28.

dispose les deux faces portant les pôles en regard l'une de l'autre (fig. 28), dans l'espace AB compris entre les deux pôles, le champ sera évidemment très intense. La figure 29 montre une réalisation pratique d'un électro-

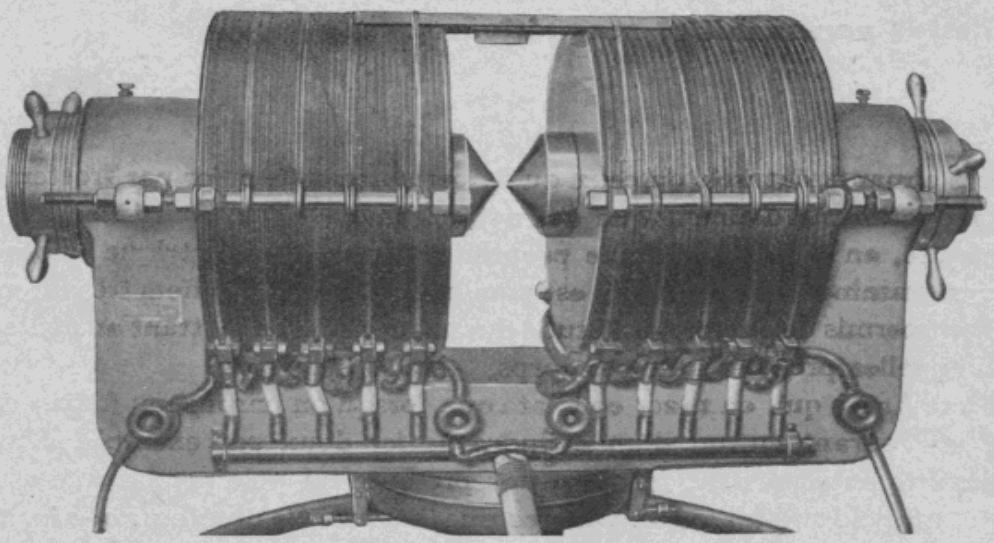


Fig. 29. — Électro-aimant de laboratoire.

aimant de laboratoire. On voit l'importance des bobines excitatrices et la forme conique donnée aux pièces polaires afin d'augmenter l'intensité du champ dans l'espace les séparant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

A l'aide de ce nouveau procédé d'aimantation, il est possible d'étudier en détail les propriétés magnétiques des divers corps. Il nous faut tout d'abord définir quelques grandeurs s'y rattachant.

L'***intensité d'aimantation*** I peut être représentée, dans le cas d'un barreau rectangulaire par exemple, par le nombre de masses magnétiques développées sur 1 centimètre carré de sa section terminale.

La ***susceptibilité magnétique*** k est le rapport entre l'intensité d'aimantation I que prend l'échantillon étudié et l'intensité du champ magnétique H dans lequel il est placé. Nous avons défini précédemment la *perméabilité magnétique*.

* * *

Si on place un échantillon de métal magnétique (fer doux, nickel, cobalt, acier, etc.) dans un champ magnétique de plus en plus puissant (produit par un électro-aimant par exemple), on constate que l'intensité de l'aimantation ne croît pas indéfiniment et que, à partir d'une certaine valeur du champ, elle reste constante, même si l'intensité du champ magnétisant augmente considérablement. On dit que l'échantillon est aimanté ***à saturation***.

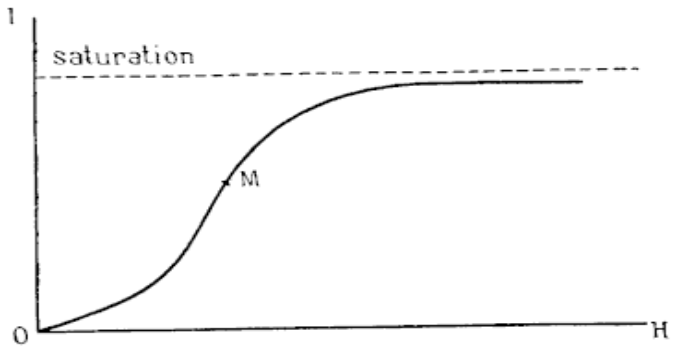


Fig. 30.

D'autre part, même avant d'atteindre sa valeur de saturation, l'aimantation est loin de croître proportionnellement à l'intensité du champ ; si l'on trace la courbe donnant l'intensité d'aimantation en fonction du champ, on a l'allure représentée figure 30, qui indique une marche assez compliquée du phénomène.

Ewing, par des considérations très simples, est arrivé cependant à fournir une ***représentation physique*** satisfaisante des ***divers stades de l'aimantation***. Nous avons vu que l'on admet que les corps magnétiques sont constitués par une infinité de petits aimants élémentaires, de dou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

blets magnétiques, de dimensions moléculaires, qui s'orientent sous l'influence du champ extérieur de façon à se disposer parallèlement à ce champ.

Considérons maintenant un groupe de quatre aimants élémentaires à l'intérieur du corps. Il ne peuvent que tourner autour de leur axe. Ils se disposeront symétriquement de façon à être en état d'équilibre, comme l'indique la figure 31, 1. Établissons maintenant un champ magnétique H peu intense. Il aura pour effet de faire tourner légèrement les aimants dans sa direction, mais les actions mutuelles exercées par les quatre aimants sont encore assez fortes pour empêcher la dissociation du groupe (fig. 31, 2). Que le champ magnétisant augmente à certain moment, le système deviendra instable, et les aimants, basculant autour de leur axe, se disposeront alors comme l'indique la figure 31, 3. A partir de ce moment, tout accroissement de l'intensité du champ n'aura plus pour résultat que de parachever l'alignement des aimants élémentaires et, lorsque la saturation sera atteinte, ils seront tous parallèles (fig. 31, 4).

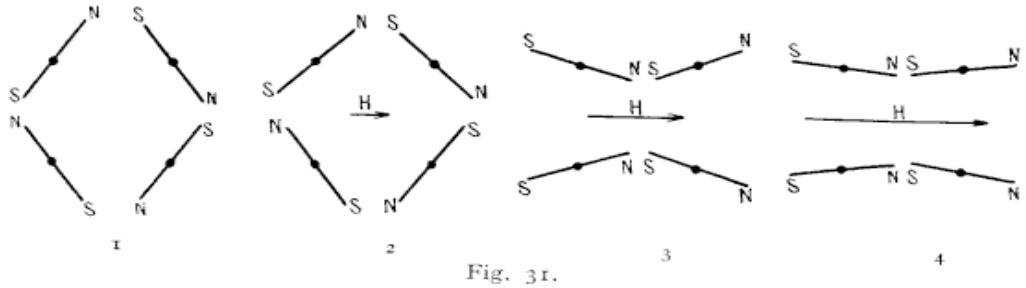


Fig. 31.

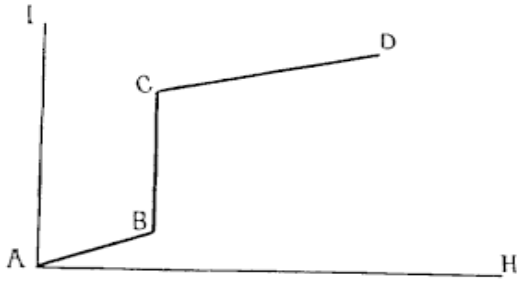


Fig. 32.

Si nous traduisons par une courbe les faits précédents, nous aurons la courbe de la figure 32 ; de A à B, correspondant aux états intermédiaires entre 1 et 2, l'aimantation est sensiblement proportionnelle au champ ; dans le passage de l'état instable limite 2 à l'état 3, l'aimantation augmente considérablement (portion BC). Ensuite, par les états de 3 à 4, l'aimantation croît très peu (portion CD). On voit que cette courbe est bien la schématisation de la courbe de la figure 30. Les transitions y sont moins nettes, parce qu'il ne faut pas oublier qu'au lieu d'un seul groupe de quatre aimants, il aurait fallu en considérer une infinité, et que tous ces groupes sont orientés dans des positions quelconques, de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sorte que certains d'eux seront plus tôt que d'autres dans la position de saturation par exemple.

* * *

On voit donc que k, ***susceptibilité magnétique***, n'est jamais constant et ***varie*** avec chaque valeur de la force magnétisante. La susceptibilité passe d'ailleurs par une valeur maxima correspondant au point d'inflexion M de la courbe d'aimantation (fig. 30).

La susceptibilité magnétique varie également avec la température à laquelle on opère. Curie a montré qu'elle est, tout au moins approximativement, inversement proportionnelle à la température absolue.

Enfin, même pour le même métal, et en opérant à la même température, a susceptibilité magnétique n'est pas constante pour une valeur donnée du champ. Elle dépend de tous les états magnétiques antérieurs par lesquels est passé le corps.

* * *

Cette dernière constatation s'explique très facilement lorsque l'on opère sur un morceau d'acier par exemple. On constate, en effet, que la courbe d'établissement de l'aimantation que nous avons étudiée précédemment n'est pas réversible. Si on désaimante un morceau de fer, pour une valeur

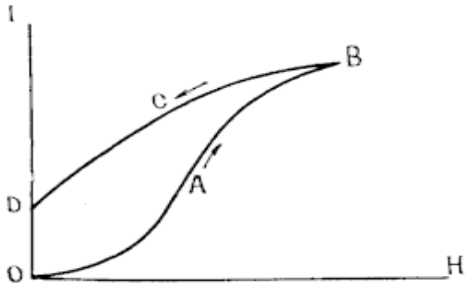


Fig. 33.

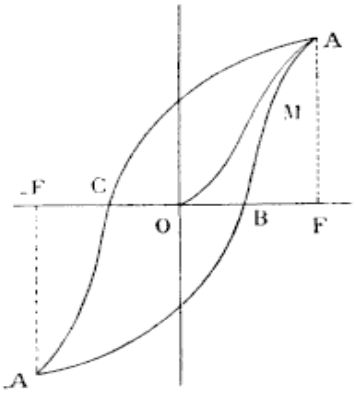


Fig. 34.

donnée de H, on trouve que l'aimantation est plus grande que celle constatée pour la même valeur lors de l'aimantation. En particulier, lorsque l'on supprime le champ magnétisant, on sait que l'échantillon conserve encore une aimantation que l'on appelle le ***magnétisme rémanent***. La figure 33 traduit graphiquement ce résultat. La courbe OAB correspond

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'établissement de l'aimantation dans un champ croissant, et la courbe BCD aux valeurs de l'aimantation dans un champ décroissant (1). On a donné à ce phénomène le nom d'***hystérésis***.

Si, au lieu de faire varier le champ magnétisant de O à F, on le fait varier de — F à + F, on obtient alors ce que l'on appelle la courbe d'hystérésis représentée figure 34. OA correspond à l'établissement initial de l'état d'aimantation, ACA′ aux valeurs décroissantes du champ et la partie A′BA aux valeurs croissantes du champ (2).

* * *

L'hystérésis correspond donc à un véritable *retard* de l'état d'aimantation d'un corps parcourant un cycle de magnétisme. On peut se représenter ce retard comme dû aux frottements des aimants élémentaires moléculaires qui ne sont pas capables, dans les métaux autres que le fer doux, de tourner librement autour de leur axe et de s'orienter instantanément dans la position d'équilibre correspondant à la valeur actuelle du champ.

Mais, si cette interprétation est exacte, ce frottement interne doit se traduire à l'extérieur par des phénomènes décelables. C'est bien ce que l'on constate. Tout d'abord, lorsqu'un métal magnétique est soumis un grand nombre de fois de suite à des aimantations et désaimantations successives, il s'échauffe notablement. De plus, à la longue, il se produit une modification profonde dans la structure du métal ; il perd peu à peu ses qualités magnétiques : c'est le *vieillissement* que l'on constate dans les tôles des transformateurs. Tout se passe comme si, au bout d'un certain temps, les axes des aimants grippaient et ne permettaient plus que des oscillations de moindre amplitude.

* * *

Les phénomènes qui précèdent sont présentés par un grand nombre de corps ayant une importance pratique considérable : fer, aciers, nickel, cobalt, et certains composés de ces métaux. On les appelle des ***substances ferro-magnétiques***. Certains autres corps, quelques gaz, comme l'oxygène et l'air, présentent les mêmes propriétés, bien qu'à un degré moindre, et sont appelés ***substances paramagnétiques***. Leur susceptibilité est positive.

(1) Pour le fer *doux*, qui ne conserve pas de magnétisme rémanent, les deux courbes OAB et BCD sont sensiblement confondues.

(2) La valeur OC qu'il faut donner au champ pour détruire le magnétisme rémanent mesure ce que l'on appelle la *force coercitive*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autres corps, au contraire, tels que le bismuth, l'eau, l'alcool, se comportent dans le champ magnétique d'une façon inverse. Au lieu de s'aimanter par influence comme le fer, un pôle sud se développant au point d'entrée des lignes de force et un pôle nord à leur point de sortie, elles s'aimantent en développant un pôle nord au point d'entrée des lignes de force et un pôle sud au point de sortie (fig. 35). Leur susceptibilité est alors négative et toujours très faible. On les appelle des ***corps diamagnétiques***. Ils n'ont pas d'intérêt pratique ; aussi n'en dirons-nous rien.

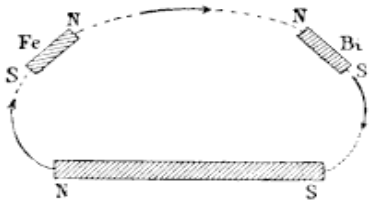


Fig. 35.

* * *

Dans l'étude du magnétisme, nous avons raisonné en supposant l'existence de masses magnétiques, jouant un rôle analogue à celui des masses électriques en électrostatique, mais nous avons dit également que cette conception était purement théorique, la masse magnétique étant une véritable entité et n'ayant pas d'existence naturelle. Quelle est alors la grandeur physique que l'expérience permet d'atteindre et de mesurer? C'est le ***moment magnétique***. Voici comment on peut introduire cette grandeur et la relier à la masse magnétique.

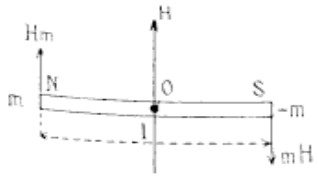


Fig. 36.

Tout aimant situé dans un champ magnétique est soumis à deux forces égales et opposées. Considérons l'aimant NS de longueur l, portant à ses extrémités deux charges de magnétisme $+m, -m$ (fig. 36). Cet aimant est placé dans un champ magnétique uniforme H et peut tourner autour d'un axe O perpendiculaire au champ. A ses extrémités s'exercent deux forces de valeur mH égales et opposées. Il est donc soumis à un couple dont le moment mécanique est mlH. La quantité ml est ce que l'on appelle le moment magnétique M de l'aimant et, par suite, le couple moteur qui tend à le faire tourner a pour valeur MH.

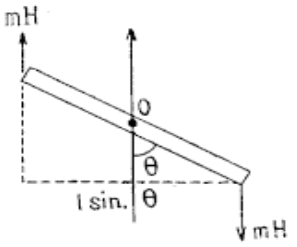


Fig. 37.

Remarquons que, si l'aimant fait un angle θ avec la direction du champ (fig. 37), le couple moteur auquel il est soumis a pour valeur mlH sin θ = MH sin θ (1).

(1) Il est facile de mesurer expérimentalement la valeur du produit MH, ainsi que la valeur du rapport $\frac{M}{H}$, d'où l'on déduit immédiatement les valeurs de M et de H.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Puisqu'un courant électrique est capable d'exercer une action magnétisante, il est naturel de penser qu'***un courant produit autour de lui des actions magnétiques*** (1).

Il doit donc être possible de répéter les expériences fondamentales du magnétisme, en particulier la production des spectres magnétiques qui renseigne sur la distribution dans l'espace des lignes de force.

C'est bien ce que l'expérience a vérifié. La figure 38 montre le spectre magnétique obtenu en faisant passer un courant dans un fil rectiligne AB traversant verticalement la feuille de papier horizontale saupoudrée de limaille de fer (fig. 39).

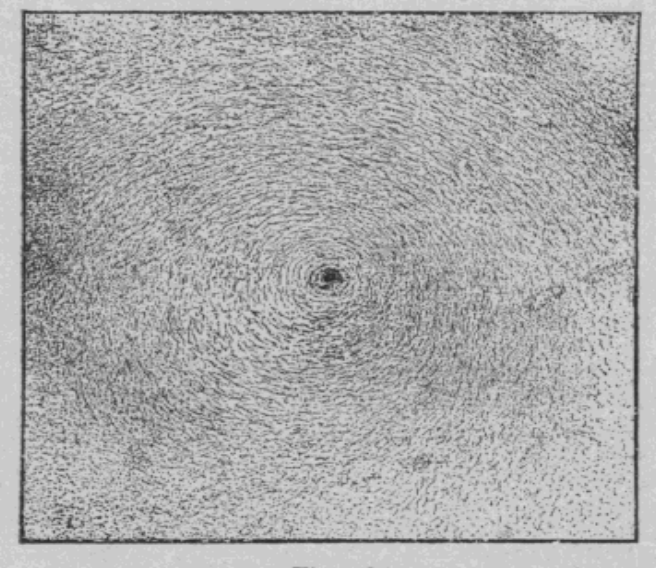


Fig. 38.

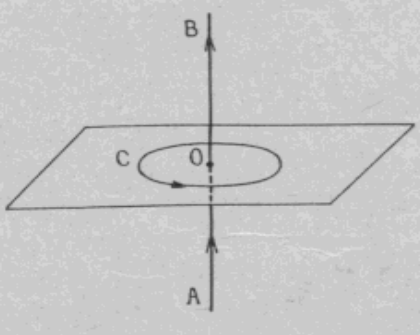


Fig. 39.

* * *

Quelle est la direction des lignes de forces concentriques au point O que l'on met ainsi en évidence? En d'autres termes, comment s'orientera

Si on divise le moment d'un aimant par son volume v, on a, dans le cas d'un barreau cylindrique de section s et de longueur l, $v = ls$ et $\frac{M}{v} = \frac{m}{s}$, qui est précisément l'intensité d'aimantation.

On voit donc, sans qu'il soit besoin d'entrer dans plus de détails, que le moment magnétique, seule grandeur physiquement mesurable, permet de définir numériquement les diverses grandeurs que nous avons introduites en partant de la notion de masses magnétiques.

(1) Le phénomène fut découvert par Œrsted en 1802, qui observa qu'une aiguille aimantée est déviée par un courant traversant un conducteur placé dans son voisinage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un petit aimant que l'on dispose tangentiellement à une ligne de force? La réponse est donnée par la règle d'Ampère, que l'on peut énoncer comme suit :

Si un observateur, couché le long du fil de telle sorte que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, regarde un point C, un élément de magnétisme nord placé en C sera soumis à une force qui l'entraînera vers la gauche de l'observateur.

Le sens des lignes de force est donc celui indiqué sur la figure 39. On peut énoncer d'autres façons la règle d'Ampère. Si on suppose que l'on visse un tire-bouchon dans le sens de parcours du courant, le sens de rotation du tire-bouchon est celui des lignes de force.

Un autre énoncé encore plus simple est le suivant : si on saisit le fil avec la main droite de façon que le pouce allongé suivant le fil soit dirigé dans le sens de propagation du courant, les autres doigts indiquent le sens des lignes de force (1).

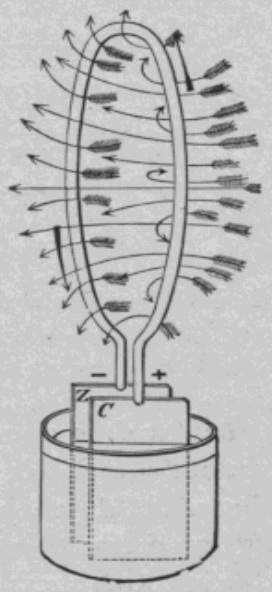
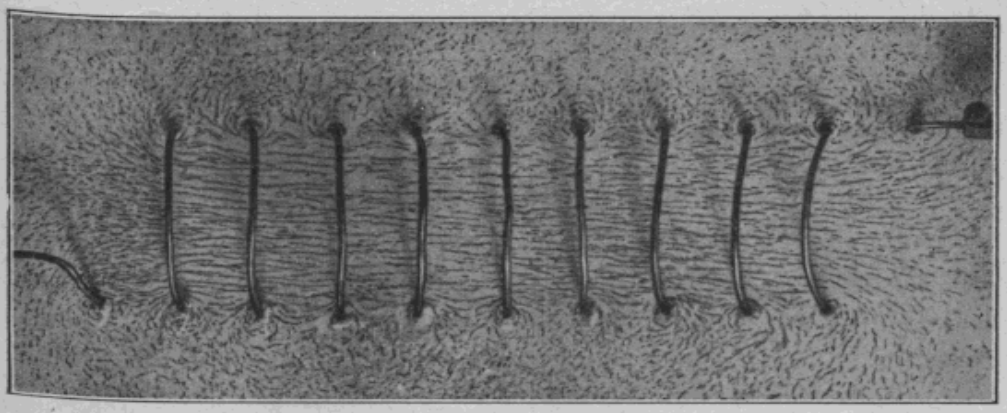


Fig 40.

* * *

Si, au lieu d'un fil rectiligne, on considère un *circuit fermé*, les lignes de


Fig. 41.

force ont, autour de chaque élément du contour, la direction représentée

(1) Nous verrons plus loin que le courant électrique est en réalité dû à un déplacement d'électrons du pôle négatif vers le pôle positif, c'est-à-dire *en sens inverse* de celui adopté comme sens du courant dans les applications électriques. Par suite, si l'on revisait l'électricité à la lumière des conceptions modernes, le sens du courant serait le sens inverse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la figure 40 par les petites flèches. Elles coupent normalement le plan du circuit indiqué par les grandes flèches.

Enfin, dans le cas d'une bobine de fil, d'un ***solénoïde***, qui n'est pratiquement que la juxtaposition d'un certain nombre de circuits fermés élémentaires, le spectre magnétique a l'apparence représentée figure 41. C'est-à-dire qu'à l'intérieur du solénoïde le champ est sensiblement uniforme et les lignes de force ont une direction facile à déduire par application de la règle d'Ampère (fig. 42).

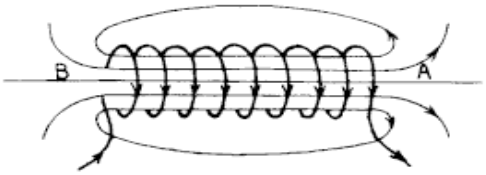


Fig. 42.

* * *

Ayant déterminé l'existence et la direction du champ magnétique créé par un courant circulant dans un conducteur, il faut maintenant calculer l'intensité du champ électromagnétique ainsi créé.

Une première conclusion à laquelle nous conduit immédiatement l'étude des spectres magnétiques est qu'un courant peut être remplacé, pour le calcul du champ produit, par un aimant qui lui est équivalent.

Dans le cas d'un circuit fermé, par exemple, on peut substituer un aimant infiniment plat s'appuyant sur les concours du circuit.

Sur une des faces de ce ***feuillet*** se trouve distribuée uniformément une certaine quantité de magnétisme nord et, sur l'autre face, une quantité égale de magnétisme sud.

Un solénoïde, au contraire, est équivalent à un aimant de même longueur terminé par deux faces nord et sud portant des masses magnétiques égales et de sens contraire.

Il est de plus évident que l'action magnétique produite en un point de l'espace par un conducteur de forme donnée, parcouru par un courant, sera proportionnelle à l'intensité du courant qui y circule.

* * *

La notion de feuillet magnétique, qui joue un rôle primordial dans l'électromagnétisme, est due à Ampère qui, en 1823, énonça le théorème fondamental suivant : Tout conducteur linéaire parcouru par un courant est équivalent à un feuillet magnétique s'appuyant sur les contours de ce conducteur, et dont le moment magnétique par unité de surface, que l'on appelle la ***puissance du feuillet***, U, est proportionnel à l'intensité i du courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a donc :

$$U = ci,$$

c étant un facteur numérique de proportionnalité qui dépend des unités employées pour mesurer l'intensité du courant et la puissance du feuillet.

* * *

On peut choisir les unités de façon à n'avoir pas à introduire le coefficient c, c'est-à-dire de façon que le nombre mesurant l'intensité d'un courant soit égal au nombre mesurant la puissance du feuillet équivalent.

On arrive ainsi à une ***définition nouvelle de l'intensité du courant***. L'unité électromagnétique C.G.S. de courant sera l'intensité d'un courant équivalent à un feuillet magnétique de même contour dont la puissance sera égale à l'unité C.G.S. électromagnétique de puissance (1).

Dans la pratique, l'unité choisie, qui est l'***ampère***, est égale au dixième de l'unité électromagnétique C.G.S.

Ainsi donc, nous arrivons, par des considérations purement magnétiques, à définir l'intensité d'un courant.

D'autre part, nous avons, par des considérations purement électrostatiques, défini l'unité C.G.S. électrostatique de courant comme celle d'un courant transportant par seconde l'unité C.G.S. électrostatique d'électricité.

Ces deux unités ne sont pas égales ; on a constaté que l'unité électromagnétique C.G.S. d'intensité de courant est 3.10^{10} fois plus grande que l'unité électrostatique d'intensité de courant.

On a donc deux systèmes possibles d'unités : électrostatique ou électromagnétique, la correspondance de l'un à l'autre s'effectuant par l'intervention d'un facteur numérique égal à 3×10^{10}. Comme il se trouve que ce facteur est justement égal à la vitesse de propagation de la lumière et de l'onde électromagnétique dans le vide, nous prévoyons dès maintenant que cette coïncidence n'est pas un simple effet du hasard. Nous serons amenés à revenir plus en détail sur cette question.

* * *

Par la considération du feuillet magnétique équivalent à un courant, on peut calculer le champ magnétique en tous les points de l'espace. Il est

(1) L'unité C.G.S. électromagnétique de puissance, qui n'est autre que l'unité électromagnétique C.G.S. de moment magnétique, est le moment magnétique d'un doublet constitué par deux masses magnétiques égales à l'unité séparées par une distance de 1 centimètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

possible d'arriver au même résultat sans faire intervenir la notion de feuillet, en supposant que le champ H en un point P situé à une distance r d'un élément de courant ∂l d'un circuit fermé parcouru par un courant i est donné par la ***loi de Biot et Savart***.

$$H = \frac{i\,\partial l \sin \theta}{r_2},$$

θ étant l'angle formé par l'élément de courant considéré avec la droite le joignant au point où l'on cherche le champ (fig. 43). Quant à la direction du champ, elle est perpendiculaire au plan formé par l'élément de courant et la droite le joignant au point p.

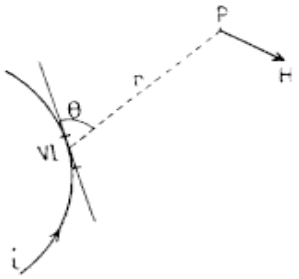


Fig. 43.

Il nous faut insister sur le fait que la loi de Biot et Savart (dont nous verrons une généralisation plus loin, connue sous le nom de loi de Laplace) donne le même résultat que la considération des feuillets magnétiques. Il faut également remarquer que cette dernière méthode est plus satisfaisante pour l'esprit, car, quelque difficile que soit le problème, il est toujours possible de trouver un feuillet ou un système de feuillets équivalent à un courant donné, tandis que la considération des actions de chaque élément ∂l de courant est purement fictive, puisqu'il est impossible d'isoler physiquement un tel élément de l'ensemble du circuit. Néanmoins, dans un grand nombre de cas, la loi de Biot et Savart, qui permet l'application simple du calcul intégral, conduit à des calculs plus simples.

D'ailleurs, il est absolument inutile de chercher à démontrer l'exactitude de la loi *élémentaire* de Biot et Savart. Seul le résultat *final* obtenu par un circuit fermé est vérifiable, et il existe une infinité de lois élémentaires qui conduisent au même résultat, ainsi que l'a montré H. Poincaré.

* * *

Dans le cas d'un ***solénoïde*** suffisamment long pour que l'on puisse considérer que le champ à son intérieur est uniforme, sa valeur est donnée par la formule :

$$H = \frac{4\,\pi n i}{10},$$

n étant le nombre de tours de fil par centimètre et i l'intensité du courant en ampères. Le produit ni représente ce que l'on appelle en électrotechnique les ***ampères-tours***.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Ce résultat est applicable en particulier au cas d'un solénoïde en forme d'anneau fermé. Supposons maintenant que le solénoïde soit enroulé sur une âme d'un métal magnétique de perméabilité μ. L'induction B à l'intérieur du ***circuit magnétique*** est $B = \mu H = \frac{4\pi N}{10 l} i \mu$, N étant le nombre total des spires sur la longueur l et le flux qui traverse une des spires de section S est égal à :

$$\Phi = \frac{4\pi}{10} \frac{Ni \mu S}{l}$$

que l'on peut écrire :

$$\Phi = \frac{4\pi Ni}{10 \frac{l}{\mu S}}.$$

Si nous comparons cette formule avec celle exprimant la loi d'Ohm :

$$i = \frac{E}{R} = \frac{E}{\rho \frac{l}{s}} = \frac{E}{\frac{l}{cs}},$$

ρ étant la résistivité, dont l'inverse, c, est la *conductivité*, on voit que ces deux équations sont analogues et, pour cette raison, on a appelé *résistance magnétique* ou ***réluctance*** la quantité $\frac{\mu S}{l}$ (analogue de la résistance $\frac{cs}{l}$) et ***force magnétomotrice*** la quantité $4\pi Ni$ (analogue de la force électromotrice E). On peut donc énoncer la loi d'Ohm du magnétisme en disant que le flux magnétique est égal au quotient de la force magnétomotrice par la réluctance (1).

Remarquons que l'analogie n'existe que dans les formules, car, tandis que c, conductivité, est une constante pour un conducteur donné, μ dépend de l'induction magnétique B et, par suite, du flux magnétique. D'autre part, l'entretien d'un courant dans un conducteur correspond à une dépense continue d'énergie (d'après la loi de Joule), tandis que le flux magnétique une fois établi ne dépense plus d'énergie. C'est un phénomène statique ; il ne circule rien le long des lignes d'induction ; au contraire, il y a circulation d'électricité dans un circuit électrique.

(1) Dans les applications, on a donné des noms aux différentes grandeurs ainsi définies :

Le *gilbert* est l'unité de force magnétomotrice, et est égal à $\frac{10}{4\pi}$ ampères-tours.

L'*œrsted* est l'unité de réluctance, et est égal à la réluctance d'une masse d'air de 1 centimètre de long et 1 centimètre carré de section.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Néanmoins, au point de vue pratique, ces considérations rendent des services, car elles permettent, en appliquant dès lois et des raisonnements analogues à ceux de l'électricité (en particulier la loi de Kirchoff), d'arriver à des résultats suffisamment approchés.

* * *

Puisqu'un courant circulant dans un circuit fermé est équivalent à un aimant en ce qui concerne les actions magnétiques extérieures, il est évident que l'on doit pouvoir répéter avec les courants les expériences fondamentales du magnétisme. C'est ce qu'Ampère a vérifié à l'aide d'appareils de laboratoire d'une élégante simplicité, que nous ne décrirons pas, car, dans l'état actuel de nos connaissances, ils n'ont plus d'intérêt, ayant seulement servi, au début de l'étude de l'électrodynamique, à établir solidement les bases de ce chapitre de l'électricité.

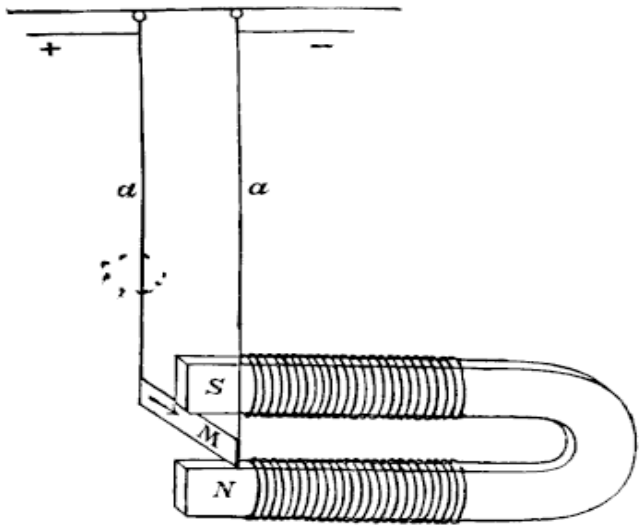


Fig. 44.

a. Il est évident qu'un circuit fermé parcouru par un courant, un solénoïde rectiligne par exemple, s'il est mobile dans l'espace, s'orientera, sous l'influence du champ magnétique terrestre, comme le ferait un aimant. L'axe de la bobine se placera dans la direction nord-sud magnétique. Si on place un conducteur mobile dans un champ magnétique, il se déplacera dans un sens que l'on peut déduire de la règle d'Ampère, ou plus simplement de la ***règle des trois doigts***, que l'on peut énoncer comme suit : Si l'index de la main gauche est dirigé dans la direction des lignes de force du champ, le médius dans la direction du courant dans le fil mobile, le pouce, placé perpendiculairement aux deux autres doigts, donne la direction du déplacement.

Prenons un exemple (fig. 44). Entre les branches d'un électro-aimant en fer à cheval placé horizontalement se trouve disposée une plaque épaisse M, suspendue par des fils métalliques souples, *a*, *a*, servant également à amener le courant. Dans ces conditions, les lignes de force du champ magnétiques sont verticales, dirigées de bas en haut ; il faut donc placer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'index de la main gauche verticalement ; le médius sera dirigé d'arrière en avant du plan de la figure (sens de circulation du courant). Donc, le pouce indiquera la direction vers la gauche de la figure, c'est-à-dire que la plaque doit être chassée vers la gauche, en dehors du champ magnétique.

Ajoutons que la grandeur de cette force est donnée par la loi de Laplace, qui se traduit par la formule :

$$f = Hids \sin \alpha,$$

f étant la force exercée par un champ magnétique H sur un élément de courant ds parcouru par un courant i et faisant l'angle α avec la direction du champ. Le sens de la force est celui indiqué par la règle des trois doigts.

Remarquons que, d'une façon absolue, rien ne permet de considérer la loi de Laplace comme exprimant la véritable loi naturelle de l'action d'un champ sur un élément de courant. En effet, on ne peut avoir un courant qui ne soit pas fermé, ce qui rend impossible la vérification expérimentale de la ***loi de Laplace*** ; on ne mesure pratiquement qu'une action *résultante* sur un élément de longueur finie.

Dans ces conditions, ainsi que l'a montré H. Poincaré, si un phénomène comporte une explication mécanique complète, il en comporte une infinité d'autres qui rendront également compte de toutes les particularités révélées par l'expérience. En d'autres termes, il existe une infinité de lois différentes au point de vue de l'effet élémentaire, mais équivalentes au point de vue de l'effet résultant. La loi de Laplace est une de ces lois, particulièrement simple et d'une application commode dans les calculs, mais rien n'implique qu'elle préside *réellement* aux phénomènes.

* * *

b. Un circuit électrique créant un champ magnétique déviera une aiguille aimantée et produira, dans un morceau de fer doux placé dans son voisinage une aimantation induite. Par suite, il s'exercera des ***forces attractives*** entre le circuit électrique et la pièce de fer doux, et, si celle-ci peut se déplacer librement, elle sera attirée par le circuit.



Fig. 45.

Considérons par exemple un solénoïde parcouru par un courant (fig. 45). Il est facile de voir, par application de la règle d'Ampère, qu'il se produira un pôle nord à sa gauche, c'est-à-dire à l'extrémité —. Les lignes de force vont donc extérieurement de l'extrémité — vers l'extrémité + et, à l'intérieur du solénoïde, de l'extrémité + vers l'extrémité —. Dans le barreau aimanté par induction, il se produira un pôle sud en face de l'extrémité

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nord du solénoïde, d'où attraction, et le barreau de fer pénétrera dans la bobine. Si, dans son mouvement, le barreau dépasse l'autre extrémité de la bobine, les actions inverses se produisent, et il est encore aspiré par la bobine. En un mot, un noyau de fer doux est toujours attiré par une bobine.

* * *

c. Si on considère ***deux circuits*** mobiles parcourus par des courants, chacun d'eux étant équivalent à un aimant, on devra observer entre les deux circuits des attractions ou des répulsions.

C'est bien ce que l'expérience vérifie. Nous énoncerons simplement les résultats expérimentaux obtenus par Ampère.

Deux courants parallèles dirigés dans le même sens s'attirent ; deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.

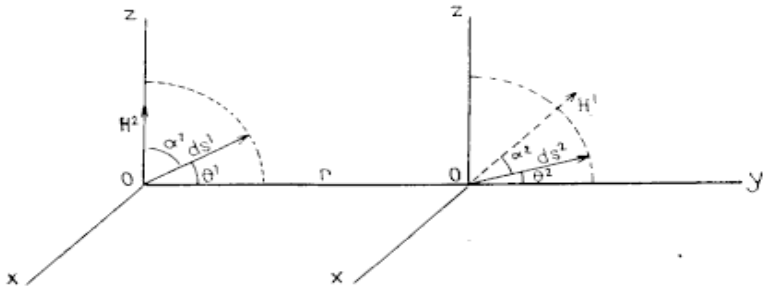


Fig. 46.

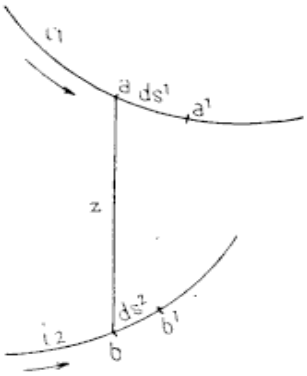


Fig. 47.

Deux courants angulaires tendent, dans tous les cas à se placer de telle manière qu'ils soient parallèles et que le courant les traverse tous les deux dans le même sens. Il est possible de calculer les actions réciproques de deux éléments de courant en appliquant les lois de Laplace et de Biot et Savart. Mais on arrive alors à la conclusion assez bizarre que l'action de l'élément ds_1 du premier courant sur l'élément ds_2 du second courant n'est pas égal et de sens opposé à l'action de ds_2 sur ds_1 (1).

Ceci ne doit pas nous surprendre, puisque la loi élémentaire de Biot et

(1) On peut le voir rapidement. Supposons que ds_1 est dans le plan yOZ et ds_2 dans le plan yOX (fig. 46). Le champ H_1 dû à l'élément ds_1 parcouru par le courant i_1 est $H_1 = i_1 ds_1 \frac{\sin \theta_1}{r^2}$, et la force F_1 exercée sur ds_2 est :

$$F_1 = i_2 ds_2 H_1 \sin \alpha_2 = i_1 i_2 \, ds_1 ds_2 \frac{\sin \theta_1 \cos \theta_2}{r^2}.$$

On a de même :

$$H_2 = i_2 \, ds_2 \frac{\sin \theta_2}{r^2} \qquad F_2 = i_1 ds_1 H_2 \sin \alpha_1 = i_1 i_2 ds_1 ds_2 \frac{\sin \theta_2 \cos \theta_1}{r^2}.$$

F_1 et F_2 n'ont pas la même valeur et sont rectangulaires entre elles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Savart est absolument arbitraire et ne donne des résultats exacts que pour un *circuit fermé*.

Une infinité de lois élémentaires sont dans le même cas. C'est ainsi qu'Ampère, voulant que les actions réciproques de deux éléments ds_1, ds_2 soient égales, directement opposées et appliquées suivant la droite qui joint les éléments, de façon à ce que le principe de l'action et de la réaction s'applique, a été conduit à formuler une loi élémentaire totalement différente (1).

* * *

d. Un élément d'un circuit parcouru par un courant est toujours placé dans un ***champ magnétique*** qui est celui ***créé par le circuit lui-même***. Il est donc soumis à une force électromagnétique et, si le circuit comprend des parties mobiles, celles-ci se déplaceront par rapport aux autres.

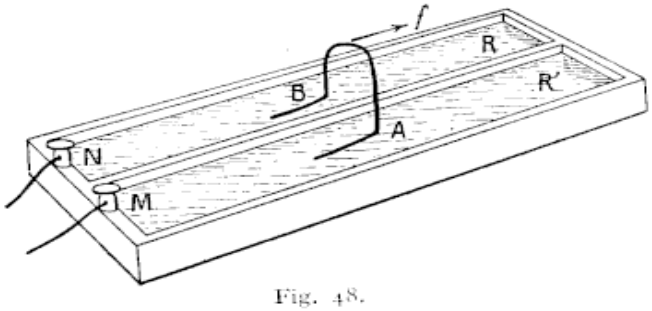


Fig. 48.

Une expérience simple permet de vérifier qu'il en est bien ainsi. Dans une boîte en bois comportant deux rigoles R et R′ parallèles, remplies de mercure (fig. 48), on fait passer le courant amené en N et M en disposant un petit pont AB formé d'un fil de fer flottant sur le mercure. Quand le courant passe, l'équipage glisse sur le mercure et s'éloigne des bornes, quel que soit le sens de circulation du courant.

* * *

e. S'appuyant sur les résultats précédents, il est possible de réaliser des mouvements continus, des rotations d'aimants ou de courants, en employant des courants déformables. L'exemple classique est celui de la ***roue de Barlow***.

Elle consiste en un disque de cuivre C (fig. 49) mobile autour d'un axe horizontal passant par son centre. Il plonge légèrement dans une rigole DF remplie de mercure. Un aimant en fer à cheval a ses branches placées de part et d'autre du disque.

(1) Cette loi a pour expression :

$$dF = \frac{i_1 i_2\, ds_1 ds_2}{r^2}\,(2\cos\varepsilon + 3\cos\alpha\cos\alpha'),$$

ε étant l'angle de aa' avec bb', α l'angle $a'ab$ et α' l'angle abb' (fig. 47).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le courant arrive par A, passe dans le mercure, de là dans la roue, et retourne à la pile par B. Il est donc, dans le disque, dirigé du mercure vers le centre. D'après la figure, les lignes de force du champ magnétique de l'aimant sont dirigées d'avant en arrière de la figure et, si on applique la règle des trois doigts, on voit que la roue est soumise à une force tangentielle qui la fait tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.

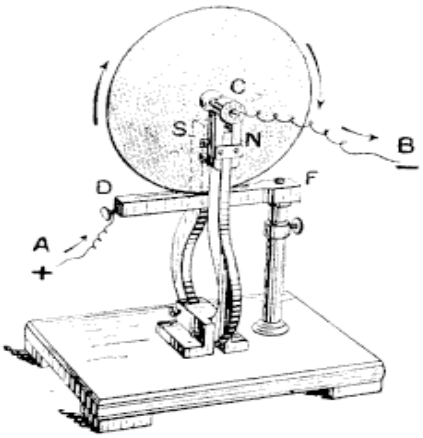


Fig. 49.

Remarquons que la roue de Barlow est le plus simple des moteurs électriques ; les principes précédents servent de base à l'étude de ces moteurs.

* * *

L'analogie entre les circuits électriques et les aimants suggéra à *Ampère* une ***explication électromagnétique des phénomènes magnétiques***.

Ampère admettait qu'autour de chaque molécule des corps magnétisés circulait un courant parcourant un chemin infiniment petit ; il admettait, de plus, que tous ces courants élémentaires circulaient dans le même sens de rotation ; enfin, pour lui, la résistance électrique opposée à ces courants était supposée nulle ; il expliquait ainsi l'absence d'échauffement d'un corps magnétisé.

Dans les corps non magnétisés, ces *courants moléculaires* se trouvent disposés dans toutes les orientations, de sorte que leur action totale résultante est nulle. Sous l'influence d'un courant circulant dans une bobine enroulée autour d'un barreau par exemple, les courants élémentaires s'orientent de façon à être parallèles au courant dans les spires et de même sens que lui.

Cette conception, que l'on comparera avec celle d'Ewing que nous avons exposée précédemment, s'interprète facilement dans la théorie des électrons : il suffit de supposer qu'un électron tourne autour de chaque molécule, décrivant une orbite circulaire, équivalent dans son mouvement de rotation au courant moléculaire d'Ampère. Le magnétisme des corps est donc ainsi ramené aux phénomènes de mouvement des électrons.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IV

L'INDUCTION

Réversibilité des phénomènes électriques. — Caractère temporaire des courants induits. — Origine des courants d'induction. — Vérifications expérimentales. — Courants de Foucault. — Loi de Lenz. — Règles pratiques. — Valeur de la force électromotrice d'induction. — Le coefficient d'induction mutuelle. — Le henry. — Le coefficient de self-induction. — Extra-courants. — Calcul de la self-induction. — Élimination de la self-induction. — Cas des circuits renfermant des noyaux de fer. — L'extra-courant de rupture.

Dans les pages qui précèdent, nous avons vu que tous les effets du courant étudiés, chimiques, calorifiques ou lumineux, sont susceptibles de réciprocité. Nous sommes donc en droit de nous demander si les phénomènes électromagnétiques et électrodynamiques qui sont produits par le courant sont capables, inversement, d'engendrer des courants électriques.

Par exemple, un courant électrique aimante le fer ; inversement, l'aimantation du fer peut-elle produire un courant électrique? De même, sous l'action du courant, des aimants peuvent être mis en mouvement ; inversement, le déplacement des aimants peut-il créer des courants électriques?

C'est Faraday qui le premier chercha à résoudre ces questions, en partant de l'analogie électrostatique, la seule connue à l'époque : la présence d'un corps électrisé communique, par induction, une charge électrique à un corps placé dans son voisinage. Un courant électrique circulant dans un conducteur ne peut-il, par ***induction,*** déterminer la création d'un courant dans un circuit fermé placé à son voisinage?

* * *

Les expériences montrèrent qu'il y a bien production d'un courant électrique dans un circuit voisin d'un conducteur parcouru par un courant, mais, et c'est là la propriété fondamentale révélée, ***le courant induit n'est pas permanent*** ; *il ne se manifeste qu'au moment où le courant électrique est ouvert ou fermé dans le conducteur inducteur.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On appelle le circuit inducteur le *primaire*, le circuit induit le *secondaire*, le courant inducteur le courant primaire, le courant d'induction le courant secondaire.

On constate expérimentalement que *le courant secondaire est, à la fermeture du courant primaire, de sens opposé à ce courant, et, au contraire, lors de l'ouverture du courant primaire, le courant secondaire est de même sens que ce courant.*

* * *

Quelle est l'***origine du courant d'induction***? Les deux circuits sont naturellement isolés l'un de l'autre, et le seul phénomène qui permette à un observateur placé dans le circuit induit d'être informé du passage du courant dans le circuit inducteur est l'établissement dans l'espace du champ électromagnétique créé par le passage de ce courant.

Ainsi donc, c'est dans la création ou la disparition du champ électromagnétique engendré dans l'espace occupé par le circuit secondaire qu'il faut chercher l'origine du courant d'induction, c'est-à-dire de la création d'une force électromotrice d'induction dans un circuit fermé.

D'autre part, comme la force électromotrice d'induction ne se manifeste qu'au moment où le courant (et par suite le champ magnétique) s'établit ou disparaît, il est logique de supposer que c'est la *variation* du champ magnétique à travers le circuit induit qui, en dernière analyse provoque l'apparition de la force électromotrice d'induction.

On peut donc formuler la proposition générale suivante : *Toute variation du flux d'induction magnétique qui traverse un circuit fermé conducteur provoque dans ce circuit la production d'une force électromotrice induite.*

* * *

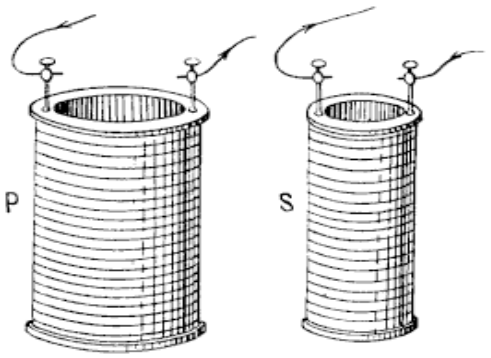


Fig 50.

Afin de vérifier cette proposition, il faut passer en revue les divers moyens dont nous disposons pour faire varier le flux magnétique dans un circuit, et constater que chacun d'eux provoque bien un courant induit.

a. Les deux circuits primaire (P) *et secondaire* (S) *sont rigides et immobiles.* — On ouvre ou on ferme le courant dans P. On constate le passage du courant induit dans S. C'est le cas que nous avons étudié précédemment. Remarquons d'ailleurs qu'il n'est pas nécessaire d'aller

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jusqu'à la suppression totale du courant inducteur. Toute variation de son intensité, provoquant des variations correspondantes dans le champ magnétique qu'il crée dans l'espace, modifie également la valeur du flux d'induction dans le circuit secondaire et, par conséquent, y engendre un courant induit (fig. 50).

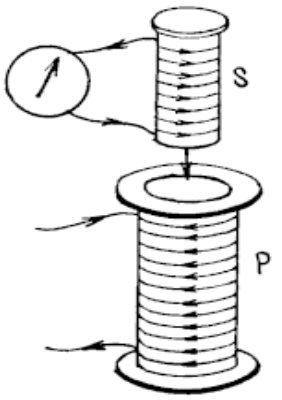


Fig. 51.

b. Le circuit S *par exemple est mobile par rapport au circuit* P, *dans lequel l'intensité du courant est constante.* — En approchant ou éloignant S de P, on coupe avec S un plus ou moins grand nombre de lignes de force magnétiques; le flux magnétique varie donc dans S, et un courant induit s'y observe, qui dure tant que dure le déplacement, c'est-à-dire tant que le flux d'induction varie.

L'expérience est très simple à réaliser à l'aide de deux bobines de fil creuses. Dans l'une circule un courant ; quand on approche l'autre, on observe le courant induit (fig. 51).

Au lieu de produire le champ magnétique par un courant électrique circulant dans un circuit, nous pouvons le produire par des aimants ou des électro-aimants. Dans ces conditions, le circuit primaire P est remplacé par un aimant ou un électro-aimant (fig. 52).

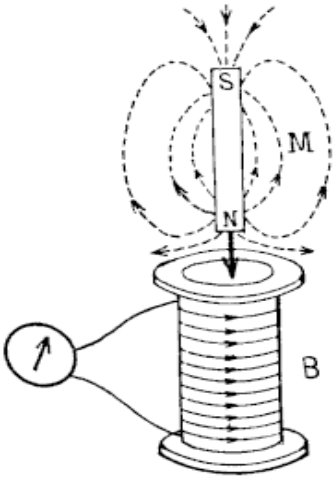


Fig. 52.

c. En approchant un aimant d'un circuit S, *on y crée un courant induit.* — Inversement, d'ailleurs, l'aimant (ou l'électro-aimant) peut être fixe et le circuit secondaire mobile.

Un cas particulier intéressant est celui du champ magnétique terrestre. Si on déplace une bobine dans l'espace, elle sera le siège d'une force électromotrice induite par le magnétisme terrestre. Naturellement, cette force électromotrice est très faible, mais elle est parfaitement mesurable.

d. On peut également modifier le flux magnétique par *action d'un corps magnétique,* un barreau de fer doux F, par exemple. Dans ces conditions, P et S sont fixes, le courant circule dans P et on approche de S un barreau de fer doux. On constate la production d'un courant d'induction dans S (fig. 53).

* * *

Dans les expériences précédentes, le circuit secondaire était un circuit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

linéaire, une bobine par exemple. On peut le remplacer par une *masse métallique*. On constate encore l'existence de courants induits à l'intérieur de cette masse, courants auxquels on donne le nom de ***courants de Foucault***.

Une expérience simple permet de les mettre en évidence : entre les pôles d'un électro-aimant, on fait tourner une roue de cuivre (fig. 54). Si le courant ne circule pas dans l'électro-aimant, la roue, une fois mise en rotation, tourne pendant un certain temps. Si on la lance, puis que l'on fasse passer le courant dans l'électro-aimant, on constate que son mouvement s'arrête brusquement, comme si elle avait été violemment freinée.

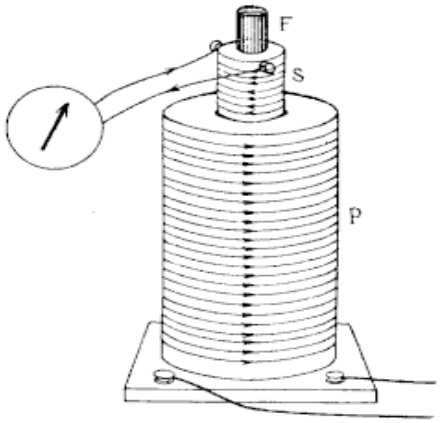


Fig. 53.

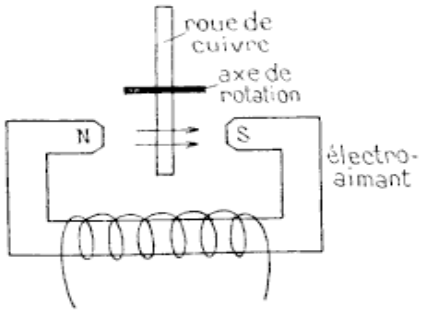


Fig. 54.

On explique ce phénomène en disant que le mouvement de la roue dans le champ fait passer dans le métal, très bon conducteur, des courants induits sur lesquels le champ de l'électro-aimant agit. Il en résulte des forces qui gênent et arrêtent le mouvement. Si la vitesse de rotation est assez grande et le champ magnétique intense, on constate même que la roue s'échauffe : l'énergie qu'elle possédait du fait de sa rotation s'est transformée en chaleur par effet Joule des courants de Foucault circulant dans le métal.

* * *

L'existence et l'origine des courants induits étant ainsi établie, il faut maintenant procéder à leur étude qualitative. Deux questions sont à résoudre : ***quel est le sens de circulation des courants induits, et quelle est leur intensité ?*** Nous allons examiner successivement ces deux points.

Le ***sens de circulation*** des courants induits est donné par la ***loi de Lenz***, qui s'énonce : *le sens du courant induit est tel que le flux qu'il produit*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à travers le circuit qu'il parcourt tende à s'opposer à la variation de flux qui lui donne naissance.

On peut encore l'énoncer de la façon suivante :

Le déplacement relatif de S par rapport à P produit un courant induit dirigé de telle façon que les forces qui résultent de son existence s'opposent au mouvement. En autres termes, on peut dire que les courants induits correspondent à une sorte d'inertie électromagnétique qui s'oppose aux variations de flux dans le système, de même que l'inertie de la matière s'oppose aux variations de vitesse des corps matériels.

Donnons un exemple : à travers un circuit S, le flux magnétique diminue. La force électromagnétique induite aura un sens tel que le flux magnétique qu'elle produit dans le circuit tende à augmenter le flux total.

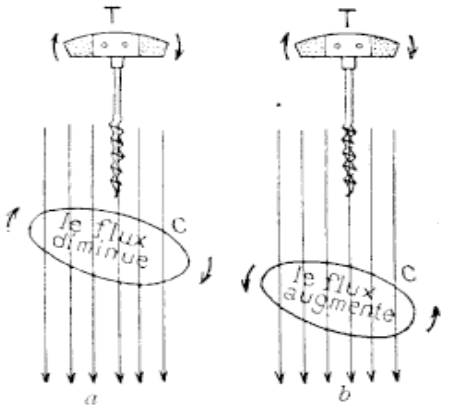


Fig. 55.

La détermination du sens du courant induit peut se faire facilement à l'aide de diverses règles pratiques ; nous en donnons quelques exemples.

1° *Règle du tire-bouchon de Maxwell.* — On fait tourner un tire-bouchon T de manière qu'il s'enfonce dans le sens des lignes de force du champ ; si le flux à travers le circuit C diminue, le courant induit a le sens de la rotation du tire-bouchon (fig. 55, *a*) ; si le flux augmente, le courant induit tourne en sens inverse du tire-bouchon (fig. 55, *b*). On voit immédiatement que cette règle est bien d'accord avec la loi de Lenz ; en effet, le courant induit a un sens tel que son propre flux magnétique, celui qu'il produit lui-même à travers sa surface, est de même sens que le flux primitif, si celui-ci diminue, et de sens contraire, si le flux primitif croît ; le courant induit tend donc bien à empêcher la variation de ce flux, comme le veut la loi de Lenz.

2° *Règle des trois doigts* (*main gauche*). — Dans le cas particulier, très important, où la force électromotrice d'induction est due au déplacement d'un circuit dans un champ magnétique fixe, la *règle des trois doigts*, que nous avons énoncée précédemment, mais appliquée avec la *main gauche*, donne le sens du courant induit : l'index étant dirigé dans le sens des lignes de force, et le médius dans le sens du déplacement, le pouce indique le sens du courant induit.

3° *Bonhomme d'Ampère.* — Si un observateur est couché le long des lignes de force et que le nombre des lignes de force *augmente* dans le cir-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cuit, le courant induit est dirigé dans le circuit dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

* * *

Il est facile de calculer la ***valeur de la force électromotrice d'induction*** dans un circuit par application de ce que nous savons des actions exercées par un champ magnétique sur un courant placé dans ce champ.

En effet, considérons un conducteur AB, de longueur l, parcouru par un courant d'intensité i, et supposons qu'il soit disposé perpendiculairement à un champ magnétique H (fig. 56). Nous savons qu'il est soumis à une force iH dynes par centimètre; par suite, sur le conducteur de longueur l, la force totale exercée par le champ est iHl et elle est perpendiculaire au plan formé par AB et H.

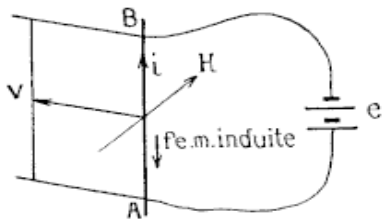


Fig. 56.

Supposons que cet élément de courant AB soit libre de se déplacer sous l'action de cette force, et soit v la vitesse de déplacement dans la direction de la force. Le travail accompli par seconde est force × déplacement = iHlv et la source de l'énergie fournie au système est la pile alimentant le circuit ; sa force électromotrice est e et, comme l'intensité du courant est i, l'énergie fournie par seconde a pour valeur ei.

Cette énergie est utilisée à deux fins : d'abord, échauffer le conducteur par effet Joule, et ensuite déplacer le conducteur dans le champ. Nous pouvons facilement évaluer ces deux travaux : l'échauffement a pour mesure i^2r, r étant la résistance du conducteur AB ; le déplacement correspond à un travail iHlv. Par conséquent, on a :

$$ei = i^2r + i\mathrm{H}lv,$$

d'où :

$$i = \frac{e - \mathrm{H}lv}{r},$$

c'est-à-dire que la force électromotrice effective du circuit est *diminuée* de la quantité Hlv par suite du mouvement du conducteur. Cette quantité donne la mesure de la *force électromotrice induite*. Or, lv représente la surface balayée par seconde par le conducteur dans son déplacement, et H est le nombre de lignes de force par centimètre carré. Donc, la force électromotrice induite a pour mesure le nombre des lignes de force magnétiques rencontrées par le conducteur en une seconde.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'il s'agit d'un circuit fermé, le résultat précédent s'énonce : *la force électromotrice induite est égale à la variation de flux magnétique par seconde* (1).

* * *

Nous avons examiné les phénomènes qui se produisent dans le circuit secondaire lorsque le champ magnétique d'origine magnétique ou électromagnétique variait. Nous allons maintenant revenir au cas initialement étudié de deux circuits P et S en présence, et chercher si la création du courant induit dans S quand un courant passe dans P n'a pas une action sur P lui-même. En un mot, nous avons vu que P agit sur S, mais, inversement, S n'agit-il pas sur P?

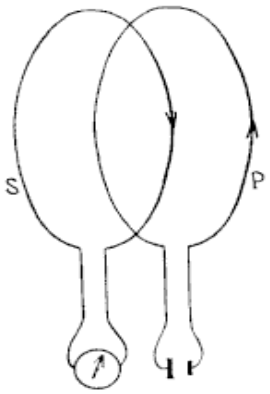


Fig. 57.

Pour nous en rendre compte, considérons deux circuits P et S en présence (fig. 57). Il est facile de prévoir qu'ils auront des actions mutuelles, que S réagira sur P, tout comme, en électrostatique, nous avons vu un corps chargé par influence modifier l'état électrique du corps l'influençant.

En effet, quand le courant croît dans P, le champ magnétique dû au courant croît également et, par suite, dans le circuit S il y a production d'une force électromotrice et d'un courant dirigé en *sens inverse* du courant dans P (d'après la loi de Lenz). Inversement, si on ouvre le circuit de P, le courant a son intensité qui tombe à zéro, le champ magnétique décroît donc et, dans S, il y aura production d'un courant de *même sens* que le courant dans P. En un mot, tout courant dans S crée un champ magnétique qui tend toujours à s'opposer aux variations du champ magnétique total.

On montre qu'il y a réciprocité, c'est-à-dire que si un courant de 1 ampère passe dans P, il envoie dans S un flux total M, qui est précisément égal à celui que S envoie dans P quand un courant d'un ampère le traverse.

Le coefficient M est ce que l'on appelle le ***coefficient d'induction***

(1) Plus exactement, si $d\mathcal{F}$ est la variation du flux magnétique à travers le circuit pendant le temps dt, la force électromotrice d'induction e a pour valeur :

$$e = \frac{d\mathcal{F}}{dt}.$$

Si e est exprimé en *volts* et le flux en *maxwells*, il faut introduire un coefficient numérique, et la formule devient :

$$e = \frac{1}{10^8}\frac{d\mathcal{F}}{dt}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mutuelle des deux circuits. C'est-à-dire que le flux F envoyé par P dans S est iM. On a donc pour valeur de la force électromotrice induite e :

$$e = \text{variation par unité de temps de } iM,$$

que l'on peut encore écrire :

$$\text{Induction mutuelle} = \frac{\text{force électromotrice du secondaire}}{\text{taux de variation du courant dans le primaire}}.$$

Si l'on mesure la force électromotrice en volts, l'intensité en ampères, on a, pour définition de l'unité d'induction mutuelle, appelée ***henry*** :

$$1 \text{ henry} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ampère par seconde}} = \frac{10^8 \text{ unités C.G.S. de force électromotrice}}{10^{-1} \text{ unité C.G.S. de courant par seconde}}$$
$$= 10^9 \text{ unités C.G.S. absolues d'induction mutuelle.}$$

* * *

Au lieu de considérer deux circuits séparés, considérons maintenant un seul circuit, constitué par exemple par une bobine dans laquelle nous lançons le courant. Au début, il n'existe aucun champ magnétique ; mais, sitôt que le courant commence à passer, des lignes de forces sont créées, qui produisent un flux magnétique naissant dans le circuit, donnant par conséquent naissance à une force électromotrice d'induction de sens opposé à la force électromotrice appliquée (d'après la loi de Lenz).

En d'autres termes, un circuit parcouru par un courant i est traversé par un flux $\mathcal{F}$ créé par ce courant lui-même. Comme le champ, et par suite le flux, sont proportionnels au courant, on a :

$$\mathcal{F} = Li.$$

L est ce qu'on appelle le ***coefficient de self-induction*** du circuit. Il est mesuré en henrys, comme le coefficient d'induction mutuelle.

* * *

Dans un circuit présentant une self-induction notable, la valeur du courant n'est pas dès le début égale à $\frac{E}{R}$; le courant ne prend pas immédiatement la valeur définie par la loi d'Ohm ; il y a une période où l'intensité est égale à $\frac{E - e}{R}$, e étant la force électromotrice d'induction qui va en décroissant au fur et à mesure que le courant s'établit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est possible de montrer directement l'existence de ce phénomène d'une façon très simple : il suffit de reprendre le dispositif du pont de Wheatstone dont nous avons parlé précédemment et de constituer une de ses branches par une résistance bobinée de façon à présenter une self notable. On constate alors que, le pont étant équilibré, c'est-à-dire aucun courant ne passant dans sa branche diagonale lorsque le courant circule dans le reste du pont, si on coupe le courant, il y a passage d'un courant dans la branche diagonale dû à l'***extra-courant de rupture*** dans la bobine · au contraire, au moment où on lance le courant, il y a passage d'un courant momentané de sens inverse dans la diagonale du pont : c'est l'***extra-courant de fermeture.***

On peut également enregistrer la loi de l'intensité en fonction de temps dans un circuit dans lequel on lance un courant en le réunissant à une source au potentiel constant E. Dans certains cas, comme celui de très gros électro-aimants bobinés de gros fils, la période variable peut atteindre plusieurs secondes.

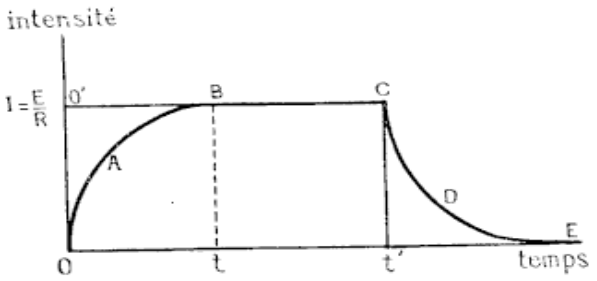
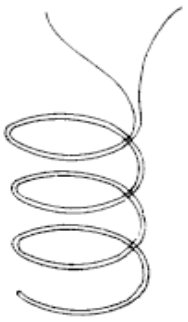


Fig. 58. — Établissement et rupture d'un courant.

La figure 58 représente la variation de l'intensité en fonction du temps : la partie OABC correspond à la période où l'intensité est croissante ; la partie CDE, à la période de rupture du courant. On voit que ce n'est qu'au bout d'un certain temps *t* que l'intensité prend la valeur définie par la loi d'Ohm.


Fig. 59.— Circuit sans self-induction.

* * *

La self-induction jouant un rôle important en électricité pratique, cherchons comment on peut soit la supprimer, soit lui donner une grande valeur dans un circuit dont la résistance ohmique est constante.

Il est évident que plus le conducteur embrassera une grande surface, plus la self-induction sera notable, et inversement.

Pour avoir une *très faible self-induction*, on réduira la surface du circuit en repliant le fil sur lui-même, comme le montre la figure 59. La self-induction du conducteur ainsi disposé est négligeable (sauf si l'on utilise des courants de haute fréquence), mais l'inconvénient de ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dispositif est que les deux fils voisins forment les armatures d'un condensateur dont la capacité peut ne pas être négligeable. Aussi préfère-t-on utiliser le fil simplement enroulé en couches alternativement dans un sens et dans l'autre.

Les self-inductions *de grande valeur* sont le plus souvent réalisées par des bobines à grand nombre de tours de fil. Il est d'ailleurs facile de calculer la self-induction d'une bobine très longue. Nous savons que le champ, à son intérieur, a pour valeur $4\pi ni$, n étant le nombre de tours de fil par centimètre de longueur de la bobine. Si S est la surface de la section de cette bobine, chaque spire est traversée par un flux $4\pi ni$S. Comme la bobine a une longueur l et comprend N spires, le flux total est $4\pi ni$SN, et le coefficient de self-induction est égal à :

$$L = \frac{\Phi}{i} = 4\pi n NS = \frac{4\pi N^2 S}{l} = \frac{4\pi N^2 S}{l \times 10^9} \text{ henrys.}$$

Remarquons que cette valeur n'est qu'approchée, le champ n'étant pas uniforme aux extrémités de la bobine.

Insistons également sur le fait que les résultats précédents sont extrêmement compliqués par la présence d'un noyau de fer dans le circuit. En effet, la présence d'un noyau de fer dans une bobine augmente le champ, donc la valeur du flux d'induction, et par suite les phénomènes de self-induction. Mais, comme l'induction dans le fer n'est pas proportionnelle au champ magnétique, ainsi que nous l'avons vu, le flux d'induction n'est plus proportionnel à i, et la définition même de L n'a plus de sens. Néanmoins, dans la pratique, on arrive à des résultats approchés en définissant le coefficient de self-induction pour la valeur de i correspondant au régime normal de fonctionnement et en admettant qu'il conserve la même valeur quand le courant et l'aimantation varient.

* * *

Si on se reporte à la figure 58, qui donne la variation de l'intensité en fonction du temps lors de l'établissement ou de la rupture du courant dans un circuit possédant une self-induction notable, on voit qu'en particulier, au moment de la rupture du courant, ***la self-induction tend à prolonger*** celui-ci ; l'intensité ne tombe pas instantanément à zéro.

C'est là l'explication des arcs qui se forment entre les contacts des interrupteurs industriels placés sur le circuit de moteurs (appareils ayant une grande self-induction par suite des bobinages qu'ils renferment). Nous verrons les dispositions qu'il a fallu prendre dans la pratique pour obvier aux inconvénients que présente cet extra-courant de rupture.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE V

COURANTS ALTERNATIFS

Production et définition du courant alternatif. — Propriétés générales des courants alternatifs. — Variation de l'intensité. — Représentation graphique. — Intensité efficace. — Force électromotrice efficace. — Puissance. — Circuit avec self-induction. — Décalage de phase ; sa valeur. — Inductance. — Impédance. — Circuit avec capacité. — Décalage de phase. — Capacitance. — Circuit avec self-induction et capacité. — Résonance. — Période propre du circuit. — Influence de la self-induction et de la capacité. — Puissance réelle et puissance apparente. — Facteur de puissance. — Courant watté. — Courant dévatté. — Courants polyphasés. — Courants diphasés. — Courants triphasés. — Propriétés générales. — Champs magnétiques tournants. — Principe des moteurs synchrones. — Principe des moteurs asynchrones. — Expérience d'Elihu Thomson.

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la variation du flux d'induction à travers un circuit conducteur détermine la production d'une force électromotrice induite dont la valeur est donnée par la variation du flux par unité de temps.

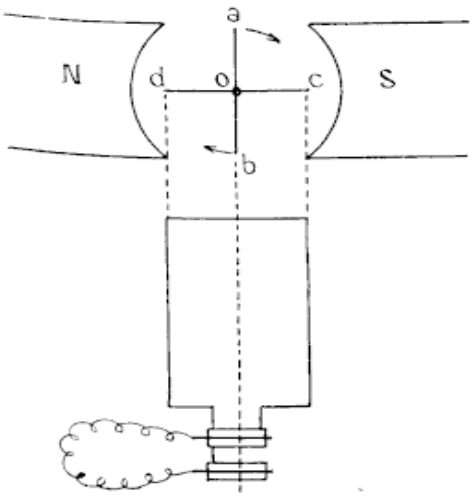


Fig. 60. — Schéma de la production des courants alternatifs.

Considérons un cas particulier représenté figure 60, celui d'un cadre rectangulaire placé entre les deux pôles d'un aimant (ou d'un électro-aimant) et tournant autour d'un axe O, perpendiculaire au plan de la figure, d'un mouvement uniforme.

On voit que le flux de force passant à travers le cadre diminue lorsque celui-ci passe de la position *ab* à la position *cd*, pour laquelle il devient nul. Lorsque la rotation se poursuit, le flux augmente de la position *cd* à la position *ba*, diminue ensuite jusqu'à la position *dc* pour augmenter de nouveau jusqu'à *ab*, et ainsi de suite.

En appliquant l'une des règles donnant le sens du courant induit, on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voit que celui-ci change de sens deux fois par tour, chaque fois que le cadre passe par le plan perpendiculaire aux lignes de force magnétiques (position *ab*). Il n'y a pas de changement de sens du courant induit lorsque le cadre passe par la position où il est traversé par un flux nul (position *cd*). En effet, le flux qui le traverse va bien augmenter lorsqu'on dépassera cette position, mais il entre par l'autre face, puisque la face qui regardait le pôle nord regarde ensuite le pôle sud ; il en résulte que le sens du courant reste le même dans le cadre.

Si les deux extrémités du cadre sont réunies chacune à une bague métallique placée sur l'axe de rotation, on peut recueillir, dans un circuit réunissant les deux bagues un courant constamment variable, allant tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, changeant deux fois de direction par tour, lorsque le cadre occupe la position *ab*. On a alors ce que l'on appelle un ***courant alternatif***.

* * *

Nous verrons comment, dans la pratique, on réalise des courants intenses, et même comment on peut arriver à produire, avec ces courants alternatifs, des courants industriels, sensiblement continus. Nous ne nous occuperons ici que des ***propriétés générales des courants alternatifs***.

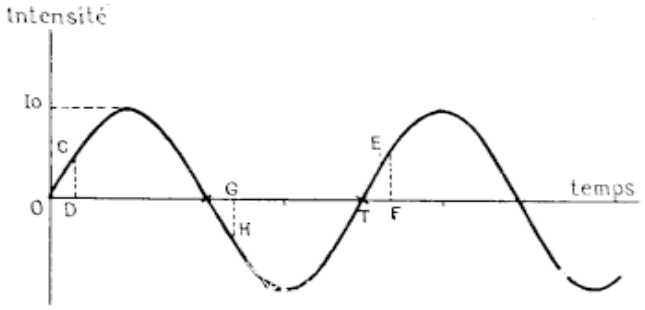


Fig. 61. — Courant alternatif.

Si l'on trace la courbe donnant la valeur de l'*intensité* du courant alternatif en fonction du temps, on obtient une courbe analogue à celle de la figure 61. On voit que la courbe est composée de parties identiques (correspondant aux phénomènes se produisant pendant une révolution complète du cadre).

On appelle *période* T le temps nécessaire pour que le courant reprenne la même intensité et dans le même sens.

On appelle *fréquence* N le nombre de périodes par seconde. On a évidemment entre N et T la relation :

$$N = \frac{1}{T} \text{ ou } NT = 1.$$

Il est facile de voir qu'il y a deux changements de sens du courant par période. On dit parfois qu'il y a deux *alternances* du courant. De même, le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

graphique montre que le courant, parti de zéro, atteint une valeur maxima après $\frac{1}{4}$ de période $\frac{T}{4}$; il reprend la valeur zéro après une demi-période $\frac{T}{2}$, une valeur maxima, mais de sens contraire, après $\frac{3\,T}{4}$, et redevient nul après une période entière.

Si l'on part d'une valeur quelconque CD de l'intensité, après $\frac{T}{2}$, cette intensité, représentée par GH, a pris une valeur égale et de signe contraire ; après une période T, elle est représentée par EF = CD.

* * *

On peut représenter d'une manière très commode les variations de l'intensité de la façon suivante : considérons une roue tournant autour de son centre avec une vitesse angulaire constante, et, sur la jante de cette roue, un point M (fig. 62). La distance MP de ce point à l'horizontale AOB varie constamment, et ses variations représentent très bien celles de l'intensité d'un courant alternatif dont l'intensité maxima serait égale à OB, rayon de la roue. Lorsque l'intensité du courant est représentée par MP, l'angle MOA représente à ce moment la ***phase.***

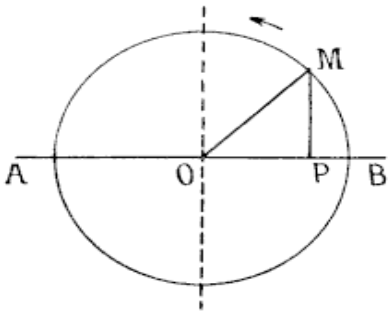


Fig. 62. — Représentation cinématique d'une grandeur à variations sinusoïdales.

La *force électromotrice* d'un courant alternatif varie aussi constamment et peut être représentée par un diagramme analogue à celui de l'intensité. La différence de potentiel a la même période que l'intensité. On peut donc la représenter également par la distance EP′ d'un point E de la jante d'une roue dont le rayon est égal à la tension maxima et qui est invariablement lié à la roue servant à représenter les variations de l'intensité (fig. 63).

Lorsque le circuit dans lequel passe le courant alternatif ne contient pas de bobines, n'a pas de self-induction, les points I et E sont situés sur le même rayon ; l'intensité et la différence de potentiel ont constamment la même phase. Au contraire, si le circuit a une self-induction notable, nous verrons qu'il n'en est plus de même ; la tension est constamment en avance sur l'intensité, les deux points I et E ne sont plus sur le même rayon et on appelle *différence de phase* φ l'angle IOE (fig. 64). On dit que *l'intensité est décalée en arrière* sur la tension de l'angle φ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Puisque l'intensité d'un courant alternatif parcourant un circuit varie à chaque instant, oscillant à chaque période entre deux intensités maxi-

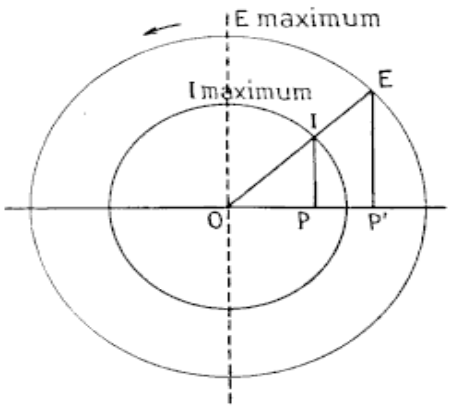


Fig. 63. — Représentation cinématique de l'intensité et de la force électromotrice alternatives.

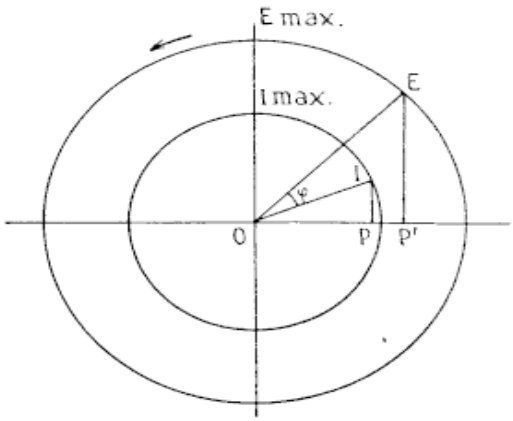


Fig. 64. — Représentation cinématique de la différence de phase.

ma I_m égales et de signe contraire, il est intéressant, au point de vue des applications, thermiques par exemple, de savoir quelle serait la valeur de l'intensité d'un courant *continu* qui produirait les mêmes effets. On appelle cette intensité ***intensité efficace*** I_{eff}. On démontre que, si le circuit ne possède pas de self-induction :

$$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ I_m.$$

De même, on définit la différence de ***potentiel efficace*** E_{eff} dans le même circuit par :

$$E_{eff} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ E_m,$$

E_m étant la valeur maxima de la force électromotrice.

Si le circuit n'est pas inductif, c'est-à-dire n'a pas de self-induction, la puissance W du courant a pour mesure :

$$W = V \times I.$$

* * *

Nous venons d'insister à plusieurs reprises sur la nécessité, pour que les résultats précédents soient valables, de ne pas avoir de self-induction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le circuit parcouru par le courant alternatif. Cette restriction est nécessaire, car nous allons voir maintenant que les phénomènes se compliquent dans ***le cas d'un circuit alimenté par un courant alternatif et comprenant une self-induction***.

Considérons encore l'appareil simple générateur de courants alternatifs, et soit OABCD la courbe donnant les variations de l'intensité en fonction du temps (fig. 65, *a*). Pendant $\frac{T}{4}$ (T étant la période), l'intensité croît de zéro à sa valeur maxima, mais alors, d'après la loi de Lenz, le courant (et par suite le flux) allant en augmentant, il se produit une force électromotrice d'induction de sens inverse. Au voisinage du maximum A, le courant (et par suite le flux) varie peu et la force électromotrice d'induction est nulle. De $\frac{T}{4}$ à $\frac{T}{2}$, l'intensité diminue et s'annule ; par conséquent, la force électromotrice induite est du même sens que le courant, c'est-à-dire positive. De $\frac{T}{2}$ à $\frac{3T}{4}$, l'intensité croît, mais en sens inverse, et la force électromotrice d'induction sera alors de sens inverse du courant, donc positive. Elle s'annulera quand le courant sera au voisinage de sa valeur maxima en C, changera de sens et croîtra ensuite, jusqu'à une valeur maxima qu'elle atteindra lorsque le courant s'annulera en D.

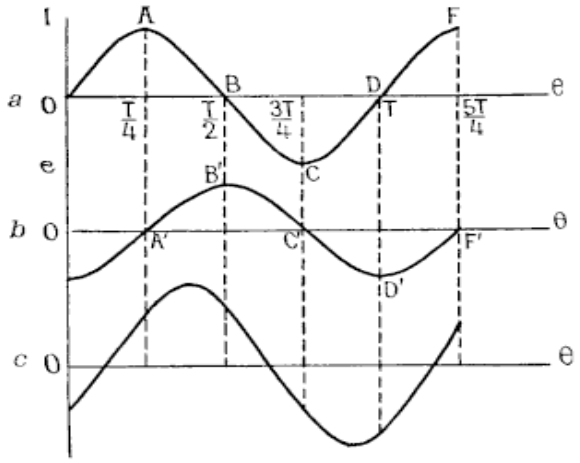


Fig. 65. — Variations simultanées de la force électromotrice (*a*), de la force électromotrice d'induction (*b*), de la force électromotrice résultante (*c*).

La courbe figurative de la force électromotrice d'induction (fig. 65, *b*) est donc aussi une courbe périodique, de même fréquence que le courant, mais qui est décalée en retard d'un quart de période.

* * *

Pour avoir la ***valeur résultante*** de la différence de potentiel aux bornes du circuit, il faut effectuer à chaque instant la somme algébrique de la force électromotrice alternative appliquée et de la force électromotrice d'induction. Le figure 65, *c*, donne la courbe résultante.

On arrive plus simplement au résultat en utilisant la représentation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du rayon tournant que nous avons indiquée pour le courant alternatif. Soient OM et ON les rayons correspondant aux courbes de la force électromotrice appliquée et de la force électromotrice induite. Ces deux rayons font entre eux un angle φ égal à 90°, ON, représentant la force électromotrice induite, étant en retard sur OM. Si on trace le rayon OR, diagonale du rectangle construit sur OM et ON, la distance de R à AB représente la force électromotrice résultante (fig. 66).

Il faut donc montrer que, à chaque instant :

$$\text{projection } \overline{OR} = \text{projection } \overline{OM} + \text{projection } \overline{ON}$$

ou :

$$\overline{OR} = \overline{Om} + \overline{On}.$$

Or, $On = mR$ comme projections sur une même ligne de deux droites ON, MR égales et parallèles. On peut donc remplacer On par mR et, comme On est négatif, et doit être soustrait de mO, on a bien le résultat cherché.

La méthode est d'ailleurs générale et peut s'appliquer à la composition d'un nombre quelconque de forces électromotrices (ou, plus généralement, de vecteurs) ayant même période.

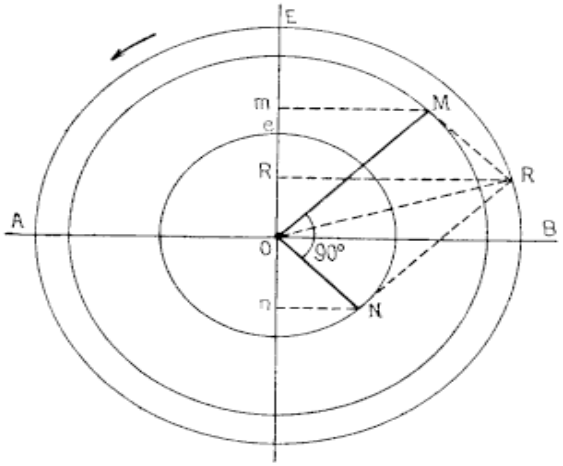


Fig. 66. — Représentation cinématique de la force électromotrice résultante.

* * *

Nous allons montrer que, ***dans un circuit présentant de la résistance et de la self-induction, la courbe des intensités est en retard sur celle des forces électromotrices***, qu'il y a un décalage, augmentant avec le coefficient de self du circuit et avec la fréquence du courant.

Pour cela, considérons le courant à un instant donné, et soit i son intensité, e la force électromotrice d'induction et v la valeur instantanée de la différence de potentiel. On a, à cet instant :

$$i = \frac{v + e}{R} \quad \text{ou} \quad v = iR - e,$$

égalité qui montre qu'à un instant donné, v est la somme algébrique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de deux forces électromotrices : l'une, iR, produit de la résistance ohmique par l'intensité variable, et $(-e)$, force électromotrice d'induction, prise en sens contraire.

Nous pouvons chercher le vecteur représentant la variation de v, comme nous venons de le faire. Pour cela, portons sur une droite Ox une longueur $OA = I_m R$, I_m étant la valeur maxima du courant i. On sait que l'on peut représenter la variation de iR par la rotation du vecteur OA (fig. 67).

La force électromotrice e est décalée d'un quart de période par rapport à l'intensité et pourra être représentée par le vecteur tournant $OB = e_m$; par suite, $-e_m$ aura la direction OC.

Le vecteur résultant est la diagonale OR, qui est égale à la valeur maxima de la différence de potentiel cherchée, et on a $V_m = OR$.

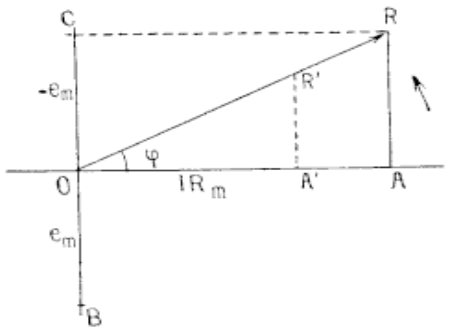


Fig. 67.

On en tire immédiatement que le courant OA est *en retard* sur la tension OR d'un angle φ, que l'on appelle le ***décalage*** et que l'on peut exprimer en fonction des caractéristiques électriques du circuit.

En effet, on démontre que la force électromotrice d'induction e est donnée à chaque instant par :

$$e = 2\pi NLi = \omega Li,$$

N étant la fréquence, L le coefficient de self-induction et ω, que l'on appelle la *pulsation* du courant, une grandeur égale à $2\pi N$ (c'est la vitesse angulaire de rotation du vecteur OR).

On en déduit que :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{AR}{OA} = \frac{L\omega}{R}.$$

$L\omega$ est ce que l'on appelle l'***inductance.***

La représentation graphique précédente conduit également à la relation fondamentale :

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}.$$

La quantité $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ s'appelle la *résistance apparente* ou ***impédance***, qui montre que la loi d'Ohm ordinaire :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$I = \frac{V}{R}$$

ne s'applique plus dans le cas des courants alternatifs. A la résistance ohmique ordinaire R s'ajoute une résistance, fonction à la fois de la self induction du conducteur et de la fréquence du courant alternatif qui le parcourt, et que nous avons appelée *inductance*.

* * *

Considérons maintenant le cas d'un ***circuit alimenté par du courant alternatif et comprenant une capacité***. Supposons que cette capacité soit représentée par un condensateur (fig. 68).

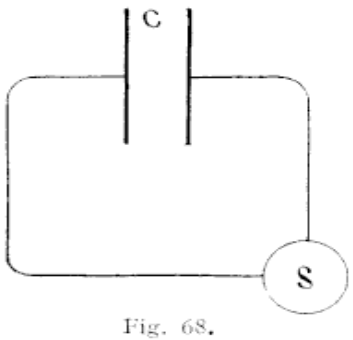


Fig. 68.

Dans ces conditions, si le circuit était alimenté par du courant continu, on n'y constaterait aucun passage de courant, car le condensateur constituerait une coupure infranchissable. Au contraire, si le courant d'alimentation est alternatif, on constate qu'un courant de même nature circule dans le circuit.

En effet, à chaque période, chaque armature se charge alternativement d'électricité positive et d'électricité négative, les quantités d'électricité correspondantes étant fournies par la source de courant alternatif.

Mais le condensateur, lorsqu'il se décharge dans le circuit, va évidemment réagir sur le courant en introduisant une force électromotrice périodique, de même période que le courant, que l'on appelle *force électromotrice de condensation*.

On montre que cette force électromotrice de condensation a pour valeur :

$$\frac{i}{2\pi NC} = \frac{i}{\omega C}$$

et qu'elle a pour effet de diminuer l'intensité efficace du courant et que le circuit semble avoir une résistance apparente (*impédance*) plus grande que la résistance ohmique des conducteurs qui le composent.

De plus, cette force électromotrice produit un décalage de sens inverse à celui de la self-induction. Le courant est *en avance* sur la force électromotrice qu'il faut appliquer pour l'entretenir, et qui est la résultante de deux forces électromotrices de même période, qui sont d'une part la force électromotrice appliquée e et d'autre part la force électromotrice de condensation décalée de 90° sur e.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, en effectuant la construction graphique indiquée sur la figure 69, on voit que le courant (vecteur OA) est en avance sur V (vecteur OR) d'un angle φ défini par :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{AR}{OR} = \frac{\frac{i}{\omega C}}{R} = \frac{i}{\omega CR}.$$

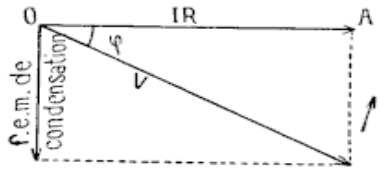


Fig. 69.

On voit également que :

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}.$$

La quantité

$$\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

s'appelle l'***impédance***, et la quantité

$$\frac{1}{C\omega}$$

la ***capacitance***.

* * *

Enfin, si l'on considère le cas général d'un ***circuit ayant à la fois une résistance*** R, ***une self-induction*** L ***et une capacité*** C, on montre que l'intensité est alors donnée par la formule :

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}},$$

la capacité agissant en sens inverse de la self-induction qu'elle compense plus ou moins, le décalage étant dans ces conditions donné par :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{C\omega}}{R}.$$

Un cas particulier est celui de :

$$\omega L = \frac{1}{C\omega}$$

ou :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Dans ces conditions, il n'y a pas de décalage, tg $\varphi = 0$, et la loi d'Ohm

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ordinaire s'applique. Le courant a alors son intensité maxima. La fréquence du courant qui, appliquée à un circuit donné, réalise cette condition est :

$$N = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

que l'on écrit souvent, en considérant non plus la fréquence, mais la période $T = \frac{1}{N}$ du courant, :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

On dit dans ce cas que la ***période propre du circuit*** (1) $(2\pi\sqrt{LC})$ est égale à la période du courant, ou qu'il y a ***résonance***.

* * *

Quelques conséquences intéressantes peuvent être tirées des résultats précédents. Tout d'abord, dans un circuit ohmique ne possédant que de la self-induction, plus la fréquence du courant augmente, plus le retard du courant sur la différence de potentiel augmente. En même temps, la résistance apparente du circuit croît rapidement. Pour de hautes fréquences, une bobine, même n'ayant qu'une faible self-induction, ne laisse pas passer de courant. De même, une bobine à grand nombre de tours de fil fin, même pour des courants de fréquence industrielle (40 à 60 périodes par seconde), ne débite aucun courant.

Si le circuit ohmique possède une capacité, on voit qu'il laissera passer d'autant plus de courant que la fréquence de celui-ci sera plus élevée, de sorte que réunir un condensateur aux bornes d'un circuit haute fréquence revient presque à les mettre en court-circuit.

Quant aux phénomènes de résonance, ils sont constamment utilisés dans les réglages de T. S. F. et, au contraire, sont extrêmement nuisibles lorsqu'ils se produisent dans des réseaux de distribution d'énergie, comme nous le verrons dans la seconde partie de ce livre.

* * *

Nous venons de voir l'influence de la self-induction et de la capacité sur l'intensité du courant circulant dans un circuit. Il faut également rechercher leur action sur la valeur de la ***puissance*** du courant.

Comme nous l'avons dit, la formule simple $W = VI$ ne s'applique plus

(1) Voir, pour plus de détails, le chapitre sur les oscillations électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(sauf dans le cas de la résonance), puisque l'intensité et la différence de potentiel ne sont plus en phase.

Il est facile de calculer la valeur de l'énergie. En effet, dans un circuit de résistance R parcouru par un courant, la puissance développée est égale à I^2R, I étant la valeur de l'intensité si le courant est continu, et la valeur de l'*intensité efficace* s'il est alternatif.

D'autre part, on peut écrire : $I^2R = IR \times I$.

Si nous nous reportons à la figure 67, nous voyons que la force électromotrice efficace $I_{eff}R$ (égale à la force électromotrice maxima I_mR multipliée par $\sqrt{2}$) peut être représentée par le vecteur OA′ qui est en phase avec le courant I. De même, la force électromotrice efficace e_{eff} (égale à la force électromotrice OR multipliée par $\sqrt{2}$) peut être représentée par le vecteur OR′.

Or, on a :

$$OA' = OR' \cos \varphi,$$

c'est-à-dire :

$$IR = V \cos \varphi.$$

Par suite,

$$W = IR \times I = IV \cos \varphi.$$

Ainsi donc, *la puissance réelle d'un courant alternatif est égale à la puissance* $I_{eff}V_{eff}$ *qu'on appelle puissance apparente* (et qui correspond à l'application directe de la formule de l'énergie) *multipliée par un nombre plus petit que l'unité, que l'on appelle le facteur de puissance* et qui dépend du décalage de phase entre la différence de potentiel et l'intensité.

Cette expression diffère de l'expression de la puissance en courant continu non seulement par la substitution des valeurs efficaces aux valeurs continues, mais encore par l'introduction du facteur de puissance (1).

Remarquons d'ailleurs que, pour $\varphi = 0$, quand la force électromotrice et l'intensité sont en phase, $\cos \varphi$ est égal à 1 et la puissance réelle est égale à la puissance apparente. Au contraire, quand $\varphi = 90^0$, $\cos \varphi$ est nul et la puissance réelle est nulle (2).

(1) On peut facilement exprimer $\cos \varphi$ en fonction des valeurs trouvées pour $\operatorname{tg} \varphi$, car on sait que :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

(2) On appelle *courant watté* le courant dont l'intensité est en concordance de phase avec la force électromotrice agissante, et *courant déwatté* celui dont l'intensité est décalée de 90° en arrière de la force électromotrice.

Il est possible, étant donné un courant alternatif circulant dans un circuit inductif, de le considérer comme la somme de deux courants dont les intensités sont l'une en phase, l'autre décalée de 90° par rapport à la force électromotrice. La construction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Si le décalage de phase introduit une complication assez grande dans l'étude des courants alternatifs, la différence de phase entre divers courants alternatifs a donné lieu à une série de phénomènes que nous allons passer en revue rapidement et qui ont une importance pratique considérable.

On appelle ***courants polyphasés*** des courants alternatifs de *même période*, même intensité et même force électromotrice, mais qui présentent entre eux une différence de phase qui est une partie aliquote de la période. En pratique, on n'utilise que les courants *diphasés* et *triphasés*.

* * *

On appelle ***courants diphasés*** deux courants alternatifs identiques présentant une différence de phase de $\frac{1}{4}$ de période. Leur décalage est $\varphi = \frac{\pi}{2}$. La représentation cinétique de ces courants est indiquée figure 71. MP et M'P' donnent les variations des intensités dans les deux circuits. On voit que l'intensité s'annule dans l'un lorsqu'elle s'annule dans l'autre, et inversement. La figure 71 montre également les courbes représentatives des courants diphasés (1).

* * *

On appelle ***courants triphasés*** un groupe de trois courants alternatifs identiques ayant entre eux un décalage de $\frac{1}{3}$ de période. La représentation cinétique (fig. 72) montre que les trois vecteurs représentatifs sont décalés de $120^\circ \left(\frac{2\pi}{3}\right)$. Quant aux

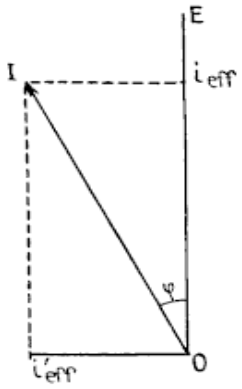


Fig. 70.

graphique est très simple. Représentons par OI l'intensité du courant et par OE la force électromotrice efficace qui l'entretient (fig. 70), φ étant le décalage de phase. On peut décomposer par la règle du parallélogramme des forces, le courant OI en deux courants composants, dont l'un, i_{eff}, de vecteur iO, est watté et l'autre, i'_{eff}, de vecteur i'O, est déwatté. Par exemple, un courant de 40 ampères efficaces en retard de 30° sur la force électromotrice agissante peut être considéré comme le résultat de deux courants, l'un watté de 34,64 ampères produisant tout le travail, l'autre déwatté de 20 ampères, ne produisant rien.

(1) Deux courants diphasés ont leurs intensités représentées respectivement par : $i_1 = I \cos \omega t$. $i_2 = I \sin \omega t$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbes des intensités (fig. 72), elles sont obtenues en déplaçant la première vers la droite de la longueur $DE = \frac{1}{3} AB$ pour la seconde courbe et de $FG = \frac{2}{3} AB$ pour la troisième (1).

Une des propriétés fondamentales des courants alternatifs triphasés

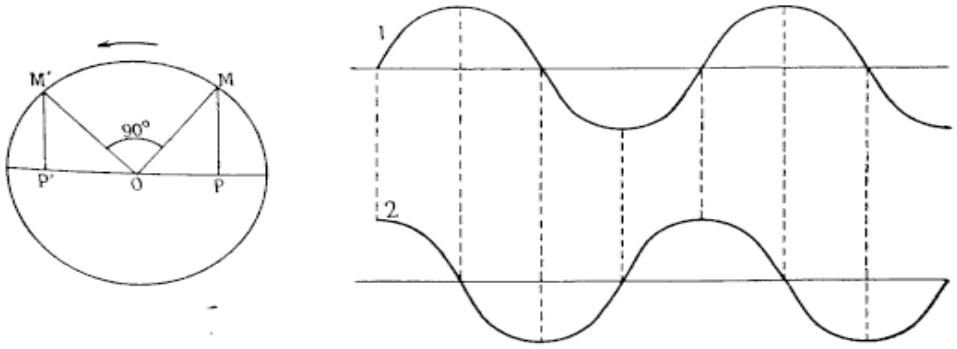


Fig. 71. — Courants diphasés et leur représentation cinématique.

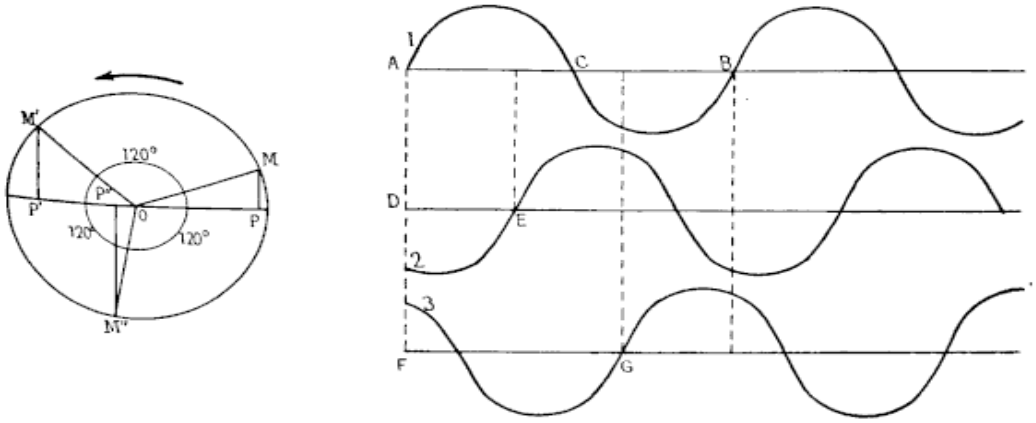


Fig. 72. — Courants triphasés et leur représentation cinématique.

est mise en évidence par la représentation cinétique. On vérifie facilement que la somme des intensités des trois courants alternatifs est nulle.

* * *

Les courants alternatifs polyphasés permettent d'obtenir avec facilité des ***champs magnétiques tournants*** qu'on utilise dans les moteurs.

(1) Les courants alternatifs ont leurs intensités représentées respectivement par :

$$i_1 = I \cos \omega t. \qquad i_2 = I \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right). \qquad i_3 = \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous allons démontrer cette propriété. Considérons tout d'abord deux courants diphasés passant dans des bobines identiques situées à 90° l'une de l'autre (fig. 73). Le courant i passant dans la bobine B_1 produit en O un champ magnétique dirigé suivant OX et proportionnel à i. On a : $H_1 = Ki_1 = KI \cos \omega t$. De même, le courant i_2 passant dans la bobine B_2 produit en O un champ H_2 dirigé suivant OY et de valeur $H_2 = Ki_2 = Ki \sin \omega t$.

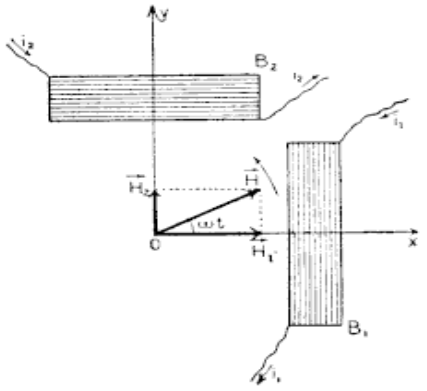


Fig. 73. — Production d'un champ tournant.

Le champ magnétique résultant en O est H, et on voit immédiatement que :

$$H^2 = H^2_1 + H^2_2 = K^2I^2,$$

c'est-à-dire que :

$$H = KI.$$

Le champ magnétique créé en O par deux bobines fixes parcourues par des courants diphasés a une valeur H *constante et sa direction tourne d'un mouvement uniforme de vitesse angulaire* ω *égale à la pulsation des courants, c'est-à-dire qu'il fait par seconde un nombre de tours égal à la fréquence du courant* (1).

* * *

Si l'on place un aimant (ou un électro-aimant) en O, tournant autour du même axe que le champ, et qu'on le lance avec une vitesse angulaire ω égale à la pulsation du courant, on constate que l'aimant continue sa rotation sous l'influence de H et même est capable de vaincre un couple résistant qui lui est appliqué. C'est le principe des ***moteurs synchrones.***

Inversement, si on supprime le courant dans les bobines et qu'on fasse tourner l'aimant avec la vitesse angulaire ω, le flux envoyé par l'aimant à travers les bobines, variant au cours de sa rotation, y crée des forces électromotrices d'induction, et il y a génération d'électricité dans le circuit. C'est le principe des alternateurs.

(1) On démontre de même que, si on envoie des courants alternatifs triphasés dans trois bobines identiques disposées à 120° l'une de l'autre autour d'un point O, il y a création en ce point O d'un champ magnétique tournant encore à la vitesse angulaire ω et dont l'intensité constante a pour valeur $H = \frac{3}{2} KI$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Si l'on place au contraire un disque métallique (ou un circuit fermé) en O, tournant autour du même axe que le champ, les variations de flux qui le traversent produisent dans sa masse (ou dans le circuit) des courants de Foucault (ou des courants induits) qui tendent, d'après la loi de Lenz, à s'opposer à son mouvement. On démontre que, lorsque le disque (ou le circuit) tourne dans le même sens que le champ avec une vitesse angulaire inférieure, il est soumis à un couple moteur dont la valeur moyenne n'est pas nulle, et il peut fournir du travail : c'est le principe des ***moteurs asynchrones***.

* * *

La possibilité que nous venons de signaler de pouvoir produire des forces, et par conséquent de réaliser des moteurs avec des appareils dont le circuit mobile est fermé sur lui-même et ne reçoit aucun courant de l'extérieur a été mise en évidence par une ***expérience d'Elihu Thomson***.

Nous avons vu que, si on place dans le champ alternatif produit par un circuit C parcouru par un courant alternatif i, un second circuit C′, celui-ci est le siège d'une force électromotrice d'induction alternative qui peut avoir une valeur efficace considérable s'il comporte un grand nombre de tours de fils. C'est le principe des transformateurs.

Si le circuit C′ est fermé, il est parcouru par un courant alternatif induit i' de même période que le courant i, et il s'exerce entre ces deux circuits des forces électrodynamiques. Dans l'expérience d'Elihu Thomson, C est constitué par une bobine verticale à noyau de fer doux et C′ par un anneau de cuivre qu'on enfile sur l'extrémité du noyau. Quand le courant passe, l'anneau est violemment expulsé de la bobine et projeté en l'air (1).

* * *

Les propriétés des courants alternatifs que nous venons de passer en revue ne sont exactes que pour des courants dont la fréquence n'est pas élevée. Au contraire, quand cette fréquence atteint plusieurs dizaines de mille alternances par seconde, les phénomènes sont tous différents. On a alors des courants de haute fréquence, des oscillations électriques qui forment l'objet d'un chapitre spécial.

(1) On démontre que les deux courants i et i' sont en opposition de phase, et, par suite, que les deux circuits, étant parcourus à chaque instant par des courants de sens contraire, se repoussent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VI

ÉLECTROLYSE. — THÉORIE DES IONS FORCES ÉLECTROMOTRICES

Deux sortes de conducteurs. — Électrolytes. — Non électrolytes. — Ionisation. — Théorie d'Arrhénius. — Actions secondaires. — Exemples. — Mécanisme du passage du courant. — Lois de Faraday. — Coefficient de dissociation. — Perte faradique. — Nombres de transport. — Théorème de Hittorf. — Marche d'une électrolyse. — Conductivité des électrolytes. — Conductivité limite. — Loi de Kohlrausch. — Vitesse relative et vitesse absolue des ions. — Calcul des forces électromotrices. — Différence de potentiel au contact de deux liquides. — Mécanisme du passage du courant. — Calcul de la force électromotrice. — Différence de potentiel entre un métal et un liquide. — Tension de dissolution de Nernst. — Potentiel de décharge. — Déplacement réciproque des métaux. — Calcul de la tension de Nernst. — Différence de potentiel aux électrodes. — Série des tensions. — Application. — Théorie de l'électrolyse. — Tension de décomposition des corps. — Applications de la théorie.

Nous avons vu que l'on pouvait distinguer deux sortes de conducteurs au courant électrique :

1° Les conducteurs de *première classe*, qui laissent passer le courant sans subir d'altération chimique. Ce sont les conducteurs employés dans la pratique pour le transport de l'énergie électrique ;

2° Les conducteurs de *seconde classe*, qui comprennent, en général, les solutions d'acides, de bases, de sels, dans l'eau ou dans certains dissolvants (gaz sulfureux liquéfié, ammoniaque liquide, etc.), ainsi que les sels fondus.

Le passage du courant dans ces conducteurs est toujours accompagné de la décomposition chimique du corps dissous ou du sel fondu. D'où le nom d'***électrolytes*** donné aux conducteurs de la seconde classe et d'*électrolyse* à la décomposition par le courant.

* * *

Le courant est amené dans l'électrolyte à l'aide de conducteurs de première classe qu'on appelle *électrodes*. Le courant entre dans l'électrolyte par l'*anode*, qui est reliée au pôle positif du générateur électrique, et sort par la *cathode*, qui est en communication avec le pôle négatif du générateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On dit que le courant circule dans l'électrolyte de l'anode à la cathode et qu'il va des points dont le potentiel est le plus élevé aux points à plus bas potentiel.

En accouplant ensemble d'une manière quelconque des conducteurs de première classe, on n'obtient pas en général de courants permanents. Les conducteurs de première classe ne fonctionnent pas comme générateurs d'énergie électrique. Au contraire, l'association de conducteurs de seconde classe et de conducteurs de première classe permet d'obtenir un courant durable (piles, accumulateurs).

L'expérience montre que les *liquides purs* (eau, acide chlorhydrique liquéfié, ammoniaque liquide, alcool, etc.) ne sont pas traversés par le courant ; ce sont des *non-électrolytes*. Il en est de même des solutions dans l'eau de la plupart des *corps organiques* (alcools, éthers, glucoses, sucres, etc.). D'une façon générale, tous les corps qui ne renferment ni fonction acide, ni fonction basique, sont des ***non-électrolytes***. Ainsi donc, l'acide chlorhydrique liquéfié et anhydre d'une part, l'eau pure d'autre part ne conduisent pas le courant, et cependant la solution d'acide chlorhydrique dans l'eau est un bon électrolyte.

On est donc amené à penser que l'acide chlorhydrique dilué, comme tous les électrolytes, possède à l'état de solution une constitution différente de celle qu'il a à l'état libre.

On sait d'autre part que les électrolytes se comportent d'une façon particulière qui les distingue des molécules organiques : en *cryoscopie*, en *ébullioscopie*, dans les phénomènes de *pression osmotique*. Tout porte à croire que les électrolytes sont formés d'un plus grand nombre de particules que les autres corps.

* * *

C'est à Arrhénius que l'on doit l'explication de ces phénomènes. Dans sa théorie de l'ionisation, on admet que les électrolytes subissent en se dissolvant une décomposition réversible qui a reçu le nom de *dissociation électrolytique* ou d'***ionisation***.

Ainsi le sel marin dissous existerait *partiellement* sous la forme de particules Na et Cl et, entre ces particules et la molécule NaCl, il s'établit l'équilibre :

$$Na + Cl \rightleftarrows NaCl,$$

l'équilibre dépendant de la température et de la concentration du système. On suppose de plus qu'en se formant, les particules se chargent de quantités d'électricité égales et de nom contraire, Na positivement, Cl négativement. C'est à ces atomes, munis de leur charge, que l'on donne le nom d'***ions***.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous sommes obligés de concevoir les ions comme doués de propriétés autres que celles des corps dont ils portent le nom. Ainsi, le sodium dans l'eau réagit violemment, tandis que l'ion sodium n'attaque pas l'eau. Nous représenterons les ions par les symboles chimiques surmontés du signe + ou —.

$$\dot{Na} \qquad \dot{Cl}.$$

La portion de sel marin non dissociée est la *molécule neutre*, si bien que l'on peut écrire l'équilibre précédent :

$$NaCl \rightleftarrows \dot{Na} + \dot{Cl},$$

de même :

$$AzO^3K \rightleftarrows \dot{A}zO^3 + \dot{K}.$$

On doit concevoir les ions $\dot{K}$, ou $\dot{A}zO^3$, comme des *isomeres électrochimiques* de l'atome de potassium K ou du radical AzO^3.

Les différences entre les propriétés de ces isomères peuvent être considérables; la seule analogie nécessaire est que, dans des circonstances déterminées, ils se transforment l'un dans l'autre.

D'une manière générale, dans un sel en dissolution, le métal devient ion positif, le radical restant ion négatif. Par exemple :

$$\dot{A}zO^3\,\dot{K}\,; \qquad \dot{Cl}\,\dot{A}zH^4\,; \qquad \dot{Cl}\,\dot{H}\,; \qquad \dot{O}\dot{H}\,\dot{K}.$$

Les acides dissous sont caractérisés par l'ion $\dot{H}$, les bases par l'ion $\dot{O}H$.

Si l'électrolyte est bivalent, l'ionisation est un peu plus compliquée. Par exemple, le chlorure de calcium $CaCl^2$, en solution étendue, donne les ions $\dot{\dot{C}}a$ et $\dot{Cl} + \dot{Cl}$. On voit que l'ion bivalent $\dot{\dot{C}}a$ porte une charge double d'un ion monovalent, K par exemple.

La valence d'un ion est donc égale au nombre de charges qu'il prend en se formant.

Exemples :

Acide sulfurique	$\dot{S}O^4 + 2\,\dot{H}$.
Sulfate de soude	$\dot{S}O^4 + 2\,\dot{Na}$.
Sulfate de cuivre	$\dot{S}O^4 + \dot{Cu}$.
Ferrocyanure de potassium	$\dot{F}e\dot{C}y^6 + 4\,\dot{K}$.
Ferricyanure de potassium	$\dot{F}eCy^6 + 3\,\dot{K}$.

Si on admet que les deux ions $FeCy^6$ ont même structure chimique, ils ne diffèrent que par leur charge et sont *électro-isomères*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est ce qui a lieu pour les chlorures de fer par exemple :

Chlorure ferreux ..... $\overset{++}{Fe} + 2\,\overline{Cl}$.

Chlorure ferrique ..... $\overset{+++}{Fe} + 3\,\overline{Cl}$.

Remarque. — La somme algébrique des charges reste toujours nulle.

* * *

Le plus souvent, par suite de leurs propriétés chimiques, les produits de l'électrolyse réagissent, soit entre eux, soit sur les électrodes, soit sur l'électrolyte. On donne à ces réactions le nom d'***actions secondaires***. Un certain nombre d'industries reposent sur l'utilisation des actions secondaires, tandis que, pour d'autres, les supprimer est une question primordiale.

Donnons quelques exemples.

1° *Électrolyse de l'acide sulfurique étendu.* Sous l'action du courant, l'acide sulfurique SO^4H^2 est décomposé en $\overline{SO^4}$ qui remonte le courant et en $2\,\overset{+}{H}$ qui se portent sur la cathode et se dégagent ; SO^4 réagit à l'anode sur l'eau de la dissolution :

$$SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O$$

et de l'oxygène se dégage (fig. 74).

L'acide sulfurique est donc régénéré et tout se passe comme si on avait électrolysé l'eau ; c'est pour cela que l'on considère souvent cette électrolyse comme constituant une *analyse de l'eau*.

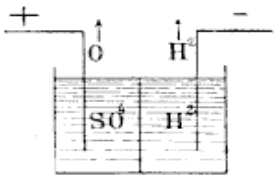


Fig. 74. — Électrolyse de l'acide sulfurique étendu.

Prenons encore un autre exemple. Supposons que nous électrolysions du sulfate de cuivre. Ce sel se décompose en $\overline{SO^4}$ et $\overset{++}{Cu}$; Cu se dépose sur la cathode et SO^4 se combine au cuivre de l'anode pour régénérer le sulfate de cuivre. Tout se passe donc comme si on avait transporté le cuivre de l'anode à la cathode (fig. 75).

* * *

Si nous établissons un champ électrique à l'intérieur d'un électrolyte en y plongeant deux électrodes d'amenée de courant, entre lesquelles existe par suite une différence de potentiel, nous exercerons ainsi une action directe sur les ions de la solution.

Les ions négatifs seront attirés par la charge positive que prend l'anode,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et repoussés par la charge négative de la cathode ; ce sera l'inverse pour les ions positifs (fig. 76). De là les termes d'*anion* pour désigner un ion négatif et de *cation* pour désigner un ion positif.

Une fois au contact de l'électrode, l'ion perd sa charge qui est neutralisée par l'électricité de nom contraire de l'électrode. Les ions abandonnent

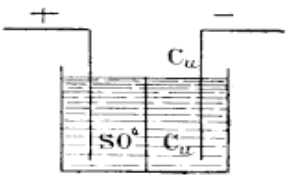


Fig. 75. — Électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre.

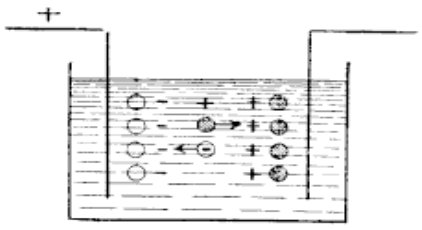


Fig. 76. — Déplacement des ions dans l'électrolyse.

leurs charges par paires : pendant que la charge d'un ion positif disparaît à la cathode, celle d'un ion négatif disparaît à l'anode. Il en résulte un mouvement d'électricité dans le circuit pour rétablir l'état primitif, mouvement qui est dans le sens du courant d'électricité observé. L'ion débarrassé de sa charge reprend les propriétés de l'atome chimique ou du groupe d'atomes dont il est l'isomère, ce qui explique pourquoi les réactions secondaires que nous avons signalées peuvent se produire seulement au voisinage immédiat des électrodes.

Nous voyons ce que signifient ces mots « ***passage du courant dans un électrolyte*** »; ce sont les ions qui, attirés par les électrodes, s'y déchargent par paires et entretiennent le courant. Si, au début de l'électrolyse, il n'y a pas d'ions, ou si, à la fin, il n'y en a plus, le courant ne passe pas.

* * *

Lois de Faraday. — 1° *Si on place dans un circuit non bifurqué différentes cuves contenant le même électrolyte, on aura la même quantité décomposée, quelle que soit la forme du vase.*

En effet, il est passé partout la même quantité d'électricité.

2° *Les quantités décomposées pendant le même temps sont proportionnelles à l'intensité du courant.*

3° *Si l'on décompose différents électrolytes, le même courant décompose des quantités d'électrolytes proportionnelles aux quotients des masses atomiques par les valences des corps considérés.*

On peut résumer ces trois lois en disant :

Des quantités égales d'électricité mettent en liberté dans différents électrolytes des quantités équivalentes de matière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si a est la masse d'hydrogène mise en liberté par l'unité électromagnétique de courant, la masse décomposée M d'un électrolyte de masse atomique A et de valence n est donnée par :

$$M = a\frac{A}{n}m,$$

où $m = it$ est la quantité d'électricité qui traverse l'électrolyte.

La quantité $\frac{aA}{n}$ est l'*équivalent électrochimique* du corps.

Il représente le poids du métal mis en liberté par une même quantité d'électricité. Si A est exprimé en grammes, cette quantité d'électricité est égale à 96 600 coulombs. C'est la quantité d'électricité nécessaire pour libérer 1 gramme d'hydrogène.

On appelle souvent *faraday* et on représente par F cette quantité d'électricité.

On peut donc dire que la décomposition d'un équivalent électrochimique quelconque

$$\left(HCl,\quad NaCl,\quad \frac{1}{2}Ba(OH)^2,\quad \frac{1}{2}CaCl^2,\quad \frac{1}{3}PO^4H^3,\quad \frac{1}{4}FeCy^6K^4,\ldots\right)$$

exige un faraday.

La loi de Faraday peut être rangée parmi les lois les plus exactes de la physique. Elle s'applique aussi bien aux sels fondus qu'aux électrolytes dissous. Aussi a-t-elle servi à la détermination de l'unité d'intensité de courant.

* * *

Nous avons dit que la mise en dissolution d'une électrolyte s'accompagne, d'après l'hypothèse d'Arrhénius, d'un dédoublement en ions des molécules, mais cette dissociation électrique n'intéresse pas toutes les molécules. Il y en a un certain nombre qui, par suite de la concentration du sel dans la solution, échapperont à la décomposition. Plus exactement, l'état d'équilibre qui s'établit ainsi au sein de la solution est un équilibre statique. Toutes les molécules se dédoublent bien en leurs ions, mais l'agitation cinétique fait qu'à chaque instant il y en a un certain nombre qui se reforment par suite de la rencontre de deux ions de signe contraire. Finalement, si on suppose qu'on a dissous une molécule-gramme d'un électrolyte, il n'y en aura qu'une certaine fraction α qui sera dissociée. C'est-à-dire qu'il y aura α molécules dissociées et $1-\alpha$ molécules non dissociées; α est le ***coefficient de dissociation***. Quand la dissociation est totale, α est alors égal à 1 ; c'est sa valeur maxima.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chaque ion joue dans la solution le même rôle qu'une molécule complète, en ce qui concerne les propriétés physiques de la solution. C'est-à-dire que, si la molécule dissoute donne deux ions, lorsque la dissociation est α, tout se passera comme si on avait en solution $(1 - \alpha) + 2\alpha = 1 + \alpha$ molécules.

* * *

Pendant l'électrolyse, avons-nous dit, les ions se dirigent vers les électrodes avec une certaine vitesse qui n'est évidemment pas la même pour deux ions de nature différente, le frottement opposé à leur marche par le liquide dissolvant n'étant pas le même pour tous. On constatera donc, à la suite de l'électrolyse, des ***différences de concentration*** dans les diverses portions de l'électrolyte.

C'est Hittorf qui constata le premier, vers 1851, que, dans une électrolyse simple, il y a une portion moyenne d'électrolyte qui ne subit pas de variations de concentration, et que la perte faradique se partage entre les deux compartiments, anodique et cathodique, de telle sorte *que la perte est proportionnelle à la vitesse de l'ion.*

Il en résulte que l'électrolyte s'appauvrit du côté où se dirige l'ion le plus lent et s'enrichit *relativement* du côté vers lequel se déplace l'ion le plus rapide.

* * *

On est alors amené à considérer en plus des *vitesses absolues* de déplacement des ions, leur *vitesses relatives*, ou ***nombres de transport.*** Ces deux grandeurs sont faciles à relier entre elles. En effet, soit u la vitesse du cation, v celle de l'anion, p_a la perte anodique, p_c la perte cathodique, f la perte totale d'électrolyte. On a évidemment :

$$p_a + p_c = f.$$

D'après la remarque de Hittorf :

$$\frac{p_a}{u} = \frac{p_c}{v} = \frac{p_a + p_c}{u + v} = \frac{f}{u + v},$$

d'où :

$$\frac{p_c}{f} = \frac{u}{u + v} \qquad \frac{p_a}{f} = \frac{v}{u + v}.$$

Les rapports $\frac{u}{u + v}$ et $\frac{v}{u + v}$ de la vitesse de chaque ion à la somme des vitesses des deux ions ont reçu le nom de *nombres de transport* des ions pour l'électrolyte considéré.

Le théorème de Hittorf peut donc s'énoncer encore : *les vitesses rela-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tives de l'anion ou du cation sont respectivement égales au quotient de la perte cathodique ou anodique par la perte totale due à l'électrolyse.

En particulier, si on s'arrange pour que l'électrolyse libère un équivalent gramme de l'électrolyte, $f = 1$, p devient c appauvrissement à la cathode, p^a devient a appauvrissement à l'anode, et on a :

$$c + a = 1,$$

c et a sont les nombres de transport qui peuvent être très différents.

Par exemple pour $CaCl^2$: $c = 0{,}780$, $a = 0{,}220$.

Remarquons d'ailleurs que la vitesse relative des ions est influencée par la concentration de la solution, par suite du frottement qui s'exerce entre les diverses molécules en présence. Elle est aussi fonction de la température, qui, lorsqu'elle s'élève, tend à égaliser les vitesses relatives, qui se rapprochent alors toutes deux de 0,5. Enfin, la vitesse relative est indépendante de l'intensité du courant, car la vitesse absolue de chaque ion est proportionnelle à l'intensité du champ établi dans la solution.

* * *

L'analyse chimique des portions d'électrolyte voisines des électrodes renseigne donc sur la marche d'une électrolyse et la ***nature des ions qui existent dans la solution***.

Un élément A ou un groupe d'éléments B font partie de l'anion ou du cation, si, après l'électrolyse, l'analyse décèle un excès de A ou B dans l'un ou l'autre des compartiments.

Ainsi, dans l'électrolyse du sulfate de potassium, on trouve du côté cathodique un excès de sulfate de potassium, ce qui indique que $\overset{+}{K}$ se dirige vers la cathode.

Les résultats ne sont pas toujours simples, comme le montre l'exemple suivant.

Supposons que l'on électrolyse du chlorure d'étain de formule $SnCl^4$. On pourrait penser que les ions sont $\overset{+++}{Sn}$ et 4 $\overline{Cl}$. Or, l'analyse montre que la concentration en étain ne varie pas autour de la cathode pendant l'électrolyse ; donc l'étain n'est pas à l'état d'ion. La vitesse du Cl étant sensiblement la même que dans la solution d'acide chlorhydrique de même concentration, il s'ensuit que le chlorure stannique est décomposé par l'eau en bioxyde et en acide chlorhydrique :

$$SnCl^4 + 2\ H^2O = SnO^2 + 4\ HCl.$$

C'est HCl qui conduit le courant et l'étain ne se dépose à la cathode que par une réaction secondaire :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$SnO^2 + 4\,H = Sn + 2\,H^2O.$$

* * *

Un électrolyte oppose au courant une résistance analogue à celle d'un conducteur métallique et cette résistance est donnée par la formule :

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

R étant la résistance totale du conducteur, ρ la *résistivité* ou résistance spécifique, l la longueur et s la section.

L'inverse de la résistance est la *conductance* ou *conductibilité*. L'inverse de la résistivité est la *conductivité* ou *conductance spécifique* ; elle est donnée par la formule :

$$c = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{Rs}.$$

On observe que tous les électrolytes, sauf le chlorure de sodium, présentent un maximum de conductivité pour une certaine concentration. Ce résultat était facile à prévoir *a priori* : l'eau pure, par exemple, et l'acide chlorhydrique pur ne conduisent pas le courant ; la conductivité du mélange part de zéro et passe par un maximum pour redescendre de nouveau à zéro.

* * *

Que se passe-t-il si on augmente la dilution, la température restant constante ?

D'après les lois générales de l'équilibre chimique, la dissociation croîtra, c'est-à-dire que les molécules neutres de l'électrolyte se décomposeront graduellement en leurs ions ; la conductivité de la solution ira en augmentant jusqu'au moment où, toutes les molécules étant ionisées, la conductivité aura une valeur limite que l'on ne pourra dépasser, appelée *conductivité limite*, et qui correspond à une dilution infinie. On peut prévoir facilement que cette limite ne dépend que de la nature des deux ions formant l'électrolyte, c'est-à-dire du frottement de ces ions contre le dissolvant.

La conductivité limite est donc la somme de deux termes caractéristiques de l'anion et du cation (**loi de Kohlrausch**).

Nous avons dit que la conductibilité des électrolytes est due seulement à la partie dissociée aux ions, et qu'elle dépend des frottements de ces ions et du liquide ; quand la dilution est suffisante, les frottements deviennent constants ; à partir de ce moment, la conductibilité est influencée uniquement par le nombre d'ions présents.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le degré d'ionisation des bons électrolytes est toujours considérable. Les électrolytes univalents viennent en tête et sont très fortement ionisés, même en solution demi-normale ($\delta = 2$). Les corps formés d'un ion monovalent et d'un ion bivalent ne se dissocient guère qu'à partir de $\delta = 20$; enfin, les corps constitués par deux ions bivalents (SO^4H^2, SO^4Mg) sont peu dissociés.

* * *

Si l'on connaît les ***vitesses relatives*** des ions dans une seule combinaison, on peut obtenir de proche en proche la mobilité des autres ions. Il suffit d'étudier une série de sels tels que chacun d'eux ait un ion commun avec le sel précédemment étudié.

Les expériences mettent en évidence le fait remarquable que les ions $\overset{+}{H}$ et $\overline{OH}$ ont des mobilités de beaucoup supérieures à celles des autres ions.

Nous avons dit que la vitesse d'un ion était proportionnelle à la chute du potentiel par centimètre (c'est-à-dire au champ). On démontre que, pour avoir la ***vitesse absolue d'un ion*** en solution étendue, il suffit de diviser sa mobilité par le nombre F = 96 600.

Voici quelques vitesses d'ions exprimées en millimètres par minute sous l'influence d'une différence de potentiel d'un volt par centimètre :

$\overset{+}{H}$.....	2,05	$\overset{+}{K}$.....	0,40	$\overset{+}{Na}$.....	0,27	$\overline{OH}$.....	1,08

* * *

Une des applications les plus importantes de la théorie des ions est le calcul des ***forces électromotrices***, qui renseigne sur la quantité d'énergie mise en jeu dans les diverses opérations, sur leurs conditions de possibilité, sur la manière de se comporter des ions aux électrodes, et l'ordre dans lequel ils se déchargent lorsque la solution électrolysée contient plusieurs sels (raffinage du cuivre, de l'or, de l'argent, etc.).

On sait que l'on désigne sous le nom de *pile* un ensemble formé de deux conducteurs métalliques (*pôles*) réunis par un ou plusieurs conducteurs de seconde classe (*électrolytes*), et que dans ces conditions il se produit un courant lors de la fermeture du circuit.

La force électromotrice (*f. e. m.*) est la différence de potentiel (*diff. de pot.*) en circuit ouvert entre les conducteurs métalliques. Elle est égale à la somme des différences de potentiel que l'on rencontre en allant d'un pôle à l'autre, au passage de chaque surface de séparation de conducteurs hétérogènes.

Nous sommes donc conduits à étudier les différences de potentiel qui se produisent :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° Au contact de deux conducteurs liquides ;

2° Au contact d'un conducteur liquide et d'un conducteur métallique (surface des électrodes).

Par exemple, la pile Daniell, qui est formée par la chaîne :

$$Zn \mid SO^4Zn \mid SO^4Cu \mid Cu$$

a une force électromotrice égale à la somme des trois différences de potentiel se produisant au contact de :

$$Zn \mid SO^4Zn, \quad SO^4Zn \mid SO^4Cu, \quad SO^4Cu \mid Cu.$$

* * *

Nous allons étudier la ***différence de potentiel au contact de deux conducteurs liquides*** et commencer par le cas le plus simple : deux solutions diversement concentrées d'un même électrolyte.

Supposons que les deux solutions sont maintenues en présence par une paroi fictive M, des électrodes appropriées plongeant dans chacun des compartiments.

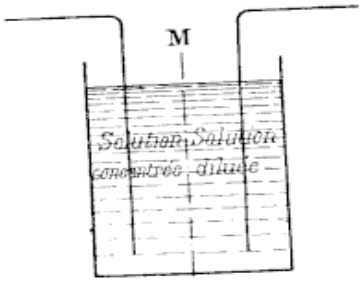


Fig. 77. — Solutions de concentration différente.

Nous n'avons affaire qu'à deux ions ; par suite de la différence de concentration, les ions tendent à se mélanger pour amener l'égalisation. Si nous considérons l'effet produit au bout d'un instant, nous voyons qu'il est en faveur du liquide concentré ; le nombre d'ions transportés de gauche à droite est plus grand que celui transporté de droite à gauche (fig. 77).

Mais les deux ions cheminent avec des vitesses différentes ; supposons d'abord que le cation soit le plus rapide ; on aura, au bout d'un instant, excès de cations à droite de M et par suite un excès d'anions à gauche de M. Il se produira alors ***une couche double*** d'électricité le long de M, positive à droite, négative à gauche. La solution diluée est alors positive par rapport à la solution concentrée. C'est le cas des acides dissous, puisque $\overset{+}{H}$ est le plus rapide des ions.

Si l'anion est plus rapide que le cation, c'est l'inverse qui a lieu, la solution diluée est négative par rapport à la solution concentrée. C'est le cas des bases dissoutes, l'ion $\overline{OH}$ étant, après $\overset{+}{H}$, le plus rapide.

Ainsi, la formation de la couche double, c'est-à-dire de la différence de potentiel, est due à l'inégalité des vitesses de diffusion des deux ions. Les deux charges électriques de noms contraires qui se font vis-à-vis exercent l'une sur l'autre une attraction électrique qui s'oppose à la diffu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sion, c'est-à-dire à la continuation de la séparation des ions ; il en résulte un équilibre caractérisé par la différence de potentiel au contact.

Si l'on ferme le circuit, il y aura courant, et son effet sera de tendre vers l'égalisation des concentrations.

Supposons que le cation se déplace plus vite que l'anion ; la solution diluée est alors positive par rapport à la solution concentrée ; l'électrode qui y plonge sera alors l'électrode positive pour l'extérieur et jouera le rôle de cathode. Comme la liqueur se concentre du côté où va l'ion le plus rapide (ici du côté de la cathode), la solution diluée s'enrichira.

On voit donc que la différence de potentiel au contact de deux électrolytes de même nature, mais diversement concentrés, est due à la différence de concentration des solutions et à l'inégalité de transport des ions (1).

* * *

Il nous reste maintenant à étudier la ***différence de potentiel entre un métal et un liquide*** dans lequel plonge ce métal. Nous ferons pour cela l'usage d'une notion introduite par Nernst, la ***tension de dissolution*** d'un métal. Voici en quoi elle consiste.

On admet, à l'heure actuelle, que les métaux contiennent des ions positifs et négatifs *libres*.

Au contact d'un liquide, l'eau par exemple, les métaux émettent des ions positifs, et par suite tendent à se charger négativement. Chaque métal, chaque métalloïde est caractérisé par une certaine *pression d'ionisation* ou *tension de dissolution*, contrariée d'ailleurs par l'attraction électrostatique, de sorte qu'un équilibre, ou plutôt un régime stationnaire, s'établit entre le métal et le liquide lorsque le nombre d'ions émis est très faible, le champ électrostatique étant cependant énorme grâce à la charge considérable des ions.

Si le liquide est un électrolyte renfermant déjà des ions métalliques, leur tension peut s'opposer à l'émission des ions positifs du métal. Suivant le nombre d'ions dans l'électrolyte, le métal peut ou émettre des ions, et par suite se charger négativement, ou au contraire recevoir un excès d'ions positifs, et alors se charger positivement.

(1) Le calcul montre que la force électromotrice d'une telle pile est donnée par la formule :

$$E = \frac{RT}{F} \frac{u - v}{u + v} \log \frac{c_1}{c_2},$$

R étant la constante des gaz parfaits, T la température absolue, F = 96 600 coulombs, u et v les vitesses des cations et des anions, c_1 et c_2 les concentrations des deux solutions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les différences de potentiel au contact entre métal et électrolyte sont dues, par hypothèse, à cet échange d'ions positifs.

On peut les calculer facilement ; on leur donne le nom de ***potentiel de décharge***, que nous justifierons plus loin.

* * *

Le ***déplacement réciproque des métaux*** dans les solutions de leurs sels s'explique immédiatement par la considération du potentiel d'ionisation. Donnons-en deux exemples particulièrement nets.

Nous verrons que la pression d'ionisation du fer est supérieure à celle du cuivre. Si on met par suite une lame de fer dans une solution de sulfate de cuivre, les ions $\overset{++}{Cu}$ attirés par la charge négative du fer métallique, repoussés par la charge positive de la solution, se précipitent sur le fer qu'ils couvrent de cuivre métallique, abandonnant leur charge à la quantité équivalente de fer qui se dissout à l'état d'ions $\overset{++}{Fe}$.

De même, plongeons une lame de zinc dans une solution d'acide sulfurique. La pression d'ionisation du zinc étant très grande, il attire les ions $\overset{+}{H}$, ceux-ci se déchargent, donnent H chimique qui se dégage, et ces ions sont remplacés par un poids équivalent de zinc dans la solution.

* * *

Le calcul montre que, si l'on représente par C la concentration, d'ailleurs minime, des ions du métal sur le métal lui-même et par c la concentration des ions dans la solution, la différence de potentiel qui s'établit entre le métal et la solution est donnée par :

$$E = -\frac{RT}{nF} \log \frac{C}{c},$$

n étant la valence.

Cette expression n'a qu'un intérêt théorique, puisque l'on ne peut mesurer C, mais, dans les calculs, cette grandeur s'élimine du résultat final, et c'est ce qui fait la valeur des considérations de Nernst (1).

(1) Nous allons en donner une application, afin de faire comprendre la marche du calcul.

Considérons ce que l'on appelle une pile de concentration, c'est-à-dire un système formé de deux électrodes de même métal plongeant dans deux solutions de concentrations différentes d'un sel de ce métal.

Le cation est donc commun, les anions pouvant être différents. Le schéma d'une telle pile est :

$$M \mid L_1 \mid L_2 \mid M.$$

D'après ce que nous avons vu précédemment, la force électromotrice est :

$$E = M \mid L_1 + L_1 \mid L_2 + L_2 \mid M.$$

On a d'autre part :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Nous avons vu jusqu'à présent comment on calculait la force électromotrice totale de certaines piles comme la somme des différences de potentiel qui naissent au contact des substances hétérogènes. Nous allons étudier la ***différence de potentiel à chaque électrode.*** Soit un métal M plongeant dans la solution uni-équivalente d'un de ses sels; formons une pile répondant au schéma :

$$M \mid \text{sel de M} \mid KCl \ (1 \text{ équivalent}) \ Hg^2Cl^2 \mid Hg.$$

On réalise ainsi un couple avec l'électrode Hg | Hg^2Cl | KCl normal, qu'on appelle ***électrode normale au calomel***, et l'électrode à étudier.

Deux cas peuvent se présenter :

1° Considérons la pile :

$$Zn \mid SO^4Zn \ (1 \text{ éq.}) \ \ldots \ Hg^2Cl^2 \mid Hg.$$

Elle a une force électromotrice égale à 1v,084, le mercure étant le pôle positif, c'est-à-dire que, dans l'électrolyse, le courant va du zinc au mercure. On représente souvent la pile par le symbole :

$$Zn \mid SO^4Zn \ \ldots \ Hg^2Cl^2 \mid Hg.$$

$$\xrightarrow[0^v,56]{}$$

$$\xrightarrow[1^v,084]{}$$

la grande flèche indiquant le sens du courant dans l'électrolyte, la petite flèche le sens du courant qui serait dû à l'électrode au calomel seule, dont le mercure est toujours positif. Il en résulte que la différence de potentiel cherchée est, si l'on néglige les différences de potentiel au contact des électrolytes :

$$E = 1^v,084 - 0^v,56 = 0^v,524$$

et qu'elle est dirigée dans le même sens que la différence de potentiel de

$$M \mid L_1 = \frac{RT}{F} \log \frac{C}{c_1}$$

$$L_2 \mid M = \frac{RT}{F} \log \frac{c_2}{C}$$

$$L_1 \mid L_2 = \frac{RT}{F} \frac{u - v}{u + v} \log \frac{c_1}{c_2}.$$

Par suite :

$$E = \frac{RT}{F} \left[\log \frac{c_2}{c_1} + \frac{u - v}{u + v} \log \frac{c_1}{c_2} \right] = \frac{RT}{F} \frac{2v}{u + v} \log \frac{c_1}{c_2}.$$

Comme on le voit, la pression d'ionisation disparaît de la formule finale, qui ne dépend plus que des concentrations et de la vitesse des ions, en particulier de l'anion.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'électrode normale, ce que l'on indique par :

$$Zn \mid SO^4Zn \xrightarrow[0^v,524]{}$$

Ainsi, dans l'électrolyte Zn | SO^4Zn (1 équivalent), la solution est positive par rapport au métal ; on écrit :

$$Zn \mid SO^4Zn = + 0^v,524.$$

2° Le couple :

$$Cu \mid SO^4Cu \ (1 \text{ éq.}) \ldots \ Hg^2Cl^2 \mid Hg$$

a pour force électromotrice $0^v,025$, le cuivre étant le pôle positif. On écrit :

$$Cu \mid SO^4Cu \ \ldots \ Hg^2Cl^2 \mid Hg \xrightarrow[0^v,56]{} \xleftarrow[0^v,025]{}$$

et la différence de potentiel cherchée est dans ce cas :

$$E = 0^v,56 + 0^v,025 = 0^v,585.$$

La solution de sulfate de cuivre est négative par rapport au cuivre, ce que l'on écrit :

$$Cu \mid SO^4Cu \ (1 \text{ éq.}) = - 0^v,585.$$

* * *

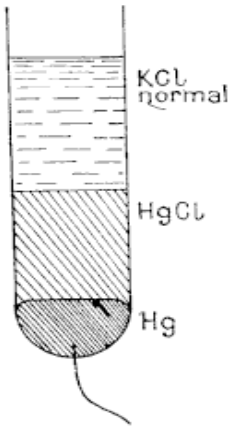


Fig. 78.

Le tableau suivant donne la différence de potentiel entre les corps et la solution uni-équivalente de leurs ions. On appelle ces potentiels, *potentiels de décharge*, ou *potentiels électrolytiques*. La première colonne est relative à l'électrode normale au calomel, la deuxième à l'électrode à hydrogène. Ce tableau s'appelle la ***série des tensions*** (1).

(1) L'électrode normale au calomel est constituée par une goutte de mercure recouverte de calomel Hg^2Cl^2 surmonté d'une dissolution normale de chlorure de potassium (fig. 78).

L'électrode à hydrogène est obtenue en faisant barboter un courant d'hydrogène au contact d'une lame de platine plongeant dans une solution normale d'acide sulfurique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	I	II		I	II
K	+ 2,92	+ 3,2	H	— 0,277	0
Na	+ 2,54	+ 2,82	Cu	— 0,606	— 0,329
Ba	+ 2,54	+ 2,82	Az	< — 0,570	< — 0,293
Ca	+ 2,28	+ 2,56	Bi	< — 0,668	< — 0,391
Mg	+ 1,21	+ 1,49	Sb	< — 0,743	< — 0,466
Al	+ 1	+ 1,28	Hg	— 1,027	— 0,75
Mn	+ 0,798	+ 1,075	Ag	— 1,048	— 0,771
Zn	+ 0,493	+ 0,77	Pt	< — 1,140	< — 0,863
Fe	+ 0,063	+ 0,34	Au	< — 1,356	< — 1,079
CO	— 0,045	+ 0,232	Cl	+ 1,63	+ 1,353
Ni	— 0,049	+ 0,228	Br	+ 1,270	+ 0,993
Sn	< — 0,085	+ 0,192	I	+ 0,797	+ 0,52
Ph	— 0,129	+ 0,148	O	+ 1,39	+ 1,12

En tête se trouvent les métaux ayant la plus grande tendance à passer à l'état d'ions; à la fin de la liste se trouvent les métaux ayant tendance à précipiter (Ag, Pt, Au).

Cette classification n'est valable que si les concentrations des ions sont les mêmes : uni-équivalentes ou à peu près. Si la concentration de l'ion devient 10^m fois plus petite, la différence de potentiel augmente de :

$$\frac{RT}{F}\frac{m}{n},$$

n étant la valence.

Pour Zn par exemple et une solution $\frac{1}{1\,000}$ équi-moléculaire, le potentiel de décharge du zinc augmente de :

$$0{,}058 \times \frac{3}{2} = 0^{v},087.$$

* * *

Comme exemple d'application, considérons une pile type Daniell :

$$Zn \mid SO^4Zn \mid SO^4Cu \mid Cu,$$

ou plus généralement une pile représentée par :

$$M \mid \text{sel de } M \mid \text{sel de } M' \mid M',$$

M et M' étant deux métaux différents. Si on néglige la différence de potentiel au contact des électrolytes, qui est toujours très faible, la f. e. m. E de la pile est égale à la différence $V - V'$ des différences de potentiel au contact des métaux et des électrolytes.

Si les concentrations des ions $\overset{++}{Zn}$ et $\overset{++}{Cu}$ sont uni-équivalentes, on a, d'après les tableaux :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$V = +0^{v},493 \qquad V' = -0^{v},606$$
$$E = V - V' = 1^{v},1.$$

C'est bien ce que donne l'expérience.

* * *

Nous pouvons maintenant, grâce aux notions que nous venons de développer, esquisser la ***théorie de l'électrolyse***, dont l'importance pratique est considérable.

Nous avons vu que la loi de Faraday exige que, pendant l'électrolyse, le même nombre de valences soient rompues simultanément aux deux électrodes, quelle que soit la nature de ces valences.

Avec un électrolyte binaire AM, on a les ions $\overline{A}$, $\overset{+}{M}$ qui déterminent la conductibilité de la solution et en plus les ions de l'eau $\overset{+}{H}$ et $\overline{OH}$, celle-ci étant légèrement dissociée. Pour un mélange de deux électrolytes A_1M_1, A_2M_2 on a les anions $\overline{A}_1$, $\overline{A}_2$, $\overline{OH}$ et les cations $\overset{+}{M}_1$, $\overset{+}{M}_2$, $\overset{+}{H}$.

Quels sont les couples d'ions qui vont se séparer aux électrodes, celles-ci étant supposées inattaquables?

Supposons d'abord les électrodes réversibles pour tous les ions et supposons en plus que nous connaissions les potentiels de décharge des ions. Augmentons graduellement la f. é. m. appliquée aux bornes de l'électrolyte; au début, il n'y a pas de courant, puis, pour une certaine valeur, cette f. é. m. E sera égale à la somme $V_1 + V_2$ des potentiels de décharge de deux des ions, I_1 (anions), soit $\overline{A}_1$, $\overline{H}_2$ ou $\overline{OH}$, et I_2 (cations), soit $\overset{+}{M}_1$, $\overset{+}{M}_2$, ou $\overset{+}{H}$. A partir de ce moment, ces deux couples d'ions vont se décharger sur les électrodes, à l'exclusion des autres couples d'ions qui font partie de la solution. Ainsi l'électrolyse se produit quand la tension aux bornes de la cuve est suffisante pour qu'il puisse se séparer simultanément un des anions et un des cations de l'électrolyte.

Cette f. é. m. est la *tension de décomposition* du corps I_1I_2.

D'une façon générale, la tension de décomposition d'un sel AM est égale à la somme des différences de potentiel des électrodes réversibles pour l'anion A et le cation M à la concentration du bain.

Considérons maintenant une solution contenant plusieurs sels métalliques, soient M_1, M_2, M_3 les métaux, l'anion étant supposé unique pour simplifier. Soit V le potentiel de décharge de l'anion et V_1, V_2, V_3 ceux des métaux, pour une concentration uni-équivalente de chaque ion. Les tensions de décomposition sont, par ordre croissant :

$$V + V_1 < V + V_2 < V + V_3$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par exemple. Donc si on applique une f. é. m. E telle que :

$$V + V_1 < E < V + V_2,$$

le métal M se décomposera *seul* sur la cathode et, si l'on pousse l'électrolyse assez loin, ce métal pourra s'éliminer peu à peu. C'est le principe de la *séparation quantitative des métaux par voie électrolytique*.

On voit donc que, pour déposer un métal, il faut compenser son potentiel électrolytique V, et c'est pour cette raison que nous avons appelé précédemment ce potentiel, potentiel de décharge de l'ion.

On a ainsi l'explication d'un certain nombre de difficultés que l'on rencontre expérimentalement.

Par exemple, en étudiant la série des tensions, on voit qu'il sera facile de séparer l'argent du cuivre (— 0v,33) du plomb (+ 0v,15), tandis qu'on ne réussira pas en présence du mercure (— 0v,75), en solution uni-équivalente.

Ce procédé de triage employé en grand dans l'industrie est moins simple lorsqu'il se dégage des corps gazeux sur les électrodes. En effet, on constate, au moment où des bulles de gaz se déposent, un excès de tension qui peut être considérable, et qui dépend à la fois du gaz et de la nature de l'électrode. Par exemple, pour l'hydrogène provenant de l'électrolyse d'une solution d'acide sulfurique, on a trouvé des survoltages de :

	0v,15	0v,23	0v,64	0v,70	0v,78
l'électrode étant en	argent	cuivre	plomb	zinc	mercure.

Pour l'oxygène, on a trouvé, pour une solution uni-équivalente de KOH, des survoltages de :

	1v,47	1v,48	1v,53	1v,63
l'électrode étant en	fer	cuivre	plomb	argent.

Le phénomène est général.

L'existence de ces tensions explique un certain nombre de faits ; par exemple pourquoi, pendant la charge de l'accumulateur au plomb, il se dépose du plomb à la cathode, alors que la série des tensions fait prévoir un dégagement d'hydrogène ; le plomb, en effet, est plus positif que l'hydrogène (+ 0v,15 pour une solution de chlorure, et + 0v,22 dans la solution de sulfate de plomb dont la solubilité est moindre). L'hydrogène pourtant ne se dégage pas, car il lui faut un survoltage de 0v,64.

* * *

Nous donnerons, pour terminer, deux ***applications des théories précédentes à des électrolyses courantes***.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° *Électrolyse d'une solution concentrée de chlorure de zinc* (60 grammes par litre). — La tension de décomposition est au plus de :

$$1^{v},35 + 0^{v},77 = 2^{v},12,$$

d'après la série des tensions. Le chlore se dégage sur l'anode, le zinc sur la cathode; quant à l'hydrogène, il ne peut se déposer, car le potentiel de décharge de l'ion H en solution neutre est $0^{v},41$ qui, augmenté du survoltage relatif au zinc $0^{v},70$, donne $1^{v},1$ comme tension de décharge de l'hydrogène, supérieure à celle du zinc, $0^{v},77$.

2° *Électrolyse d'une solution de chlorure de sodium.* — A l'anode, le chlore se dégage ; à la cathode, c'est l'hydrogène, à la place du sodium. La tension de décomposition de NaCl est donc égale à la somme des tensions de décharge de $\overset{+}{H}$ et $\overline{Cl}$. Admettons $1^{v},36$ pour $\overline{Cl}$ et $0^{v},41$ pour $\overset{+}{H}$ peu concentré au voisinage de la cathode. L'électrolyse peut donc commencer avec une f. é. m. de $1,36 + 0,41 = 1^{v},77$.

Mais, au fur et à mesure de l'électrolyse, $\overset{+}{H}$ est remplacé dans la solution par $\overline{OH}$, c'est-à-dire par une base, et la tension aux bornes doit être augmentée pour que l'électrolyse continue.

* * *

Nous avons essayé, dans ce chapitre, de donner une rapide vue sur l'ensemble de la ***théorie des ions*** et de ses applications. Celles-ci, comme on a pu s'en rendre compte par les quelques exemples traités, intéressent au plus haut point l'ingénieur électricien : fonctionnement des accumulateurs, force électromotrice des piles et des accumulateurs, séparation électrolytique des métaux, toutes ces questions ne peuvent être résolues sans l'appui de la théorie des ions. Nous verrons, dans les chapitres sur les piles, sur les accumulateurs et sur les applications chimiques du courant électrique, le parti qu'en a tiré l'industrie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VII

APPAREILS DE MESURES — UNITÉS

Les électromètres. — Électroscopes. — Électromètre à feuille d'or de Wilson. — Électromètre à plateaux. — Électromètre cylindrique. — Voltmètre électrostatique. — Voltmètre multicellulaire. — Électromètre à quadrants. — Montage hétérostatique. — Montage idiostatique. — Mesure de la capacité par l'électromètre. — Galvanomètres. — Galvanomètre à cadre mobile. — Galvanomètres à aimant mobile. — Galvanomètre Desprez-d'Arsonval. — Galvanomètre à corde de Einthoven. — Thermogalvanomètre de Duddell. — Radiomètre de Boys. — Galvanomètre de Kelvin. — Systèmes astatiques. — Ampèremètres et voltmètres. — Boîte de résistances. — Méthodes de mesure : méthode de déviation, méthode de zéro. — Mesures absolues. — Ampère-étalon. — Ampère international. — Électrodynamomètre. — Ohm-étalon. — Ohm international. — Volt international. — Mesure absolue des autres grandeurs électriques. — Courant de convection. — Expérience de Rowland. — Identité du déplacement des charges électriques et du courant. — Détermination du rapport c des unités électrostatiques et électromagnétiques. — Principe des mesures. — Valeur de c.

Dans les chapitres précédents, nous avons parlé des diverses grandeurs électriques : différence de potentiel, charges électriques, intensité, résistance, capacité, etc., dont nous avons étudié les diverses propriétés et relations mutuelles, sans rien dire sur la façon dont expérimentalement on les mesure, sans rien indiquer sur les appareils dont s'aide le savant pour les évaluer en fonction des unités que nous avons définies. C'est cette lacune qu'il nous faut combler maintenant. Nous ne décrirons dans ce chapitre que les appareils de mesure scientifiques, c'est-à-dire ***de laboratoire***, car nous verrons, dans la seconde partie de ce livre, les appareils dont on se sert pour les mesures dans la pratique industrielle.

* * *

En électricité statique, l'appareil de mesure fondamental est l'***électromètre***, qui est destiné à la mesure des différences de potentiel.

Un électromètre comporte toujours un conducteur mobile formant l'une des armatures d'un condensateur qui est chargé avec la différence de po-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tentiel à mesurer. On lui oppose une force antagoniste qui tend à le ramener à sa position d'équilibre. On peut évaluer la différence de potentiel soit en calculant la force antagoniste : on a alors un électromètre absolu, soit en étalonnant préalablement l'appareil : on a alors une mesure relative de la différence de potentiel.

* * *

L'***électroscope*** appartient à la seconde catégorie. Son principe est extrêmement simple. Les deux pendules en moelle de sureau qui nous ont servi dans l'étude de l'électricité statique constituent un électroscope : leur divergence est fonction du potentiel auquel sont portées les deux boules de moelle de sureau.

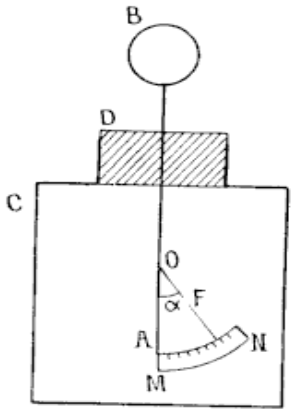


Fig. 79. — Électroscope ordinaire.

Pratiquement, on remplace les deux boules par deux feuilles d'or, et la disposition est analogue à celle de la figure 79. Une plaque verticale AB pénètre à travers un bouchon isolant D à l'intérieur de la cage C ; la feuille mince F, en or ou en tout autre métal, est collée à la tige en O, et se déplace en face d'une graduation MN, tracée sur une feuille mince de matière isolante, qui permet de repérer la position de son extrémité. La différence de potentiel V à mesurer est établie entre la cage C et le conducteur ABF.

Dans cet appareil, c'est le poids de la feuille d'or mobile qui intervient pour équilibrer la répulsion des deux feuilles d'or dues aux forces électriques.

* * *

Lorsqu'il s'agit de mesurer de faibles différences de potentiel, on utilise une modification due à C. T. R. Wilson et appelée ***électromètre à feuille d'or de Wilson.***

Il se compose essentiellement d'une feuille d'or isolée L (fig. 80) suspendue en C et qui est écartée de la position verticale par l'attraction d'un plateau incliné P. On montre qu'en agissant sur l'inclinaison de la plaque P, la différence de potentiel entre P et L et la distance de P et L, l'équilibre de la feuille d'or peut être soit stable pour toutes ses positions, soit instable dans une certaine région.

On établit une différence de potentiel constante V_0 entre P et L, et, en agissant sur l'inclinaison de l'appareil et la distance de P à L on, cherche

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la région de sensibilité maxima. Quand V_0 est modifié par l'application de la différence de potentiel à mesurer, L se déplace et son déplacement est observé à l'aide d'un microscope. L'appareil, en effet, est très petit, et les dimensions de la cage peuvent être réduites à 2 × 3 × 2 centimètres. On peut ainsi apprécier le $\frac{1}{200}$ de volt.

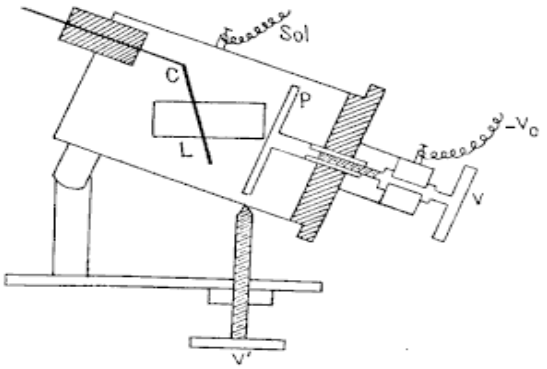


Fig. 80. — Électromètre de Wilson.

* * *

Le plus simple des électromètres absolus est l'***électromètre à plateaux***. Il est constitué par un condensateur plan à plateaux horizontaux dont le plateau supérieur, mobile, est suspendu sous l'un des plateaux d'une balance. La force électrostatique qui s'exerce entre les plateaux est équilibrée par le poids d'une masse placée dans le plateau opposé de la balance (1). Mais cet appareil ne peut servir que pour mesurer des différences de potentiel considérables.

C'est ainsi que, dans un modèle où les plateaux ont 6 centimètres de rayon et sont distants de 1 centimètre, pour V = 10 000 volts, la masse est égale à 5 grammes.

* * *

Dans l'***électromètre cylindrique de Bichat et Blondlot***, ce sont deux cylindres coaxiaux dont l'un, mobile, n'est que partiellement engagé dans l'autre, fixe, qui constituent les armatures du condensateur. Quand on établit une différence de potentiel entre les deux cylindres, la capacité du condensateur tend à augmenter, et le cylindre mobile tend à rentrer dans le cylindre fixe. Le cylindre mobile est porté par un fléau de balance, et on équilibre la force motrice par les poids placés dans un plateau suspendu au cylindre.

* * *

L'existence des forces électrostatiques servant à mesurer la différence

(1) On démontre que l'on a :

$$V = d\sqrt{\frac{8\pi mg}{S}},$$

S étant la surface des plateaux et d leur distance.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de potentiel est liée à la variation de capacité du condensateur constituant l'électromètre. Au lieu de produire cette variation, comme dans l'électromètre à plateaux, par un écartement des plateaux, on peut la réaliser par le déplacement de l'un des plateaux parallèlement à lui-même, de façon à réduire l'étendue des surfaces en regard. On y arrive aisément par une rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan des plateaux.

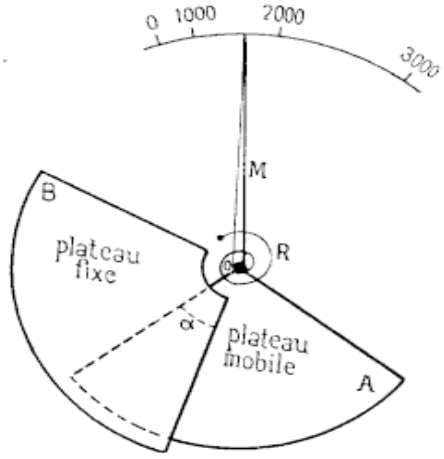


Fig. 81. — Voltmètre électrostatique.

Si l'on donne aux plateaux la forme de secteurs circulaires centrés sur l'axe de rotation (fig. 81), on montre que la déviation α est sensiblement proportionnelle au carré de la différence de potentiel. Si on équilibre les forces électrostatiques par l'action antagoniste d'un ressort R par exemple, et si on mesure à l'aide du déplacement d'une aiguille M la rotation du plateau mobile A, on a un ***voltmètre électrostatique*** capable de mesurer des différences de potentiel considérables, de 1 000 à 15 000 volts.

Ces appareils fonctionnent aussi bien pour des différences de potentiel continues qu'alternatives, car ils ne sont sensibles qu'au carré de la valeur de ces différences de potentiel, mais leur sensibilité est très faible, et les divisions, au voisinage du zéro, sont très serrées ; si la graduation maxima est 5 000 volts par exemple, l'intervalle 0 — 1 000 n'occupera que le $\frac{1}{25}$ de l'échelle.

* * *

Pour augmenter la sensibilité de l'appareil, il faut évidemment accroître la variation de capacité par unité d'angle de rotation. On multiplie par 2 cette variation en adjoignant, comme l'indique la figure 82, un plateau B′ au plateau B, qui agira sur la face opposée de A. On multiplie encore par 2 la sensibilité en doublant l'appareil, comme l'indique la figure 83, par adjonction d'un second appareil $A_1B_1B_1'$, symétrique du premier par rapport à l'axe de rotation. Enfin, on peut encore accroître la sensibilité en superposant plusieurs de ces appareils autour du même axe de rotation. On a alors le ***voltmètre multicellulaire de Kelvin***.

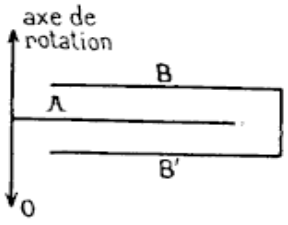


Fig. 82.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

L'***électromètre à quadrants***, dû à Kelvin et modifié ensuite en particulier par Dolezalek, est l'instrument essentiel des mesures électrostatiques. C'est un voltmètre analogue à ceux que nous venons de décrire, mais complété par une seconde paire de quadrants CC_1, comme l'indique la figure 84, chacun des quatre quadrants communiquant avec le quadrant opposé. Les quadrants sont portés par des colonnes isolantes et communiquent avec deux bornes extérieures que l'on met en relation soit avec une source de potentiel fixe, soit avec la cage métallique renfermant tout l'appareil.

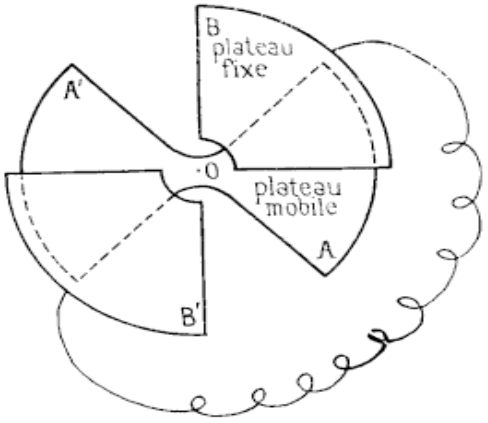


Fig. 83.

L'aiguille, aussi légère que possible, en aluminium ou en mica argenté, est suspendue par un fil de torsion conducteur afin de permettre de la charger électriquement. Le couple antagoniste de ce fil, lors de sa torsion, équilibre les actions électrostatiques. Enfin, un miroir solidaire de l'aiguille, et fixé en général sur le fil de torsion, permet de mesurer

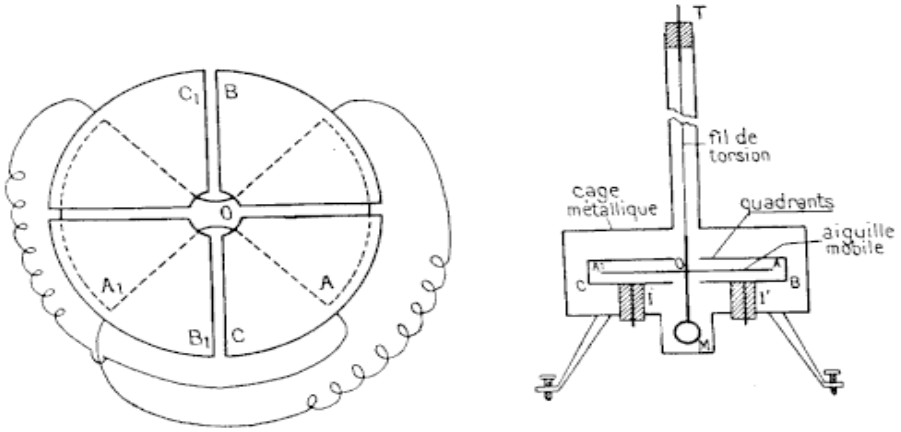


Fig. 84. — Électromètre à quadrants de Kelvin.

optiquement la déviation par le déplacement d'un rayon lumineux réfléchi que l'on repère sur une règle graduée translucide.

La figure 84 montre le schéma de l'appareil de Kelvin, et la figure 85 la modification de Dolezalek au tiers environ de la grandeur réelle. N est l'aiguille d'aluminium suspendue à un fil de quartz argenté F de 3 à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

9 millièmes de millimètre de diamètre et d'environ 60 millimètres de longueur ; Q, Q sont les quadrants que l'on a ouverts pour laisser voir l'aiguille ; A, A sont leurs supports isolants. M est le miroir servant à repérer la rotation de l'équipage mobile.

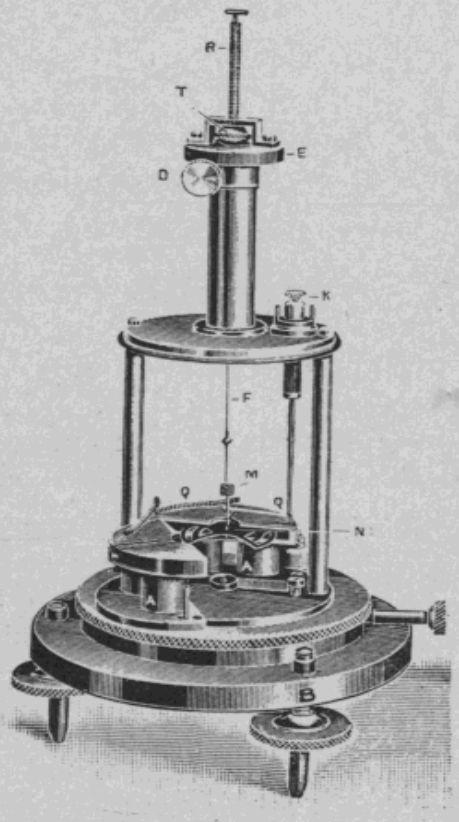


Fig. 85. — Électromètre de Dolezalek.

Un couvercle métallique, percé d'une fenêtre pour le passage des rayons lumineux, complète l'appareil.

On peut réaliser deux montages pour la mesure des différences de potentiel. L'un, dit *montage hétérostatique*, comporte l'emploi d'une différence de potentiel auxiliaire. Les deux pôles de la pile de charge sont reliés à la cage et à l'aiguille (fig. 86, *a*) ; l'une des paires de quadrants est réunie à la cage et la différence de potentiel à mesurer est établie entre les deux paires de quadrants. On montre que, dans ces conditions, la déviation est proportionnelle à la différence de potentiel à mesurer.

Dans un second montage, dit *montage idiostatique*, et représenté schématiquement figure 86, *b*, on ne se sert pas de différence de potentiel auxiliaire. L'une des paires de quadrants est réunie à l'aiguille, l'autre à la cage, et on établit entre elles la différence de potentiel à mesurer.

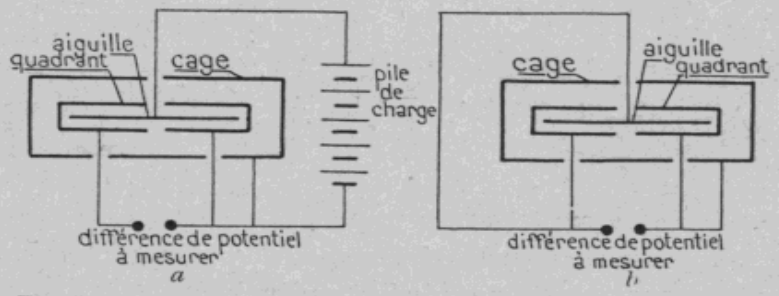


Fig. 86. — *a*, Montage hétérostatique. *b*, Montage idiostatique.

Dans ces conditions, la déviation est proportionnelle au carré de cette différence de potentiel, ce qui permet de mesurer les différences de poten-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiel alternatives. On peut, avec un électromètre sensible et bien réglé, apprécier le dix-millième de volt.

* * *

L'électromètre, avons-nous dit, est l'appareil essentiel pour les mesures électrostatiques. Nous allons en effet montrer qu'il permet, grâce à un artifice, non seulement de mesurer la tension d'un conducteur, mais également sa ***capacité***. Connaissant ces deux grandeurs, on en déduit immédiatement la charge. Les trois grandeurs fondamentales : tension, capacité et charge sont donc ainsi mesurables.

Soit x la capacité inconnue qu'il s'agit de mesurer. Chargeons-la à un potentiel V quelconque et relions l'armature isolée à l'électromètre ; on mesure le potentiel V par la déviation de l'aiguille de l'électromètre. Ceci fait, on relie l'armature isolée du condensateur à l'armature isolée d'un condensateur dont on connaît la capacité c, par construction par exemple. L'électricité se répartit entre les deux capacités, et la tension baisse et prend une nouvelle valeur V′ que l'on mesure à l'électromètre. Connaissant c, V et V′, on tire très facilement la valeur de x (1).

* * *

Dans l'étude des courants électriques, trois grandeurs fondamentales interviennent : l'intensité du courant, la résistance du conducteur, la force électromotrice appliquée. L'instrument qui joue le rôle fondamental dans toutes les mesures est le ***galvanomètre***, qui sert à mesurer des courants faibles.

Le *couple actif* est dû à l'action qui s'exerce entre un courant et un aimant permanent. Il en résulte que l'on peut distinguer deux classes d'appareils, suivant que c'est le circuit parcouru par le courant qui est mobile ou, au contraire, que c'est l'aimant qui peut se déplacer.

(1) En effet, si M est la charge prise par le condensateur, lors de la première mesure on a :

$$M = xV.$$

On a de même :

$$M = (x + c)V',$$

d'où :

$$\frac{V}{V'} = \frac{x + c}{x} = 1 + \frac{c}{x}$$

et par suite :

$$x = \frac{cV'}{V - V'}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les *galvanomètres à cadre mobile*, l'aimant est fixe et l'équipage est formé d'un cadre composé de plusieurs spires de fil fin bien isolé, suspendu par deux fils métalliques, l'un dans le prolongement de l'autre. Le couple antagoniste est obtenu par la torsion du fil de suspension. L'amortissement des oscillations provient des courants d'induction qui prennent naissance dans le fil du cadre lorsque le circuit est fermé, ou des courants de Foucault qui se développent dans le support sur lequel on enroule le cadre (fig. 87).

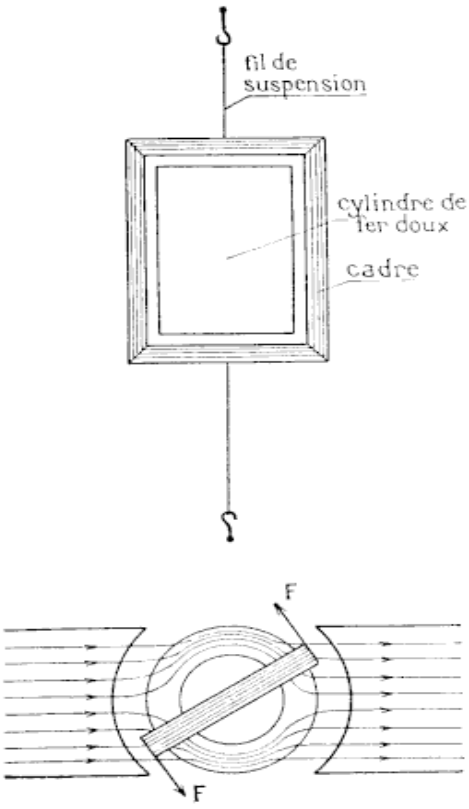


Fig. 87. — Principe du galvanomètre à cadre mobile.

Dans les *galvanomètres à aimant mobile*, le courant passe dans une ou plusieurs bobines fixes, et l'équipage mobile est constitué par un ou plusieurs petits aimants suspendus par un fil de cocon ou de quartz. Le couple antagoniste provient de l'action du champ terrestre ou d'aimants fixes sur les aimants mobiles. L'amortissement est dû au frottement de palettes dans un liquide ou dans l'air.

Dans tous les cas, l'équipage mobile, après un certain nombre d'oscillations, s'arrête dans une position pour laquelle le couple actif est égal au couple antagoniste.

Nous allons dire quelques mots de chacune de ces catégories d'instruments.

* * *

Le type le plus courant de galvanomètre à cadre mobile est le ***galvanomètre Desprez-d'Arsonval***. La figure 88 montre le modèle usuel, dans lequel le cadre mobile est formé d'un fil de cuivre de $0^{mm},1$ de diamètre formant 500 spires agglomérées à la gomme laque. Les fils de suspension sont en argent de $0^{mm},1$ de diamètre. Le fil supérieur est soudé d'un côté au fil du cadre, et de l'autre à un crochet tenant à une potence; celle-ci est reliée à l'une des bornes d'arrivée du courant.

Le fil inférieur est soudé au fil du cadre et de l'autre côté à un ressort réglable à l'aide d'une vis. Les parties latérales du cadre se trouvent dans l'entrefer d'un aimant permanent formé de plusieurs aimants en fer à che-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

val donnant un champ magnétique dans l'entrefer de l'ordre de 1 600 gauss. A l'intérieur du cadre, dont la surface est de 15 à 20 centimètres carrés, se trouve un cylindre en fer doux dont le rôle est de rendre l'entrefer aussi petit que possible.

Le réglage de la tension du fil de suspension se fait à l'aide d'une vis et d'un écrou disposés à la partie supérieure.

On démontre que la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant, tout au moins pour des courants peu intenses. Dans l'appareil que nous venons de décrire, un courant de 1 microampère correspond à un déplacement de 10 millimètres sur une échelle transparente située à 1 mètre du miroir du galvanomètre.

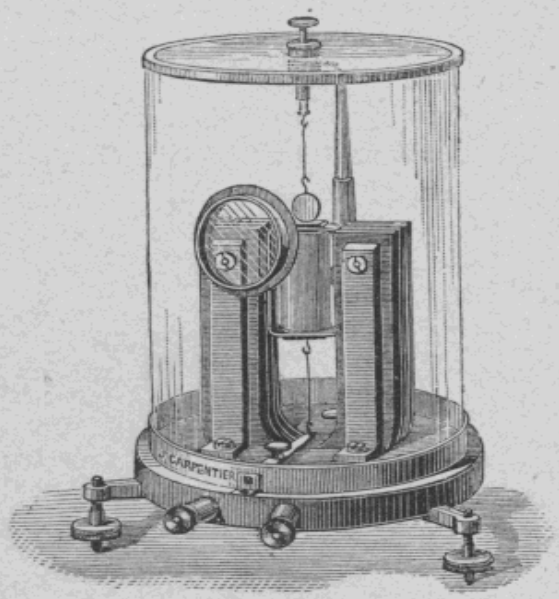


Fig. 88. — Galvanomètre Desprez-d'Arsonval.

* * *

En remplaçant l'aimant permanent par un électro-aimant, on peut augmenter considérablement la sensibilité de l'appareil. Nous décrirons à titre d'exemple le ***galvanomètre à corde de Einthoven***.

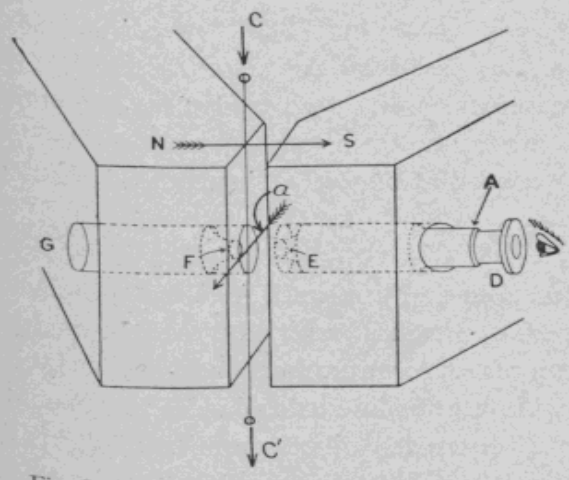


Fig. 89. — Principe du galvanomètre à corde.

C'est un galvanomètre à cadre oscillant, dans lequel le cadre est réduit à un simple fil ou corde qui se trouve tendu entre les pôles d'un électro-aimant très puissant. La figure 89 montre le schéma de l'appareil. Quand un courant passe dans le fil conducteur CC′, le fil est dévié dans le sens de la flèche, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction du champ magnétique NS. Ce petit déplacement est observé au moyen d'un microscope A,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

placé dans un trou percé au travers des pièces polaires de l'électro-aimant. On peut également projeter l'image du fil sur un écran ou une plaque photographique à l'aide d'une lampe à arc et d'une lanterne de projection.

L'appareil présente l'énorme avantage de n'avoir qu'une inertie très faible de la partie mobile (le fil), de sorte qu'il peut suivre avec fidélité les variations extrêmement rapides d'un courant, tandis que, dans le galvanomètre à cadre ordinaire, l'inertie du cadre est assez grande et la durée d'oscillation de plusieurs secondes. Le fil, ou *corde*, est, dans les appareils très sensibles, constitué par un fil de verre argenté de $0^{mm},002$ de diamètre environ, et la période d'oscillation, qui dépend de la tension de la corde, est de moins de $\frac{1}{200}$ de seconde.

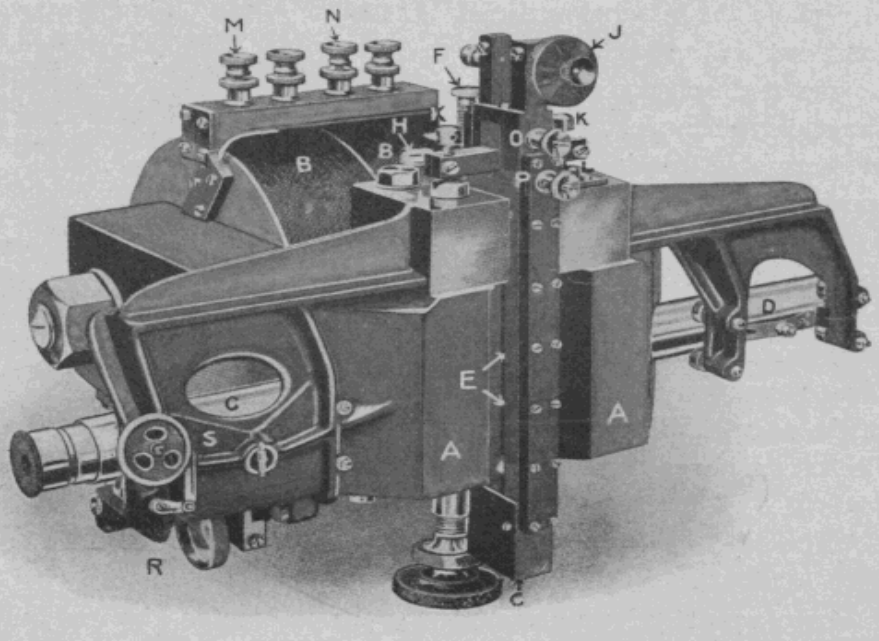


Fig. 90. — Galvanomètre à corde de Einthoven.

La figure 90 montre la vue d'ensemble de l'appareil. A, A sont les pièces polaires d'un électro-aimant dont B, B sont les bobines d'excitation que l'on peut grouper de diverses manières grâce aux bornes M, N, de façon à faire varier l'intensité du champ qui agit sur la corde placée dans le compartiment C, et occupe la position E entre les pièces polaires. La vis J permet de faire varier la tension de la corde (et par suite la sensibilité de l'appareil). CD est le microscope d'observation.

Lorsque l'on projette, à l'aide d'un dispositif optique approprié, l'image de la corde sur une plaque photographique se déplaçant d'un mouvement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

uniforme, on obtient des diagrammes analogues à celui de la figure 91, qui est relative à l'établissement et à la rupture d'un courant

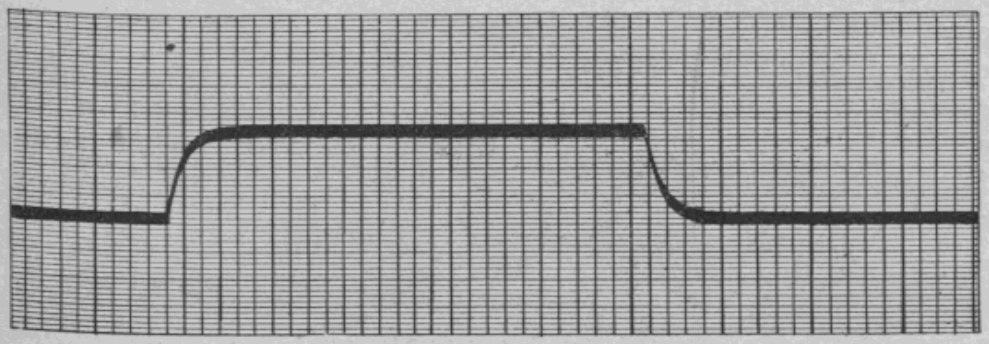


Fig. 91. — Exemple de courbes relevées au galvanomètre à corde.

de 2×10^{-8} ampère ; l'intervalle entre deux raies verticales correspond à 0,04 seconde.

* * *

Aux galvanomètres à cadre mobile se rattachent le ***radiomicromètre de Boys*** et le ***thermogalvanomètre de Duddel***, qui reposent sur le même principe.

Dans le *radiomicromètre de Boys*, le cadre, de dimensions très petites, se compose d'une seule spire placée entre les branches N, S d'un aimant ou d'un électro-aimant. Cette spire est formée de deux métaux différents (bismuth-antimoine par exemple) et la moindre différence de température entre les deux soudures P et Q (fig. 92) y engendre un courant donnant une déviation notable. Par exemple, en échauffant Q par l'énergie rayonnée par une bougie placée à 100 mètres, on peut obtenir, sur l'échelle graduée, une déviation de 1 millimètre. C'est grâce à cet appareil que l'on étudie les rayonnements des étoiles en astronomie physique.

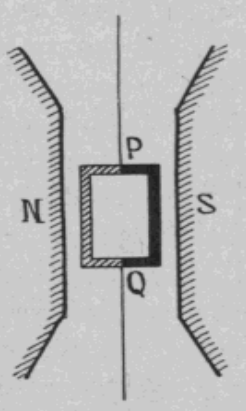


Fig. 92. — Principe du radiomicromètre.

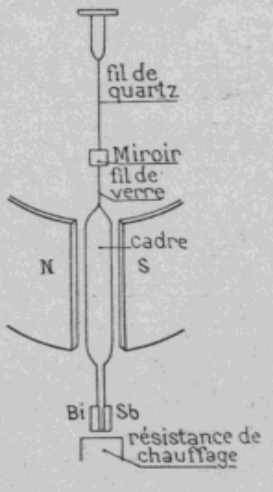


Fig. 93. — Principe du thermogalvanomètre.

Le *thermogalvanomètre de Duddell* consiste en une résistance qui s'échauffe lorsqu'elle est parcourue par le courant à mesurer. Une partie de cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaleur échauffe à son tour une soudure d'un radiomicromètre de Boys. La figure 93 montre le schéma de l'appareil. Le cadre est formé d'un fil d'argent suspendu par un fil de quartz et un fil de verre portant le miroir d'observation.

Cet appareil est utilisé pour la mesure des très faibles courants, alternatifs ou non. Comme il n'a pratiquement ni self-induction ni capacité, on peut l'utiliser dans des circuits de fréquence élevée (même plusieurs millions par seconde) et il permet d'évaluer des courants de quelques microampères.

* * *

Le type des ***galvanomètres à aimants mobiles*** est le ***galvanomètre de Kelvin***, qui a été modifié, quant à ses dispositions pratiques, par de nombreux savants : Wiedemann, Broca, Paschen, etc.

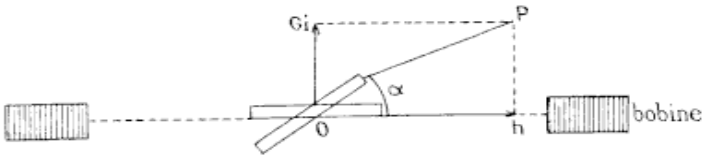


Fig. 94. — Principe du galvanomètre à aimant mobile.

Son principe est extrêmement simple. Une aiguille aimantée est suspendue à un fil sans torsion, un fil de cocon par exemple, et est placée au centre d'une bobine à grand nombre de tours de fil, dans laquelle on fait passer le courant que l'on veut mesurer. Cette bobine crée un champ magnétique (proportionnel à l'intensité du courant, G*i*). D'autre part, l'aiguille aimantée est soumise à l'action du champ terrestre H (ou, si l'on préfère, à l'action du champ créé par un aimant placé au-dessus de l'appareil). Il en résulte que l'aiguille aimantée prend une nouvelle position d'équilibre quand le courant passe et, d'après sa rotation repérée par le déplacement d'un rayon lumineux réfléchi par un miroir solidaire de l'aiguille, on peut mesurer l'intensité *i* du courant (fig. 94).

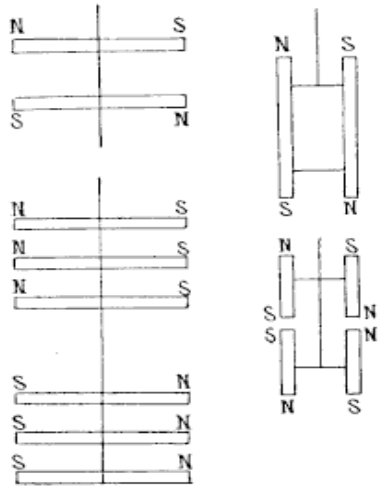


Fig. 95. — Différents montages astatiques.

Pour soustraire l'aiguille aimantée à l'action du champ terrestre et en même temps augmenter la sensibilité de l'appareil, on constitue l'équipage mobile par des paires de petits aimants

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

identiques, accolés de façon à ce que leurs pôles de nom contraire se regardent (les diverses dispositions utilisées sont représentées figure 95). Si ces aimants (ou les systèmes d'aimants) étaient mathématiquement identiques, l'équipage mobile serait indifférent à l'action directrice du champ terrestre ou du champ de l'aimant de l'appareil. On aurait un *système astatique*.

En réalité, il est impossible de réaliser des aimants identiques et, d'autre part, le champ directeur (terrestre ou artificiel) n'est pas non plus rigoureusement uniforme, de sorte qu'il existe toujours un champ directeur h que l'on peut faire varier à volonté et même rendre très faible, ce qui permet de faire varier à volonté la sensibilité de l'appareil (1).

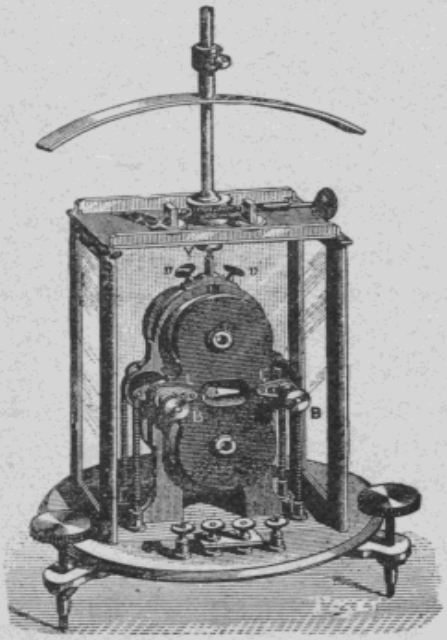


Fig. 96. — Galvanomètre de Kelvin.

Dans le galvanomètre de Kelvin, les deux petits aimants élémentaires sont solidaires d'une tige d'aluminium portant également le miroir et suspendue par un fil de cocon. Chacun de ces aimants est placé au centre d'une bobine. Les enroulements des bobines sont en sens inverse, pour multiplier la sensibilité. Un aimant directeur peut être déplacé verticalement, de façon à faire varier la sensibilité. La figure 96 montre une vue d'ensemble de l'appareil.

* * *

Nous verrons que les appareils industriels de mesure de l'intensité du courant, les ***ampèremètres***, sont simplement des modifications et des adaptations des galvanomètres, en vue d'une construction plus robuste, nécessitée par les valeurs plus grandes des courants industriels et les conditions plus sévères de leur emploi pratique.

Signalons immédiatement que la loi d'Ohm permet de ramener la mesure

(1) En effet, si h est le champ directeur, à la position initiale, l'équipage mobile est dans la direction de ce champ, qui sera par exemple celui du plan de la bobine (fig. 94). Quand le courant passe, le champ Gi est normal à h et le système mobile se place dans la position résultante OP, déviant d'un angle α donné par $\operatorname{tg}\alpha = \frac{Gi}{h}$. Plus h est petit, plus α est grand pour une même intensité de courant, c'est-à-dire plus l'appareil est sensible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une différence de potentiel à celle de l'intensité d'un courant, de sorte que les ***ampèremètres*** et les ***voltmètres*** sont des appareils dont le principe est le même. En effet, si on intercale dans un conducteur AB un ampèremètre, ses indications sont proportionnelles à la différence de potentiel $V_A - V_B$ et la mesurent en valeur relative. L'appareil constitué par l'ampèremètre et la résistance AB s'appelle un *voltmètre*. Nous verrons comment on le réalise dans la pratique.

* * *

Il nous reste maintenant à dire quelques mots des ***résistances*** que l'on emploie dans les mesures de laboratoire, et qui sont groupées en *boîtes de résistances*.

Ces résistances sont constituées par des fils de manganèse ou de maillechort enroulés de diverses façons afin de réduire la capacité et la self-induction. Chacune des bobines ainsi constituées a ses extrémités

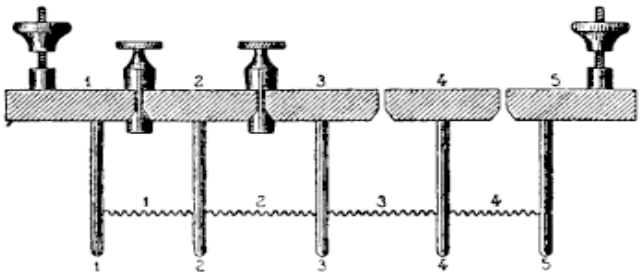


Fig. 97. — Schéma d'une boîte de résistances.

aboutissant à deux tiges, soudées à des blocs métalliques, fixés sur le couvercle de la boîte par des vis et des rivets.

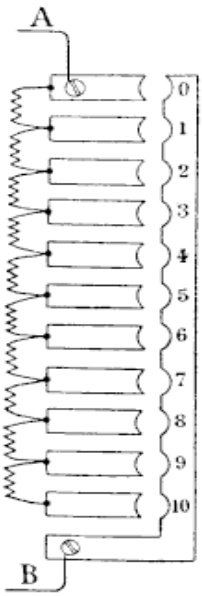


Fig. 98.

Les blocs sont isolés entre eux, et des fiches servent à les mettre en contact. Dans certaines boîtes, toutes les bobines sont en série et sur le couvercle se trouve marquée, devant chaque séparation, la valeur de la résistance qui aboutit aux deux plots voisins. Les fiches mettent les résistances en court-circuit et, pour introduire une résistance, il faut donc enlever la fiche correspondante (fig. 97).

Dans d'autres appareils, on réalise au contraire la disposition indiquée figure 98, et on n'emploie qu'une seule fiche. En plaçant la fiche en 3, le courant allant de A à B traverse une résistance de 3 ohms, par exemple. On peut réaliser sur ce principe des boîtes à décades (fig. 99), n'utilisant que peu de fiches, mais comportant un grand nombre de bobines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On diminue le nombre de résistances en composant les boîtes de résistance comme les boîtes de poids, 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200,

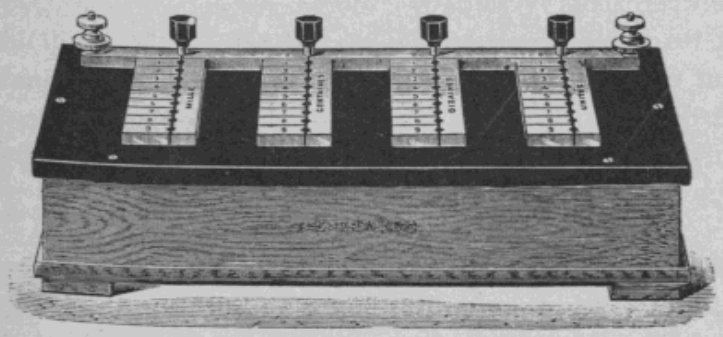


Fig. 99. — Boîte de résistances à décades.

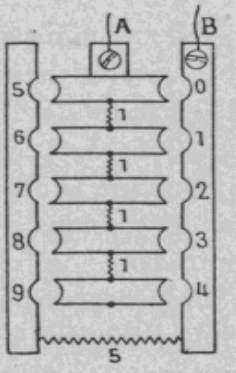


Fig. 100. — Combinaison Feussner.

500, etc., ou d'autres combinaisons, en groupant convenablement les résistances, par exemple la combinaison Feussner (fig. 100) qui demande cinq bobines par décade de neuf résistances, ou la combinaison Carpentier, qui ne nécessite que quatre résistances (fig. 101).

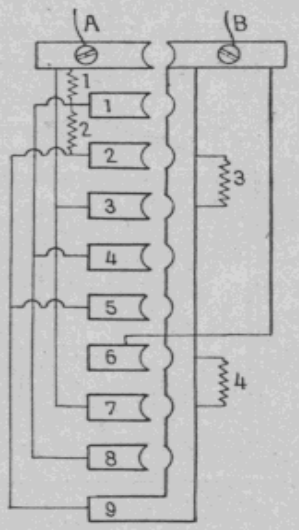


Fig. 101. — Combinaison Carpentier.

* * *

L'étude des diverses méthodes de mesure sortirait du cadre de ce livre, et le lecteur pourra se reporter à leur sujet aux ouvrages spéciaux. Disons simplement que l'on peut les grouper en deux classes : ***méthode de déviation*** et ***méthode de zéro***.

Dans les méthodes de déviation, l'appareil est étalonné une fois pour toutes, et la grandeur à mesurer est connue par une simple lecture si l'on a déterminé préalablement la loi de proportionnalité entre cette valeur et celle de la déviation.

Dans les méthodes de zéro, au contraire, il faut disposer d'un *étalon* de la grandeur à mesurer. On réalise alors un montage tel que l'action de cet étalon sur l'appareil de mesure soit de sens opposé à celle de la grandeur à mesurer, et on ramène l'appareil de mesure au zéro. Dans la plupart des cas, l'appareil de mesure est un galvanomètre que l'on ramène au zéro en agissant sur des résistances ; le rapport de la grandeur à mesurer à la grandeur étalon de même espèce est donné par le rapport des deux résistances employées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Nous avons vu que les trois grandeurs électriques fondamentales : intensité, résistance et force électromotrice, sont reliées par la loi d'Ohm, de sorte que, si l'on veut effectuer des ***mesures absolues*** en fonction des unités C. G. S., il suffit de déterminer les étalons de deux seulement de ces grandeurs. On a choisi l'ampère (unité d'intensité) et l'ohm (unité de résistance) et, par conséquent, le volt (unité de différence de potentiel) est une unité secondaire.

Pour déterminer l'***ampère en valeur absolue***, il faut pouvoir évaluer l'intensité d'un courant en fonction des unités de longueur, temps et masse, qui sont les unités fondamentales. On peut y arriver en se servant des actions mécaniques qu'exercent entre eux des circuits parcourus par des courants.

Si un circuit mobile parcouru par un courant i est placé dans le champ créé par une bobine parcourue par ce même courant, les forces qui s'exercent entre ces deux circuits sont proportionnelles au carré de l'intensité i, le facteur de proportionnalité ne dépendant que des dimensions géométriques des circuits et, par suite, étant calculable en fonction de l'unité de longueur. Comme, d'autre part, on peut mesurer par une balance et des poids la force exercée entre les deux circuits, le problème est résolu. L'appareil est appelé ***électrodynamomètre***.

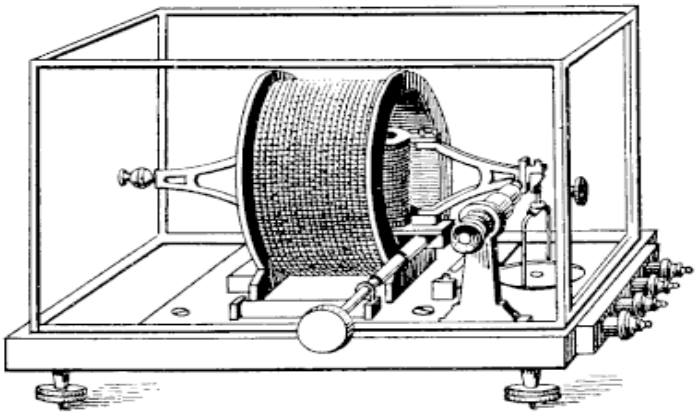


Fig. 102. — Ampère-étalon.

La figure 102 montre un *ampère-étalon*. On voit nettement la grosse bobine fixe à l'intérieur de laquelle se déplace, solidaire d'un fléau de balance, une bobine mobile que l'on ramène à sa position d'équilibre, en ajoutant des poids dans le plateau.

Pratiquement, un courant de 1 ampère est un courant qui dépose $1^{mg},118$ d'argent par seconde dans l'électrolyse (voir chapitre VI). C'est l'*ampère international*, qui est inférieur de 2 à 3 dix-millièmes à l'ampère vrai défini par les électrodynamomètres.

Pour mesurer la ***résistance en valeur absolue***, on se sert de la loi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'Ohm, $e = ir$, en produisant une force électromotrice calculable et en mesurant l'intensité du courant résultant.

Les seules forces électromotrices mesurables sont les forces électromotrices d'induction. On les produit par la rotation d'un cadre de surface et de nombre de tours connus, tournant dans un champ magnétique connu avec une vitesse de rotation également connue.

Cette force électromotrice donne naissance dans un conducteur à un courant i que l'on mesure par ses actions magnétiques par exemple et, comme $r = \frac{e}{i}$, on a la mesure absolue de r.

Pratiquement, l'*ohm international* est la résistance à 0° d'une colonne de mercure de $106^{cm},3$ et de masse $14^{gr},4521$. L'ohm international est supérieur de 3 à 5 dix-millièmes à l'ohm vrai.

Quant au *volt international*, c'est la différence de potentiel qui existe entre les extrémités d'une résistance de 1 ohm international parcourue par un courant d'un ampère international.

Pratiquement, le volt international est les $\frac{1}{1,0183}$ de la force électromotrice de l'élément Weston (voir chapitre VI).

* * *

Ces trois grandeurs électriques, comparées directement aux unités fondamentales, suffisent pour permettre de mesurer toutes les autres en valeur absolue. Si l'on connaît l'intensité d'un courant en valeur absolue, on peut, grâce à une bobine de dimensions connues, créer en un point de l'espace un champ magnétique connu en valeur absolue et, par conséquent, mesurer en gauss un champ magnétique inconnu en déterminant son rapport au champ-étalon. De même, connaissant en valeur absolue l'intensité d'un courant et la différence de potentiel aux bornes d'un circuit, on peut mesurer en ergs-seconde la puissance consommée dans le circuit, etc.

* * *

Lorsque nous avons introduit la notion de courant électrique, en considérant d'abord la décharge d'un condensateur, puis ensuite l'action d'une force électromotrice appliquée aux deux extrémités d'un circuit conducteur, nous avons implicitement supposé que les deux sortes de phénomènes étaient identiques.

Pour que cette identité soit absolument établie, il faut que la propriété essentielle du courant électrique : la production d'un champ magnétique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puisse être mise en évidence par le déplacement de charges électriques, par ce que l'on appelle un ***courant de convection***.

C'est ce que ***Rowland***, puis ***Bender*** et ***Crémieu*** ont nettement mis en évidence. Le principe de leurs expériences est le suivant : l'une des armatures A d'un condensateur plan peut tourner très rapidement autour d'un axe perpendiculaire (fig. 103). Si la charge portée par le plateau A est entraînée par ce plateau dans son mouvement de rotation, elle équivaudra à un certain courant électrique et devra produire à son voisinage un champ magnétique H que l'on pourra mesurer. C'est bien ce que l'expérience a vérifié, de sorte que l'on peut dire que *le champ magnétique créé par des charges électriques en déplacement est identique au champ magnétique créé par des conducteurs parcourus par des courants.*

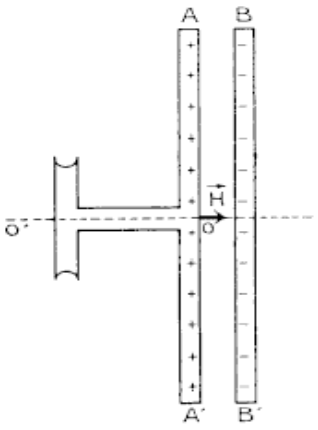


Fig. 103.

On admet d'ailleurs aujourd'hui que, dans tous les cas, le champ magnétique est effectivement dû au déplacement de charges électriques, d'électrons, qui, dans les conducteurs, existent à l'état libre, en dehors des atomes, et s'y meuvent en temps normal d'un mouvement désordonné, comme les molécules d'un gaz à l'intérieur du récipient qui les renferme.

Lorsque l'on établit entre les bornes du conducteur un champ électrique, sous l'influence de cette force d'orientation, les électrons se déplacent d'un mouvement d'ensemble parallèle au champ et de sens opposé : le courant électrique se manifeste.

Nous montrerons également plus loin que cette analogie avec le mouvement des molécules d'un gaz se pousse très loin. En particulier, si on augmente la température, les mouvements des électrons deviennent plus intenses et peuvent être suffisants pour leur permettre de vaincre les forces électrostratiques et de s'échapper du métal. C'est l'émission thermoionique, dont les applications pratiques sont considérables.

* * *

Nous avons vu que les phénomènes d'induction permettent de définir la différence de potentiel d'une façon indépendante de la définition à laquelle conduit l'étude des phénomènes électrostatiques, et nous avons dit à ce moment que l'on avait été amené ainsi à constituer deux systèmes d'unités : unités électrostatiques et unités électromagnétiques, le passage de l'un des systèmes à l'autre se faisant par l'intervention d'un coefficient c.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous allons dire quelques mots de la ***détermination du rapport des unités électrostatiques et électromagnétiques.***

En principe, il suffit de mesurer une même grandeur dans l'un, puis dans l'autre des systèmes. En pratique, on n'a opéré expérimentalement que sur la différence de potentiel et la capacité.

Le principe de la mesure est très simple. Dans le cas d'une différence de potentiel, on mesure celle-ci d'une part à l'aide d'un électromètre absolu (mesure en unités électrostatiques) et d'autre part en évaluant à l'aide d'un électrodynamomètre absolu le courant qu'elle produit dans une résistance-étalon (mesure en unités électromagnétiques).

On trouve ainsi que le rapport c est égal à 3×10^{10}.

D'autre part, on peut calculer facilement, en fonction de c, la valeur d'une grandeur électrique quelconque évaluée dans l'un ou l'autre des deux systèmes.

On obtient alors le tableau suivant, dans lequel nous avons indiqué également la valeur dans les deux systèmes des ***unités pratiques***.

Quantité d'électricité..	1 u.é.m. $= 3 \cdot 10^{10}$ u.é.s.;	1 coul. $= \frac{1}{10}$ u.é.m. $= 3 \cdot 10^{9}$ u.é.s.
Intensité de courant ..	1 u.é.m. $= 3 \cdot 10^{10}$ u.é.s.;	1 amp. $= \frac{1}{10}$ u.é.m. $= 3 \cdot 10^{9}$ u.é.s.
Différence de potentiel.	1 u.é.m. $= \frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$ u.é.s.;	1 volt $= 10^{8}$ u.é.m. $= \frac{1}{3 \cdot 10^{2}}$ u.é.s.
Capacité	1 u.é.m. $= 9 \cdot 10^{20}$ u.é.s.;	1 farad $= \frac{1}{10^{9}}$ u.é.m. $= 9 \cdot 10^{11}$ u.é.s.
Résistance	1 u.é.m. $= \frac{1}{9 \cdot 10^{20}}$ u.é.s.;	1 ohm $= 10^{9}$ u.é.m. $= \frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$ u.é.s.
Coeff. de self-induction.	1 u.é.m. $= \frac{1}{9 \cdot 10^{20}}$ u.é.s.;	1 henry $= 10^{9}$ u.é.m. $= \frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$ u.é.s.

C'est justement sur l'identité du rapport c et de la vitesse de la lumière que Maxwell fonda en 1865 la théorie électromagnétique de la lumière, car il montra théoriquement que la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide est égale au rapport c. Il en déduisit également que les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques, ce que les expériences sur les ondes hertziennes ont vérifié définitivement.

* * *

Dans les chapitres précédents, nous avons cherché à exposer aussi succinctement que possible les ***lois essentielles*** de l'électricité que nous pourrions appeler l'électricité classique. L'ordre suivi nous a permis d'introduire les notions fondamentales auxquelles nous serons amenés à nous référer dans la suite de cet ouvrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les dernières années, des phénomènes nouveaux ont conduit à compléter et parfois même à reviser les conceptions électriques classiques. Nous n'y avons fait que de brèves allusions jusqu'à présent, afin de ne pas compliquer et alourdir l'exposé, mais, comme leur importance pratique est de jour en jour plus grande, nous avons cru devoir leur consacrer une série de chapitres spéciaux dans lesquels nous avons cherché à résumer aussi clairement que possible l'état actuel de nos connaissances sur chacun de ces sujets qui nous font pénétrer peu à peu dans le mécanisme intime des phénomènes électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VIII

LES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES

Production des oscillations par décharge d'un condensateur. — Période. — Oscillations amorties. — Oscillations entretenues. — Transformation des courants de haute fréquence. — Montage Tesla. — Montage Oudin. — Phénomènes dans l'espace environnant. — Champ oscillatoire. — Déplacement des lignes de force. — Mécanisme de la propagation des ondes. — Vérifications expérimentales de la théorie. — Expériences de Fessenden et de Hertz. — Oscillateur de Hertz. — Résonateur de Hertz. — Ondes stationnaires. — Analogies avec les ondes lumineuses. — Vitesse de propagation. — Propagation superficielle des courants de haute fréquence dans les fils. — Relation de Maxwell. — La gamme des radiations, des oscillations électriques aux rayons ».

Nous avons supposé au début de ce livre que le courant électrique, lorsqu'il circule dans un circuit conducteur, se comporte d'une façon analogue à celle d'un courant d'eau dans une canalisation, s'écoulant constamment dans la même direction. Par exemple, la décharge d'un condensateur donne lieu à un déplacement d'électricité se traduisant par un courant allant de l'armature chargée positivement à l'armature chargée négativement.

Lord Kelvin a montré que le processus de la décharge est complètement différent si les deux armatures sont réunies non plus par un fil ordinaire, mais par l'intermédiaire d'une bobine, en un mot s'il y a une ***self-induction*** notable intercalée dans le circuit. C'est qu'en effet, dans ces conditions, il y a production dans la bobine d'un champ magnétique, et ce phénomène modifie entièrement les conditions expérimentales, ainsi qu'il

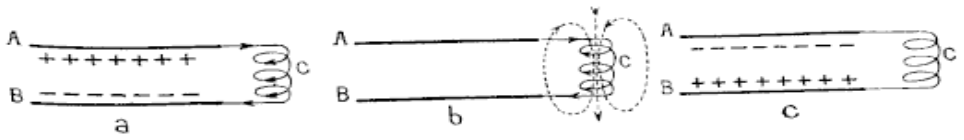


Fig. 104. — Décharge oscillante d'un condensateur.

est facile de s'en rendre compte. Quand la décharge commence à se produire, le courant dans la bobine C circule tout d'abord comme l'indique la figure 104, *a*. Mais alors il crée un champ magnétique dans la bobine et, lorsque la décharge est complète, le courant a atteint sa valeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maxima et le champ magnétique également (fig. 104, *b*). A ce moment, le courant s'éteint dans la bobine dans laquelle, par suite, le champ magnétique diminue d'intensité. La variation du flux magnétique qui en résulte a pour conséquence, d'après les lois de l'induction, la production d'une force électromotrice induite qui tend à s'opposer à cette variation ; par conséquent, le courant continuera à passer dans le même sens, chargeant B positivement et A négativement jusqu'à ce que l'état représenté figure 104, *c* soit atteint, c'est-à-dire que le courant se soit annulé, les charges sur les armatures du condensateur étant alors inversées. Le même phénomène se produit alors, mais en sens inverse, et, s'il n'y avait pas de pertes d'énergie par échauffement du fil et radiation d'énergie dans l'espace environnant, l'oscillation des charges continuerait indéfiniment, comme celle d'un pendule sans frottement.

La ***période d'oscillation*** T, si la résistance du circuit n'est pas trop grande, est donnée par la formule simple :

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

L étant la self-induction de la bobine et C la capacité du condensateur (1). C'est-à-dire que le nombre d'oscillations par seconde n est égal à :

$$n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Remarquons d'ailleurs que, par suite de la déperdition d'énergie, l'intensité du courant dans le circuit diminue notablement à chaque oscillation et sa courbe a une forme analogue à celle représentée par la figure 105. Ce sont ce que l'on appelle des ***oscillations amorties***. Nous verrons, dans le chapitre sur la télégraphie sans fil, que l'on peut par différents procédés obtenir des ***oscillations entretenues*** qui sont alors de véritables courants alternatifs de haute fréquence.

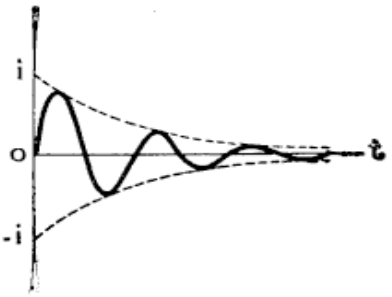


Fig. 105. — Amortissement des courants de haute fréquence.

En effet, on peut voir, d'après la formule précédente, que des fréquences de l'ordre de 100 000 par seconde sont aisément réalisables avec des capacités et des self-inductions courantes. Pour produire ces courants, un des dispositifs les plus simples est représenté figure 106 : le con-

(1) Si la résistance n'est pas négligeable, la formule est :

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

densateur C a ses armatures reliées aux extrémités P, Q du secondaire d'une bobine d'induction S; le circuit de décharge est constitué par un gros fil dont quelques spires forment la self-induction L. Deux petites sphères métalliques, E, E′ constituent ce que l'on appelle l'*éclateur*. Le fonctionnement est le suivant : la bobine charge le condensateur ; quand la différence de potentiel entre ses armatures est suffisante, une étincelle jaillit entre E et E′ et la décharge oscillante s'établit comme si on avait réuni les deux boules par un conducteur de faible résistance. Par suite de la grande self-induction du secondaire de la bobine, les courants de haute fréquence ne peuvent y circuler et, bien qu'il soit en dérivation sur le circuit de décharge, il ne joue aucunement dans le phénomène,

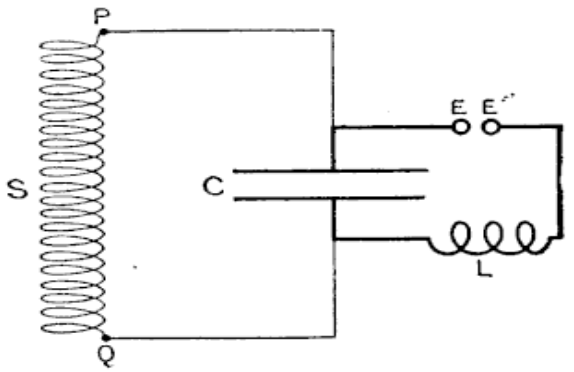


Fig. 106. — Production des courants de haute fréquence.

* * *

Ayant ainsi réalisé des courants alternatifs de haute fréquence, rien n'empêche de les ***transformer*** comme des courants alternatifs ordinaires. C'est ce que Tesla réalisa pour la première fois. Le *montage Tesla* est extrêmement simple, comme l'indique la figure 107. La self-induction du circuit de décharge L joue le rôle de primaire d'un transformateur *sans fer* dont le secondaire T comprend dix à vingt fois plus de spires. Entre les deux extrémités A et B de ce secondaire, on peut obtenir des différences de potentiel de l'ordre de 100 000 à 1 000 000 de volts.

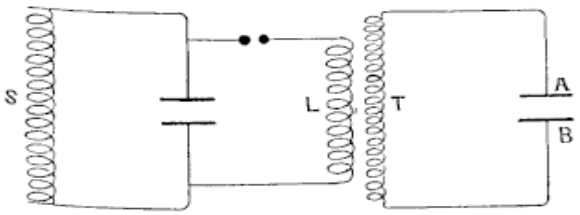


Fig. 107. — Montage Tesla.

Un autre dispositif, dit *montage Oudin*, est représenté figure 108. La self L′ du circuit secondaire S est constituée par un certain nombre de spires de la self L du circuit P. Nous aurons l'occasion de revenir sur ces divers montages dans le chapitre sur l'électricité médicale. Signalons simplement ici que ces courants de haute fréquence et de haut voltage sont inoffensifs pour l'organisme, ce qui peut paraître surprenant à première vue. Il semble que, de même que l'œil n'est plus sensible pour des vibrations lumineuses extrêmement rapides, que l'oreille ne saisit plus les sons suraigus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au-dessus de 40 000 vibrations par seconde, les nerfs moteurs et sensitifs ne sont plus excités par des oscillations électriques dont la fréquence dépasse 30 000 par seconde, bien que l'organisme en général ressente une action utilisée dans le traitement de certaines maladies.

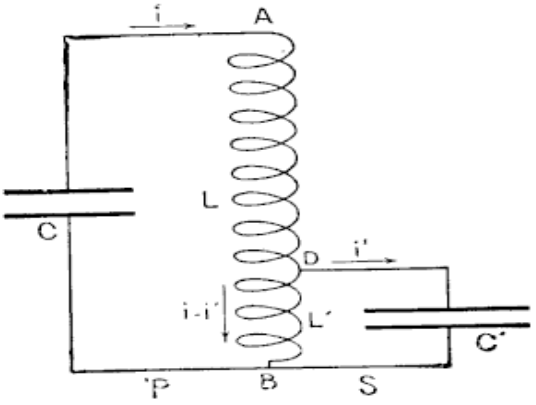


Fig. 108. — Montage Oudin.

* * *

Quittant maintenant le système générateur d'oscillations électriques, nous allons porter notre attention sur l'***espace environnant***. Le courant alternatif qui parcourt le circuit oscillant produit à son voisinage un champ magnétique alternatif ; les différences de potentiel alternatives qui existent entre ses pointes créent également un champ électrique alternatif, ces deux phénomènes, champ électrique variable et champ magnétique variable, étant d'ailleurs inséparables l'un de l'autre. Voyons comment ils se propagent dans l'espace. A cet effet, considérons deux conducteurs, A et B, chargés : A négativement et B positivement. Le champ électrique qu'ils produisent dans l'espace est représenté figure 109, *a* (on n'a représenté, pour plus de simplicité, que la moitié des lignes de force). S'il se produit une étincelle entre les deux pointes, la charge que porte A se dirige vers le bas et celle que porte B vers le haut. Les lignes de force se déplacent donc vers l'intérieur, les extrémités qui sont sur les conducteurs se dirigeant dans le même sens que les charges. Mais, d'après ce que nous venons de dire, le mouvement des lignes de force crée un champ magnétique, et celui-ci confère au système des lignes de force électriques une sorte d'inertie qui fait que, lorsque ces lignes arrivent à la coupure AB, au lieu de s'arrêter, elles continuent leur mouvement et dépassent leur position d'équilibre. Les charges suivent et finalement les conducteurs se trouvent avoir échangé leurs charges ; B est alors chargé négativement et

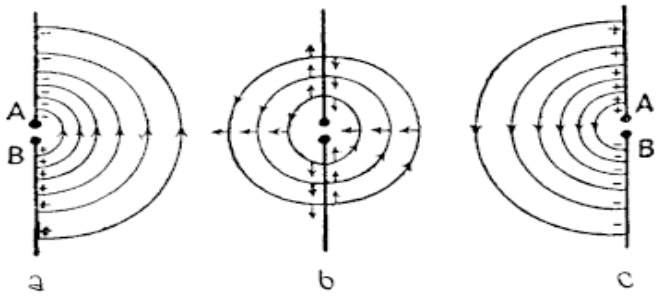


Fig. 109. — Champ oscillatoire engendré par l'éclateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A positivement. Quand la moitié des lignes de force ont traversé la coupure, l'état du champ électrique est celui représenté figure 109, *b*, toutes les lignes de force se déplaçant à ce moment de droite à gauche. Lorsque les charges sont inversées, le champ électrique est celui représenté figure 109, *c*. On voit que les lignes de force ont passé simplement de droite à gauche des conducteurs. A ce moment, les mêmes phénomènes se reproduisent, mais en sens inverse.

* * *

Une caractéristique importante de la décharge est l'inertie, la sorte de ***viscosité du milieu*** dans lequel se déplacent les lignes de force électriques et qui est due à la production d'un champ magnétique résultant de leur mouvement. Si on voulait se représenter grossièrement le phénomène grâce à une analogie matérielle, on pourrait assimiler les lignes de force à des cordes pesantes dont les extrémités glissent sur deux tringles (les conducteurs), ces cordes se déplaçant dans un milieu résistant, comme un liquide visqueux.

* * *

Cette image permet de comprendre plus facilement ce que nous allons dire maintenant. Dans la décharge telle que nous venons de l'étudier, l'énergie se dissipe entièrement sous forme calorifique dans le conducteur, à condition que cette décharge soit suffisamment lente. Supposons maintenant, ce qui est le cas en télégraphie sans fil, que la décharge donne lieu à des ***oscillations très rapides***. Le phénomène se complique alors.

En effet, considérons une ligne de force en particulier (fig. 110, 1). Pendant la décharge, les charges électriques se déplacent en sens inverse, de A vers *a* et de B vers *b*. Une ligne de force tend donc à se resserrer progressivement pendant que ses extrémités s'approchent de *a* et *b* (fig. 110, 2 et 3).

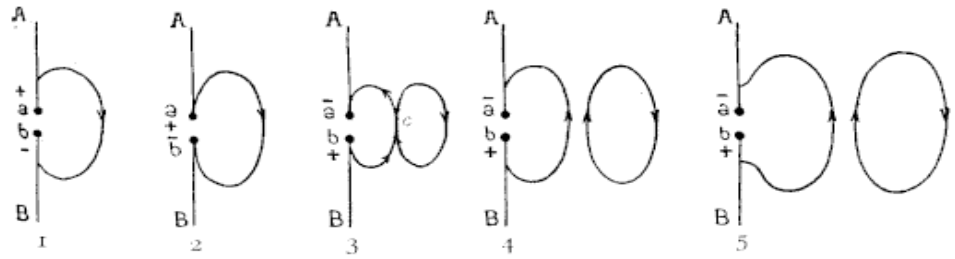


Fig. 110. — États successifs d'une ligne de force.

Puis les charges continuent à se déplacer en allant de *b* vers B pour les positives et de *a* vers A pour les négatives.

Il y a donc tendance à la création d'une nouvelle ligne de force dans le sens *bca* et à la conservation de l'ancien état traduit schématiquement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par l'existence de la ligne de force considérée, d'où sectionnement de la ligne de force en *c* (fig. 110, 4). La ligne de force primitive se ferme alors en une boucle qui s'élargit en se déplaçant dans le sens de propagation (fig. 110, 5).

Le phénomène se reproduit à chaque alternance : à mesure qu'une boucle se détache et se propage en s'élargissant, une nouvelle ligne de force se crée, se déforme et se détache à son tour pour suivre la précédente, la vitesse de propagation de ces ondes étant égale à celle de la lumière.

* * *

Si on veut une représentation plus complète du ***mécanisme de la radiation***, on obtient alors les courbes représentées figure 111, qui donnent huit états d'une demi-oscillation d'après les indications du calcul, les

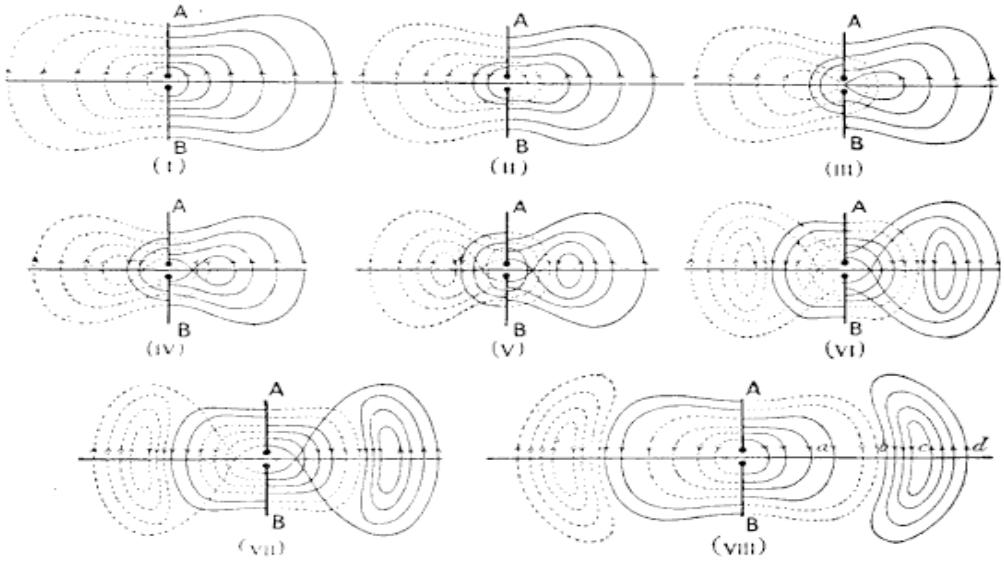


Fig. 111. — Propagation des ondes.

lignes de force initialement à droite de AB étant figurées en traits pleins, celles à gauche en traits ponctués.

Remarquons d'ailleurs que la propagation de ces lignes de flux électrique donne naissance à un flux magnétique dont la direction est perpendiculaire à la fois à la direction du flux électrique et à celle de propagation. A grande distance, la surface sur laquelle sont répartis tous les états de même phase, dans le milieu, c'est-à-dire que l'on appelle la surface d'onde, est une sphère ayant pour centre le centre de *ab*.

* * *

La ***décharge oscillante des condensateurs***, étudiée mathématiquement par lord Kelvin en 1853, fut vérifiée ***expérimentalement***

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en 1857 par Feddersen qui put mettre en évidence à l'aide d'un miroir tournant le caractère oscillatoire de l'étincelle de décharge d'un condensateur, En 1865, Maxwell, théoriquement encore, établit l'identité des oscillations électriques et des phénomènes optiques, mais ce n'est qu'en 1888 que Hertz montra expérimentalement l'existence des radiations électromagnétiques. Ainsi donc, ce chapitre de l'électricité donne deux exemples curieux d'anticipations hardies de la théorie sur l'expérience. Nous allons dire quelques mots des expériences de Hertz.

Ce physicien chercha à réaliser, avec les radiations électriques, les mêmes phénomènes que ceux obtenus avec les radiations lumineuses. L'idée était la suivante : si ces deux radiations si différentes d'origine et d'allure se comportent de la même façon dans tous les cas, et si leurs vitesses de propagation sont les mêmes dans les différents milieux, on est en droit de conclure à leur identité, et par suite l'optique et l'électricité se rejoignent et le mécanisme profond de leurs phénomènes est le même.

Pour réaliser avec les ondes électriques des expériences optiques, il faut évidemment que les longueurs d'onde soient du même ordre de grandeur, afin que les miroirs, prismes et lentilles « électriques » n'aient pas des dimensions exagérées.

* * *

Si nous nous reportons à la formule simple de Kelvin donnant la période des oscillations électriques, on voit que, pour réduire cette période, il faut que la self et la capacité du système oscillant soient très petites. Aussi Hertz fut-il conduit à donner à son ***oscillateur*** une forme particulière.

Son appareil se composait de deux capacités A, B (simples plaques métalliques carrées de 40 centimètres de côté placées à 60 centimètres l'une de l'autre et portant deux boules de métal de 2 à 3 centimètres de diamètre) (fig. 112) réunies aux bornes du secondaire d'une bobine d'induction. La durée d'oscillation de ce système est d'environ $1{,}8 \times 10^{-8}$ seconde, et, la vitesse de propagation étant celle de la lumière, 3×10^{10} centimètres par seconde, la longueur d'onde λ donnée par la formule

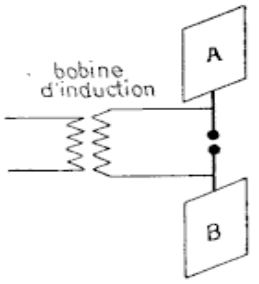


Fig. 112. — Oscillateur de Hertz.

$$\lambda = vt$$

est donc de $5^{m},4$ environ.

Le phénomène oscillatoire qui prend naissance dans l'excitateur n'est d'ailleurs pas modifié par la présence du secondaire de la bobine d'induc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion qui constitue une dérivation de résistance et de self-induction considérables par rapport à la résistance et à la self-induction du circuit de l'excitateur. Au moment où la décharge se produit, le circuit AB se trouve en effet fermé par l'étincelle et sa résistance devient très faible.

Quand les oscillations se produisent dans le circuit AB, le milieu extérieur est le siège de perturbations énergiques que Hertz mit en évidence par l'emploi d'un *résonateur* constitué par un cercle de cuivre d'environ 35 centimètres de diamètre, présentant une coupure étroite. En donnant à ce cercle des dimensions convenables, on peut l'*accorder* avec l'excitateur, c'est-à-dire que, dans ces conditions, il vibre à l'unisson de l'excitateur de la même façon qu'un tuyau sonore ébranlé par un diapason émettant un son de même hauteur, d'où le nom de ***résonateur*** donné à l'appareil.

Les courants induits qui s'y créent, et qui ont même fréquence que ceux de la décharge oscillante, provoquent, à la coupure du résonateur, la production d'un flux d'étincelles qui sont toujours très petites, mais que l'on décèle au moyen d'un micromètre à étincelles constitué par une vis pointue que l'on approche plus ou moins d'une boule (fig. 113).

L'orientation du résonateur par rapport à l'oscillateur n'est pas indif-

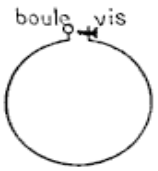


Fig. 113. — Résonateur de Hertz.

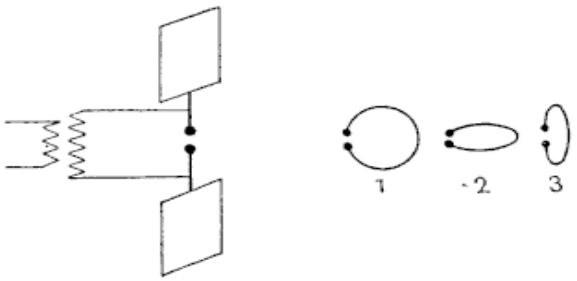


Fig. 114. — Orientation du résonateur par rapport à l'oscillateur.

férente ; il faut que sa coupure soit parallèle à celle de l'oscillateur, c'est-à-dire que les oscillations pourront être décelées quand le résonateur sera dans les positions 1 ou 3 (fig. 114), tandis qu'on n'observera rien quand il sera dans la position 2 (1).

* * *

Pour mettre les ondes électriques en évidence, Hertz s'est appuyé sur le phénomène des ***ondes stationnaires***.

(1) Cela tient à ce que les ondes électromagnétiques sont polarisées, c'est-à-dire que le déplacement électrique est, pour des points situés dans le plan équatorial, dirigé dans une seule direction, celle qui est parallèle à l'oscillateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Voici en quoi il consiste : Supposons que des ondes viennent se réfléchir sur un miroir plan, normal à l'axe de propagation; les ondes réfléchies, dans leur déplacement en sens inverse, interfèrent avec les ondes directes, de sorte que le milieu dans lequel elles se propagent sera au repos en certains points appelés *nœuds* (là où les deux vibrations de direction inverse sont égales et de sens opposé) et au contraire en état de vibration intense en d'autres appelés *ventres* (là où les deux vibrations s'ajoutent). Le phénomène est le même que celui bien connu en acoustique dans la vibration des cordes, la réflexion des ondes sonores sur les murs, et en optique, dans les interférences. La figure 115 montre graphiquement le phénomène.

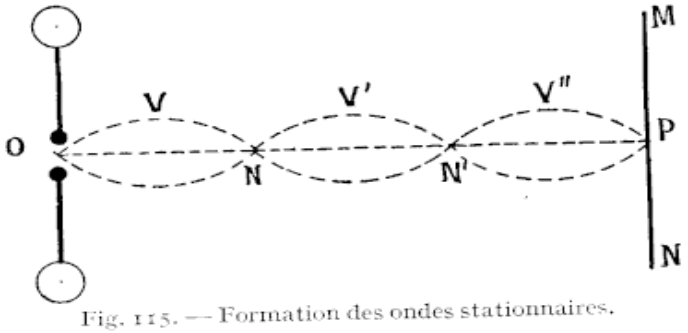


Fig. 115. — Formation des ondes stationnaires.

Le miroir, dans le cas des ondes hertziennes, est constitué par une plaque métallique MN. On constate, en déplaçant le résonateur suivant la ligne OP, qu'il existe une série de plans, V, V′, etc., où les étincelles sont particulièrement brillantes, et une série de plans intermédiaires, également équidistants, N, N′, où elles deviennent imperceptibles (1).

* * *

Les expériences de Hertz sont fondamentales, car les ondes stationnaires ainsi mises en évidence ne peuvent être dues qu'à des phénomènes d'interférence qui nécessitent l'existence d'ondes périodiques se déplaçant dans le milieu avec une vitesse finie qu'il est possible de calculer et que l'on a trouvée égale à celle de la lumière.

L'***analogie avec les ondes lumineuses*** est évidente ; aussi a-t-on cherché à reproduire avec les ondes hertziennes les principaux phénomènes de l'optique. C'est ainsi qu'au lieu d'une surface plane, on opère la réflexion sur une surface de courbure convenable, de manière à déterminer des *rayons électriques* comme on concentre des rayons lumineux. L'un des dispositifs de Hertz consiste à placer l'axe de l'excitateur suivant la ligne

(1) D'ailleurs, suivant que l'on donne au condensateur l'orientation 1 ou 3, on trouve que les nœuds et les ventres s'intervertissent mutuellement. Cela tient à ce que nous avons dit plus haut, qu'il y a deux phénomènes oscillatoires simultanés : ondes électromagnétiques et ondes électrostatiques, qui sont à angle droit et dont l'un est nul quand l'autre est maximum.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

focale d'un cylindre parabolique en zinc (fig. 116) de 2 mètres de haut et $1^{m},2$ d'ouverture. On obtient ainsi un véritable rayon que l'on peut recevoir sur un second miroir identique au premier, les deux axes étant en coïncidence, et on répète l'expérience bien connue des deux miroirs conjugués. On montre ainsi que le mouvement vibratoire est concentré sur la ligne focale du second miroir.

On peut également faire réfléchir le rayon sur un plan métallique et constater que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

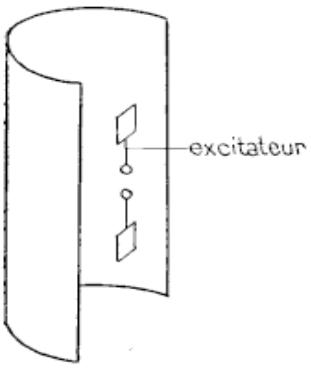


Fig. 116. — Miroir hertzien.

En se servant d'une prisme en asphalte de $1^{m},50$ de haut et 30° d'angle, Hertz a montré que le rayon est dévié vers la base, et il a pu déterminer l'indice de réfraction électrique de l'asphalte.

Les successeurs de Hertz, Righi et Lebedew en particulier, sont arrivés à produire des ondes électriques dont la longueur d'onde est de l'ordre de quelques centimètres seulement, et ils ont pu, avec des appareils moins volumineux, reproduire tous les phénomènes de l'optique (polarisation, diffraction, interférences, etc.).

* * *

Pour que l'identité entre les ondes électriques et les ondes lumineuses soit complète, il faut que leur ***vitesse de propagation*** soit la même et, d'autre part, qu'il existe une relation définie entre les propriétés électriques et les propriétés optiques des milieux dans lesquelles elles se propagent.

La détermination de la vitesse de propagation a été l'objet de nombreuses expériences, depuis celles de Hertz jusqu'à celles, plus récentes, de Blondlot et d'Abraham, Dufour et Ferrié. Ces derniers expérimentateurs ont mesuré le temps mis par les signaux de télégraphie sans fil pour aller de France en Amérique.

Toutes les mesures ont confirmé les résultats de la théorie de Maxwell : la vitesse de propagation est la même, aux erreurs d'expérience près, que celle de la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde. Mais elles ont montré également que cette vitesse est la même, que la propagation ait lieu dans l'air ou, au contraire, le long d'un fil métallique. Nous verrons, dans le chapitre sur la télégraphie et la téléphonie, que, pour les courants électriques ordinaires, il n'en est pas de même, et que la propagation d'un courant dans un fil de grande longueur prend parfois un temps considérable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

La conclusion que l'on tire immédiatement de ce dernier résultat est que ***le conducteur n'intervient pas dans la propagation des ondes électriques*** et que, en réalité, la propagation a lieu par le milieu qui entoure le fil, celui-ci ayant simplement pour rôle de drainer les oscillations dans ce milieu dans une direction déterminée.

Voici comment on peut se rendre compte du phénomène. Quand un conducteur est le siège de courants de haute fréquence, les parties profondes sont protégées par l'induction des parties superficielles qui tend à y faire naître des courants de *sens contraire* au courant superficiel.

Le courant que l'on observe, et qui est la résultante de la composition du courant principal et des courants induits, va donc en décroissant de la périphérie vers le centre, d'autant plus vite que les phénomènes d'induction sont plus intenses, c'est-à-dire que la fréquence est plus grande. Insensible pour les courants alternatifs de basse fréquence dans les conducteurs de dimensions courantes, ce phénomène devient très appréciable pour le courants de haute fréquence, qui tendent alors à se localiser dans une couche mince à la surface du conducteur.

Pour fixer les idées, nous dirons que pour des fréquences de l'ordre de 100 millions par seconde, couramment réalisées en télégraphie sans fil, le courant se trouve localisé, pour un conducteur de cuivre, sur une épaisseur de 29 millièmes de millimètre. C'est-à-dire que si l'on recouvre une *âme isolante* non conductrice d'une pellicule de cuivre de cette épaisseur, la résistance du conducteur ainsi constitué sera la même, pour ces courants de haute fréquence, que celle d'un conducteur de cuivre plein de même diamètre.

Les courants de haute fréquence n'intéressent donc que la surface des conducteurs et ne pénètrent pas à l'intérieur. C'est pour cette raison que Hertz a pu se servir d'un miroir en zinc dans ses expériences. Bien que conducteur, ce miroir constitue pour les oscillations électriques un corps *opaque* arrêtant la propagation et permettant aux phénomènes de réflexion de se produire.

Remarquons d'ailleurs qu'il n'y a pas que la résistance des conducteurs dont la valeur pour les courants de haute fréquence soit différente de la valeur pour les courants continus ou alternatifs ordinaires ; il en est de même de la self-induction.

* * *

La théorie de Maxwell, identifiant les ondes électromagnétiques et les ondes lumineuses, avait prévu les résultats précédents, en particulier

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'égalité de leur vitesse de propagation. D'autre part, si, au lieu de se propager dans le vide ou dans l'air, les ondes électromagnétiques se propagent dans un milieu de pouvoir conducteur spécifique (constante diélectrique) K, la vitesse de propagation est $\frac{v}{\sqrt{K}}$ ainsi que l'a vérifié l'expérience. Or, la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu d'indice de réfraction n est $\frac{v}{n}$. Si les deux phénomènes sont identiques, on doit donc avoir :

$$\frac{v}{\sqrt{K}} = \frac{v}{n}$$

ou :

$$K = n^2.$$

La constante diélectrique d'un corps doit être égale au carré de son indice de réfraction. C'est la ***relation de Mawxell.***

C'est bien ce que vérifie l'expérience, comment l'indiquent les quelques nombres ci-dessous :

Substances.	K.	n^2.
Soufre	4,73	4,89
Paraffine	2,29	2,02
Pétrole	1,92	1,92
Térébenthine	2,23	2,13
Benzine	2,38	2,26
Eau	80	79,8

* * *

L'identité prévue par Maxwell est donc expérimentalement établie : les ondes lumineuses, comme les ondes hertziennes, sont des ondes électromagnétiques et elles ne diffèrent entre elles que par leur ***longueur d'onde.*** On peut répéter les mêmes expériences avec les unes et les autres, les théories mathématiques et les équations qu'on en déduit sont les mêmes dans les deux cas.

En diminuant les dimensions des oscillateurs, Lebedew, et plus récemment Nichols et Tear, ont pu produire des oscillations électriques dont la longueur d'onde était de l'ordre de $0^{mm},2$, soit 200 μ (le μ étant le millième de millimètre). Mais, pour aller plus loin dans le domaine des petites ondes, il faudrait donner aux oscillateurs des dimensions impossibles à réaliser pratiquement : elles seraient de l'ordre des dimensions moléculaires. Heureusement, grâce à l'emploi de la méthode dite des *rayons restants*, on a pu isoler, dans le rayonnement infra-rouge des sources lumineuses, des radiations dont la longueur d'onde est de 330 μ, soit un tiers de milli-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètre, et qui présentent les mêmes propriétés que les ondes hertziennes de même longueur d'onde.

Ainsi donc, si on part des ondes hertziennes dont les longueurs d'onde peuvent atteindre plusieurs dizaines de milliers de mètres, on peut passer graduellement à des ondes de plus en plus courtes qui finalement se confondent avec les ondes infra-rouges des spectres lumineux. C'est-à-dire que les propriétés électriques s'atténuent peu à peu et qu'au contraire les propriétés calorifiques apparaissent progressivement. A ce moment, le physicien ne peut plus construire les systèmes oscillants, mais il les trouve tout faits dans la nature : ce sont les molécules en état de vibration lumineuse. Au fur et à mesure que la longueur d'onde continue à diminuer, les propriétés calorifiques s'évanouissent à leur tour et les propriétés lumineuses s'affirment. Le spectre visible correspond à des ondes dont les longueurs d'onde sont comprises entre 8 et 4 μ. Si on continue l'étude plus loin, on arrive aux radiations ultra-violettes, auxquelles seule la plaque photographique est sensible. C'est le domaine des propriétés chimiques, qui s'étend jusqu'aux radiations de longueur d'onde 0,01 μ. Plus loin encore, c'est aux phénomènes électriques que l'on revient : aux rayons X, mais alors les radiations ont des propriétés entièrement différentes de celles des radiations précédentes. Elles ne sont plus déviées par les prismes et les lentilles, on ne peut les réfléchir par des miroirs, mais, par contre, elles traversent les corps solides. Leurs longueurs d'onde sont extrêmement petites, et le μ (millième de millimètre) devient une unité de longueur beaucoup trop grande ; il faut encore en prendre le millième, le $m\mu$, et on trouve alors des longueurs d'onde comprises entre 12 $m\mu$ et 0,5 $m\mu$. Sommes-nous arrivés à la limite? Pas encore, car on a montré que les rayons γ forment le prolongement de la série des rayons X, mais avec des longueurs d'onde si petites qu'actuellement il n'existe aucun moyen de les mesurer.

Les résultats que nous venons d'énoncer peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Radiations.	*Longueurs d'onde.*	*Propriétés.*
Oscillations électriques	Plusieurs milliers de mètres jusqu'à $0^{mm},2$.	Électriques.
Radiations infra-rouges	300 μ à 4 μ.	Calorifiques.
— lumineuses	4 μ à 0,8 μ.	Optiques.
— ultra-violettes	0,8 μ à 0,01 μ.	Chimiques.
Rayons X	12 $m\mu$ à 0,5 $m\mu$.	Électriques.
— γ	$< 0,5$ $m\mu$.	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On constate qu'entre les deux domaines de radiations, celui des radiations dites « lumineuses », parce que leur source est une source lumineuse, et celui des radiations X, il existe actuellement une région de discontinuité assez grande dont l'étude expérimentale sera certainement très difficile, soit qu'on considère les radiations qui s'y trouvent comme des rayons X très mous, ou au contraire comme des radiations de l'ultra-violet extrême. Dans les deux cas, ces radiations seront très absorbables et, pour mesurer leur longueur d'onde, les dispositifs utilisés en optique sont trop grossiers (par exemple les réseaux ordinaires), tandis que ceux qui permettent d'opérer sur les rayons X (les réseaux moléculaires) sont au contraire trop fins. Néanmoins, on a pu, qualitativement tout au moins, mettre en évidence l'existence de telles radiations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IX

LE PASSAGE DE L'ÉLECTRICITÉ A TRAVERS LES GAZ. L'ÉLECTRON

Conductibilité des gaz à la pression ordinaire. — L'étincelle. — Potentiel explosif. — Variations du potentiel explosif en fonction de la distance, de la pression, de la forme des électrodes. — Cas d'électrodes dissymétriques. — Cas d'une pointe et d'un plan. — L'arc électrique. — Passage de l'électricité dans les gaz raréfiés. — Tube de Geissler. — Les diverses régions d'un tube de Geissler. — Répartition du potentiel. — Tube de Crookes. — Rayons cathodiques. — Propriétés électriques et magnétiques des rayons cathodiques. — Actions mécaniques. — Les rayons X. — Propriétés. — Rayons secondaires. — Mécanisme des rayonnements précédents. — Le rapport $\frac{e}{m}$. — Principe des méthodes de mesure. — Constance du rapport $\frac{e}{m}$. — L'électron. — Détermination de la charge de l'électron. — L'effet photo-électrique. — Les phénomènes thermo-ioniques. — L'universalité de l'électron. — Phénomènes provoqués par les électrons dans les milieux gazeux. — Ionisation. — Conductibilité des gaz. — Matérialisation des électrons. — Expériences de Wilson. — Variations de la conductibilité des gaz ionisés. — Interprétation par la théorie des ions. — Ionisation par chocs. — Détermination directe de la charge de l'électron. — Expérience de Millikan. — L'inertie de l'électron. — Le rayon de l'électron. — L'électron, constituant fondamental de la matière.

L'étude de la ***conductibilité des gaz*** et des phénomènes qui s'y produisent lors du passage de l'électricité constitue un des chapitres les plus importants de l'électricité moderne. Elle présente non seulement un intérêt considérable par suite des applications auxquelles elle a donné naissance (rayons X, lumière froide, etc.), mais encore elle a fourni sur la constitution intime de la matière et de l'électricité les renseignements les plus précis que nous possédions à l'heure actuelle. Aussi allons-nous nous arrêter assez longuement à l'examen de cette question.

* * *

Commençons par les phénomènes qui se produisent à la pression ordinaire. On appelle ***étincelle*** le trait de feu qui se forme entre deux conducteurs dont les potentiels sont différents lorsqu'on les approche

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'un de l'autre. Cette étincelle peut avoir une forme rectiligne, se présentant sous l'aspect d'un épais trait de feu d'éclat à peu près uniforme lorsque les conducteurs sont très voisins. Si on les éloigne, le trait s'amincit et devient un zigzag. Enfin, si on les écarte encore plus, on voit apparaître l'aigrette, qui rappelle un petit arbre dont la tige porte des ramifications violacées déliées.

* * *

Le ***potentiel explosif*** est la plus grande différence de potentiel qui puisse exister entre deux conducteurs sans que l'électricité passe de l'un à l'autre. Si sa connaissance est fondamentale pour l'étude de l'étincelle, sa détermination est difficile, car beaucoup de facteurs agissent sur lui.

C'est ainsi, par exemple, que plus le gaz est sec, plus le potentiel explosif est élevé, parfois trois ou quatre fois plus grand que pour un gaz imparfaitement sec. D'autre part, la forme même des électrodes entre lesquelles jaillit l'étincelle influe également d'une façon considérable sur sa valeur.

Supposons d'abord que les électrodes soient des portions de sphères de grand rayon par rapport à la distance qui les sépare, de façon à ce que le champ entre elles soit sensiblement uniforme. On trouve les résultats suivants :

1° La nature du métal est sans action sur les résultats, sauf pour le magnésium et l'aluminium, pour lesquels le potentiel explosif est moindre.

2° Pour des *distances moyennes* des électrodes, le potentiel explosif V est une fonction linéaire de la distance l. On a :

$$V = a + bl.$$

Dans l'air, par exemple, l'expression est :

$$V_{volts} = 1\,170 + 32\,000\,l.$$

l étant exprimé en centimètres.

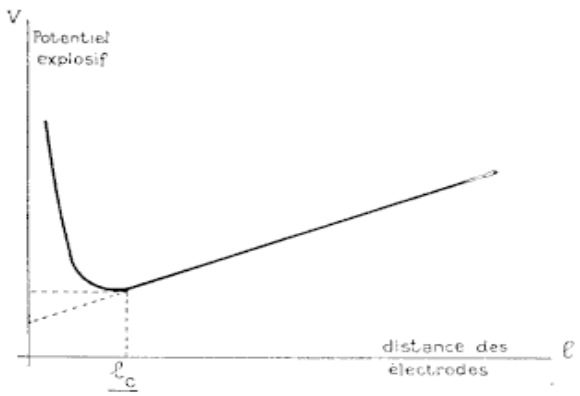


Fig. 117. — Variation du potentiel explosif en fonction de la distance des électrodes.

3° Pour des *distances très petites*, la loi précédente ne s'applique plus ; le potentiel explosif présente une valeur minima pour une certaine longueur l_c que l'on appelle *longueur critique* ; il est plus élevé pour les distances inférieures ou supérieures à l_c (fig. 117).

4° A la pression atmosphérique, la longueur critique est d'environ $0^{mm},01$, et par suite difficile à mesurer, mais, si on diminue la pression

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jusque vers 1 millimètre de mercure, l_c devient alors égal à 8 millimètres environ, et par conséquent est parfaitement mesurable. La longueur critique est en raison inverse de la pression.

On peut mettre en évidence la longueur critique en rapprochant les

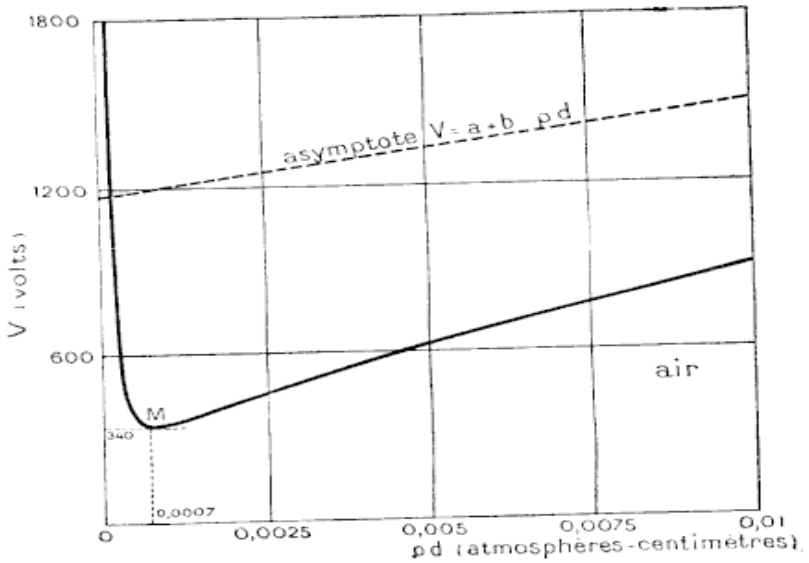


Fig. 118. — Variation du potentiel explosif en fonction de la distance.

électrodes jusqu'à ce que la distance entre leurs parties les plus rapprochées l'une de l'autre soit inférieure à la longueur critique. On constate alors que l'étincelle n'éclate pas entre ces points, mais elle suit un parcours incurvé, et éclate entre deux points dont la distance est égale à la longueur critique.

La figure 118 montre l'allure de la variation du potentiel explosif en fonction de la distance.

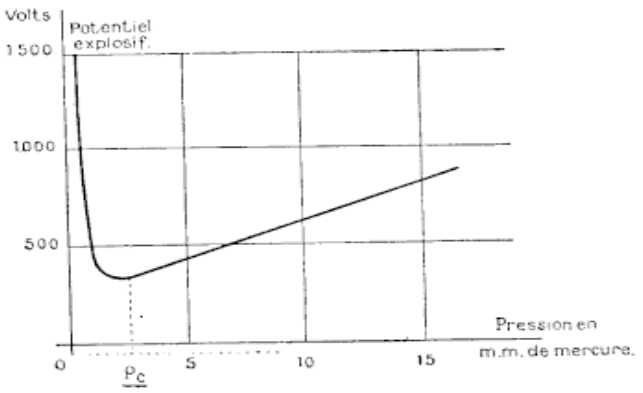


Fig. 119. — Variation du potentiel explosif en fonction de la pression.

5° La variation du potentiel explosif en fonction de la pression suit une loi analogue à la précédente. Sa valeur diminue quand la pression diminue, jusqu'à une certaine valeur p, que nous appellerons *pression critique*, et qui est fonction de la longueur de l'étincelle.

La figure 119 montre la variation du potentiel en fonction de la pression pour une distance d'étincelle de 3 millimètres environ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

6° Quand on modifie la longueur d'étincelle l, la pression critique p_c varie de manière que le produit lp_c reste constant. Ce produit est donc une caractéristique d'un gaz donné. Si l est exprimé en millimètres et p en millimètres de mercure, on a $lp_c = 5{,}7$ pour l'air.

7° Paschen a rassemblé les résultats précédents dans un loi qui porte son nom et que l'on peut énoncer : *le potentiel explosif est une fonction linéaire du produit pl* :

$$V = \alpha + \beta\, pl,$$

ou, ce qui revient au même : le potentiel explosif ne dépend que de la masse du gaz par unité de surface des électrodes.

Carr a montré que la loi de Peschen s'applique également en dessous de a pression critique. Par suite, si la relation entre le potentiel explosif et la pression est connue pour une longueur donnée d'étincelle, on peut le calculer pour toutes les autres longueurs.

* * *

Lorsque ***les électrodes sont dissymétriques***, ou que leurs surfaces en regard sont petites par rapport à leur distance, le champ qui existe entre elles n'est plus uniforme, et les lois précédentes ne s'appliquent plus.

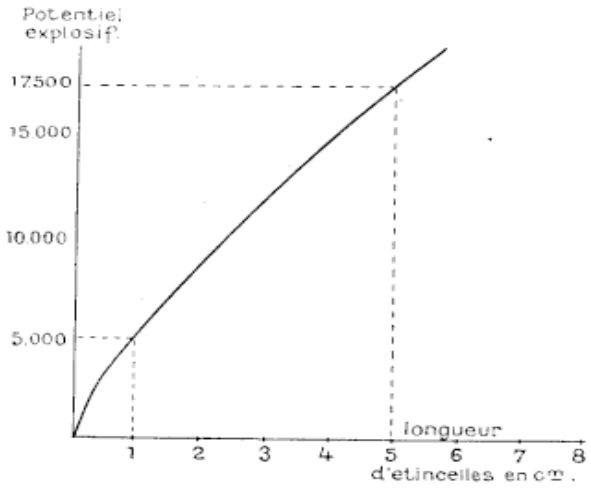


Fig. 120. — Potentiel explosif entre petites électrodes sphériques.

Si l'on prend des sphères de petit diamètre (1 ou 2 centimètres), la relation entre leur distance et le potentiel explosif est sensiblement linéaire quand les distances sont grandes, mais elle est beaucoup plus compliquée pour les courtes distances. La figure 120 donne l'allure de la courbe.

Plus les électrodes ont de petits rayons, plus le potentiel explosif correspondant à une longueur d'étincelle donnée est petit. Les nombres suivants, relatifs à une longueur d'étincelle de 1 mètre, permettent de fixer l'ordre de grandeur du phénomène.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	Entre plans indéfinis.	Entre sphères de diamètre			Entre pointes.
		30 cm.	10 cm.	5 cm.	
Potentiel explosif ...	316 000 V.	291 000 V.	219 000 V.	153 000 V.	59 500 V.

* * *

Un cas particulièrement intéressant est celui où l'une des électrodes est ***constituée par une pointe***, l'autre électrode étant une surface de grandes dimensions, plane par exemple.

Dans ces conditions, on constate que, pour que le conducteur qui porte la pointe se décharge, il faut qu'il soit porté à un *potentiel minimum* qui est une fonction de l'acuité de la pointe, du signe de la charge et de la pression et de la nature du gaz.

On trouve également que ce potentiel minimum est environ moitié moindre quand la pointe est négative que lorsqu'elle est positive. La variation en fonction de la pression est représentée figure 121.

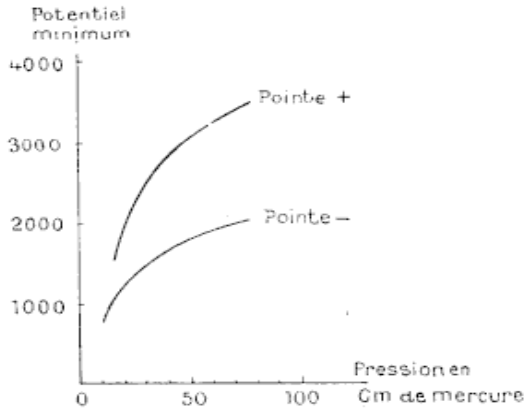


Fig. 121. — Potentiel disruptif entre pointe et plaque en fonction de la pression.

Quand le potentiel minimum est dépassé, il s'établit un courant entre la pointe et la plaque. Nous verrons que ces résultats ont été utilisés pour la construction de redresseurs de courants.

On sait que, lorsqu'un corps pointu est fixé sur un conducteur en communication avec une source d'électricité à haut potentiel, la pointe décharge partiellement le conducteur. C'est ce que l'on appelle le *pouvoir des pointes*, la déperdition étant accompagnée d'un déplacement d'air, qui constitue le *vent électrique*.

L'application usuelle du pouvoir des pointes est le ***paratonnerre***, longue tige verticale terminée par une pointe et reliée à l'autre extrémité à une bonne terre, réalisée le plus souvent, comme les terres de télégraphie sans fil, par une plaque de tôle de fer ou de cuivre enfoncée en terre dans un sol humide. Nous dirons quelques mots, dans le chapitre sur l'électricité et le magnétisme terrestres, des phénomènes électriques accompa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gnant les orages et contre lesquels le paratonnerre assure une protection assez efficace.

* * *

Lorsque deux conducteurs sont reliés à une source de potentiel assez importante pour assurer un débit d'électricité notable, si on rapproche leurs extrémités, à un certain moment une étincelle jaillit et un *arc* s'amorce. Le lecteur trouvera, au chapitre sur l'éclairage électrique, l'étude complète du phénomène de l'***arc électrique***, ainsi que son explication théorique. Cette étude devrait logiquement prendre place ici, mais nous avons préféré la rapprocher de celle, si importante, de ses applications pratiques.

* * *

L'étude de l'étincelle électrique nous a montré que l'air oppose au passage de l'électricité une très grande résistance qui ne peut être vaincue que par l'emploi de tensions très élevées. L'air conserve-t-il cette propriété dans tous les cas? En particulier, si on le raréfie dans un ***espace clos***, les phénomènes restent-ils identiques?

C'est à cette question que Gassiot, en France, en 1854 ; Plücker, à Bonn, en 1858, cherchèrent à répondre. Ce dernier eut la bonne fortune de s'adjoindre le concours du célèbre souffleur de verre Geissler, dont l'habileté a facilité considérablement les recherches.

Si on fait progressivement le vide dans un tube de verre cylindrique terminé à ses deux extrémités par des électrodes reliées extérieurement à une source à haut potentiel, on observe les apparences successives suivantes.

Au début, à la pression atmosphérique, la décharge passe sous la forme d'un trait de feu, accompagné d'un bruit sec caractéristique. Quand la

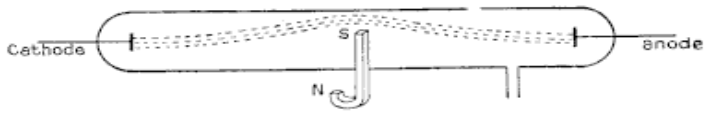


Fig. 122. — Passage de l'électricité dans un tube à vide. Action d'un aimant.

pression baisse, le bruit diminue et le trait de feu s'élargit progressivement en changeant de couleur, remplissant le tube d'une teinte violacée si on opère avec l'air. Cette modification commence à se produire aux environs de 10 millimètres de mercure de pression, et, quand on arrive à une pression de 1 millimètre, la lueur emplit toute la largeur du tube et, sur sa longueur, présente, suivant la région, des aspects différents. On a ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que l'on appelle un tube de Geissler. Si l'on approche un aimant du tube, on constate que la lueur est sensible à son action et s'incurve comme l'indique la figure 122 : le plan de la courbe est normal au plan passant par la trajectoire initiale et par le champ. En renversant le champ, la trajectoire change de signe.

Au contact de la cathode, et sur toute sa surface, on aperçoit une mince couche lumineuse, puis ensuite l'espace obscur de Crookes, la lumière négative et l'espace sombre de Faraday. Cet ensemble, même dans les

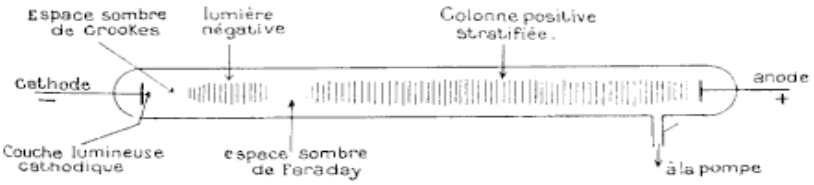


Fig. 123. — Les diverses régions d'un tube de Geissler.

tubes de grande longueur, ne dépasse guère quelques centimètres. Au delà se trouve la colonne positive qui aboutit à l'anode (fig. 123) et qui est stratifiée lorsque l'on opère avec un mélange de gaz.

* * *

La ***distribution du potentiel*** le long du tube est loin d'être uniforme

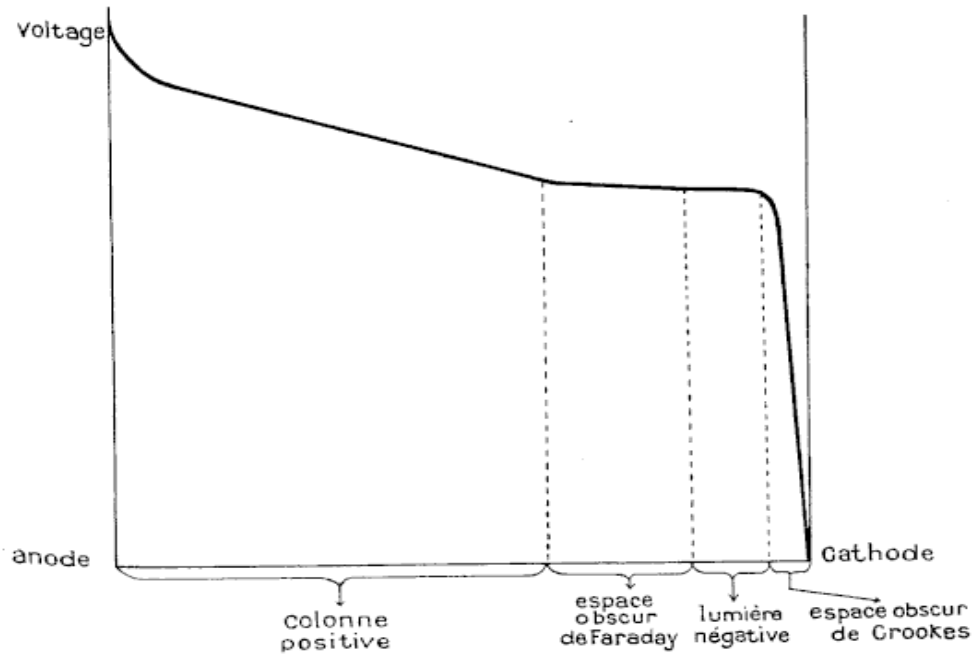


Fig. 124. — Répartition du potentiel dans un tube de Geissler.

et elle est caractérisée par une chute brusque au voisinage de la cathode,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui est de l'ordre de grandeur du potentiel explosif minimum dans le gaz qui remplit le tube (environ 340 volts pour l'air) et semble indépendante de la pression et de l'intensité du courant. La figure 124 donne l'allure de la distribution dans le cas d'un tube ne présentant pas de stratifications de la colonne positive (celles-ci se traduiraient par des ondulations de la courbe, les maxima de ces ondulations correspondant aux strates brillantes). La chute de potentiel est linéaire dans la colonne positive et le potentiel reste à peu près constant dans l'espace obscur de Faraday et dans la lumière négative.

On définit la résistance d'un tube de Geissler par le quotient de la force électromotrice appliquée par l'intensité du courant qui y circule. Elle dépend des conditions du tube (nature du gaz et pression).

Les tubes de Geissler ont reçu des applications industrielles très considérables, que nous étudierons au chapitre sur l'éclairage (tubes de Moore, de Claude, lampe à vapeur de mercure). Le lecteur y trouvera des renseignements détaillés sur le fonctionnement et les caractéristiques de ces appareils.

* * *

Si on ***continue à faire le vide dans le tube de Geissler***, on constate que la luminosité générale diminue peu à peu et qu'en même temps l'espace obscur de Crookes augmente considérablement et, pour des pressions de l'ordre du millième de millimètre de mercure, l'intérieur du tube est tout entier obscur. Parallèlement à ces changements d'aspect, la résistance du tube a décru au fur et à mesure que l'espace obscur de Crookes envahissait le tube, mais, lorsque tout le tube est obscur, si on continue à faire le vide, la résistance se remet à croître si rapidement que, pour les vides les plus parfaits que nous puissions réaliser, il est presque impossible de pouvoir produire une décharge dans le tube. On a réalisé ce que l'on appelle un tube de Crookes. Bien que tout l'intérieur du tube de Crookes soit obscur, il doit certainement s'y produire certains phénomènes

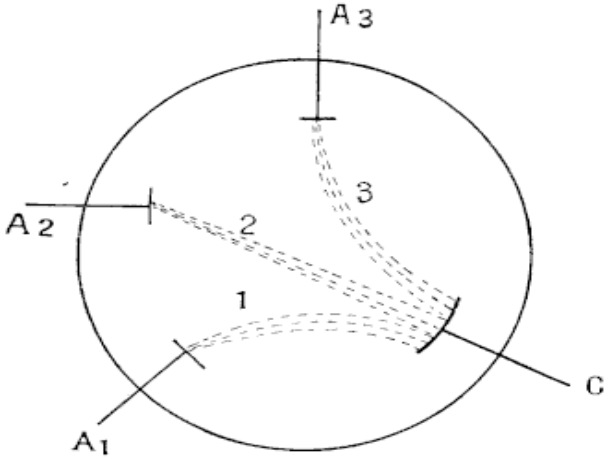


Fig. 125. — Trajet de la décharge dans un tube de Geissler.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En effet, tout d'abord on constate qu'il passe un courant, et ensuite on remarque, sur la paroi de verre opposée à la cathode, une lumière de phosphorescence des parois.

Sir William Crookes étudia systématiquement le phénomène et arriva à la conclusion que les phénomènes observés doivent être produits par quelque chose émané de la cathode et se propageant dans le tube à grande vitesse et auquel il donna le nom de *rayons cathodiques*.

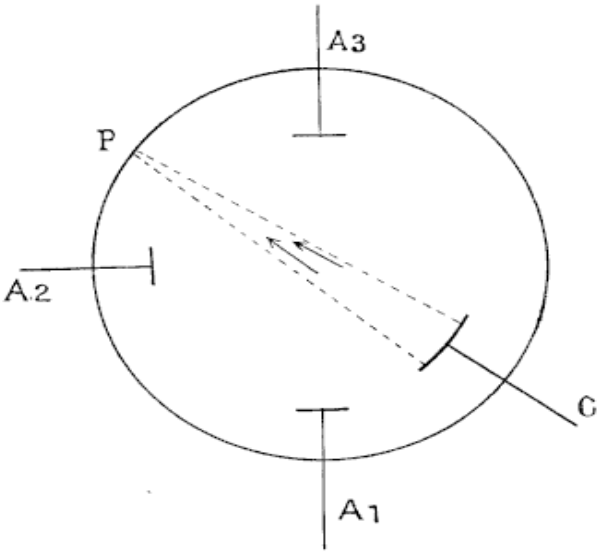


Fig. 126. — Faisceau cathodique dans un tube de Crookes.

* * *

Les propriétés principales de ces ***rayons cathodiques*** sont les suivantes :

1° *Les rayons cathodiques se déplacent toujours perpendiculairement à la cathode.* Tandis que, pour la décharge dans les tubes de Geissler, la lueur suit un trajet plus ou moins sinueux, mais allant toujours de l'anode à la cathode, dans les tubes de Crookes, le faisceau cathodique a une direction indépendante de la position de l'anode. C'est ainsi que, dans la figure 125, qui est relative à un tube de Geissler, si on a trois anodes disposées en divers points de l'ampoule, on a un des trois trajets 1, 2, 3, suivant l'anode employée ; dans la figure 126, qui se rapporte à un tube de Crookes, quelle que soit l'anode utilisée, on observe la trace du faisceau cathodique au même point P de l'enveloppe.

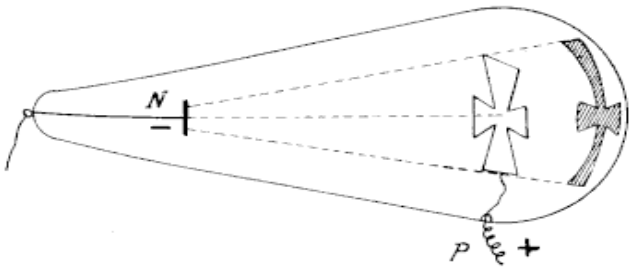


Fig. 127. — Ombre cathodique.

Si on donne à la cathode la forme d'un plan et que l'on interpose sur le trajet du faisceau une croix de mica, on observe l'ombre portée de cette croix sur les parois de verre (expérience de Coorkes, fig. 127).

Si, au contraire, la cathode est constituée par une portion concave de sphère, on peut arriver à concentrer en un point (le foyer du miroir) le faisceau cathodique qui en émane.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° *Les rayons cathodiques produisent des phénomènes calorifiques intenses.* — Si on place au foyer d'une cathode sphérique un morceau de platine, on constate sa fusion au bout d'un certain temps. De même, la partie de la paroi de l'ampoule de verre rencontrée par le faisceau s'échauffe, et l'ampoule peut se percer sous l'influence de la pression atmosphérique, par suite du ramollissement du verre.

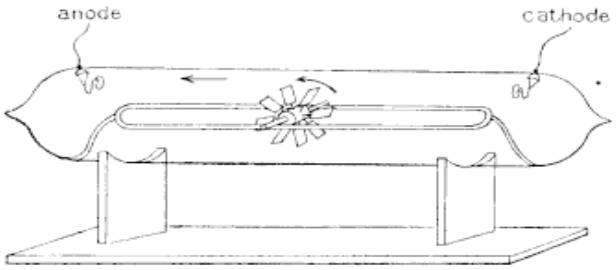


Fig. 128. — Action mécanique des rayons cathodiques.

3° *Les rayons cathodiques produisent des actions mécaniques.* — On place une petite roue à palettes de mica sur deux tiges parallèles de verre soudées dans une ampoule de Crookes (fig. 128). Les rayons cathodiques viennent frapper les palettes, la roue tourne et se dirige de la cathode vers l'anode.

4° *Le faisceau cathodique est sensible à l'action du champ électrique.* — Si on fait passer un faisceau cathodique entre deux plaques P_1, P_2 (fig. 129) et que l'on établisse une différence de potentiel entre les deux plaques, on constate que le faisceau est dévié vers la plaque positive ; le point de rencontre avec la paroi de l'ampoule, au lieu d'être en I, vient en I_1.

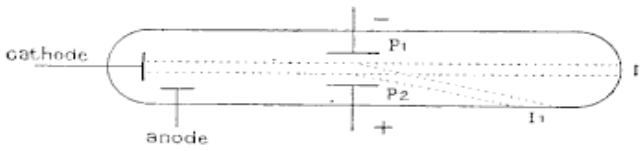


Fig. 129. — Déviation des rayons cathodiques par un champ électrique.

5° *Le faisceau cathodique est dévié par le champ magnétique.* — Il se comporte comme un courant, c'est-à-dire qu'il est dévié dans une direction perpendiculairement au plan formé par la direction du faisceau et le champ magnétique. La figure 130 montre le sens de la déviation.

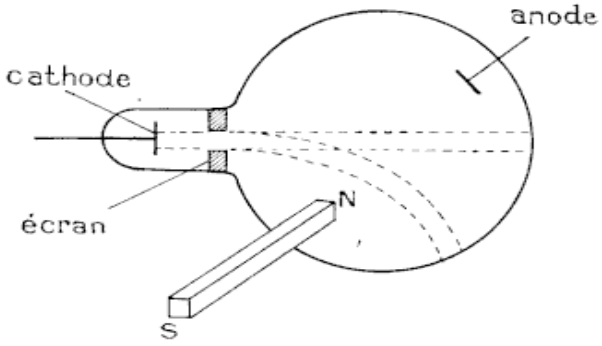


Fig. 130. — Action du champ magnétique sur les rayons cathodiques.

6° *Les rayons cathodiques transportent des charges négatives.* — Il suffit, pour s'en rendre compte, de les recevoir à l'intérieur d'un cylindre de Faraday A (fig. 131), relié à un électromètre et protégé des actions d'in-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fluence électrostatique par un second cylindre B qui l'entoure et est relié au sol. Le pinceau de rayons cathodiques limité par un écran E ne peut atteindre le cylindre A que lorsqu'il est dévié par un aimant. Tant qu'il ne tombe pas sur le cylindre, l'électromètre ne dévie pas ; sitôt qu'on l'amène à rencontrer le cylindre, l'électromètre dévie et indique une forte charge négative.

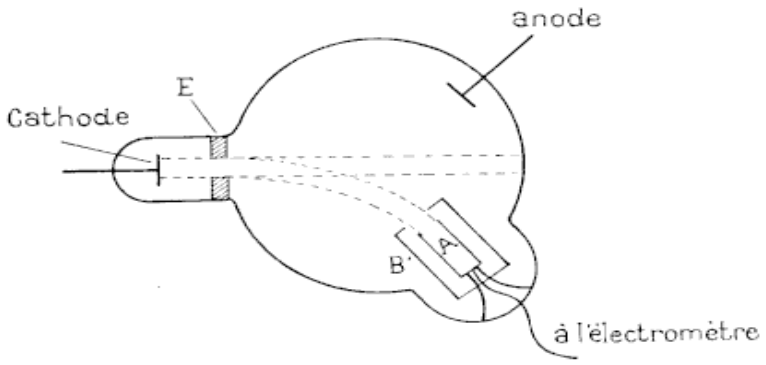


Fig. 131. — Mise en évidence de la charge des rayons cathodiques.

Les propriétés des rayons cathodiques ont permis de conclure qu'ils sont constitués par des corpuscules chargés négativement, expulsés de la cathode avec de grandes vitesses (10 000 à 100 000 kilomètres par seconde), sous l'influence du champ électrique qui produit la décharge.

* * *

Très longtemps, les ***rayons cathodiques***, malgré leurs remarquables propriétés, ne constituèrent qu'une curiosité de laboratoire. Ils semblaient emprisonnés dans le tube à vide qui leur donnait naissance, sans que l'on puisse espérer les observer à l'extérieur. Même dans le tube, ils sont déjà arrêtés par de très légers obstacles, et la paroi de verre de l'enceinte ne devient phosphorescente qu'intérieurement ; toute l'énergie des rayons paraît utilisée à la production de cette phosphorescence et à l'échauffement de la surface de verre.

Cependant, Lenard, s'appuyant sur les observations de Hertz, réussit, en remplaçant une partie de la paroi de verre par une mince feuille d'aluminium, à faire pénétrer dans l'atmosphère les rayons cathodiques qui jusque-là étaient restés enfermés dans le tube. On constata alors que ces rayons extérieurs provoquent la phosphorescence des corps, impressionnent les plaques photographiques et chargent d'électricité négative les corps qu'ils rencontrent. Ils sont d'ailleurs rapidement arrêtés par l'air, qu'ils rendent conducteur (ionisation).

* * *

Les résultats des travaux de Hertz et de Lenard avaient suscité un vif intérêt dans le monde des physiciens. Cet intérêt devint général au com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mencement de l'année 1896, à la suite de la découverte fortuite par Rœntgen d'un nouveau rayonnement, auquel il donna le nom de ***rayons X***, et qui est émis par tous les corps sur lesquels vient frapper un faisceau de rayons cathodiques.

Les rayons X se manifestent à l'observateur de deux manières principales : d'une part ils agissent sur les plaques photographiques, même à travers des écrans constitués par des substances opaques (métaux, bois, os, etc.) ; d'autre part, ils excitent la fluorescence des corps susceptibles de la donner. Nous verrons au chapitre sur l'électricité médicale les applications de la première propriété, ainsi que les moyens pratiques de produire les faisceaux de rayons X.

Les propriétés de ces rayons sont remarquables et totalement différentes de celles des rayons cathodiques qui leur donnent naissance.

1° *Les rayons X ne sont déviés ni par un champ magnétique ni par un champ électrique.*

Ils ne sont donc pas constitués par des particules électrisées en mouvement.

2° *Les rayons X se propagent en ligne droite et ne sont ni réfléchis ni réfractés par les corps qu'ils traversent.*

3° *La vitesse de propagation des rayons X est égale à celle de la lumière.*

Ces propriétés ont conduit à les considérer comme des ébranlements de l'éther, des ondes électromagnétiques, analogues aux ondes lumineuses, mais dont la longueur est extrêmement petite. En fait, Laüe, en 1912, en utilisant les réseaux cristallins dont les distances réticulaires sont de l'ordre de quelques unités Angström, a pu produire des phénomènes de diffraction qui ont permis de calculer la longueur d'onde des rayons X, qui est de l'ordre de quelques dixièmes d'Angström, c'est-à-dire que leurs fréquences sont de l'ordre de 10^{19}. Nous reviendrons plus loin sur ces résultats.

* * *

Lorsque les rayons X rencontrent un obstacle, ils provoquent l'émission d'un nouveau rayonnement, appelé ***rayons secondaires***.

Ce rayonnement est complexe et se compose :

1° Pour la plus grande part, de rayons X *secondaires* ;

2° D'une émission de particules électrisées négativement, se déplaçant à grande vitesse, c'est-à-dire de rayons cathodiques.

Les rayons X *secondaires* se subdivisent en deux groupes : les rayons X diffus et les rayons X caractéristiques.

Les rayons X diffus sont analogues aux rayons incidents et peuvent être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

considérés comme des rayons qui ont été déviés par le corps sur lequel ils sont tombés. Les diverses substances ne diffusent pas les rayons X de la même manière, et on ne connaît pas de relation entre la diffusion et le poids atomique du corps en expérience.

Les rayons X caractéristiques, comme leur nom l'indique, diffèrent suivant la nature du corps qui les produit et sont une fonction de son poids atomique. Leur importance est telle que nous y reviendrons en détail plus loin.

Quant aux *rayons cathodiques*, leur intensité d'émission est d'autant plus grande que le poids atomique du corps est plus élevé. Ils ne sont pas émis d'une façon uniforme dans toutes les directions, mais présentent un maximum d'émission perpendiculairement au faisceau de rayons X qui leur donne naissance. Leur vitesse ne semble dépendre ni de la nature du métal d'où ils sortent, ni de la distance qui sépare le tube à rayons X du corps générateur de rayonnement secondaire. Elle est égale à celle des rayons cathodiques produits dans le tube à rayons X (Beatty et Sadler).

* * *

Dans tout ce qui précède, nous avons simplement exposé les faits et les résultats expérimentaux, sans chercher à pénétrer ni leur ***mécanisme*** ni la ***nature intime des divers rayonnements décrits***. Nous allons au contraire maintenant nous attacher à résoudre ces problèmes, et nous verrons qu'ils ont fourni une abondante moisson de renseignements et d'informations sur la constitution de la matière et le mécanisme du passage de l'électricité à travers les gaz.

Tout d'abord, les propriétés des *rayons cathodiques* nous ont conduits à admettre qu'ils étaient constitués par des corpuscules chargés négativement et se déplaçant à grande vitesse. Le premier problème qui se pose est évidemment de déterminer les trois grandeurs caractéristiques de ces rayons, dans l'hypothèse émise, c'est-à-dire la *vitesse*, la *charge électrique* et la *masse* des projectiles qui les constituent.

La vitesse et le ***rapport de la charge électrique à la masse*** $\left(\frac{e}{m}\right)$ peuvent être mesurés avec précision par un grand nombre de méthodes. La détermination directe de e et de m est plus délicate.

Nous ne donnerons que le principe des méthodes les plus directes. Elles reposent toutes naturellement sur les propriétés des rayons cathodiques que nous avons énoncées plus haut. L'une des plus simples fait intervenir la déviation des rayons cathodiques par les champs magnétiques et électriques.

Voici comment on raisonne : Si e est la charge d'un corpuscule se dépla-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

çant avec la vitesse v, on peut l'assimiler à un courant ev. Dans un champ magnétique uniforme H, normal à la direction du déplacement, on sait qu'il se produira une force Hev normale au plan formé par la direction du courant et celle du champ magnétique. Or, un corps qui est soumis à une force constamment normale à sa trajectoire décrit un chemin circulaire, ainsi qu'on le démontre aisément en mécanique. L'accélération normale dans ce mouvement a pour expression générale $\frac{v^2}{r}$, r étant le rayon de la trajectoire circulaire, et la force agissant sur le corps est finalement $\frac{mv^2}{r}$. Elle n'est autre que la force Hev, et, en égalant ces deux expressions, on a :

$$\frac{mv}{e} = Hr.$$

Si donc on connaît H et r, on a une première valeur $\frac{mv}{e}$.

D'autre part, on sait que le champ électrique exerce également une influence sur les rayons cathodiques. Si un corpuscule de charge e se déplace entre deux plateaux électrisés créant un champ électrostatique V, la force à laquelle il est soumis est Ve. Si ce champ électrostatique est normal en direction au champ magnétique précédent, et si on s'arrange pour que son action annule celle du champ magnétique, la trajectoire de la particule cathodique étant alors rectiligne, on aura $Ve = Hev$, d'où $v = \frac{V}{H}$. Connaissant ainsi v et $\frac{mv}{e}$, on en tire la valeur de $\frac{e}{m}$.

Le dispositif expérimental est représenté schématiquement sur la figure 132. Les rayons émis de la cathode C sont limités à un pinceau rectiligne par deux blocs de métal A et B, dont l'un sert d'anode. Le pinceau passe dans un champ magnétique MM circulaire et dirigé normalement au plan de la figure, et au même endroit deux plaques E et F peuvent être portées à un haut potentiel électrostatique. Quand le champ magnétique s'exerce seul, le point d'impact du faisceau se déplace de P en Q. La mesure de PQ permet de calculer le rayon r de la trajectoire décrite sous l'influence du champ H. Ensuite, on ramène le point d'impact à sa position initiale en établissant entre les deux plaques une différence de potentiel convenable.

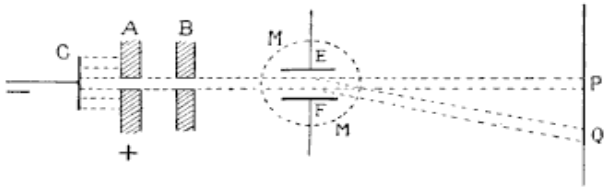


Fig. 132. — Mesure de $\frac{e}{m}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans une autre méthode, on s'appuie sur les propriétés thermiques des rayons cathodiques. A cet effet, on les recueille dans un cylindre de Faraday relié à un électromètre à quadrant ; si N corpuscules pénètrent dans le cylindre par seconde, Ne est la charge Q mesurée par l'électromètre à quadrant.

D'autre part, ces rayons sont arrêtés, à l'intérieur du cylindre collecteur, par une soudure d'un couple thermo-électrique relié à un galvanomètre sensible, de sorte que l'on peut suivre la variation de température de la

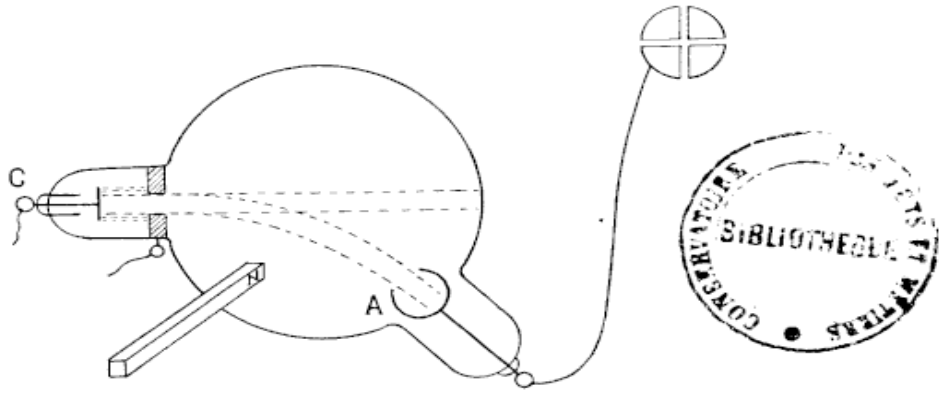


Fig. 133. — Mesure de $\frac{e}{m}$.

soudure par suite du bombardement par les projectiles cathodiques. Si l'on connaît la capacité calorifique du couple, on peut mesurer l'énergie W qu'il reçoit par seconde. Or, cette énergie est égale à l'énergie cinétique $N\frac{1}{2}mv^2$ de l'ensemble des projectiles arrêtés par la soudure. On a donc :

$$W = \frac{1}{2} N m v^2.$$

Comme :

$$Q = Ne,$$

en éliminant N entre ces deux relations, on a :

$$\frac{e}{m} = \frac{Qv^2}{2W}.$$

Si on dévie le faisceau cathodique par un champ magnétique comme dans la méthode précédente, on a :

$$\frac{mv}{e} = Hr,$$

et, en faisant les transformations algébriques :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$r \qquad \frac{2W}{QH_1} \qquad\qquad \frac{e}{m} = \frac{2W}{Q(H_1)^2}.$$

La figure 133 montre la disposition schématique de l'appareil expérimental. Quelle que soit la méthode employée, on trouve toujours, pour la valeur du rapport $\frac{e}{m}$, le même nombre, $1{,}76.10^7$ unités électromagnétiques. Quant à la vitesse, elle varie, suivant les conditions de l'expérience, entre des limites très grandes (10 000 à 100 000 kilomètres par seconde).

* * *

La ***constance du rapport*** $\frac{e}{m}$, quel que soit le gaz dans lequel on opère et ses conditions de pression, quel que soit le métal d'où sont expulsés les corpuscules électrisés, suggère l'idée fondamentale que, dans tous les cas, les particules ainsi décelées sont identiques entre elles et le rapport $\frac{e}{m}$ semble jouer un rôle analogue à celui de l'équivalent électrochimique en électrolyse. Si on se rappelle que, dans l'électrolyse, le rapport $\frac{e}{m}$ pour l'hydrogène est égal à $\frac{9649}{1{,}008} = 0{,}95 \times 10^4$, on voit que, pour les rayons cathodiques, l'équivalent électrochimique est environ 1 860 fois plus petit que celui de l'hydrogène. Trois alternatives se présentent alors :

1° Il n'y a aucune relation, d'une part, entre la masse de l'atome d'hydrogène et celle du corpuscule cathodique et, d'autre part, entre les charges portées par ces deux supports.

2° Les masses, au contraire, peuvent être du même ordre de grandeur, la charge portée par le corpuscule cathodique étant alors 1 860 fois plus faible que celle portée par un ion hydrogène dans l'électrolyse.

3° Enfin, les charges peuvent être les mêmes dans les deux cas, la masse du corpuscule cathodique étant alors 1 860 fois plus faible que celle de l'atome d'hydrogène.

Pour pouvoir choisir entre ces trois possibilités, il faut déterminer directement et séparément e et m, et non plus le rapport de ces deux quantités. Anticipant un peu sur les résultats des expériences que nous allons maintenant rappeler rapidement, nous dirons que la troisième hypothèse s'est trouvée vérifiée par les observations et que le nom d'***électron***, suggéré initialement par Sir Honey, a été adopté finalement pour désigner cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

charge fondamentale d'électricité dont l'existence a été découverte d'abord dans les rayons cathodiques.

Nous allons montrer que ***l'électron joue le rôle principal dans tous les phénomènes***, que c'est le constituant primordial de la matière et qu'il se manifeste dans un grand nombre de circonstances. A la lumière de cette conception nouvelle, il sera facile d'expliquer les phénomènes que nous avons mentionnés simplement au cours des pages précédentes, en particulier le phénomène si important de l'ionisation.

* * *

La détermination directe de la valeur de la charge e et de la masse m d'un corpuscule d'électricité négative n'est pas possible à réaliser à l'intérieur d'un *tube de Crookes*, mais heureusement, cet appareil *n'est pas le seul dispositif* que nous ayons à notre disposition pour produire les électrons. Nous allons en passer successivement plusieurs en revue.

Halbwachs trouve vers 1888 que, lorsque la lumière ultra-violette tombe sur une surface métallique chargée négativement, la surface perd rapidement sa charge, tandis qu'on ne constate aucun changement si elle est chargée positivement. C'est ce qu'on appelle l'***effet photo-électrique***. L'explication de ce phénomène est la suivante : la lumière ultra-violette arrache des corpuscules négatifs de la surface du métal, et ceux-ci, sous l'action répulsive exercée sur eux par la charge du métal, s'écartent de celui-ci, ce qui explique la perte. Au contraire, si la charge est positive, il y a attraction, et les électrons ne sont plus libérés.

J. J. Thomson a calculé quel était le rapport $\frac{e}{m}$ pour les corpuscules supposés émis dans cette hypothèse, et il a trouvé un nombre très voisin de celui fourni par les rayons cathodiques, ce qui permet d'admettre qu'ils sont identiques.

* * *

On sait depuis longtemps que l'air devient conducteur au voisinage d'un corps incandescent, mais c'est Richardson qui, en 1901, montra d'une façon définitive que ce phénomène est dû à l'émission de corpuscules négatifs qui furent identifiés avec les électrons.

L'émission se produit aussi bien dans l'air que dans le vide, mais elle est plus complexe dans le premier cas, par suite de l'ionisation de l'air et de l'émission de centres chargés positivement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces phénomènes ***thermo-ioniques*** jouent un rôle fondamental dans le mécanisme de l'arc électrique ; c'est sur eux que reposent les applications des kénotrons et des lampes à trois électrodes si employées maintenant en télégraphie sans fil et du tube Coolidge à rayons X. Aussi feront-ils l'objet d'un chapitre spécial. Au point de vue particulier qui nous intéresse ici, il suffit de dire que, dans cette émission thermo-ionique, on a encore trouvé que le rapport $\frac{e}{m}$ avait la même valeur que dans les rayons cathodiques de l'émission sous l'influence des radiations ultra-violettes.

* * *

Nous avons précédemment signalé que les rayons X donnent naissance à des électrons libres (rayons cathodiques secondaires). Nous verrons également que les rayons β des substances radioactives sont constitués par des particules négatives animées de grandes vitesses.

Si on rassemble les valeurs de $\frac{e}{m}$ trouvées pour les diverses émissions d'électricité négative que nous avons passées en revue, on obtient le tableau suivant :

Rayons cathodiques	1,769. 10^7	unités électromagnétiques.
Électrons photo-électriques	1,2. 10^7	—
— photo-ioniques.....	1,76. 10^7	—
Rayons β du radium.....	1,765. 10^7	—
— β du polonium	1,7. 10^7	—

Ces nombres ne diffèrent entre eux que par des quantités inférieures aux erreurs expérimentales ; aussi peut-on dire que, ***dans tous les phénomènes*** précédents, ***les particules négatives sont des électrons identiques entre eux***.

* * *

Nous sommes donc maintenant en possession de ***moyens divers pour produire des électrons***, non plus dans des tubes où règne le vide le plus parfait, mais dans l'air, dans les gaz à la pression atmosphérique. Quels sont les ***phénomènes*** que provoquent ces ***électrons*** dans le milieu gazeux dans lequel ils sont émis, c'est ce qui nous reste à étudier.

Dans les conditions ordinaires, les gaz sont de très mauvais conducteurs de l'électricité, un corps chargé ne perdant que très lentement sa charge. Sous certaines influences, rayons cathodiques, rayons X, corps chauds, substances radioactives, des centres chargés positivement et négativement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

apparaissent en nombres égaux dans les gaz. On dit alors que ceux-ci sont ***ionisés***, et les centres électrisés qui s'y trouvent sont appelés ions *positifs* et ions *négatifs*. Ces ions, sous l'action d'un champ électrique, se déplacent avec des vitesses proportionnelles à l'intensité de ce champ. Les centres négatifs sont attirés par l'anode, les centres positifs se déplacent vers la cathode. Nous avons donc un mécanisme analogue à celui du passage du courant dans un électrolyte.

Ces ions sont formés, à la température et à la pression ordinaires, par des agrégats de molécules neutres autour d'un centre chargé soit négativement (électron), soit positivement. Quand un ion négatif arrive sur l'anode, son électron passe dans le métal de l'anode qu'il charge négativement. L'ion positif, au contact de la cathode, prend un électron pour redonner une molécule neutre, et la cathode se charge donc positivement. Le courant se ferme alors dans le circuit reliant les électrodes par le libre déplacement des électrons dans le métal.

On peut montrer expérimentalement que la conductibilité des gaz est bien due à des centres électrisés des deux signes situés dans leur masse. Si, par exemple, l'ionisation est produite par une ampoule renfermant une substance radioactive placée à l'une des extrémités d'un tube dont l'autre ouverture aboutit dans la cage d'un électroscope (fig. 134), on constate, en aspirant l'air par le conduit C, que les feuilles de l'électroscope retombent,

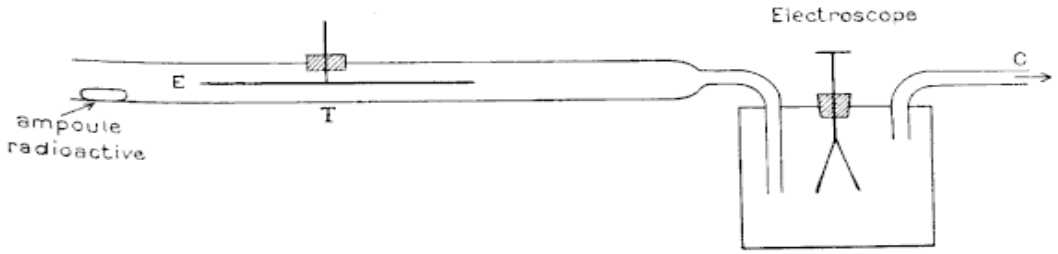


Fig. 134. — Mise en évidence du mécanisme de la conductibilité des gaz.

quelle que soit la charge qu'on leur ait communiquée. Si on place un tampon de coton à l'intérieur du tube T, l'électroscope n'est plus déchargé, ce qui prouve que ce qui rend l'air conducteur a été arrêté par le tampon-filtre. Si, dans le tube T, on place une électrode isolée E et qu'on établisse une différence de potentiel entre le tube T et l'électrode E, on constate que l'électroscope n'est pas influencé, ce qui montre que la cause de la conductibilité de l'air a été supprimée. Ces expériences très simples prouvent nettement que la conductibilité de l'air était due à des particules électrisées (puisqu'elles sont sensibles à l'action du champ électrique établi entre T et E) et que ces particules sont de deux espèces, portant les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

unes de l'électricité positive, les autres de l'électricité négative (puisqu'elles déchargent l'électroscope, quel que soit son signe), et de plus qu'il y a le même nombre de particules de chaque signe, puisque le gaz ne présente aucune électrisation globale.

* * *

On peut enfin ***rendre visibles les ions*** existant à l'intérieur d'un gaz par un artifice dû à Towsend et perfectionné par C. T. R. Wilson, en 1897, et qui a permis de mesurer avec précision la charge même de l'électron. Si on fait en effet détendre brusquement de l'air saturé de vapeur d'eau, l'air se refroidit et la vapeur d'eau devient sursaturante. Si l'on opère dans une atmosphère parfaitement pure et dépourvue de poussières en suspension, il ne se passe rien, mais, si l'on produit l'ionisation du gaz par un procédé quelconque, la vapeur d'eau se condense en un fin brouillard, *chaque ion prenant le rôle de centre de condensation.*

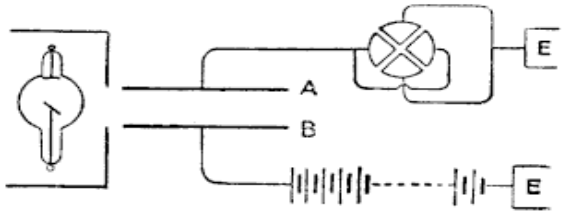


Fig. 135. — Mesure du courant d'ionisation.

* * *

Pour étudier la ***conductibilité des gaz ionisés***, on les place entre deux plateaux A et B entre lesquels on établit une différence de potentiel connue et on mesure le courant qui passe d'un plateau à l'autre (fig. 135). On constate qu'en augmentant la différence de potentiel entre les plateaux, le courant commence par croître en suivant à peu près la loi d'Ohm (portion OA de la courbe, fig. 136), puis ensuite son intensité tombe en dessous de celle correspondant à la loi d'Ohm (portion AB de la courbe), et finalement atteint une valeur maxima au-dessus de laquelle il ne croît plus lorsqu'on continue à augmenter la différence de potentiel (portion BC de la courbe). Cette valeur I_0 est ce qu'on

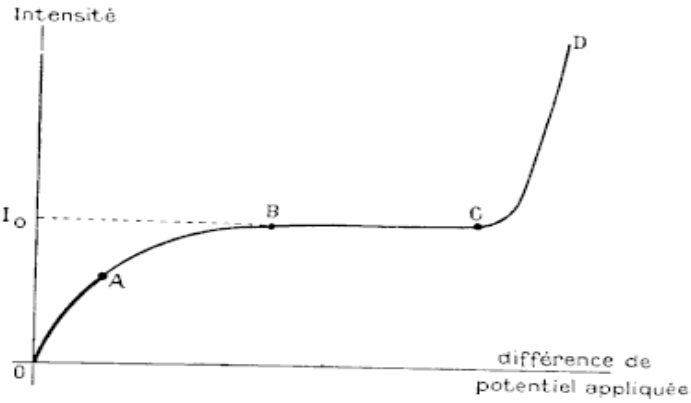


Fig. 136. — Variation du courant de conductibilité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appelle le ***courant de saturation***. Si la différence de potentiel devient très grande, brusquement l'intensité recommence à croître très vite, et on arrive, en D, au potentiel disruptif pour lequel l'étincelle jaillit entre les deux plateaux.

* * *

La théorie des ions permet d'expliquer très simplement les diverses allures de la courbe.

Au début, l'action ionisante produit, par seconde, un certain nombre d'ions des deux signes. Leur nombre total ne peut aller en augmentant indéfiniment, car, par suite de l'agitation des molécules, un certain nombre d'ions de signe contraire viennent à se rencontrer et se détruisent mutuellement en donnant une molécule neutre. Plus il y aura d'ions présents, plus il y en aura qui disparaîtront ainsi, et, à un certain moment, le nombre des ions qui disparaissent sera égal au nombre de ceux qui sont produits par l'action ionisante. Un équilibre statique se trouvera donc réalisé : le nombre d'ions par unité de volume est constant.

Si on établit un champ électrique faible entre les plateaux, les ions se déplacent vers eux suivant leur signe, mais très lentement, de sorte que l'état d'équilibre n'est pas modifié ; le courant résultant de la décharge des ions qui viennent au contact des plateaux est proportionnel à la différence de potentiel ; il suit donc la loi d'Ohm, nous sommes dans la région OA.

Lorsque le champ devient plus fort, les ions se déplacent plus rapidement et la concentration en ions dans le gaz ne peut plus être considérée comme constante, elle diminue, et le courant est en déficit par rapport à la loi d'Ohm (portion AB). Quand le champ devient encore plus intense, il arrive un moment où tous les ions produits sont attirés si rapidement vers les plateaux qu'ils n'ont plus le temps de se recombiner ; on a atteint le courant de saturation (portion BC). Ce courant mesure donc l'intensité de l'ionisation, puisque tous les ions produits sont captés par les plateaux.

* * *

Pour des champs encore plus considérables, un nouveau phénomène apparaît : c'est l'***ionisation par choc***. Les ions sont animés de si grandes vitesses par le champ électrique que, lorsqu'ils heurtent des molécules neutres du gaz, ils les font éclater à la façon d'une balle de fusil rencontrant un obstacle matériel. Les molécules ainsi rencontrées par un ion se séparent en deux : un électron négatif leur est arraché, et il reste un résidu positif. Ces nouveaux ions peuvent à leur tour en engendrer d'autres par le même

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mécanisme. Finalement, il existera alors entre les deux plateaux un nombre très grand d'ions, et le courant recueilli sera très intense (partie CD).

C'est par l'ionisation par choc que l'on explique la décharge disruptive éclatant entre deux conducteurs portés à un haut potentiel. Nous verrons (voir chapitre sur l'électricité et le magnétisme terrestre) qu'il existe toujours un certain nombre d'ions libres dans l'atmosphère. Sous l'action du champ intense existant entre deux conducteurs, ces ions se trouvent animés de grandes vitesses, ionisent par choc des molécules de gaz qui à leur tour en désagrègent d'autres ; le nombre d'ions entre les deux conducteurs augmente rapidement et est bientôt suffisant pour permettre à la décharge de passer de l'un à l'autre.

* * *

Nous avons vu que l'on pouvait rendre visibles les ions produits dans les gaz en leur faisant jouer le rôle de centres de condensation pour la vapeur d'eau sursaturée. C'est grâce à cette propriété, et en modifiant les conditions initiales des expériences, que Towsend, C. T. R. Wilson et finalement Millikan ont pu déterminer avec précision la ***charge portée par un électron***.

Nous ne dirons que quelques mots de ces expériences, dont le lecteur trouvera dans un autre volume un exposé plus complet (1).

Dans les premières expériences de Towsend, on provoquait la condensation de vapeur d'eau sur des ions. On mesurait la charge transportée par un centimètre cube de gaz et le poids total d'humidité, c'est-à-dire la masse totale des gouttelettes. Connaissant le volume des gouttelettes, supposées toutes de même dimension, que l'on déterminait par observation de la vitesse de chute du brouillard, on avait le nombre d'ions existant dans un centimètre cube. En divisant la charge par ce nombre, on obtenait la charge de l'électron.

Les dernières expériences de Millikan ont été effectuées en vaporisant un nuage de gouttelettes d'huile extrêmement fines dans un réservoir plein d'air. Celui-ci est ionisé par une substance radioactive. En observant au microscope la chute d'une gouttelette dans un champ intense, on constate que celle-ci remonte ou descend, suivant sa charge et le sens du champ. Chaque fois qu'elle rencontre un ion, sa vitesse de déplacement change brusquement ; si la gouttelette est négative par exemple, lorsqu'elle capte un électron, si elle descendait sous l'influence du champ, sa vitesse de chute augmente ; si elle rencontre ensuite un ion positif, sa charge diminue et sa

(1) Voir *Précis de chimie physique*, par H. VIGNERON (Masson, éditeur).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vitesse de chute est ralentie, etc. On conçoit, sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans le détail des calculs, que de la variation de vitesse de chute dans un champ donné lorsque la gouttelette capte un ion, on puisse mesurer la valeur de la charge supplémentaire qu'elle a acquise. On trouve ainsi pour e, charge de l'électron, la valeur $4{,}771.10^{-10}$ unité C. G. S. électrostatique ou $1{,}59.10^{-20}$ unité électromagnétique.

Quel que soit le procédé d'électrisation de la goutte employé, frottement, ionisation par un moyen quelconque ; quelle que soit la matière de la goutte, huile, glycérine, mercure, etc., dans tous les cas sa charge est un multiple entier de la charge de l'électron.

Ainsi donc, l'électricité statique se révèle comme constituée d'électrons, et le courant électrique n'est lui aussi autre chose qu'un déplacement d'une charge électrique le long d'un conducteur. En d'autres termes une charge électrique en mouvement est équivalente à un courant. *Ainsi se trouve établie expérimentalement l'origine unique de tous les phénomènes électriques, en même temps que la structure granulaire de l'électricité.*

* * *

Connaissant la charge de l'électron et d'autre part le rapport $\frac{e}{m}$, on en tire la valeur de sa masse $m = 0{,}9.10^{-27}$.

Comparons cette masse à celle de l'atome d'hydrogène ; on trouve qu'elle est environ $\frac{1}{1\,860}$ de celle de l'atome d'hydrogène, c'est-à-dire très petite par rapport à lui, et *a fortiori* par rapport à la masse d'un atome d'un autre élément.

On admet aujourd'hui que l'***inertie de l'électron*** est d'origine uniquement électromagnétique, c'est-à-dire que c'est un atome d'électricité négative sans support matériel. On suppose également qu'il a la forme sphérique, l'électricité étant répartie uniformément à sa surface. Moyennant ces hypothèses, on calcule le ***rayon de l'électron***, et on trouve la valeur $1{,}9 \times 10^{-13}$ centimètre.

Remarquons d'ailleurs que les résultats numériques précédents ne sont valables que pour des électrons animés de vitesses faibles par rapport à la vitesse de la lumière. Le calcul complet montre que, lorsque la vitesse devient de l'ordre de celle de la lumière, la masse de l'électron augmente, c'est-à-dire que le rapport $\frac{e}{m}$ diminue. La loi de variation de $\frac{e}{m}$ en fonction de la vitesse a été vérifiée d'une façon remarquable pour des vitesses

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 150 000 kilomètres par seconde (rayons cathodiques rapides) et de 290 000 kilomètres par seconde (rayons β des substances radioactives). Le résultat le plus intéressant à signaler ici est que la ***masse apparente de l'électron*** tend vers l'infini quand la vitesse de déplacement tend vers celle de la lumière, c'est-à-dire qu'il faudrait dépenser un travail infini pour communiquer à l'électron une vitesse égale à celle de la lumière. Ici encore cette vitesse apparaît comme la limite absolue des vitesses, de même que, dans un autre domaine, le zéro absolu apparaît comme la limite inférieure infranchissable des températures.

*
* *

Puisque les électrons, quelle que soit leur origine, ont toujours les mêmes propriétés, puisqu'on peut les extraire à partir d'éléments chimiques de nature quelconque, la conclusion qui s'impose est que ***ces électrons sont un des constituants fondamentaux de la matière***.

Un atome d'un corps quelconque se compose alors d'un noyau central chargé positivement, autour duquel gravitent des électrons en nombre fini et déterminé par les propriétés chimiques du corps. Comme l'atome est globalement neutre, s'il y a N électrons périphériques, la charge positive du noyau central est $+ Ne$.

Les difficultés se présentent lorsque l'on cherche la configuration du système planétaire ainsi constitué. Nous verrons que, si l'on peut déterminer avec exactitude le nombre N d'électrons (et de charges positives) composant un atome d'un corps donné, on ne sait ni comment la charge positive est répartie au noyau (couche uniforme ou amas granulaire), ni comment les électrons se disposent autour de lui (1).

Le mouvement de l'électricité dans un conducteur est dû au déplacement des électrons dans ce conducteur. Un courant électrique est donc un flot d'électrons dirigé en sens inverse du sens admis par convention pour sens du courant. A l'état neutre, les électrons sont *libres* et se déplacent, sans qu'aucune force s'y oppose, dans les espaces intermoléculaires et sont animés de mouvements désordonnés analogues à ceux des molécules des gaz.

Lorsque la température s'élève, l'agitation des électrons augmente, et certains d'entre eux peuvent arriver à s'échapper à l'extérieur ; si un champ électrique les éloigne de la surface du conducteur, on obtient un courant. Cette « évaporation » électronique sera étudiée plus en détail à propos des phénomènes thermo-ioniques.

(1) Pour l'étude des divers modèles atomiques, voir *Précis de Chimie physique*, par H. VIGNERON (Masson, éditeur).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand un champ électrique E est créé dans le métal, chaque électron est soumis à une force E*e* qui lui imprime un déplacement parallèle au champ et de sens opposé. Sous l'action de cette force constante, la vitesse de déplacement de l'électron s'accélère, mais alors il vient buter contre un autre électron ou un atome qui le renvoie dans une direction quelconque. Ces chocs transforment en chaleur une partie de l'énergie cinétique de l'électron ; le conducteur s'échauffe.

On voit donc que l'électricité positive se confond avec la matière, tandis que l'électricité négative, l'électron, a une existence propre, de sorte que la théorie moderne de la nature de l'électricité fait revivre l'ancienne théorie du fluide unique d'Œpinus, élargie et singulièrement plus féconde. Grâce aux précisions que nous possédons, elle permet de donner une explication des phénomènes dont les conducteurs sont le siège qui rentre dans le cadre général des théories sur la constitution de la matière. A la notion de dissociation des molécules de Clausius et Arrhénius, vient maintenant se juxtaposer la dissociation de la molécule elle-même en un électron et un résidu positif.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

L'ÉMISSION D'ÉLECTRICITÉ PAR LES CORPS INCANDESCENTS

Actions électriques des solides incandescents. — Effet Edison. — Électro-vaporisation. — Expériences de Dupré. — Courants thermo-ioniques. — Émission par les sels chauffés. — Soupape de Fleming. — Kénotrons. — Courbes caractéristiques. — Effet rectifiant. — Courant limite. — Pliotrons. — Tube de Coolidge. — Audion de Forest. — Courant de plaque. — Courant de grille. — Réalisation pratique de l'audion. — Effet amplificateur. — Effet détecteur. — L'audion comme générateur d'oscillations entretenues. — Emploi de substances spéciales. — Limite de fonctionnement.

Il y a plus de deux cents ans que l'on sait que l'air, au voisinage des corps chauds, a la propriété de conduire l'électricité. Au XVIIe siècle, un grand nombre de physiciens, Du Fay, Du Tour, Watson, Canton, Priestley, Cavallo, étudièrent ce phénomène. Puis l'oubli se fit, et c'est seulement en 1853 que Becquerel ramena l'attention des savants sur lui en montrant qu'au rouge blanc, l'air n'est plus un isolant. Un peu plus tard, en 1873, Guthrie observa qu'une boule de fer chauffée au rouge sombre pouvait rester chargée négativement, mais non pas positivement, et qu'à des températures supérieures, les charges des deux signes disparaissent également rapidement. Si ce phénomène peut sembler, à première vue, intéressant pour des savants, occupés à observer les particularités des actions physiques, il ne pouvait venir à l'esprit de personne que son étude conduirait à des résultats pratiques si importants qu'ils ont par exemple complètement modifié la technique des rayons X et augmenté la sensibilité des réceptions de télégraphie sans fil dans des conditions incroyables. L'émission d'électricité par les corps chauffés est une remarquable illustration de l'utilité de la science pure. Lorsque le savant découvre un phénomène nouveau et en formule les lois, il est impossible de prévoir les répercussions pratiques et l'influence qu'il peut avoir sur la technique industrielle.

* * *

Elster et Geitel commencèrent vers 1880 l'examen systématique des ***actions électriques des solides incandescents***. Ils constatèrent que le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

potentiel d'une plaque disposée au voisinage d'un fil chauffé à la pression atmosphérique est d'abord positif, puis croît, passe par un maximum au rouge et descend ensuite jusqu'à zéro au rouge blanc. Si on opère à basse pression, les résultats sont analogues, mais, après s'être annulé, le potentiel devient *négatif* et prend des valeurs croissantes avec la température. Tout se passe donc comme si les fils émettaient de l'électricité positive à basse température et de l'électricité négative aux températures élevées.

Quelques années après ces premières expériences, Edison, en 1884, étudiant la lampe à incandescence qu'il venait de créer, découvrit un phénomène analogue aux précédents et qu'on appelle l'***effet Edison***. Voici en quoi il consiste.

Entre les filaments d'une lampe à incandescence au carbone, on dispose une plaque métallique P (fig. 137) reliée au circuit d'utilisation à travers un galvanomètre. Si le galvanomètre est branché entre l'électrode et l'extrémité positive du filament (cas de la figure), on constate le passage d'un courant allant dans le sens de la flèche, du filament vers l'électrode à l'extérieur de l'ampoule. Si on branche le galvanomètre entre l'électrode isolée et l'extrémité négative du filament, on n'observe aucun courant sensible.

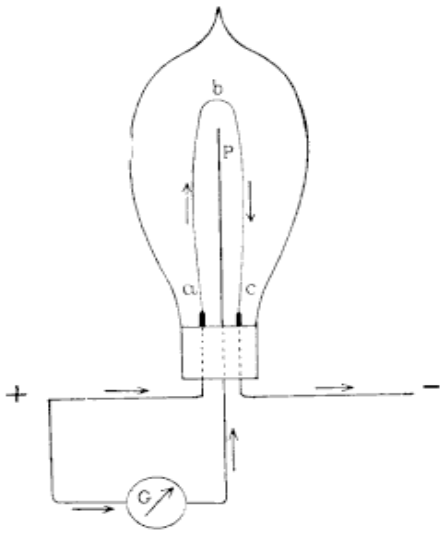


Fig. 137. — Effet Edison.

L'explication est la suivante : le potentiel de la plaque P est sensiblement celui existant à la borne du filament ; il est donc supérieur au potentiel des points du filament, particulièrement de ceux situés au voisinage de la borne négative. Il existe donc un champ électrostatique allant de la plaque au filament et les particules chargées négativement émises par le filament incandescent sont attirées par la plaque, et il y a courant. Évidemment, si l'explication précédente est exacte, la partie *bc* du filament doit être la plus active et jouer le rôle prépondérant dans le phénomène. C'est ce qu'a constaté Fleming : en l'entourant d'un cylindre métallique ou isolant, le courant devient presque nul.

On constate un effet Edison beaucoup moins intense lorsque le filament de charbon est remplacé par un filament de platine. Avec le charbon, on arrive à recueillir des courants de 0,4 ampère dans un vide de $\frac{1}{600}$ de millimètre de mercure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le courant est transporté, non par des atomes de carbone ou de platine électrisés (malgré le dépôt qui provoque le noircissement des parois de l'ampoule), mais par des électrons, ainsi que le montra J. J. Thomson en calculant le rapport $\frac{e}{m}$ pour les particules négatives émises.

* * *

L'émission d'électricité par les corps chauffés dans l'air ou les gaz aux pressions notables est un phénomène complexe, et ses caractéristiques sont moins nettes. Aussi est-il préférable d'opérer ***dans le vide*** le plus parfait que l'on puisse réaliser ; les lois de l'émission sont alors très nettes et très simples. Le dispositif expérimental est représenté schématiquement figure 138. Un filament de tungstène F est placé dans une ampoule dans laquelle le vide a été aussi poussé que possible. Il est chauffé par une batterie d'accumulateurs C, commandée par un rhéostat de réglage R. En face du filament, on a disposé une plaque P reliée à un milliampèremètre A, et, à l'aide d'une batterie d'accumulateurs B, on peut établir entre le filament et la plaque une différence de potentiel V de l'ordre de 40 à 80 volts déterminant un champ électrique E orienté de la plaque vers le filament.

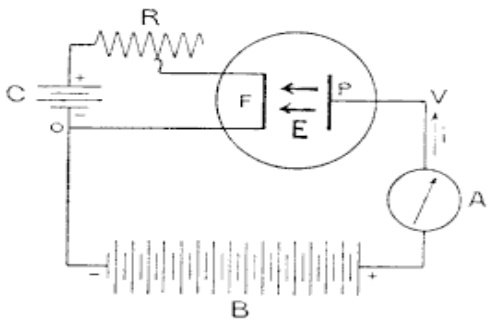


Fig. 138. — Électrovaporisation dans le vide.

Si on laisse le *potentiel* V *constant* et qu'on augmente la *température*, on constate que le courant de plaque augmente extrêmement rapidement. C'est ainsi que, dans une expérience sur un filament de sodium, le courant croît de $1{,}8.10^{-9}$ ampère à $1{,}3.10^{-2}$ ampère quand la température s'élève de 217° à 427°, c'est-à-dire qu'une élévation de température de 200° suffit pour rendre le courant dix millions de fois plus intense. En opérant avec un filament de tungstène à haute température (2 500° par exemple), il est facile d'obtenir des courants de plaque de plusieurs dizaines de milliampères, correspondant à plusieurs ampères par centimètre carré de la surface du filament. Il y a émission d'un torrent d'électrons (10^{19} par centimètre carré et par seconde), véritable ***vaporisation*** d'électricité dont la loi est d'ailleurs analogue à la formule de vaporisation de Dupré, et de la forme

$$i = A \sqrt{T} \exp. \left(-\frac{b}{T}\right).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le coefficient A ayant une valeur énorme (de l'ordre de 10^{26}) et b étant également très grand (10^4).

Sous l'influence du champ électrique, les électrons se dirigent vers la plaque en acquérant une énergie cinétique qui disparaît au moment du choc sur la plaque. Si celle-ci n'est pas suffisamment épaisse ou convenablement refroidie, elle s'échauffe et peut même être fondue.

Supposons au contraire que l'on laisse la *température du filament constante* et que l'on fasse *varier le potentiel* entre le filament et la plaque. On constate que l'intensité commence par croître plus vite que la différence de potentiel (partie OA, fig. 139), puis l'intensité suit approximativement la loi d'Ohm (partie AB), ensuite est déficiente par rapport à la loi d'Ohm (partie BC), et finalement atteint une valeur *de saturation* (partie CD). A chaque température du filament correspond une valeur bien déterminée du courant de saturation.

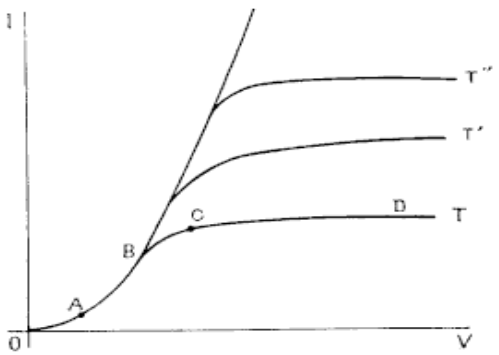


Fig. 139.

L'explication est très simple : sous l'influence d'un champ faible, les électrons émis par le filament, qui ont une grande vitesse, peuvent seuls échapper à l'attraction électrostatique que crée autour de ce filament la buée d'électrons qui en émanent. Au fur et à mesure que la différence de potentiel augmente, le champ est plus intense et détruit peu à peu le champ électrostatique antagoniste, le nombre des électrons qui peuvent s'éloigner du filament augmente, et finalement, lorsque le champ est assez intense, *tous* les électrons émis sont attirés sur la plaque : on a atteint la saturation.

* * *

Nous avons dit que, d'après les expériences fondamentales d'Elster et Geitel, il existe une émission d'électricité positive par les métaux chauffés dans le vide, indépendamment de la présence d'une atmosphère gazeuse.

Cette émission diminue d'ailleurs rapidement avec le temps, et il semble, d'après les nombreuses expériences de Richardson, Thomson, etc., qu'elle soit due à des gaz occlus dans le métal ou a des impuretés qui se décomposent en donnant des ions, en particulier les métaux alcalins et leurs sels.

Quand le filament a été chauffé dans le vide pendant longtemps, il perd sa propriété d'émettre des ions positifs.

Les courants thermo-ioniques d'ions positifs suivent une loi analogue à celle des courants d'électrons.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les ***sels chauffés*** peuvent également donner lieu à une émission d'ions positifs, ainsi que l'ont constaté J. J. Thomson en recouvrant des électrodes de dépôts salins et Arrhénius en volatilisant des sels dans la flamme d'un bec Bunsen. Même en l'absence de sels, les flammes contiennent des ions : on peut le montrer expérimentalement en déchargeant un corps chargé par léchage par une flamme. Le courant présente les mêmes caractéristiques qu'un courant d'ionisation, sans pourtant que l'on arrive au courant de saturation.

Quand on chauffe un sel dans le vide ou dans une atmosphère gazeuse, le courant de saturation varie avec le temps. Il croît d'abord, passe par un maximum, puis décroît suivant une loi exponentielle. On explique ces résultats en admettant que l'émission est due à la décomposition d'une substance contenue dans le sel.

Dans les flammes, en disposant deux électrodes entre lesquelles on crée un champ électrostatique l'une au-dessus de l'autre, la source de sel étant placée entre elles, on peut déterminer la vitesse des ions formés en ajustant le champ de façon à contre-balancer la vitesse dont ils sont animés par le mouvement ascendant de la flamme (fig. 140). Si l'électrode supérieure est positive, la présence du bloc de sel ne modifie pas le courant, à moins que le champ ne soit suffisamment intense pour attirer vers le bas les ions positifs avec une vitesse un peu supérieure à la vitesse avec laquelle la flamme les entraîne vers le haut. Wilson a trouvé que, dans un champ électrostatique dont le gradient est de 1 volt par centimètre, la vitesse des ions négatifs est d'environ 1000 centimètres pour seconde pour une température de 2 000°. La vitesse des ions positifs par les sels des métaux alcalins est d'environ 62 centimètres par seconde. En utilisant un courant d'air chaud, à 1 000°, les vitesses tombent à 26 centimètres pour l'électron et $7^{cm},2$ pour les ions positifs des métaux alcalins et $3^{cm},8$ pour les ions positifs des métaux alcalino-terreux. Ces faibles vitesses semblent indiquer que les ions entraînent un cortège d'atomes neutres; l'égalité de vitesse pour les ions des différents atomes montre que l'importance de ces cortèges dépend de la charge de l'ion. Ils sont plus grands dans le cas des ions divalents que dans le cas des ions monovalents.

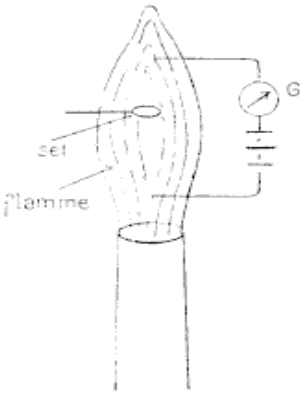


Fig. 140.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

L'émission d'électricité par les ***métaux chauffés*** a donné lieu à un grand nombre d'applications extrêmement importantes et que nous allons passer en revue maintenant.

La ***soupape de Fleming*** (1904) est la première application pratique des phénomènes thermo-ioniques. Elle a pour but de redresser les courants alternatifs de basse et haute fréquence.

De nombreux dispositifs ont été proposés; ils consistent tous en une lampe ordinaire à filament de carbone F pourvue d'une électrode isolée P (fig. 141) qui peut être un filament de carbone, une lame métallique plate ou cylindrique. Quand le filament F est porté à l'incandescence, le courant ne peut passer dans le galvanomètre G (ou le circuit extérieur) que si la plaque P est portée à un potentiel supérieur à celui de l'extrémité négative du filament, c'est-à-dire quand une charge négative s'écoule du filament vers la plaque.

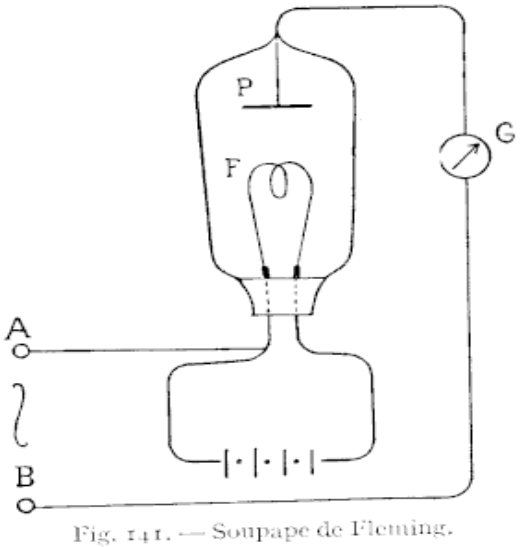


Fig. 141. — Soupape de Fleming.

L'espace compris entre F et P possède donc une conductibilité *unilatérale* ; si A et B sont reliés à un circuit alternatif, une demi-période de courant peut seule passer : l'ampoule fonctionne comme *soupape*.

Le rendement de l'appareil peut être considérablement amélioré en remplaçant le filament de charbon par un fil de tungstène entouré d'une électrode cylindrique en cuivre. On peut, en effet, porter le fil de tungstène à une température beaucoup plus élevée, ce qui assure une émission d'électrons beaucoup plus intense. On pousse également le vide, de façon à avoir une émission purement électronique, non compliquée par les phénomènes d'ionisation. Ces soupapes peuvent servir à redresser les courants de haute fréquence comme ceux employés en télégraphie sans fil. On peut également les construire de façon à pouvoir redresser les courants alternatifs industriels. On les appelle alors lampes-valves ou ***kénotrons***.

* * *

Dans les *kénotrons*, la puissance consommée pour échauffer la plaque par le bombardement des électrons peut atteindre plusieurs centaines de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

watts ; le filament est en général un fil de tungstène enroulé en hélice, placé dans l'axe d'un cylindre à parois très épaisses afin de limiter son

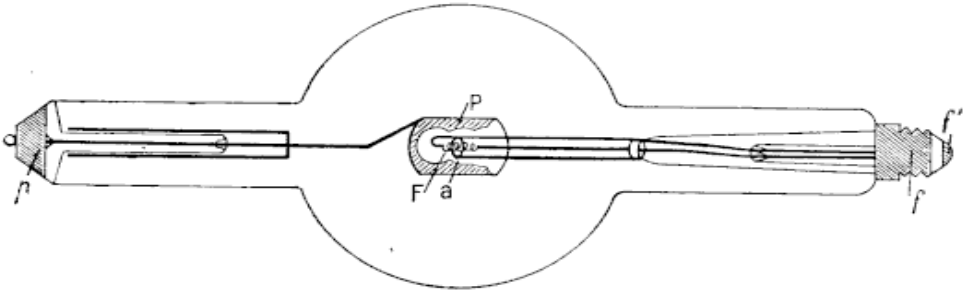


Fig. 142. — Kénotron.

échauffement. Si la surface totale du filament est assez grande, on peut atteindre des courants redressés d'un ampère sous 200 volts. On peut également redresser des courants de plusieurs milliampères sous des potentiels alternatifs de 200 000 volts. Dans ce dernier cas, les forces électrostatiques entre les parties actives du kénotron sont considérables et, pour éviter que le filament ne soit déformé et amené au contact de la plaque, on l'entoure d'un anneau *a* (fig. 142) réuni métalliquement à l'une de ses extrémités ; dans ces conditions, la différence de potentiel plaque-filament est presque entièrement localisée dans l'espace intérieur à l'anneau de garde et le champ au voisinage du filament est notablement réduit.

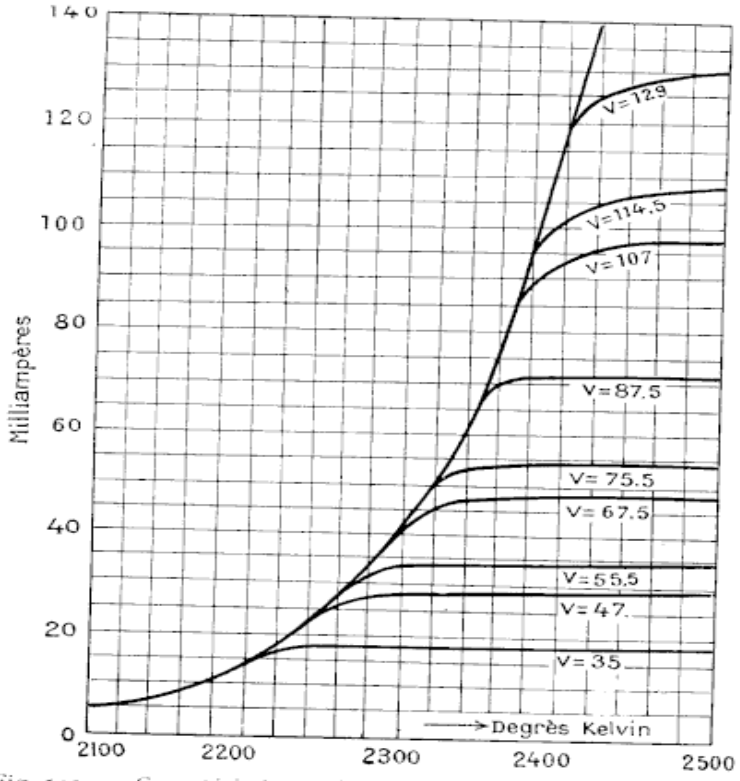


Fig. 143. — Caractéristiques d'un kénotron type pour courants intenses.

Deux bornes *f* et *f* sont reliées au secteur alternatif ; le circuit de chauf-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fage a une borne commune *f'* avec le circuit haute tension, ce qui nécessite des précautions spéciales d'isolement de l'installation.

La figure 143 donne les caractéristiques d'un kénotron type pour courants plutôt intenses. Les courbes indiquent les courants supportés par le kénotron, pour différentes températures de filament à divers voltages entre les électrodes.

Ainsi, si la température du filament est de 2 400°, le courant maximum qui peut être obtenu avec un voltage déterminé est d'environ 0,112 ampère. Si cependant la résistance du circuit est capable de maintenir le courant à une valeur plus basse, 0,054 ampère par exemple, nous voyons alors par les courbes que la chute de voltage dans le kénotron sera de 75,5 volts, le voltage restant, qui peut atteindre plusieurs milliers de volts, étant absorbé dans le circuit en série avec le kénotron. Pour des capacités de débit allant jusqu'à 600 milliampères, on peut employer soit une anode cylindrique avec un filament descendant dans l'axe, soit un filament en W placé entre deux plaques parallèles. Le premier type peut être d'un meilleur rendement en ce qui touche aux pertes dues à l'effet de saturation.

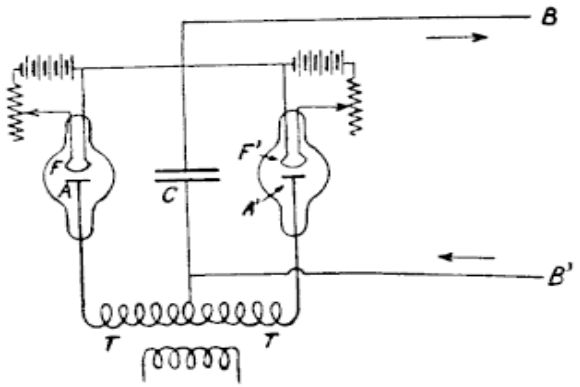


Fig. 144. — Montage de deux kénotrons pour modification des deux ondes du courant alternatif.

Là où l'on a à redresser des courants de 100 milliampères et moins, si le voltage maximum du courant redressé ne dépasse pas 15 000 volts, le type à chapeau de molybdène est mécaniquement plus simple et d'un très bon rendement.

Pour les voltages jusqu'à 100 000 volts, on a reconnu qu'une anode cylindrique était très pratique et d'un bon rendement.

La figure 144 montre le montage de deux kénotrons permettant de redresser les deux demi-ondes d'un courant alternatif, avec connexions au point central du transformateur.

* * *

Dans une décharge d'électrons purs, si la température du filament est augmentée, on arrive toujours à un point où le courant est limité par la charge de l'intervalle compris entre les électrodes. Dans ces conditions,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une petite fraction seulement des électrons s'échappant de la cathode atteint l'anode, parce qu'une partie d'entre eux est repoussée par les électrons dans l'espace, retourne à la cathode et est absorbée par elle. D'après ce point de vue, il est évident que, si un corps chargé négativement est placé dans l'intervalle entre l'anode et la cathode, le nombre d'électrons qui retourneront à la cathode va croître, de sorte que le courant vers l'anode décroîtra. D'autre part, si un corps chargé positivement est placé près de la cathode, les charges négatives des électrons dans l'espace seront largement neutralisées et permettront ainsi à un courant plus intense de partir de la cathode. Dans cette voie, il est possible de contrôler le courant circulant entre anode et cathode par le potentiel électrostatique d'un corps placé à proximité des deux électrodes. Ce contrôle peut être obtenu de meilleure façon en donnant au corps la forme d'une maille en fil fin, ou d'une grille placée entre les électrodes.

* * *

Le terme ***pliotron*** a été adopté pour désigner un kénotron dans lequel

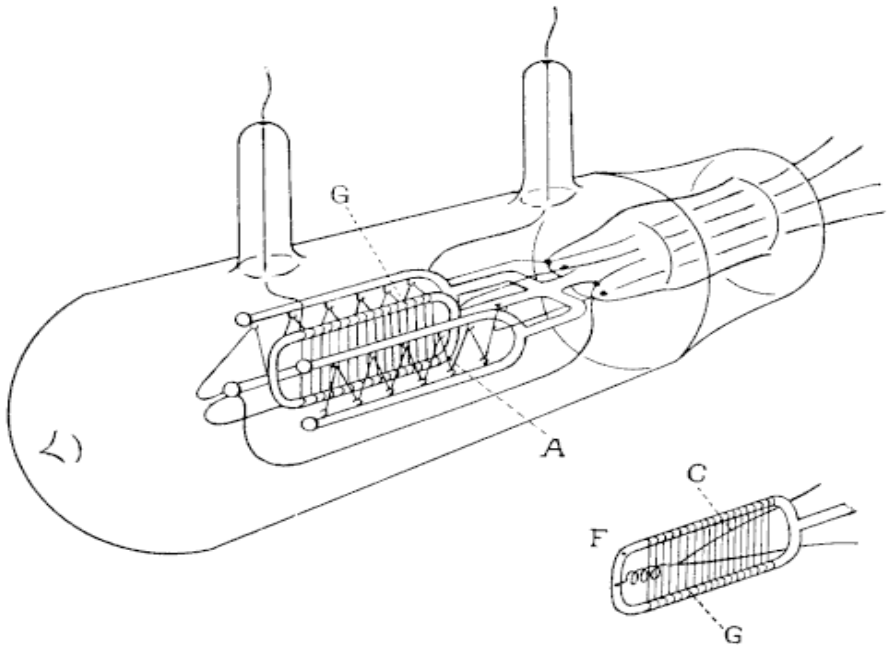


Fig. 145. — Forme de pliotron.
A, anode ; C, cathode ; F, cadre de verre ; G, grille.

on a ajouté une troisième électrode pour contrôler le courant circulant entre l'anode et la cathode.

Dans la construction des pliotrons, il a été reconnu désirable de con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

stituer les fils composant la grille avec la plus petite section possible. Aussi, même si un potentiel positif est appliqué à la grille, le courant qui la traverse peut être rendu extrêmement petit. L'emploi d'un fil très fin est rendu possible par l'emploi d'un cadre de verre, de métal ou d'une matière convenable pour supporter la grille. Ainsi, dans les figures 145 et 146, le filament est monté dans le centre d'un cadre constitué par des tubes de verre sur lesquels la grille de fil fin est enroulée. Cette grille peut aussi être constituée avec des fils de tungstène d'un diamètre d'environ $0^{mm},01$ et ceux-ci peuvent être au nombre de 100 tours par centimètre, et même plus, tout en restant séparés.

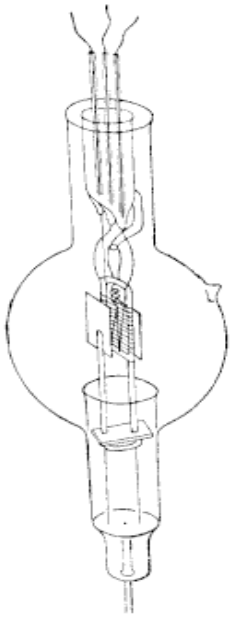


Fig. 146. — Forme de pliotron.

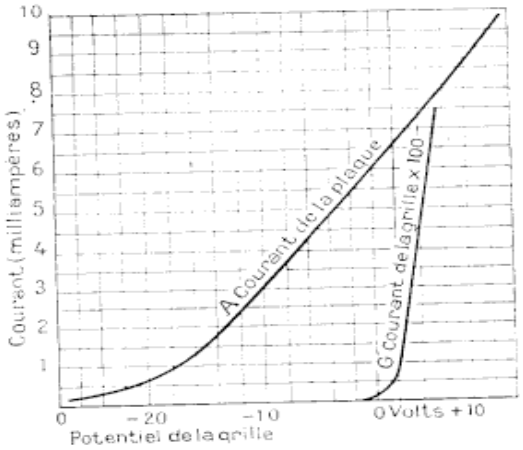


Fig. 147. — Caractéristiques du pliotron pour T. S. F.

Les figures 145 et 146 montrent deux types de pliotron. La figure 145 représente un pliotron employé pour amplifier les signaux radio-électriques dans une station de réception ; la figure 146 représente un grand pliotron qui peut être employé pour contrôler jusqu'à 1 kilowatt d'énergie pour la radiotéléphonie.

Les caractéristiques du pliotron dépendent des éléments suivants : longueur du filament employé, distance entre le filament et la grille, intervalle entre les fils de la grille, diamètre de ces fils, distance entre la grille et l'anode, forme et section de l'anode. Les éléments importants dans les caractéristiques d'un pliotron sont : 1° la relation entre le courant circulant entre l'anode et la cathode en fonction du potentiel de l'anode et de celui de la grille ; 2° le courant circulant vers la grille en fonction des potentiels de la grille et de l'anode.

La figure 147 donne les caractéristiques d'un petit pliotron comme celui de la figure 145. La courbe A est celle du courant allant à l'anode pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

différents potentiels de la grille, tandis que le potentiel de l'anode est maintenu constant à 200 volts. La courbe G est celle du courant de la grille sous les mêmes conditions. Pour différents potentiels de l'anode, ces courbes sont modifiées verticalement, proportionnellement à la variation du potentiel de l'anode.

Les trois éléments cathode à filament chaud, grille et anode sont semblables aux éléments des *audions*, que nous étudierons plus loin, mais, tandis que, dans ces appareils, l'action d'amplification apparaît comme dépendant beaucoup de l'ionisation des gaz, nous sommes en présence, dans le pliotron, d'une émission électronique purement thermique.

* * *

Il en est de même dans le ***tube à rayons X de Coolidge*** qui peut être considéré comme la première application du kénotron. Un filament métallique chauffé à haute température émet un flux d'électrons. Si nous commu-

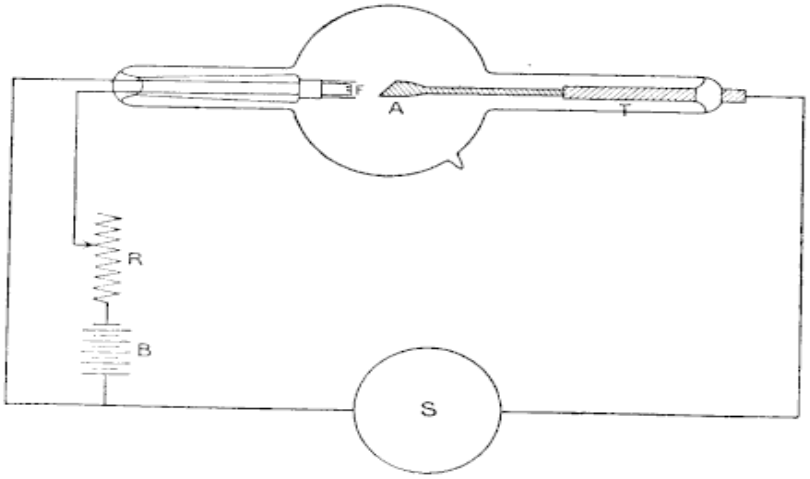


Fig. 148. — Montage d'un tube de Coolidge.

niquons à ces corpuscules négatifs une vitesse considérable, en les soumettant à l'action d'un champ électrostatique intense, nous obtiendrons un faisceau de rayons cathodiques. En recevant ce faisceau sur une anticathode ou sur l'anode, un faisceau de rayons X sera engendré à la surface d'impact.

La disposition théorique de l'appareil sera donc la suivante (fig. 148) : une cathode, formée d'un filament de tungstène F, est chauffée par une batterie d'accumulateurs B munie d'un rhéostat R et émet des électrons. L'anode est constituée par une lame de tungstène A montée sur un bloc de cuivre solidaire d'un tube de molybdène T. Entre l'anode et la cathode, on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

établit une différence de potentiel élevée à l'aide de la source S, qui transforme la « buée » d'électrons en un faisceau cathodique. Celui-ci, rencontrant l'anode A, donne naissance au faisceau de rayons X.

En agissant sur l'intensité de chauffage, on influence le nombre d'électrons émis par le filament F, c'est-à-dire l'intensité du faisceau cathodique, et par suite celle du faisceau de rayons X. En réglant la différence de potentiel appliquée entre A et F, on fait varier la vitesse des électrons, c'est-à-dire la longueur d'onde du rayonnement X émis.

La source S peut être simplement le secondaire d'un transformateur à courants alternatifs, puisque le tube forme lui-même soupape, et ne laisse passer que l'onde pour laquelle le filament est cathode. Cependant, il est préférable d'intercaler une lampe-valve entre la source et le tube, car, si, au cours de la marche de l'appareil, l'anode A s'échauffe au point de rougir, elle se met à son tour à émettre des électrons, et le fonctionnement devient mauvais. On peut également, par l'emploi de deux valves, utiliser les deux ondes du courant alternatif.

Nous verrons, au chapitre sur l'électricité médicale, les diverses installations pratiques que l'on a réalisées, ainsi que les détails de construction du tube Coolidge.

* * *

Dans les kénotrons et les tubes Coolidge, la conductibilité unilatérale est obtenue en s'appuyant uniquement sur l'émission d'électrons par les cathodes chauffées. Mais on sait que les électrons, lorsqu'ils sont doués de grandes vitesses et se déplacent dans une ***atmosphère raréfiée***, produisent une ionisation intense qui peut être utilement mise en œuvre dans certains cas.

L'un des perfectionnements les plus intéressants de la soupape de Fleming à gaz raréfié est dû à Forest qui, grâce à l'introduction d'une troisième électrode (comme dans le pliotron), transforme la soupape en une sorte de relais à gaz pouvant amplifier les oscillations électriques reçues : l'appareil a reçu le nom d'***audion***.

Son importance en télégraphie sans fil, aussi bien comme amplificateur que comme détecteur, sera mise en évidence dans le chapitre sur la télégraphie sans fil. Nous allons simplement ici étudier son fonctionnement théorique.

La troisième électrode est constituée par une lame métallique perforée ou par un tissu métallique, et on lui donne le nom de *grille*.

La plaque d'une part, la grille de l'autre sont isolées du filament et isolées l'une par rapport à l'autre (fig. 149).

Entre la plaque et le filament, on établit une différence de potentiel qui, en pratique, est au maximum voisine de 80 volts. Laissant fixe la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

température du filament générateur d'électrons et celle de la plaque, si on fait varier le potentiel v de la grille, on obtient une courbe dite ***caractéristique de la plaque*** en mesurant les intensités du courant de plaque en fonction de v.

Si le potentiel de la grille est nul, les électrons se dirigent librement vers la plaque P en produisant un courant dans le circuit filament-plaque.

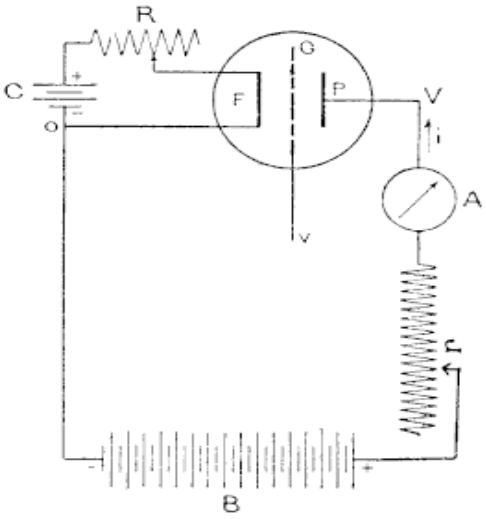


Fig. 149. — Montage d'un audion.

La grille a pour but de produire un champ électrique qui se superpose à celui de la plaque et modifie le nombre des électrons qui atteignent celle-ci (c'est-à-dire modifie l'intensité du courant dans le circuit filament-plaque).

Il est facile de se rendre compte du fonctionnement de ce régulateur d'intensité que constitue la grille.

Supposons que son potentiel soit fortement négatif par rapport à celui du filament. Il le sera aussi par rapport à la plaque (puisqu'elle est chargée positivement) et, par conséquent, toutes les lignes de force partant soit de la plaque, soit du filament, viendront aboutir sur la grille (fig. 150, 1). Il est alors évident qu'aucun des électrons émis par le filament ne pourra atteindre soit la grille, soit la plaque, et il n'y aura aucun courant dans les circuits filament-grille et filament-plaque.

2° Si on diminue le potentiel négatif de la grille, certaines des lignes de force peuvent échapper à son attraction, et, s'il n'y a aucun transport d'électrons du filament vers la grille, il y a un léger courant filament-plaque (fig. 151, 2).

3° Enfin, si la grille est chargée positivement par rapport au filament, tout en étant négative par rapport à la plaque, les lignes de force partant de la plaque aboutissent aussi bien sur la grille que sur le filament (fig. 150, 3), et il se produit un fort courant dans le circuit filament-plaque et un courant plus faible dans le circuit filament-grille. Le courant de grille est donc toujours faible par rapport au courant de plaque.

La figure 151 traduit graphiquement ces différents résultats : pour des potentiels v de la grille fortement négatifs (— 20 volts par exemple), il n'y a pas de courant (cas 1 précédent) ; à mesure que v croît, la grille laisse passer de plus en plus d'électrons et la caractéristique est une courbe ABC tangente en A à l'axe des v (cas 2). Quand la grille devient positive

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(cas 3), elle agit comme la plaque dans le kénotron ; le nombre des électrons qui la traversent augmente d'abord rapidement (partie CD), puis on arrive au courant de saturation (branche horizontale DE). Simultanément, la grille ne reçoit qu'un courant faible (courbe OG), car la plupart des électrons passent entre ses mailles et vont se décharger sur la plaque. Sa caractéristique part du point O tangentiellement à l'axe des v. Quand le courant de plaque est de l'ordre de plusieurs milliampères, le courant de grille est seulement une fraction de milliampère.

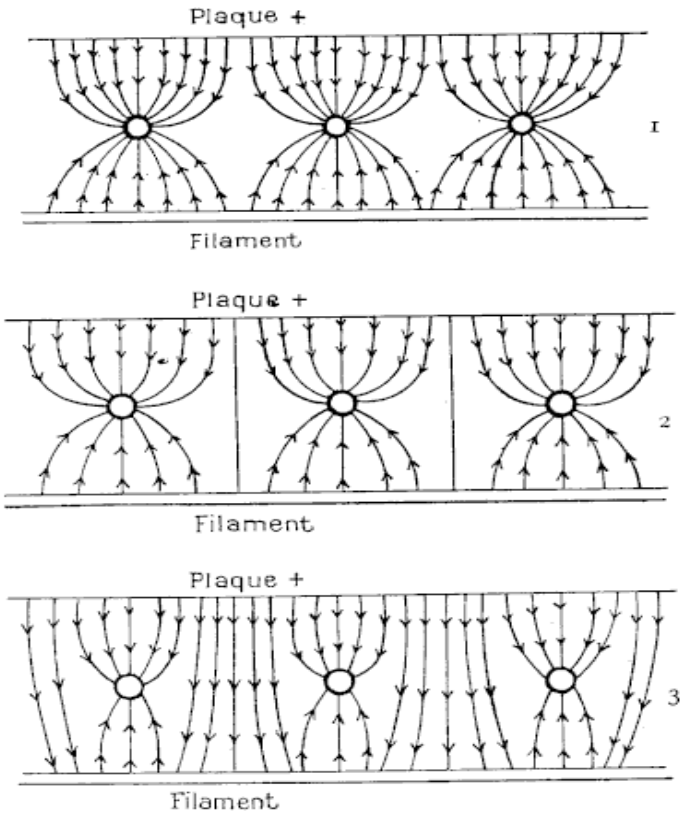


Fig. 150. — Position des lignes de force du champ électrique entre la plaque et le filament pour divers potentiels de la grille.

Nous pouvons juger maintenant de l'importance du rôle que joue la grille intercalée entre le filament et la plaque

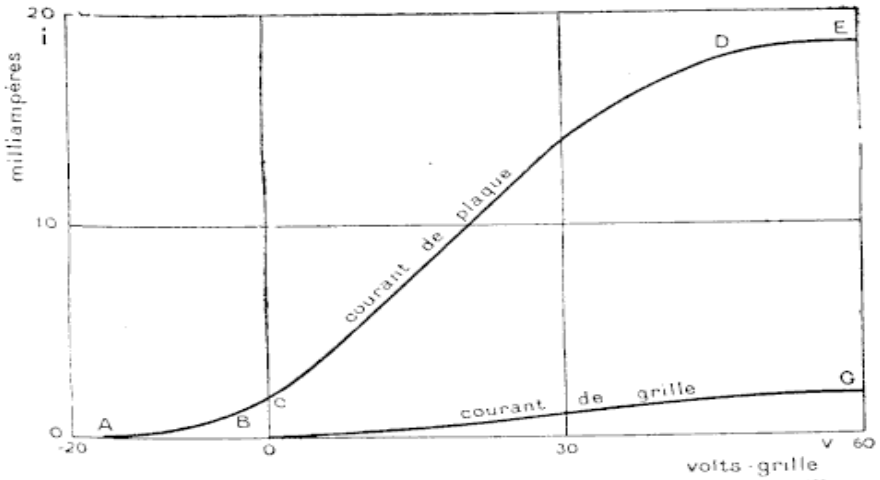


Fig. 151. — Variations du courant de plaque et du courant de grille.

dans les tubes à vide à trois électrodes. C'est celui d'un clapet extrême-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment souple, qui est fermé lorsque la grille est négative, empêchant ainsi le passage des électrons et l'établissement du courant plaque-filament. Ce clapet s'ouvre lorsque la grille est positive, laissant passer librement les électrons et le courant plaque-filament. Toutes les positions intermédiaires peuvent être occupées par ce clapet et chaque position dépend seulement du potentiel de la grille.

* * *

Le ***modèle le plus courant*** en France est celui représenté par la figure 152. Le filament est un fil rectiligne de tungstène ; la grille est une hélice en nickel entourant le filament ; la plaque est un cylindre de nickel qui enveloppe le tout. Quatre broches sortent du culot de la lampe : deux permettent le chauffage du filament ; une autre, communiquant avec la plaque, est reliée à la source de potentiel ; enfin, la quatrième, qui est en relation avec la grille, est reliée au circuit à étudier.

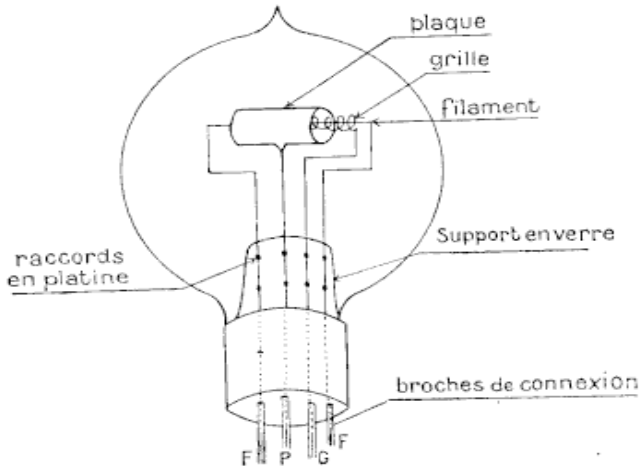


Fig. 152. — Forme classique de l'audion.

Nous verrons, à propos de la télégraphie sans fil, quelques-uns des multiples montages que l'on peut réaliser avec les lampes à trois électrodes ; nous n'expliquons actuellement que le principe de leur fonctionnement comme amplificateur et comme détecteur.

* * *

Supposons que l'on réunisse la grille à un circuit dans lequel existe une force électromotrice alternative très petite, de l'ordre du millivolt par exemple. En nous reportant aux courbes caractéristiques que nous reproduisons amplifiées figure 153, le potentiel de la grille variera entre deux valeurs om, om , et le courant de plaque entre les valeurs mM et m'M'. Au courant continu de plaque OC on a donc juxtaposé un courant alternatif dont l'intensité maxima est CP ou CP' (la portion BC étant sensiblement rectiligne). Quant à la grille, quand elle est négative, elle ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

consomme aucun courant ; quand elle est positive, elle consomme un courant mM_0 extrêmement faible (de l'ordre des micro-ampères).

Il en résulte que si, dans le circuit grille, on envoie, un courant oscillant de quelques micro-ampères, on obtient dans le circuit plaque un courant alternatif de plusieurs milliampères : la lampe fonctionne comme ***amplificateur***.

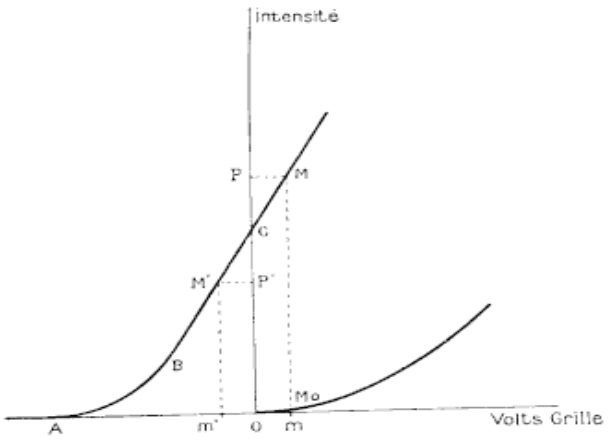


Fig. 153.

Rien n'empêche de se servir de ce courant amplifié pour impressionner le circuit grille d'une seconde lampe et recueillir dans son circuit plaque un courant encore plus intense. Un bon audion amplifie environ cinq fois les impulsions initiales. En en disposant trois en cascade par exemple, on arrive à amplifier cent vingt fois.

* * *

Les lampes audion peuvent également servir de ***détecteur***. Nous verrons qu'un détecteur est un dispositif sélectionnant, dans les ondes électromagnétiques dont la fréquence énorme (20 000 à 2 000 000 par seconde) ne permet pas d'actionner des appareils mécaniques doués d'inertie (membrane de téléphone par exemple), les ondes d'un même signe dont les effets s'ajoutent alors et peuvent être décelés. Une soupape de Fleming est donc un détecteur, et, effectivement, Fleming l'a utilisée à cet effet.

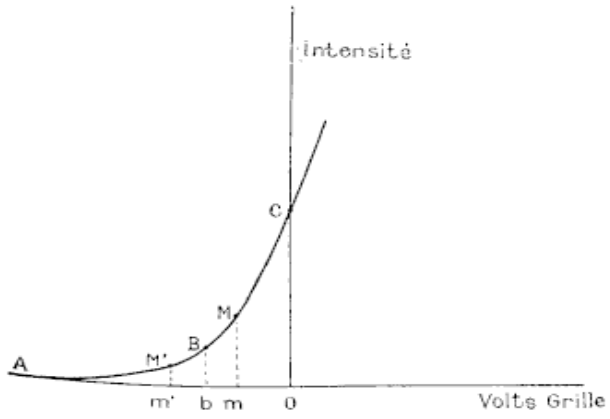


Fig. 154.

Un audion peut jouer le même rôle, et voici comment.

Reportons-nous encore une fois aux courbes caractéristiques. Nous voyons qu'au voisinage du point B, la caractéristique de plaque présente

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un coude. C'est un point détecteur. En effet, si les variations *égales* et opposées du potentiel de grille produisent des variations *inégales* en valeur absolue du courant de plaque, il y a alors prédominance d'un courant dû à une variation d'un certain signe du potentiel, et par suite détection.

Portons donc la grille au potentiel négatif O*b* (fig. 154). Le courant de plaque a la valeur *b*B. Appliquons à la grille une différence de potentiel alternative oscillant entre la valeur *bm*, *bm'*. Le courant de plaque varie alors entre les valeurs *m*M et *m'*M' dont la valeur moyenne est $\frac{M'm' + Mm}{2}$, différente de B*b*. L'intensité du courant plaque est donc modifiée et, par suite, si un téléphone est intercalé dans le circuit, il y aura effet détecteur.

Remarquons que, pour le point B de fonctionnement en détecteur, il n'y a pas de courant grille-filament, et par suite pas d'emprunt de courant au circuit oscillant. La résistance de l'intervalle grille-filament est donc pratiquement infinie et le circuit oscillant n'est pas amorti comme dans le cas d'un détecteur ordinaire (galène, par exemple) qui ne présente qu'une résistance de quelques milliers d'ohms. Le tube à vide permet donc une très bonne syntonie.

Ajoutons que l'on peut également utiliser le point détecteur qui se trouve sur la courbe caractéristique de la grille. Le fonctionnement est analogue.

* * *

L'audion peut enfin servir pour produire des ***oscillations électriques entretenues***. Le montage est représenté figure 155. Une bobine B_1, dite bobine de grille, est intercalée dans le circuit grille-filament ; une seconde bobine B_2, dite bobine de plaque, est couplée par induction avec B_1 et est intercalée dans le circuit plaque-filament. Aux deux extrémités de cette bobine, on connecte la terre et l'antenne. Reprenons les courbes caractéristiques et plaçons-nous au point C (fig. 156). Par un choix de la tension de plaque et du chauffage du filament, on s'arrange pour que ce point C soit au milieu de la partie ascendante rectiligne de la caractéristique de plaque.

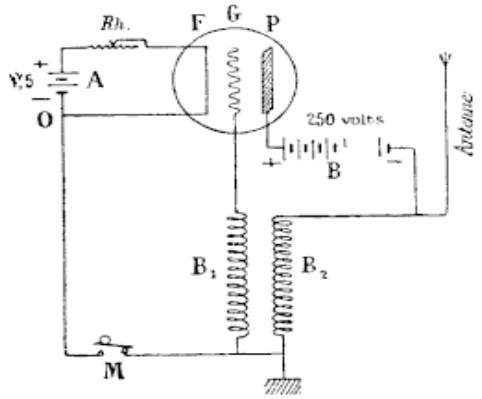


Fig. 155. —Production d'oscillations entretenues.

Supposons que nous fermions le manipulateur M (fig. 155). La grille prend alors le potentiel de l'extrémité négative du filament et il circule

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans la bobine de plaque B_2 le courant OC (fig. 156). Ce courant provoque une oscillation dans l'antenne, mais en même temps, quoique avec un léger retard, il se développe dans la bobine B_1 une force électromotrice d'induction qui fait varier le potentiel de la grille entre les deux valeurs Om, Om' et par conséquent une variation du courant de plaque entre Mm et $M'm'$ permettant l'entretien des oscillations de l'antenne. En effet, en proportionnant les self-inductions des bobines B_1 et B_2, on donne aux variations de potentiel de la grille la même période que celle de l'antenne.

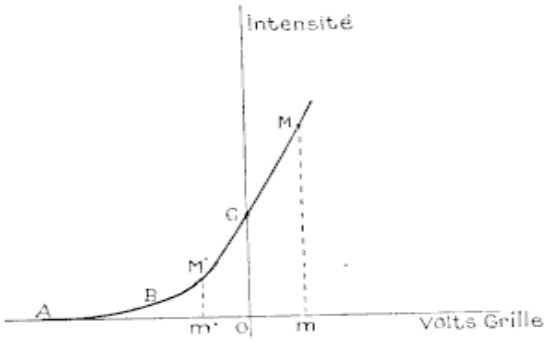


Fig. 156.

En réalité, le fonctionnement est beaucoup plus complexe que nous ne l'indiquons, et a conduit à des modifications du montage précédent, dont nous dirons quelques mots au chapitre sur la télégraphie sans fil.

* * *

Lieben et Reisz ont augmenté la puissance d'amplification des audions de 5 à 30 environ, en utilisant la propriété qu'ont certains corps d'*émettre des électrons sous de faibles tensions*. Tels sont les oxydes de calcium et de baryum en particulier. Nous avons signalé cette propriété précédemment. La cathode est recouverte d'oxyde et l'atmosphère raréfiée est fournie par un amalgame de mercure ayant une faible tension de vapeur. Ces appareils sont peu employés depuis le développement des pliotrons.

* * *

Quand la tension de la batterie qui fournit le potentiel à la plaque a une valeur suffisante, l'***ionisation du gaz*** se produit et se manifeste par l'apparition d'une lueur bleue dans l'ampoule. Cette lueur est très préjudiciable à la durée de l'appareil, par suite de la désagrégation du filament qui se produit sous l'influence du bombardement par les ions positifs. De plus, la lueur bleue et les autres phénomènes provenant de la présence d'un gaz résiduel entraînent des irrégularités dans le fonctionnement.

Dans l'audion et le tube Lieben-Reisz, l'action d'amplification apparaît comme dépendant beaucoup de l'ionisation des gaz, même si l'appareil fonctionne bien au-dessous du point où la lueur bleue apparaît. Le phé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nomène est probablement le suivant : il y a normalement une petite quantité de gaz ionisé due au passage des électrons de la cathode à l'anode. La présence des ions positifs neutralise partiellement la charge de l'espace qui limite le courant circulant entre les électrodes. Si un petit potentiel est appliqué à la grille, la vitesse des électrons la traversant est quelquefois accrue, et ils produisent plus d'ions dans le gaz. D'autre part, si le potentiel de la grille est augmenté, le nombre d'électrons la traversant l'est aussi, ce qui tend à nouveau à accroître la valeur de l'ionisation. Une très légère augmentation de la valeur de l'ionisation ainsi apportée réduit notablement la charge de l'espace et augmente le courant qui peut circuler entre les électrodes. Ainsi, pour un modèle donné, l'action de relais peut être plus importante qu'en l'absence de gaz.

S'il y a trop de gaz présents, ou si le potentiel de la plaque ou le courant circulant vers la plaque sont trop grands, l'ionisation positive peut atteindre de telles valeurs qu'elle neutralise complètement la charge d'espace et permette à un courant intense de circuler. Le fonctionnement comme relais de l'audion est alors nul. Entre ces deux extrêmes, il existe une région instable dans laquelle la sensibilité de l'audion est énorme, mais il n'est pas très pratique d'utiliser l'appareil dans cette région, à cause des difficultés de maintien du réglage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XI

LES RAYONS X ET LA CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

Absorption des rayons X par la matière. — Rayons X caractéristiques. — Expériences de Barkla et Sadler. — Séries K et L. — La longueur d'onde des rayons X. — Rayonnement caractéristique des métaux. — Loi de Moseley. — Les rayons canaux. — Influence de la nature du gaz dans l'émission des rayons canaux des tubes à vide. — Expériences de J. J. Thomson. — Spectrographe de masse. — Les isotopes. — Expériences de Aston.

Nous allons étudier dans ce chapitre les ***propriétés des rayons X***, sur lesquelles nous n'avons fait que passer rapidement dans l'exposé de la conductibilité des gaz aux basses pressions. Ces propriétés ont permis de pousser beaucoup plus loin que par tout autre moyen l'analyse de la constitution de la matière, et les résultats trouvés servent à l'heure actuelle de point de départ pour toutes les théories de l'atome. Aussi croyons-nous devoir consacrer un chapitre spécial à ces questions si importantes au point de vue scientifique. Nous ne dirons rien des moyens de production des rayons X, ampoules à focus, tube Coolidge, ni du mode d'emploi expérimental ; ces questions seront traitées au chapitre sur l'électricité médicale.

* * *

L'***absorption*** des rayons X par les substances sur lesquelles ils tombent a fourni de très intéressants résultats.

On appelle *coefficient d'absorption* λ la fraction de l'intensité du faisceau de rayons X qui est absorbée par passage à travers une épaisseur de 1 centimètre de la matière en expérience. On le mesure en observant à l'aide d'un électromètre ou d'un électroscope la variation d'ionisation produite par le pinceau de rayons X avant et après passage à travers un écran. Le dispositif expérimental peut être analogue à celui représenté figure 157. Une feuille d'aluminium A est enfermée dans un récipient à parois d'aluminium BB. On établit une différence de potentiel de plusieurs centaines de volts entre A et B, suffisante pour produire le courant de satura-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion dans le gaz renfermé dans le récipient. L'électromètre E mesure la variation de potentiel de A, qui renseigne sur l'intensité du faisceau de rayons X. Un écran S peut être interposé sur le trajet du faisceau de rayons X. et de la variation du courant de saturation il est facile de tirer la valeur du coefficient d'absorption.

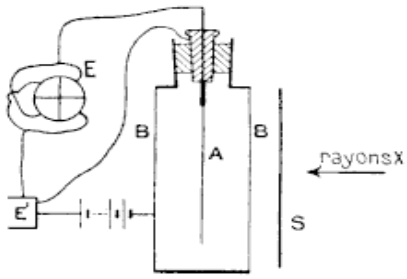


Fig. 157.

* * *

Nous avons dit que, lorsque les rayons X tombent sur un corps, ils produisent l'émission d'un rayonnement *secondaire* comprenant en particulier des ***rayons X caractéristiques***, c'est-à-dire dépendant de la nature du corps qui les émet.

Barkla et Sadler ont montré que presque toutes les substances émettent un ou plusieurs rayonnements secondaires homogènes. C'est par l'étude de leur absorption qu'on a pu les classer. Au lieu de déterminer simplement le coefficient d'absorption λ, on obtient des résultats beaucoup plus intéressants en considérant le ***coefficient d'absorption de masse*** $\left(\frac{\lambda}{\rho}\right)$ défini comme le quotient du coefficient d'absorption par la densité de la substance. Puisque l'absorption dépend de la masse de matière traversée, l'absorption, par centimètre d'épaisseur, varie considérablement d'une matière à l'autre, même lorsque l'on emploie le même faisceau incident.

Si l'absorption était strictement proportionnelle à la densité, $\frac{\lambda}{\rho}$ serait constant pour tous les corps. On constate, au contraire, que ce coefficient augmente avec le poids atomique de la matière absorbante.

Barkla mesura alors, en se servant d'écrans absorbants en aluminium, le coefficient d'absorption de masse pour les rayons X caractéristiques produits par divers corps placés sur le trajet d'un faisceau de rayons X. Il trouva que ces rayons X caractéristiques se groupent en deux séries distinctes, certains corps (argent, antimoine, iode et baryum) émettant les deux radiations. Barkla appela ces séries, série K et série L. En général, lorsqu'un corps émet les deux radiations, celles de la série K sont environ trois cents fois aussi pénétrantes que celles de la série L. Si on traduit graphiquement les résultats, en portant, pour simplifier, comme coordonnées les logarithmes du poids atomique et du coefficient $\frac{\lambda}{\rho}$, on obtient deux droites parallèles représentant les deux séries K et L (fig. 158). On sait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maintenant que la série K comprend quatre raies de longueurs d'onde différentes, et la série L plusieurs groupes de raies.

Whiddington a trouvé une relation entre le poids atomique des éléments et la puissance de pénétration de leurs rayons X caractéristiques. Si un élément de poids atomique A_K émet des radiations secondaires caractéristiques appartenant à la série K et ayant même pouvoir de pénétration que les radiations secondaires de la série L d'un corps de poids atomique A_L, on a :

$$A_K = \frac{1}{2}(A_L - 48).$$

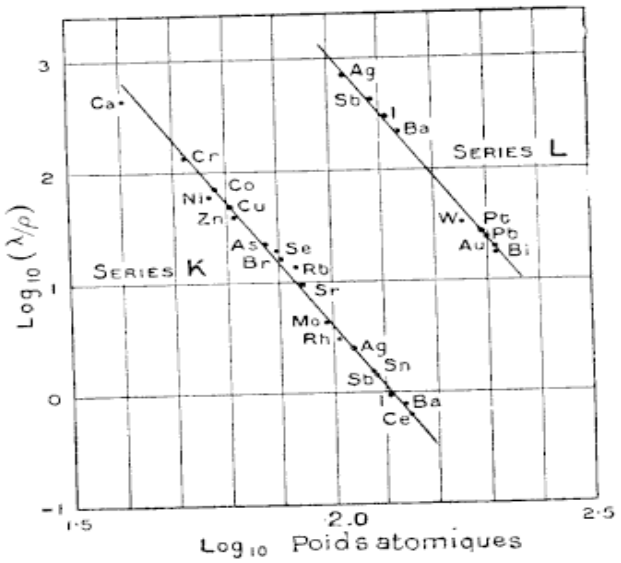


Fig. 158. — Les séries K et L des corps simples.

C'est ainsi par exemple que la radiation de la série K du brome (poids atomique : 80) a la même puissance de pénétration que la radiation de la série L du bismuth (poids atomique : 208). En effet :

$$80 = \frac{1}{2}(208 - 48).$$

Whiddington a aussi trouvé que la vitesse minima des rayons cathodiques nécessaire pour produire des rayons de même pénétrabilité que les rayons caractéristiques est proportionnelle au poids atomique de l'élément. On a :

$$v_K = A\ 10^8 \text{ centimètres-seconde}$$

pour une radiation de la série K, et :

$$v = \frac{1}{2}(A - 48)\ 10^8 \text{ centimètres-seconde}$$

pour la série L, A étant le poids atomique de l'élément (1).

(1) On peut encore écrire ces relations :

$$v_K = 2\ (N - 2)\ 10^8 \text{ et } v_L = (N - 15)\ 10^8,$$

N étant le nombre atomique de l'élément.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les rayons X se propagent avec la vitesse de la lumière ; d'autre part, ils sont constitués par un ébranlement de l'éther analogue à celui qui constitue une onde lumineuse. L'analogie serait complète si on pouvait produire avec les rayons X les phénomènes d'interférence et de diffraction que l'on réalise avec les ondes lumineuses, et si on pouvait ***déterminer leur longueur d'onde***.

Nous avons vu que les essais tentés n'avaient donné aucun résultat : les rayons X, s'ils sont constitués par une perturbation électromagnétique analogue à celle des rayons lumineux, *doivent avoir une longueur d'onde extrêmement petite*, pour laquelle nos appareils, en particulier les réseaux, sont extrêmement grossiers et par suite inefficaces. Il n'est pas possible de produire des interférences lumineuses à l'aide d'un réseau constitué par des traits distants de 1 centimètre par exemple, parce que la longueur d'onde de la lumière est infiniment plus petite que l'écartement des traits du réseau : l'appareil et le phénomène à étudier ne sont pas à la même échelle. Pour la même raison, les rayons X ne peuvent être diffractés par nos réseaux les plus parfaits, dont le nombre de traits dépasse cependant 100 par millimètre.

Le problème semblait donc insoluble lorsque Lawe, en 1913, proposa de prendre, comme réseaux de diffraction, les réseaux cristallographiques que l'on supposait exister, d'après la théorie de Bravais, dans les corps cristallisés. L'expérience réussit et permit de vérifier la théorie de Bravais, tout en démontrant la nature vibratoire des rayons X dont les longueurs d'onde dont de l'ordre de 10^{-8} centimètre (1).

* * *

Choisissant un cristal de ferrocyanure de potassium comme réseau de réflexion des rayons X, Moseley étudia le ***rayonnement X caractéristique des métaux***. Il trouva que, de l'aluminium à l'argent, le spectre des rayons X consiste en deux lignes, appartenant à la série K, la plus forte, K_α, ayant une longueur d'onde supérieure à celle de la plus faible, K_β, les lignes formant une série continue. En traçant une courbe ayant pour coordonnées la racine carrée de la fréquence de la radiation caractéristique et l'ordre de l'élément dans la classification périodique, on obtient une droite (fig. 159).

Pour les métaux, du zirconium à l'or, on trouva que la même relation

(1) Pour plus de détails, voir *Précis de chimie physique*, par H. Vigneron (Masson, éditeur).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

linéraire se vérifie pour les radiations caractéristiques de la série L, qui se compose de cinq lignes (L_α, L_β, ...). Pour chaque série, une équation de la forme $\nu = a\,(N - b)^2$ représente les résultats expérimentaux, ν étant la fréquence de la radiation caractéristique, N le nombre qui représente la position de l'élément dans la classification périodique des éléments, et que Moseley appelle le *nombre atomique* de l'élément, et qui donne le *nombre d'électrons existant dans l'atome de l'élément.*

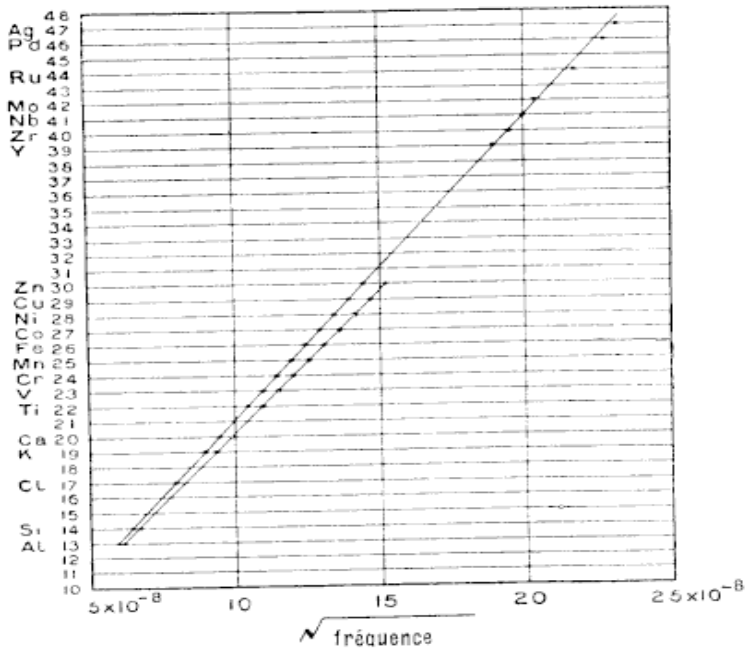


Fig. 159. — Courbe de Moseley.

Pour la série K_α, la constante b de la formule précédente a la valeur 1, et, pour la série L_α, la valeur 7,4.

Nous n'insisterons pas plus sur les remarquables résultats obtenus par Moseley et ses successeurs; ils montrent que, grâce aux rayons X, nous pouvons pénétrer à l'intérieur de l'atome et commencer à en explorer la structure intime.

* * *

Dans l'espace noir cathodique, les électrons constituant le faisceau cathodique se déplacent avec des ***vitesses énormes***, atteignant 10^9 centimètres par seconde. Par suite, s'il existe dans cet espace des ions positifs, ils seront énergiquement attirés par la cathode.

En d'autres termes, le passage de la décharge exige que le gaz soit ionisé à l'intérieur du tube ; par suite, il y a création d'électrons et d'ions positifs se déplaçant en sens inverse ; la cathode reçoit un afflux positif qui se manifeste par l'existence de la zone lumineuse cathodique. Si donc la cathode est percée de trous, un certain nombre des ions positifs la traversera et il y aura création, en arrière de la cathode, d'un faisceau de ***rayons positifs*** ou ***rayons canaux.***

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces rayons, découverts par Goldstein en 1886, se manifestent par l'illumination des gaz qu'ils traversent et leur ionisation intense, la phosphorescence qu'ils excitent à leur point d'impact, etc. Ils sont déviés par le champ magnétique et le champ électrique et se conduisent bien comme un train de particules positives. Leur vitesse est très petite (quelques milliers de kilomètres à la seconde), mais leur masse est énorme, de dix mille à cent mille fois celle des électrons; aussi ne peuvent-ils voyager loin dans les gaz, ni être considérablement déviés par l'action des champs.

Ajoutons que l'on a trouvé que les rayons α des substances radioactives sont également constitués par des centres positifs en déplacement, et on a donné le nom de *rayons positifs* à l'ensemble des rayons α et des rayons canaux.

* * *

Dans un tube à vide, les rayons positifs sont de nature complexe, mais, en prenant de larges ampoules de façon à ce que la décharge puisse être obtenue sous une grande différence de potentiel sans abîmer le tube, J. J. Thomson a trouvé l'existence de rayons positifs dont ***la nature dépend des propriétés du gaz*** présent dans l'ampoule.

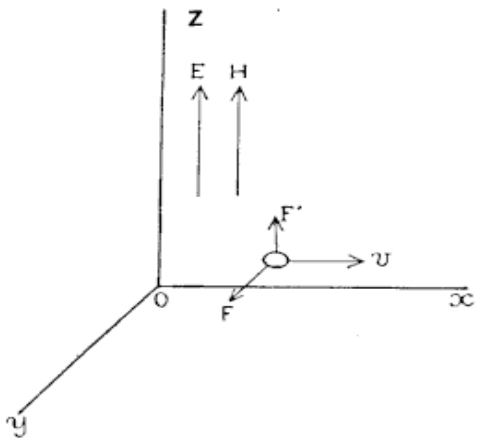


Fig. 160.

Afin de dissocier le faisceau complexe de rayons positifs, J. J. Thomson combine l'action d'un champ magnétique et d'un champ électrique intenses, la direction étant la même pour les deux champs. Dans ces conditions, si la vitesse de propagation du faisceau est supposée parallèle à l'axe de x (fig. 160) et les deux champs perpendiculaires à cette direction suivant l'axe Oz, le champ magnétique aura pour effet d'exercer sur la particule une force F, dirigée parallèlement à Oy, tandis que le champ électrique exerce une force F′ parallèle à l'axe des z.

On calcule facilement que la déviation due à la force magnétique est proportionnelle à $\frac{e}{m}\frac{1}{v}$ $(= z)$ et celle due à la force électrique est proportionnelle à $\frac{e}{m}\frac{1}{v^2}$ $(= y)$.

C'est à-dire que l'on a :

$$\frac{z}{y} = kv.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et, par suite, toutes les particules ayant même vitesse donneront, sur un écran normal à la direction de propagation initiale Ox, une ligne droite passant par O.

On voit aussi que

$$\frac{z^2}{y} = K\frac{e}{m},$$

c'est-à-dire que toutes les particules ayant la même valeur de $\frac{e}{m}$ se trouveront sur une parabole passant par O.

Si l'écran est une plaque photographique, on aura les apparences représentées sur la figure 161. En particulier, si on prend la même valeur de z, OF par exemple, on voit d'après ce qui précède que le rapport de $\overline{HF}^2$ à $\overline{GF}^2$ est égal au rapport de $\frac{e}{m}$ pour une particule à $\frac{e}{m}$ pour l'autre particule.

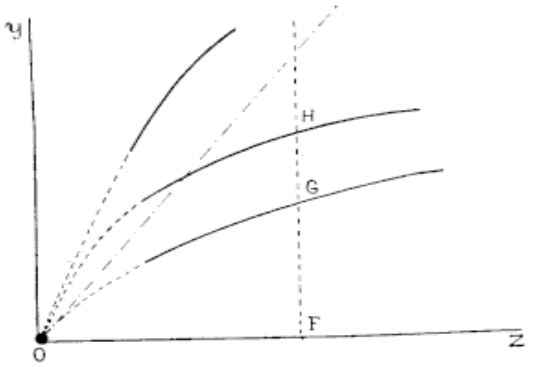


Fig. 161.

L'appareil de J. J. Thomson est représenté schématiquement figure 162.

B est une large ampoule à vide dont la cathode est percée d'un trou central. L'électro-aimant M produit le champ magnétique. Ses surfaces polaires sont isolées et réunies à une source à haut potentiel qui crée le champ électrique. Les rayons canaux

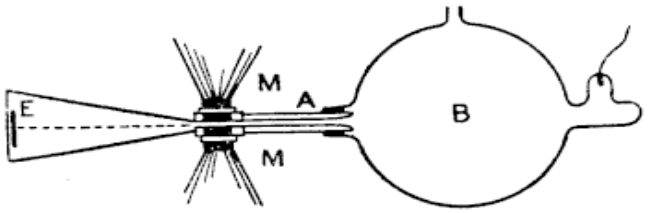


Fig. 162. — Appareil de J. J. Thomson.

viennent inscrire leur trajectoire sur un écran E ou une plaque photographique.

* * *

Un perfectionnement très important de cet appareil, qui en a considérablement augmenté la sensibilité, est dû à Aston. Ce dispositif porte le nom de ***spectrographe de masse***.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au lieu de produire simultanément les déviations magnétique et électrique du faisceau positif, on fait d'abord agir le champ électrique, qui produit une faible dispersion des rayons d'inégale vitesse, et ensuite le champ magnétique, de façon que la déviation précédente soit annulée et

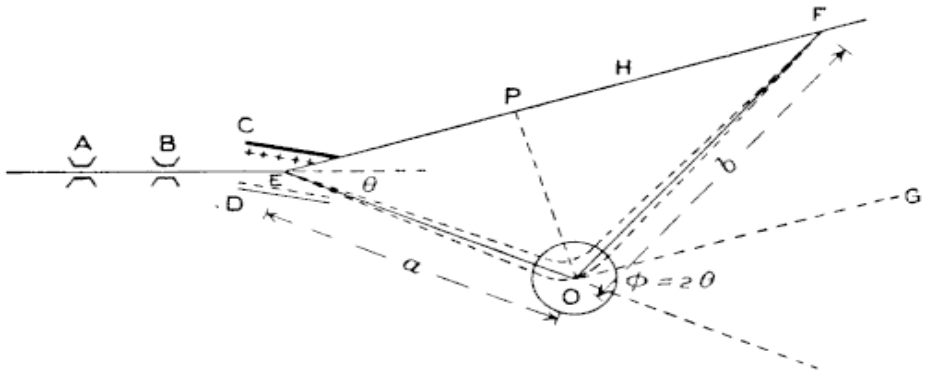


Fig. 163. — Spectrographe de masse.

que les deux rayons extrêmes du faisceau dispersé se trouvent à nouveau ramenés en un même point formant foyer. La figure 163 montre la marche des rayons. A chaque valeur de $\frac{e}{m}$ correspond un foyer. Tous ces foyers sont situés sur une courbe qui est presque une ligne droite et peut être enregistrée sur une plaque photographique convenablement placée. On obtient les

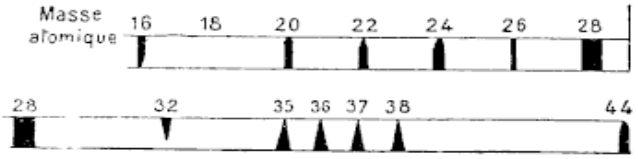


Fig. 164. — Spectres de masse.

apparences représentées figure 164, qui donne les spectres de masse du néon et du chlore.

Si on admet que la charge e de l'électron est toujours égale à une même charge élémentaire ou à un multiple entier de cette charge, on voit que la mesure du rapport des valeurs de $\frac{e}{m}$ relatives à deux ions permet de mesurer le rapport des masses des atomes qui les constituent, en d'autres termes le rapport des masses atomiques des éléments qui les produisent.

* * *

Aston a trouvé que certains corps se comportent comme un mélange de plusieurs éléments. C'est ainsi que le chlore, de masse atomique 35,46,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donne des raies doubles comme s'il était composé d'un mélange de deux éléments de masses atomiques 35 et 37. Ces deux éléments sont appelés des ***isotopes*** et leurs propriétés chimiques sont identiques, de sorte qu'il est impossible de les discerner au cours des réactions chimiques auxquelles participe l'élément. Il semble cependant qu'en s'appuyant sur les propriétés physiques des gaz (diffusion, distillation fractionnée, effusion), on soit arrivé dans quelques cas à séparer tout au moins partiellement certains isotopes.

Nous donnons ci-dessous le tableau des isotopes actuellement connus, d'après Aston :

	Nombre atomique.	*Poids atomique.*	*Nombre minimum d'isotopes.*	*Masses des isotopes par ordre de densité.*
H	1	1,008	1	1,008
He	2	3,99	1	4
Li	3	6,94	2	7,6
Be	4	9,1	1	9
B	5	10,9	2	11, 10
C	6	12,00	1	12
N	7	14,01	1	14
O	8	16,00	1	16
F	9	19,00	1	19
Ne	10	20,20	2	20, 22, (21)
Na	11	23,00	1	23
Mg	12	24,32	3	24, 25, 26
Si	14	28,3	2	28, 29, (30)
P	15	31,04	1	31
S	16	32,06	1	32
Cl	17	35,46	2	35, 37, (39)
A	18	39,88	(2)	40, 36
K	19	39,10	2	39, 41
Ca	20	40,07	(2)	(40, 44)
Sc	21	45,1	1	45
Ti	22	48,1	1	48
V	23	51,0	1	51
Cr	24	52,0	1	52
Mn	25	54,93	1	55
Co	27	58,97	1	59
Ni	28	58,68	2	58, 60
Cu	29	63,57	2	63, 65
Zn	30	65,37	(4)	(64, 66, 68, 70)
Ga	31	69,72	2	69, 71
Ge	32	72,5	3	74, 72, 70
As	33	74,96	1	75
Br	35	79,92	2	79, 81
Kr	36	82,92	6	84, 86, 82, 83, 80, 78
Rb	37	85,45	2	85, 87
Sr	38	87,63	1	88
Y	39	88,9	1	89
Ag	47	107,88	2	107, 109
I	53	126,92	1	127
Xe	54	130,2	5 (7)	129, 132, 131, 134, 136, (128) (130?)
Cs	55	132,81	1	133
Hg	80	200,6	(6)	(197-200), 202, 204

Absorption des rayons X conduisant à la loi de Moseley, spectroscopie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des rayons X permettant de déceler la nature intime des cristaux et l'arrangement des molécules à l'intérieur de l'édifice cristallin, spectres de masse fournis par les rayons canaux aboutissant à la notion nouvelle d'isotopie, montrent combien l'étude des rayons X a été féconde, et, sans nul doute, la moisson des résultats n'est pas encore terminée. Aussi avons-nous cru devoir exposer succinctement l'état de la question, afin de mettre le lecteur à même d'en juger l'intérêt et d'en suivre les développements ultérieurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XII

LA RADIOACTIVITÉ

Historique. — Travaux de Becquerel, Curie, Debierne. — Étude de l'ionisation. — Électroscopes. — Différents rayonnements émis. — Rayons α, β, γ. — Étude de chacun des rayonnements. — Rayons α, courant d'ionisation. — Rayons β. — Complexité du rayonnement β. — Rayons γ. — Les transformations radioactives. — Émission de chaleur par les sels de radium.

L'étude des ***phénomènes radioactifs***, bien que n'apportant pas, au point de vue électrique, de notions vraiment nouvelles, puisque nous y retrouverons seulement les rayonnements qui ont fait l'objet des pages précédentes, n'en constitue pas moins un chapitre extrêmement captivant de la physique moderne et une illustration frappante du développement extraordinairement rapide de la science dans les trente dernières années.

A la fin du siècle dernier, nos renseignements sur la nature des atomes étaient des plus sommaires. On connaissait leur masse relative pour les divers éléments, ainsi que les lois suivant lesquelles ils réagissent entre eux. On les considérait comme ayant chacun une personnalité bien définie, indépendante de celle de tous les autres atomes et sans relation avec eux. On soupçonnait seulement que des charges électriques devaient se trouver dans les atomes, mais on ignorait qu'il existât, entre les atomes de tous les éléments, un « facteur commun », un « plus grand commun diviseur » si l'on veut prendre des comparaisons mathématiques, qui est l'électron. On était impuissant à passer de l'un à l'autre, à transformer un élément en un élément différent, à réaliser, en un mot, une transmutation.

La découverte, vers cette époque, des rayons cathodiques, puis des rayons X, avait produit une vive sensation parmi les physiciens. Henri Becquerel en particulier, frappé du fait que les rayons cathodiques heurtant la paroi de verre de l'ampoule y allument une vive fluorescence, s'était demandé si toute phosphorescence n'est pas due à un bombardement analogue à celui des rayons cathodiques, hypothèse qu'Henri Poincaré émettait presque simultanément. Becquerel avait à sa disposition les échantillons de sels d'uranium préparés par son père, et dont certains

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

présentaient une vive fluorescence. Il les étudia et, le 24 février 1896, présenta une note à l'Académie des sciences sur les radiations de phosphorescence émises par certains sels d'uranium. Nous reproduisons ci-dessous quelques passages de cette note dont l'importance n'échappera pas lorsque nous aurons dit que le travail de Henri Becquerel qu'elle résume est la première pierre de l'édifice auquel plus tard fut donné le nom de « radioactivité ».

« On enveloppe une plaque photographique Lumière au gélatino-bromure avec deux feuilles de papier noir très épais, tel que la plaque ne se voile pas par une exposition au soleil durant une journée.

« On pose sur la plaque, à l'extérieur, une plaque de la substance phosphorescente (sulfate double d'urane et de potasse) et on expose le tout au soleil pendant plusieurs heures. Lorsque l'on développe ensuite la plaque photographique, on reconnaît que la silhouette de la substance phosphorescente apparaît en noir sur le cliché. Si l'on interpose, entre la substance phosphorescente et le papier, une pièce de monnaie ou un écran métallique percé d'un dessin à jour, on voit l'image de ces objets apparaître sur le cliché.

« On doit donc conclure de ces expériences que la substance phosphorescente en question émet des radiations qui traversent le papier opaque à la lumière et réduisent les sels d'argent. »

Sans vouloir diminuer le génie des Curie et l'importance de leurs travaux, il faut remarquer que, deux ans avant eux, Henri Becquerel découvrait le rayonnement radioactif et ses plus importantes propriétés. Comme on a pu le voir par la lecture de sa première note sur ce sujet, il croyait à tort que l'insolation préalable était indispensable, mais une seconde note vint rectifier cette erreur, et finalement il établit que la propriété radiante était absolument indépendante de la phosphorescence, que tous les sels d'uranium, même les sels uraneux qui ne sont pas phosphorescents, donnent des effets analogues, en particulier ionisent les gaz, c'est-à-dire les rendent conducteurs de l'électricité. Ces phénomènes correspondant à une émission continue d'énergie ne semblent cependant pas la conséquence d'un emmagasinement sous l'influence d'un rayonnement extérieur ; spontané et constant, le rayonnement est insensible aux variations de température et d'éclairage.

M^me^ Curie reprit l'étude du phénomène et, en 1898, trouva que le thorium présente des propriétés radioactives analogues à celles de l'uranium. Elle montra également que deux minerais d'uranium étaient plus actifs que l'uranium lui-même, et que cette anomalie disparaissait lorsque les minerais étaient reconstitués par synthèse à partir des sels purs. Elle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conclut qu'il devait exister dans ces minerais un élément radioactif inconnu, plus actif que l'uranium.

En étudiant à l'électromètre la variation d'activité des divers fractionnements obtenus par traitement chimique, les Curie découvrent d'abord une nouvelle substance, quatre cents fois plus active que l'uranium, de propriétés chimiques voisines de celle du bismuth et à laquelle ils proposent, dans leur note du 18 juillet 1898, de donner le nom de polonium.

« Certains minéraux contenant de l'uranium et du thorium (pechblende, chalcolite, uranite) sont très actifs au point de vue des rayons de Becquerel. Dans un travail antérieur, l'un de nous (M^me^ Curie) a montré que leur activité est même plus grande que celle de l'uranium et du thorium et a émis l'opinion que cet effet était dû à quelque autre substance très active renfermée en petite quantité dans ces minéraux... Nous avons cherché à isoler cette substance dans la pechblende, et l'expérience est venue confirmer les prévisions qui précèdent... Nous croyons donc que les substances que nous avons retirées de la pechblende contiennent un métal non encore signalé, analogue au bismuth par ses propriétés analytiques. Si l'existence de ce nouveau métal se confirme, nous proposons de l'appeler ***polonium***, du nom du pays d'origine de l'un de nous. »

Mais la méthode mise au point est si précise, les minerais essayés sont si riches aussi, que bientôt, au cours des séparations, un nouvel élément, analogue au baryum et d'activité au moins mille fois supérieure à celle de l'uranium, commence à manifester sa présence. Le poids atomique du « baryum radifère » que l'on détermine de temps à autre au cours des purifications successives s'éloigne de 137 (1), monte de plus en plus, finalement arrive à se fixer aux environs de 226. Le spectre du « baryum radifère », en même temps, s'enrichit d'une nouvelle raie spectrale de longueur d'onde 3 814,8 (2). Il n'en faut pas plus pour pouvoir caractériser un nouvel élément, et, le 26 décembre 1898, dans une note en collaboration avec M. Bemont, les Curie annoncent la découverte de l'élément nouveau, le ***radium***. Nous donnons ci-dessous quelques passages de cette note fondamentale qui donne les propriétés chimiques caractéristiques du nouvel élément.

« La nouvelle substance radioactive que nous venons de trouver a toutes les apparences chimiques du baryum presque pur : elle n'est précipitée ni par l'hydrogène sulfuré, ni par le sulfure d'ammonium, ni par l'ammoniaque ; le sulfate est insoluble dans l'eau et les acides ; le carbonate est insoluble dans l'eau ; le chlorure, très soluble dans l'eau, est insoluble dans l'acide chlorhydrique et dans l'alcool... »

(1) Le poids atomique du baryum.
(2) D'après DEMARÇAY, Académie des sciences, 26 décembre 1898.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En 1900, Debierne retira également de la pechblende un autre métal radioactif, d'activité comparable à celle du radium, auquel il donna le nom d'***actinium***. Actuellement, on connaît une trentaine d'éléments radioactifs.

* * *

C'est par l'examen de l'ionisation produite par les corps radioactifs que l'on étudie les ***propriétés des divers rayonnements*** qu'ils émettent. L'appareil d'observation et de mesure est soit un électroscope, soit un électromètre.

Divers modèles d'électroscopes ont été proposés afin d'augmenter la sensibilité. Le plus simple (fig. 165) se compose d'un plateau A, sur lequel on répartit le sel à étudier, disposé en face d'un plateau parallèle B relié à la feuille d'or d'un électroscope que l'on charge préalablement. L'observation

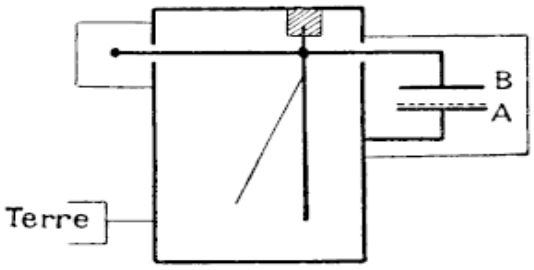


Fig. 165. — Électroscope pour radioactivité.

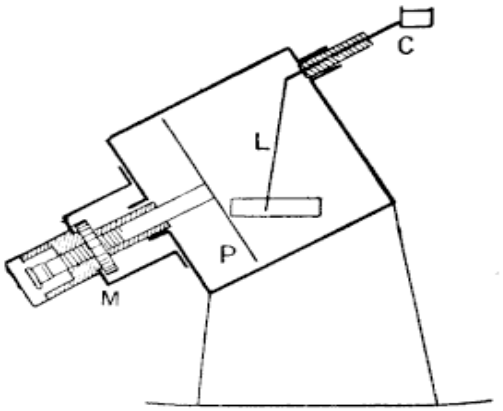


Fig. 166. — Électroscope de Wilson.

de la vitesse de décharge de l'électroscope, par suite de l'ionisation du gaz compris entre les plateaux, fournit la mesure de la puissance ionisante de la substance.

Un autre dispositif extrêmement sensible est dû à C. T. R. Wilson (fig. 166). La feuille d'or L est attirée par une plaque P chargée à potentiel constant, 200 volts par exemple. On réunit la feuille d'or à la paroi métallique de l'appareil, et celui-ci est incliné jusqu'à ce que la feuille se trouve dans le champ de vision d'un microscope d'observation (non figuré). On peut faire varier la sensibilité en inclinant plus ou moins l'appareil et en agissant sur la distance de la feuille d'or au plateau P. Celui-ci est commandé par une vis micrométrique M, et les meilleures conditions sont réalisées lorsque la position de la feuille devient instable par suite de son voisinage de la plaque P. On réunit ensuite la feuille par le conducteur C au corps dont on veut mesurer la variation de potentiel.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Si l'on place sur le plateau A de l'électroscope un sel de radium, on constate, en interposant entre les deux plateaux une feuille de fer-blanc, que la déperdition de l'électroscope est extrêmement ralentie : l'ionisation tombe au dixième, par exemple.

Si les rayons émis par la substance étaient homogènes, l'interposition d'une plaque d'épaisseur double devrait faire tomber l'ionisation au centième de sa valeur primitive. Or, on constate que tel n'est pas le cas. Par suite, il existe dans le rayonnement au moins deux sortes de rayons, dont l'une est facilement absorbable et l'autre beaucoup moins. Appelons, avec Rutherford, ***rayons*** α les rayons les plus absorbables, ***rayons*** β les autres.

Continuons à interposer des feuilles en nombre de plus en plus grand ou encore introduisons entre les deux plateaux des lames d'épaisseur croissante : on constate que l'absorption qu'elles produisent n'est pas aussi intense qu'on pourrait s'attendre à le constater, et Rutherford attribue ce fait à l'existence de radiations beaucoup plus pénétrantes que les rayons α et β, auxquelles ils donne le nom de ***rayons*** γ.

En résumé, les sels de radium émettent trois rayonnements distincts, qui se caractérisent, si on mesure leur puissance d'absorption, de la façon suivante :

	α	β	γ
Épaisseur d'aluminium réduisant l'ionisation de moitié.	$0^{cm},0005$	$0^{cm},05$	8 cm.
Puissance relative de pénétration	1	100	10 000

Anticipant sur les résultats des expériences que nous décrirons plus loin, on a montré que ces rayons sont de nature très différente.

1° Les *rayons* α, peu pénétrants, sont constitués par des atomes d'hélium chargés positivement, leur charge étant égale à deux fois la charge élémentaire.

2° Les *rayons* β, cent fois plus pénétrants que les rayons α, sont formés par des électrons lancés à de très grandes vitesses.

3° Les *rayons* γ, cent fois plus pénétrants que les rayons β, sont des vibrations électromagnétiques analogues aux rayons X, mais de très courte longueur d'onde.

Il nous reste à légitimer rapidement ces conclusions.

* * *

Les ***rayons*** α excitent la phosphorescence. Si on place au voisinage d'un sel radioactif un écran au sulfure de zinc, on constate, en l'examinant à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la loupe, une multitude de points brillants qui s'allument et s'éteignent aussitôt. On montre que cette scintillation est due au choc des particules α en interposant une lame de mica qui arrête les rayons α sans absorber notablement les rayons β et γ. La cause de la lumière est probablement la rupture des cristaux microscopiques de sulfure de zinc lorsqu'ils sont heurtés par une particule α.

Connaissant la quantité de matière radioactive mise en expérience, le nombre d'étincelles allumées dans un temps donné sur un écran limitant un angle solide connu, on peut calculer qu'un milligramme de radium émet 136 millions de particules α par seconde.

Les rayons α ne sont déviés que difficilement par les champs magnétiques, et leur déviation indique qu'ils sont chargés *positivement*. Ils sont également sensibles aux champs électrostatiques, et on a pu, comme dans le cas des rayons cathodiques, calculer leur vitesse v et le rapport $\frac{e}{m}$. On a :

$$v = 2{,}5.10^9 \text{ centimètres-seconde.} \qquad \frac{e}{m} = 6 \times 10^3.$$

En éliminant, par l'action du champ magnétique, les rayons β, on peut recueillir les particules α dans un cylindre de Faraday et on a trouvé que, quel que soit le corps radioactif en expérience, la charge d'une particule α est comprise entre 3,10 et $3{,}20.10^{-20}$ unité électromagnétique, c'est-à-dire deux fois la charge élémentaire ($\pm 1{,}59.10^{-20}$).

On peut alors calculer m ; on trouve que la masse d'une particule α est égale à celle d'un atome d'hélium. Or, on admet que l'atome d'hélium est constitué par un noyau central portant deux charges positives et autour duquel gravitent deux électrons. La particule α est donc le noyau central de l'atome d'hélium et, lorsqu'elle s'arrête et fixe deux électrons, elle redonne le gaz hélium, comme Rutherford l'a montré directement.

Bragg et Kleeman ont observé que le pouvoir d'ionisation des rayons α reste constant pendant une certaine longueur de leur trajectoire, puis cesse *brusquement*. Rutherford a montré que l'ionisation cesse au moment où la vitesse de la particule α tombe au-dessous de $1{,}12.10^9$ centimètres par seconde. Par suite, des rayons α ayant des vitesses inférieures à cette limite ne pourraient être décelés par leur ionisation, et ainsi beaucoup de substances émettent peut-être des rayons α, bien que leur radioactivité soit insoupçonnée.

En interposant diverses substances sur le trajet des rayons α, on a trouvé que le *parcours des particules* α, c'est-à-dire le chemin dans l'air à 15° et sous pression normale qu'effectuent les rayons avant de perdre leur pouvoir ionisant, est en raison inverse de la racine carrée du poids moléculaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une particule α perd son énergie en produisant l'ionisation proportionnellement à $\frac{1}{\sqrt{v}}$. v étant sa vitesse, jusque vers la fin de sa trajectoire, où la chute du pouvoir ionisant est extrêmement rapide. On a constaté que le courbe représentant l'ionisation (mesurée par la valeur du courant de saturation) en fonction du parcours de la particule α (fig. 167) présentent, quelles que soient les substances génératrices de rayons α, toutes la même terminaison. C'est-à-dire que, si AB CD est la courbe d'ionisation pour une particule de parcours OD, BCD est la courbe d'ionisation pour une particule dont le parcours n'est que ED.

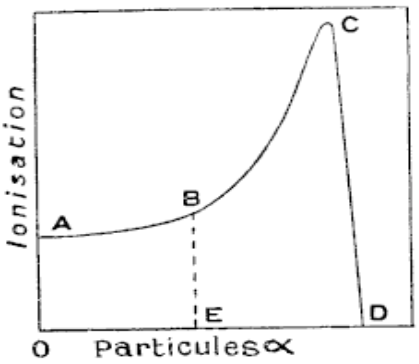


Fig. 167. — Courbe d'ionisation.

Enfin, Geiger a trouvé que le parcours D d'une particule α est proportionnel au cube de sa vitesse :

$$D = kV^3.$$

Connaissant D et V pour une particule, on peut déterminer k et, si on a mesuré expérimentalement le parcours d'une particule α émise par une substance quelconque, il est possible de calculer sa vitesse V.

* * *

Les ***rayons*** β sont facilement déviés par les champs électrique et magnétique, et leur étude montre qu'ils sont constitués, comme les rayons cathodiques, par des électrons animés de grandes vitesses.

Les recherches de Kaufmann sur la vitesse v des électrons et le rapport $\frac{e}{m}$ ont fourni des résultats extrêmement importants. Il a trouvé les nombres expérimentaux suivants :

Vitesse.	*Valeur de* $\frac{e}{m}$
$2{,}36 \times 10^{10}$ centimètres-seconde.	$1{,}31 \times 10^{7}$
$2{,}48 \times 10^{10}$ —	$1{,}17 \times 10^{7}$
$2{,}59 \times 10^{10}$ —	$0{,}97 \times 10^{7}$
$2{,}72 \times 10^{10}$ —	$0{,}77 \times 10^{7}$
$2{,}85 \times 10^{10}$ —	$0{,}63 \times 10^{7}$

Ainsi donc $\frac{e}{m}$ diminue aux très grandes vitesses. Comme e reste constant, il faut en conclure que m augmente.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, la théorie de Lorentz indique que la masse est une fonction de la vitesse :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

v étant la vitesse de déplacement et c la vitesse de la lumière. Nous avons déjà signalé ce fait lors de l'étude des rayons cathodiques.

Les rayons β, très rapides, permettent donc la vérification expérimentale de l'hypothèse à laquelle conduit la théorie électromagnétique que la masse est d'origine électromagnétique.

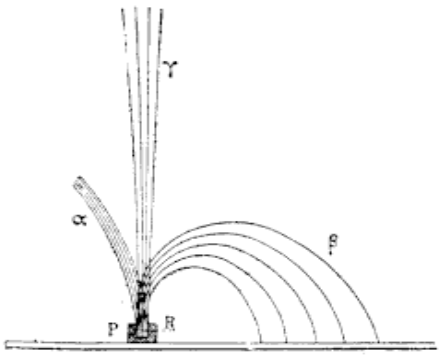


Fig. 168. — Analyse par un champ magnétique de la radiation complexe du radium.

* * *

L'examen du faisceau de ***rayons*** β dévié par un champ magnétique montre par son épanouissement que l'émission n'est pas homogène et le « spectre » des rayons β se révèle comme assez complexe, puisque Rutherford a trouvé seize groupes pour le radium B et quarante-huit pour le radium C.

Une expérience intéressante du professeur Strutt permet de visualiser la perte d'électricité par les rayons β et, inversement, la charge positive que tendent à acquérir les sels radioactifs enfermés dans une enceinte non conductrice. Un sel de radium est enfermé dans une ampoule dont les parois sont suffisamment épaisses pour arrêter les rayons α, mais non les rayons β. Deux feuilles d'or sont attachées à la partie inférieure du tube (fig. 169). Le tube A acquiert une charge positive et les feuilles d'or divergent peu à peu jusqu'à ce qu'elles viennent toucher les parois du tube extérieur dans lequel est placée l'ampoule. Elles se déchargent alors à ce moment, retombent, puis recommencent à diverger. Comme le phénomène de l'émission est indépendant de toutes les actions extérieures que l'on peut faire agir sur lui, un tel dispositif constitue une horloge dont le fonctionnement durera tant que l'émission de rayons β continuera, c'est-à-dire, dans le cas du radium, pendant plusieurs centaines d'années.

* * *

Les ***rayons*** γ ont des propriétés toutes différentes des deux rayonnements précédents. En particulier, ils ne sont pas sensibles à l'action des champs électrique et magnétique et ils ont un grand pouvoir de pénétration,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

certains d'entre eux traversant jusqu'à 22 centimètres de plomb. Ils produisent également une ionisation intense.

De nombreuses expériences ont montré leur identité avec les rayons X. Le coefficient d'absorption de masse (voir p. 186) correspond aux radiations des séries K et L des éléments de poids atomique égal à celui de la substance qui les émet. Par la méthode des réseaux cristallins, on a pu mesurer leur longueur d'onde, qui varie de $1{,}365.10^{-8}$ à $7{,}1.10^{-9}$ centimètre, c'est-à-dire de l'ordre de $\frac{1}{100}$ d'Angström ; ce sont les radiations de plus courte longueur d'onde connue.

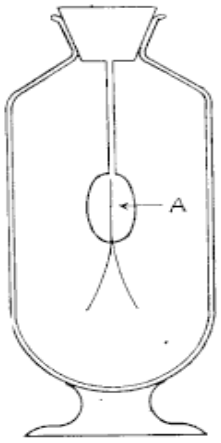


Fig. 169.

Les *rayons* γ sont les rayons X émis par les atomes de la substance radioactive frappés par les rayons β ; ils constituent donc plutôt un rayonnement secondaire.

* * *

J. J. Thomson, vers 1905, a pu mettre en évidence l'existence d'un quatrième rayonnement, les ***rayons*** ζ, analogues aux rayons β, mais dont la vitesse, de l'ordre de grandeur de 3.10^8 centimètres-seconde, est inférieure à la vitesse limite produisant l'ionisation, ce qui rend leur étude très difficile.

* * *

Nous terminerons ce chapitre par l'étude succincte des ***transformations radioactives*** qui accompagnent l'émission de rayons α, β ou γ.

Si on dissout un sel de radium dans l'eau, puis qu'on évapore à sec la solution, le précipité est beaucoup moins actif, tout au moins au début, puis peu à peu reprend son activité initiale. On en conclut que l'on avait, par dissolution, enlevé un produit de transformation du radium : c'est l'***émanation***, gaz se liquéfiant à la pression atmosphérique à — 71°.

En opérant dans le vide, on peut extraire l'émanation produite par le radium. Pour un gramme de radium, on recueille $0^{mm3},59$ de gaz.

Cette quantité d'émanation qui existe en équilibre avec un gramme de radium est appelée le ***curie*** ; c'est l'unité de radioactivité.

En résumé, le radium émet un rayonnement α et en même temps dégage de l'émanation, et l'on traduit ce fait par la relation, vérifiée par l'expérience :

Radium	=	Hélium	+	Émanation
226	=	4	+	222

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'émanation dégage un rayonnement émis aux dépens de ses atomes. On met cette destruction en évidence en mesurant le pouvoir ionisant en fonction du temps. On définit ainsi ce qu'on appelle la ***vie moyenne***, qui est la durée au bout de laquelle la moitié du produit initial a disparu en donnant les nouveaux rayonnements. C'est ainsi que la vie moyenne de l'émanation est de 3,83 jours, c'est-à-dire qu'au bout d'environ 4 jours, la quantité primitive en expérience a été réduite de moitié. Le loi de disparition est donc une loi exponentielle, de la forme :

$$n = n_0 e^{-\lambda t}.$$

n_0 étant le nombre d'atomes radioactifs présents à l'origine et n le nombre restant au temps t. La constante λ est la ***constante radioactive***. Il est facile, connaissant les caractéristiques de l'émanation et la quantité de cette émanation qui est en équilibre avec un gramme de radium, de calculer la vie moyenne du radium. On trouve une durée égale à 1 730 ans.

* * *

Si on laisse un objet quelconque enfermé quelques jours dans un récipient avec un sel de radium, il devient radioactif. Cette ***radioactivité induite*** se détruit d'ailleurs avec une grande vitesse : sa vie moyenne est de l'ordre de 30 minutes. Elle est due au dépôt sur l'objet de substances solides provenant de la désintégration de l'émanation. L'étude de la courbe de décroissance des rayonnements α et β émis par ces dépôts de radioactivité induite permet de la représenter par des sommes d'exponentielles d'exposants différents; en un mot, tout comme un courant alternatif complexe peut être décomposé en une somme de courants alternatifs simples, de même on peut décomposer la courbe de décroissance des rayonnements en une somme de courbes simples correspondant chacune à un élément de vie moyenne déterminée qui, en disparaissant, donne naissance à l'élément suivant.

On a pu d'ailleurs isoler et caractériser chimiquement ces éléments intermédiaires, assez nombreux et éphémères, comme le montre le tableau suivant :

Rayons émis		α	α	α	β	β	β	
	Radium →	*Emanation* →	*Rad. A* →	*Rad. B* →	*Rad. C* →	*Rad. C'* →	*Rad. D* →	
Poids atomique.	226	222	218	214	214	214	210	
Vie moyenne.	1 730 ans.	3,83 j.	3 min.	26,7 min.	19 min.	10^{-6} sec.	16,5 ans.	

Après ces transformations très rapides (Ra A, Ra B, Ra C, Ra C'), on trouve ensuite une série de transformations plus lentes :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Rayonnement émis.	$\overset{\beta}{\longrightarrow}$ *Radium D*	$\overset{\alpha}{\longrightarrow}$ *Radium E*	$\overset{\alpha}{\longrightarrow}$ *Radium F*
Poids atomique	$\overline{210}$	$\overline{210}$	$\overline{206}$
Vie moyenne	16,5 ans.	4,85 jours.	136 jours.

On sait maintenant que le radium est un des produits de la série de l'uranium, mais qu'entre les deux corps se trouvent deux intermédiaires dont la vie moyenne est très longue : l'uranium 2 (2×10^6 années) et l'ionium (2×10^5 années).

Nous n'entrerons pas dans de plus amples détails sur les transformations radioactives, qui relèvent beaucoup plus du domaine de la chimie physique et de l'atomistique que de celui de l'électricité (1).

Il y a deux autres séries radioactives : celle du thorium et celle de l'actinium, contenant chacune une dizaine de termes.

* * *

On sait que les sels de radium émettent non seulement des rayonnements variés, mais aussi de la ***chaleur***. On a trouvé que cette émission est d'environ 100 calories par heure et par gramme de radium. Actuellement, on admet le nombre de 134,7 calories, se répartissant comme suit :

Radium seul	25,1
Émanation	28,6
Radium A	30,3
Radium B	50,5
Radium C	

On a pu calculer qu'un gramme de radium émet, au cours de son exisrence, une quantité de chaleur de l'ordre de 10^{10} calories, quantité énorme, puisque, d'après Strutt, la présence d'une masse de 270 tonnes de radium dans le noyau intérieur de la Terre serait plus que suffisante pour expliquer le degré géothermique constaté dans les sondages (1 degré environ par 33 mètres).

On a également pu compter avec précision le *nombre de particules* α émises par le radium et ses produits de désintégration successive pendant une seconde. On est arrivé au nombre formidable de $13,6 \times 10^{10}$ particules α.

(1) Pour de plus amples détails, voir *Précis de Chimie physique*, par H. VIGNERON (Masson, éditeur).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIII

MAGNÉTISME ET ÉLECTRICITÉ TERRESTRES

Magnétisme terrestre. — Déclinaison. — Inclinaison. — Lignes d'égale déclinaison. — Isogones. — Pôles magnétiques. — Carte magnétique. — Variations des éléments magnétiques. — Variations séculaires. — Variations annuelles. — Variations journalières. — Action du soleil sur le magnétisme terrestre. — Théorie actuelle de l'origine du magnétisme terrestre. — Les perturbations sont d'origine terrestre. — Les aurores boréales. — Leur hauteur. — Répartition géographique. — Leur fréquence. — Recherches de Birckland. — Théorie de Störmer. — Actions perturbatrices locales des éléments magnétiques. — Les phénomènes électriques terrestres. — La charge de la Terre. — Le gradient de potentiel. — Ses variations. — Origine de la charge de la Terre. — Les ions atmosphériques. — Émanations radioactives. — Radiation pénétrante. — Les courants telluriques. — La foudre. — Mécanisme de la décharge. — Ordre de grandeur des phénomènes de l'éclair.

La Terre est le siège de ***phénomènes magnétiques et électriques*** dont l'importance, pour l'ingénieur électricien, ne peut plus être ignorée à l'heure actuelle et rend nécessaire l'étude de ces manifestations. Non seulement pour le magnétisme terrestre, celle de ses modifications générales dans le temps à la surface du globe, mais aussi ses perturbations locales passagères, orages magnétiques par exemple. Quant à l'électricité atmosphérique, dont les orages et les éclairs sont la preuve la plus frappante de l'existence, il est nécessaire d'en tenir compte maintenant que les fils télégraphiques et téléphoniques couvrent la surface du globe et que les transports de force à haut potentiel et à grande distance se généralisent de plus en plus. La protection de ces installations contre les décharges atmosphériques et les perturbations dues aux courants telluriques est un des gros problèmes qu'ont à résoudre les ingénieurs; aussi est-il indispensable d'en étudier les causes, tout au moins succinctement, afin de mieux comprendre leurs effets et les mesures préventives que l'on a adoptées.

* * *

Nous commencerons par l'étude du ***magnétisme terrestre***. Il est défini en chaque point de la terre, par la direction et l'intensité du champ

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

magnétique en ce point ; pratiquement, on a trouvé plus simple de définir le champ par certains éléments ou composantes qui sont : la *déclinaison* α, ou angle que fait le méridien magnétique (c'est-à-dire le plan vertical comprenant la direction du champ magnétique) avec le méridien géographique (c'est-à-dire le plan vertical passant par les pôles géographiques), la *composante horizontale* H du champ magnétique et l'*inclinaison* θ, qui est l'angle que fait la direction du champ magnétique avec l'horizontale du lieu. Il est facile de voir que la connaissance de ces trois éléments définit entièrement en grandeur et direction le champ magnétique qui peut être ensuite exprimé en fonction de telles autres coordonnées désirées. La figure 170 permet de s'en rendre compte. En effet, connaissant la composante horizontale H et l'inclinaison θ, on en déduit immédiatement la valeur de la composante verticale V d'après la relation

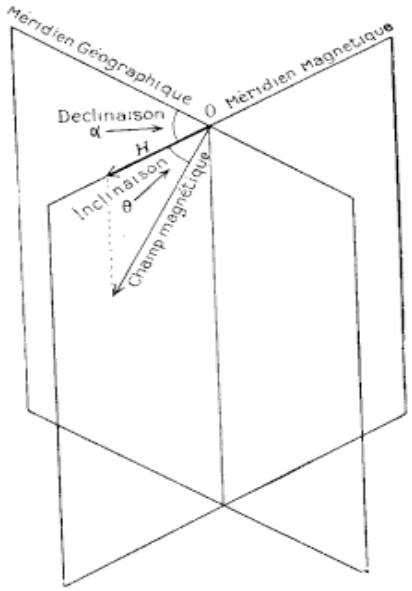


Fig. 170. — Les composantes du champ magnétique terrestre.

$$\frac{V}{H} = \operatorname{tg} \theta$$

et la valeur du champ magnétique I est alors donnée par :

$$I^2 = V^2 + H^2.$$

Nous ne décrirons pas les méthodes employées pour déterminer H, θ et α, car il est très rare que, dans la pratique courante, même pour des navigateurs, on ait à calculer ces éléments. Ils sont donnés par des tables et des cartes dont l'examen est particulièrement intéressant.

* * *

En reliant sur la carte les points du globe pour lesquels ***la déclinaison a la même valeur***, on obtient le réseau représenté figure 171, le système de projection adopté étant celui de Mercator. On constate que ces lignes ou *isogones* convergent vers quatre points : les deux pôles géographiques et deux autres points appelés *pôles magnétiques*. Il y a deux lignes « isogone zéro » passant par les points de la Terre pour lesquels la déclinaison est nulle, c'est-à-dire que l'aiguille aimantée indique la direction nord-sud géographique. L'une de ces lignes joint le pôle nord magnétique au pôle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sud géographique à travers l'Amérique et l'Atlantique ; l'autre réunit le pôle nord géographique au pôle sud magnétique en passant par l'Europe centrale, l'Arabie, l'océan Indien et l'Australie. Suivant certaines lignes

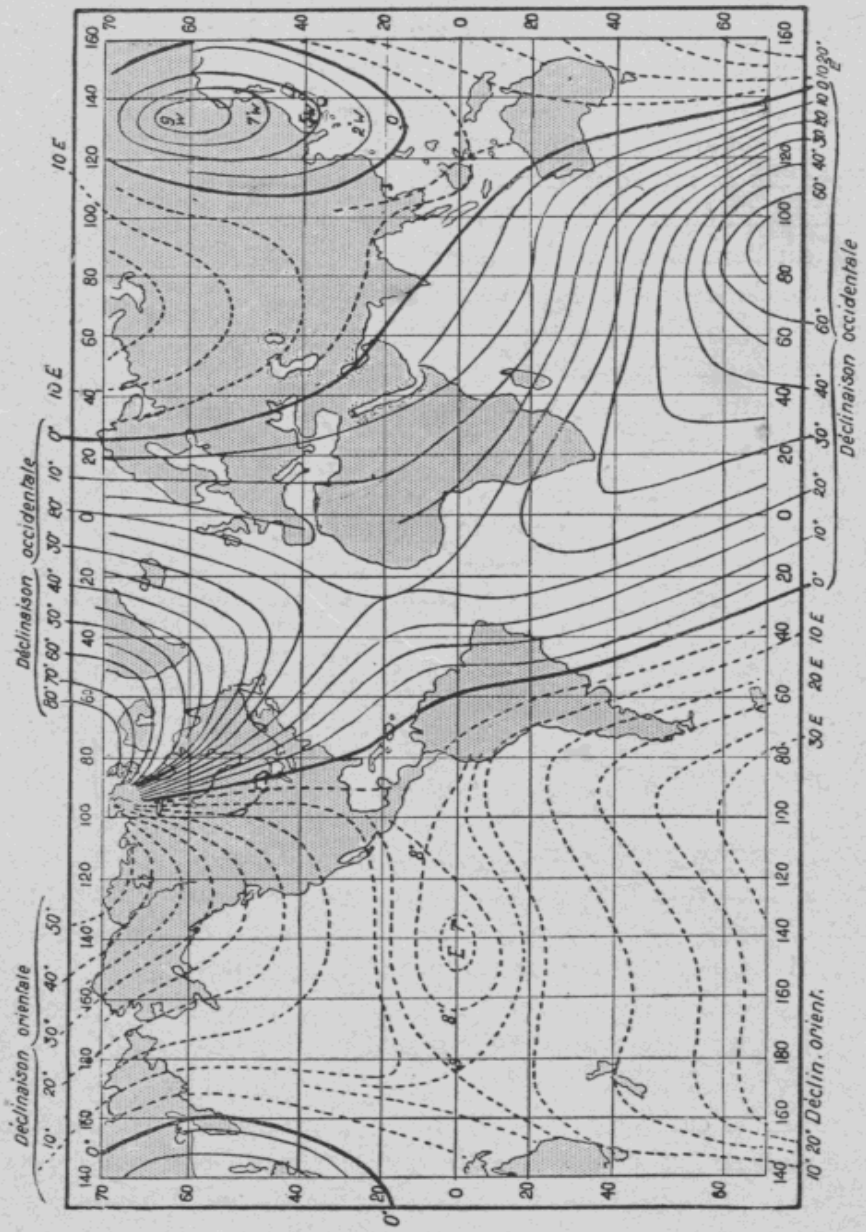


Fig. 171. — Carte de déclinaison magnétique.

joignant le pôle nord géographique au pôle nord magnétique, la déclinaison est de 180°, c'est-à-dire que, comme le pôle nord de la boussole se dirige vers le pôle magnétique, il indique la direction opposée à celle du pôle nord géographique. Il en est de même au voisinage du pôle sud. On

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

se rend mieux compte de ce résultat, d'ailleurs paradoxal, en traçant les isogones sur une mappemonde, la représentation plane, quel que soit le système de projection employé, étant toujours insuffisante.

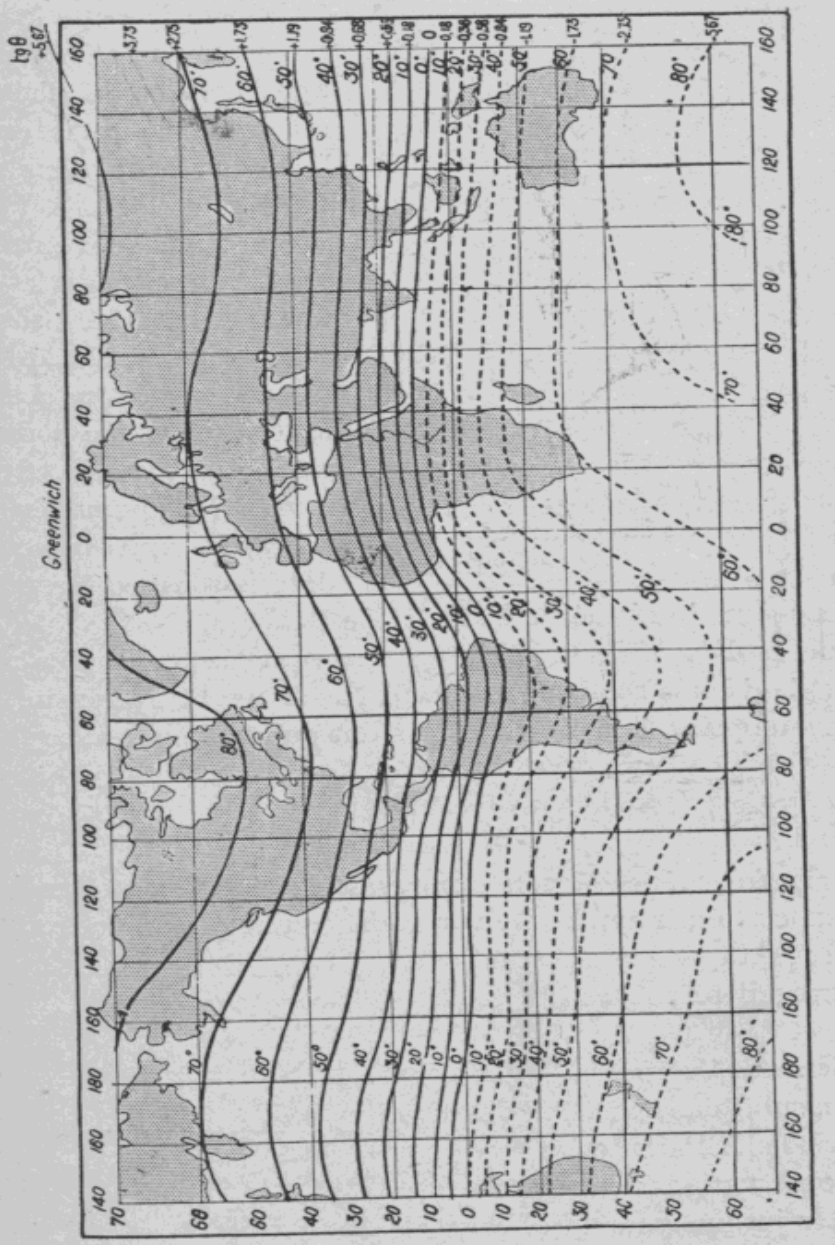


Fig. 172. — Lignes d'égale déclinaison.

A l'est de l'isogone zéro traversant l'Amérique, la déclinaison est ouest, c'est-à-dire que l'aiguille aimantée se dirige à l'ouest du nord géographique (lignes pleines, fig. 171). Au contraire, à l'ouest de cette ligne, la déclinaison est est (lignes ponctuées, fig. 171). On constate que les lignes isogones sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loin d'être régulières ; elles atteignent leur maximum d'importance dans l'Asie centrale, où il existe une région entourée complètement par une ligne d'isogone zéro, et à l'intérieur de laquelle la déclinaison est ouest. C'est ce qu'on appelle l'« ovale sibérien ». Il est probable qu'il existe une ligne analogue dans le Pacifique oriental.

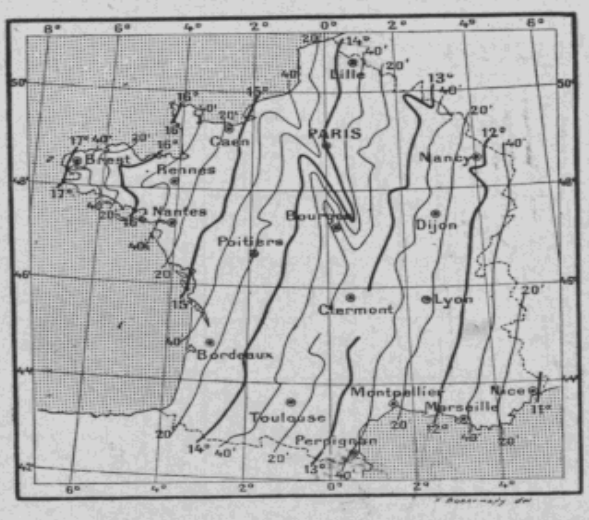


Fig. 173. — Lignes d'égale déclinaison en France. On remarque une forte anomalie dans le bassin parisien.

Ces cartes sont extrêmement importantes pour les navigateurs, et elles sont souvent revues et complétées, car le champ magnétique change dans le temps, comme nous le verrons plus loin. La figure 173 montre les anomalies très importantes que présentent les déclinaisons en France, particulièrement dans la région de Paris et de Beauce.

Les courbes d'égale déclinaison (fig. 172) sont beaucoup plus régulières que celles de déclinaison. Quant aux cartes donnant l'intensité horizontale en chaque point de la Terre, elles n'ont qu'une importance théorique.

* * *

Les ***variations des éléments magnétiques*** peuvent être décomposées en un certain nombre de variations quasi périodiques auxquelles viennent se juxtaposer des perturbations irrégulières, dites *orages magnétiques*.

1° *Variations séculaires.* — La déclinaison subit une variation de longue période. A Paris, en particulier, les observations permettent de remonter jusque vers 1540, et elle peut être représentée par la courbe de la figure 174. D'abord orientale (c'est-à-dire que le nord magnétique était à l'est du nord géographique), elle a passé par un maximum vers 1600, puis a décru, s'est annulée en 1660 et est ensuite devenue occidentale, croissant jusqu'à un

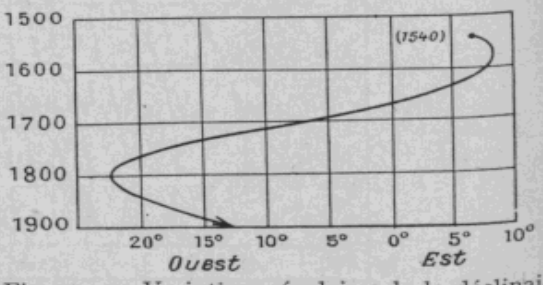


Fig. 174. — Variations séculaires de la déclinaison à Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maximum, d'environ 24°, vers 1800, puis elle a décru constamment depuis cette époque et est voisine de 8 à 10° actuellement. D'après lord Kelvin, le système magnétique terrestre tourne lentement de l'est à l'ouest, accomplissant une révolution en 960 ans environ, le pôle nord décrivant un petit cercle d'environ 17° de rayon.

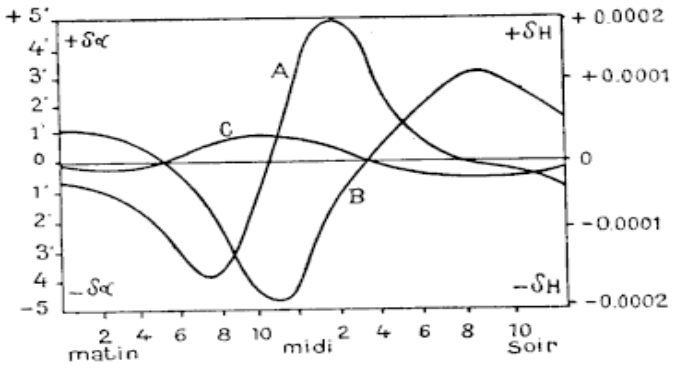


Fig. 175. — Variations quotidiennes des éléments magnétiques.

2° *Variations annuelles.* — Il y a une variation de déclinaison dont la période est d'une année, qui se produit simultanément dans des directions opposées dans les deux hémisphères et dont l'amplitude est dans nos régions d'environ 2′,5. La déviation maxima vers l'est a lieu en août, la déviation maxima vers l'ouest en février.

3° *Variations journalières.* — Enfin, on observe également des variations ayant une période de vingt-quatre heures. La figure 175 donne en A la variation de déclinaison δα (variation d'environ 4 minutes à l'est vers 8 heures du matin, et 5 minutes à l'ouest vers 1 heure de l'après-midi), en B la variation d'intensité horizontale δH (minimum 10 heures du soir, maximum vers 7 heures du matin) et la variation d'inclinaison (courbe C; minimum vers 7 heures du matin, maximum vers 11 heures du soir).

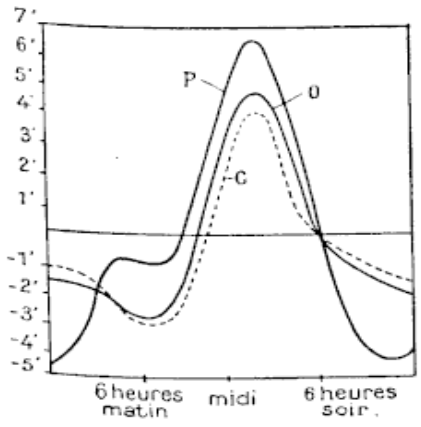


Fig. 176.— Amplitude de la variation magnétique quotidienne.

Ces variations journalières ne sont pas les mêmes tous les jours, ainsi que le montrent les courbes de la figure 176 qui donnent, d'après le Dr Chru, les variations pour les jours ordinaires (courbe O), jours très calmes (courbe C) et jours pendant lesquels les perturbations sont maxima pour la déclinaison (courbe P). Les nombres sont les moyennes des observations de onze années.

D'après Schuster, les variations journalières sont produites par des causes extérieures à la Terre, probablement l'existence de courants électriques dans l'atmosphère, et ces variations provoquent des courants

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

induits dans le sol qui réduisent l'amplitude de la composante verticale et augmentent celle de la composante horizontale.

Les courants terrestres qui produisent les variations magnétiques indiquent que la Terre n'est pas une sphère conductrice uniforme : la couche superficielle est plus conductrice que les couches profondes.

* * *

D'autre part, on constate une analogie entre ces variations et celles que produirait le mouvement de l'atmosphère sous l'action de marée de la Lune et du Soleil. Enfin, si on compare ***l'amplitude des variations journalières et la fréquence des taches solaires***, on arrive à des résultats extrêmement curieux, qui montrent, entre les deux phénomènes, un parallélisme rigoureux.

On constate que la période de onze ans qui constitue le cycle de la fré-

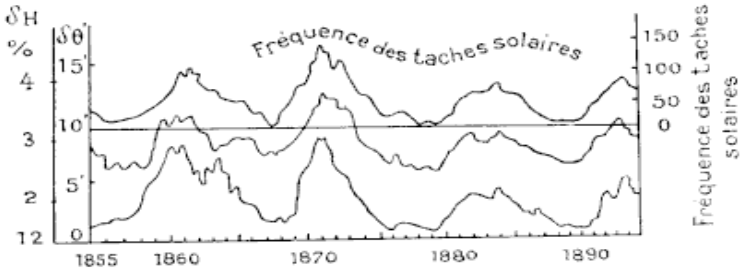


Fig. 177. — Relation entre la fréquence des taches solaires et la variation des éléments magnétiques.

quence des taches solaires coïncide exactement avec la période des variations d'amplitude des perturbations journalières.

Dans la figure 177, $\delta\theta$, amplitude de la variation journalière, est exprimée en minutes d'arc et δH, variation de l'intensité horizontale, en pour cent de l'intensité.

4° A côté de ces changements réguliers, on en enregistre fréquemment de très intenses et très irréguliers, affectant la surface totale de la Terre, souvent concordants avec des aurores boréales très fortes, et que l'on attribue à de véritables orages magnétiques.

* * *

Quelle est l'***origine du magnétisme terrestre*** ? On ne peut encore répondre avec certitude à cette question, mais il est certain qu'il faut chercher la solution dans les actions exercées par le Soleil. Celui-ci est chargé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électriquement, ainsi qu'on a pu le mettre nettement en évidence, et il est logique de penser que le déplacement de la Terre dans le champ magnétique créé par cette énorme charge en mouvement, à la façon de l'induit d'une dynamo dans le champ de ses électro-aimants, serait la cause initiale du magnétisme terrestre.

Quant à ses variations, elles ont été expliquées d'une façon satisfaisante en supposant que le Soleil émet des radiations analogues aux rayons cathodiques qui se produisent dans un tube à vide traversé par un courant électrique. Ces rayons sont constitués par de très petites particules, chargées négativement, qui, en traversant l'atmosphère terrestre, l'ionisent et la rendent conductrice. Toute différence de potentiel se produisant entre les couches de la haute atmosphère donne alors naissance à des courants électriques dont le champ magnétique perturbe l'aiguille aimantée à la surface de la Terre.

Des phénomènes tels que la période de onze ans de la variation de l'intensité journalière du champ magnétique terrestre fournissent des arguments très sérieux à cette théorie, car la nature et l'intensité des radiations émises par le Soleil dépendent évidemment de l'état de sa surface. Les variations quotidiennes peuvent également être interprétées de la même façon, mais il faut en plus tenir compte des variations de température provenant des différences d'énergie radiante reçue du Soleil et qui concourent à perturber le régime électrique et magnétique du globe. C'est ainsi qu'au cours de l'éclipse totale de Lune de 1904, on constata, en tous les points situés sur le trajet du cône d'ombre, une perturbation de l'aiguille aimantée d'un caractère analogue à celui de la variation diurne.

* * *

Lord Kelvin a montré qu'il ne fallait pas attribuer aux modifications de l'état magnétique du Soleil les perturbations observées à la surface de la Terre. Ces perturbations ont une ***origine essentiellement terrestre***, car la quantité d'énergie que devrait rayonner le Soleil pendant une tempête magnétique durant quelques heures serait égale à l'énergie totale rayonnée par cet astre pendant plusieurs mois sous forme calorifique et lumineuse. Il est probable que c'est une radiation, analogue à celle dont nous avons parlé plus haut, ne correspondant pas à une grande dépense d'énergie solaire, qui modifie la conductibilité des couches supérieures de l'atmosphère et permet la formation de courants électriques dont la source d'énergie est la Terre elle-même.

* * *

Les orages magnétiques ne sont pas toujours accompagnés d'aurores

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

boréales, mais les ***aurores boréales***, par contre, sont toujours liées à des perturbations magnétiques. Sans entrer dans la théorie complète de ces phénomènes, nous signalerons que les recherches de Birkeland, Sturmer, etc., ont montré qu'ils s'expliquent par l'existence d'un faisceau de rayons cathodiques soumis à l'action magnétique de la Terre.

Les arcs des aurores boréales sont orientés de l'est à l'ouest, normalement au méridien magnétique, et souvent, mais pas toujours, s'étendent jusqu'à l'horizon. Leur partie inférieure est nettement définie, de telle



Fig. 178. — Aurore boréale, 28 février 1910.

sorte que, par contraste, la portion du ciel à leur voisinage apparaît exceptionnellement noire. Les rayons des aurores sont parallèles aux lignes de force du champ magnétique (fig. 178 et 179). La couleur des aurores boréales est très variable ; beaucoup sont blanches, mais on en observe souvent de rouges, jaunes et vertes. Certaines sont rouges vers leur portion inférieure, puis jaunes, et finalement vertes à leur partie supérieure. Comme beaucoup d'aurores sont extrêmement changeantes, semblables parfois à une immense draperie agitée, ou à des langues de feu géantes provenant d'un mystérieux foyer, ou encore aux rayons d'un projecteur explorant le ciel, on conçoit que les observateurs aient beaucoup de peine à en obtenir des photographies nettes.

* * *

Störmer, Vegard et Krogness ont opéré plus de 2 500 ***déterminations de hauteur d'aurores boréales***, et ils ont trouvé que la hauteur de la portion inférieure varie de 85 à 170 kilomètres, avec deux maxima nettement définis, l'un à 100 kilomètres, l'autre à 106 kilomètres. Quant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à la hauteur de la partie supérieure des aurores, elle varie de 300 kilomètres, hauteur moyenne, à 600 et 700 kilomètres dans certains cas.

* * *

En ce qui concerne leur ***position géographique***, on a pu tracer des lignes d'égale fréquence des aurores, tout au moins pour l'hémisphère nord ; ce sont des cercles ayant pour centre le point où l'axe de l'aimant



Fig. 179. — Aurore boréale, 3 mars 1910.

terrestre rencontrerait la surface de la Terre (ce point est différent du pôle magnétique et du pôle géographique). On trouve que le maximum de fréquence (environ 100 par an) s'observe autour des latitudes 60° (sur l'Atlantique Nord et l'Amérique) et 70° pour l'Europe. Quand on s'éloigne du pôle nord, la fréquence décroît si rapidement que, dans l'Europe méridionale, c'est un phénomène tout à fait exceptionnel. A Paris (latitude 45°), on peut observer encore assez fréquemment des aurores boréales. Nous ne citerons que celle de la nuit du 22 au 23 mars 1920, qui fut une des plus remarquables que l'on ait observées. En Scandinavie, son éclat était incomparable, et, grâce à sa durée, M. Störmer put en prendre plus de six cents photographies durant la nuit, constituant ainsi une documentation de tout premier ordre.

* * *

Quant à la ***fréquence*** des aurores boréales, on a constaté qu'en moyenne elles sont plus nombreuses durant les années de maximum des taches solaires que pendant les années de minimum des taches. Elles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

apparaissent aussi plus souvent avant minuit qu'après. Ces résultats semblent indiquer que le Soleil n'est pas étranger à la production des aurores boréales, et, comme, d'autre part, les aurores brillantes et mobiles s'accompagnent d'orages magnétiques, il est à peu près certain que les aurores boréales sont dues à des décharges électriques, provenant du Soleil ou provoquées par lui.

* * *

Tel était à peu près l'état de nos connaissances sur l'origine des aurores boréales lorsque M. Störmer, qui, avant de se consacrer à l'astrophysique, était un mathématicien remarquable, attaqua le problème par l'analyse mathématique. Ce sont les expériences de Birkeland, essayant en laboratoire de reproduire les apparences des aurores boréales, qui lui fournirent le point de départ de ses raisonnements. Birkeland a montré que, si l'on approche un aimant puissant d'un tube de Crookes, on observe une déviation de la lueur, et celle-ci présente alors, dans la partie déviée, des apparences qui rappellent, bien qu'à une très modeste échelle, celles que l'on admire dans les aurores boréales.

Or, la Terre peut être considérée comme un grand aimant et, si nous supposons que le Soleil émet des rayons cathodiques, elle doit agir sur eux de la même façon que dans l'expérience simple de Birkeland.

D'autre part, en entourant l'aimant par une sphère électrisée, c'est-à-dire en se rapprochant des conditions réalisées dans la nature, ce savant a constaté l'existence de deux zones de concentration au voisinage des pôles, c'est-à-dire exactement le même résultat que celui qu'a fourni l'étude de la répartition des aurores boréales.

On pourrait penser qu'il n'y a plus qu'à poser l'équation et à la résoudre pour avoir la solution complète du problème. Malheureusement, s'il est simple de mettre le problème en équation, l'intégration ne va pas sans difficultés considérables. Sans entrer dans le détail, nous dirons simplement que l'équation différentielle est du second ordre et peut être intégrée une fois, introduisant ainsi une constante d'intégration. Pour aller plus loin, on n'a pas d'autre ressource que de calculer par points les trajectoires particulières correspondant aux différentes valeurs de la constante. Ce n'est pas une petite besogne ; il a fallu quatre ans à M. Störmer et à ses aides pour calculer cent vingt trajectoires seulement, et les calculs forment un manuscrit comprenant plus de 7 000 pages grand format. Ce travail formidable a été couronné de succès ; il a permis de retrouver la distribution géographique des aurores boréales, leur apparition surtout avant minuit, la forme de draperies est-ouest, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il semble donc que les aurores boréales soient dues à des torrents de particules β chargées négativement, émises par les substances radioactives renfermées dans le Soleil, particules β qui sont captées par le champ magnétique de la Terre et pénètrent dans la haute atmosphère. La vitesse de ces rayons cathodiques est d'environ 120 000 kilomètres par seconde.

Si les aurores boréales sont les seuls phénomènes nous renseignant sur la composition de la haute atmosphère terrestre (les ballons-sondes ne dépassant pas 30 ou 40 kilomètres) qui se révèle comme constituée principalement par de l'azote, elles pourront peut-être conduire à des conclusions intéressantes en ce qui concerne le Soleil lui-même. En effet, M. Störmer a trouvé par le calcul une distribution des faisceaux de particules négatives émises par le Soleil, si analogue à la distribution des flammes que l'on observe au moment des éclipses totales, qu'il semble bien qu'une nouvelle explication puisse être proposée pour l'origine de ces immenses lueurs qui s'échappent de l'astre du jour.

* * *

Nous ne nous étendrons pas plus longuement sur le magnétisme terrestre, dont l'étude, extrêmement captivante, formerait facilement la matière d'un gros volume. Ajoutons cependant qu'à toutes les variations dans l'espace et dans le temps dont nous venons de parler se juxtaposent encore, pour les navigateurs, des ***actions perturbatrices provenant des navires eux-mêmes***. La coque entièrement métallique et les divers organes en métaux magnétiques qui s'y trouvent placés (machines, turbines, tourelles pour les navires de guerre, etc.) exercent sur l'aiguille aimantée une action dirigeante impossible à calculer et malheureusement variable d'un voyage à l'autre. La coque est aimantée d'une façon permanente, ce magnétisme étant acquis pendant la construction et dépendant de l'orientation de la cale du chantier ; de plus, les masses de fer doux disposées verticalement ou horizontalement dans le navire sont aimantées par la composante verticale ou horizontale du champ terrestre et viennent encore compliquer le problème. Aussi faut-il fréquemment vérifier les indications fournies par les boussoles et les corriger en tenant compte de tous ces facteurs. Les compas gyroscopiques, qui suppriment tous ces inconvénients, remplaceront sans doute dans l'avenir la boussole ordinaire, tout au moins pour les voyages au long cours.

* * *

Nous venons de voir que notre globe possède des propriétés magnétiques ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il est aussi le siège de ***phénomènes électriques*** intenses, même en l'absence de tout orage ou autre manifestation violente.

La Terre n'est pas un corps électriquement neutre. Sa surface est recouverte d'une couche d'électricité négative suffisante pour produire dans l'atmosphère un champ électrique considérable. En effet, le potentiel croît, au voisinage de la Terre, de 150 volts environ par mètre d'élévation (c'est ce que l'on exprime en disant que le ***gradient vertical de potentiel*** est de 150 volts).

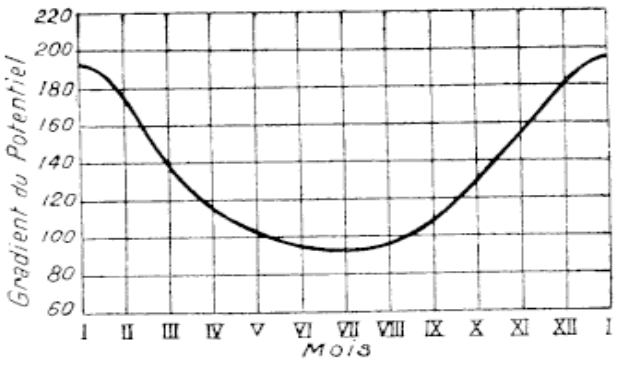


Fig. 180. — Variations du gradient de potentiel au cours de l'année.

Presque toujours cette charge est *négative*, mais, si elle est pratiquement constante en signe, elle varie non seulement avec l'altitude, mais encore, comme le champ magnétique terrestre, suivant l'époque de l'année et l'heure du jour. Le gradient est toujours plus élevé en hiver qu'en été, ainsi que l'indique la figure 180.

Le gradient n'est pas constant lorsque l'on s'élève dans l'atmosphère. Il décroît progressivement et, vers 9 kilomètres d'altitude, il n'est plus que de 2 volts par mètre, et, à 10 kilomètres, il doit être pratiquement nul. Les lois de l'électrostatique montrent que la seule explication de cette diminution du gradient de potentiel en fonction de l'altitude est l'existence dans l'atmosphère d'une charge d'électricité positive dont la valeur est juste égale à celle de la charge négative de la Terre. Les expériences directes ont vérifié cette conclusion.

* * *

L'ensemble du système charge négative à la surface du sol et charge positive dans l'atmosphère persisterait indéfiniment si l'atmosphère était un isolant parfait. Il n'en est rien, et la conductibilité électrique de l'air, bien qu'extrêmement petite, est néanmoins suffisante pour assurer en moins de dix minutes l'écoulement de 90 p. 100 de la charge du sol. Comme cette charge négative persiste, il faut donc qu'elle se reconstitue perpétuellement, par un mécanisme qui est resté longtemps mystérieux.

La découverte des ions et de leurs propriétés a fourni une ***explication vraisemblable de la charge électrique de la Terre***. On sait que, sous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

certaines influences, une molécule peut perdre un électron et reste alors chargée positivement. L'électron ainsi libéré ne tarde pas à se fixer sur une molécule neutre qui constitue alors un ion négatif. Ces ions rendent l'air conducteur ; sous l'influence d'un champ électrique, les ions positifs et négatifs se déplacent en effet en sens inverse, les uns vers les corps chargés négativement, les autres vers les corps chargés positivement, et ils les déchargent,

Supposons qu'il existe dans l'atmosphère une source permanente d'ions. Le nombre des ions existant par centimètre cube d'air irait en croissant constamment, si les corpuscules négatifs et positifs ne tendaient pas à se recombiner par attraction mutuelle ; plus ils sont nombreux, plus cette recombinaison est rapide. On conçoit donc qu'il s'établisse un équilibre entre le nombre d'ions produits et le nombre de ceux qui se recombinent. Ainsi, on admet que 6 paires d'ions sont produits dans l'atmosphère par seconde et par centimètre cube. Lorsque le nombre de paires d'ions par centimètre cube atteint 2 400, il se trouve que, dans une seconde, 6 paires d'ions se recombinent ; à ce moment, l'équilibre est atteint et le nombre des ions ne peut plus augmenter.

* * *

Il nous reste à trouver quelle est l'***origine de ces ions***, quel est le mécanisme de leur production incessante dans l'atmosphère. Il semble que l'on puisse distinguer deux sources principales :

1° Les émanations radioactives dans l'air ;

2° Ce que l'on appelle la radiation pénétrante.

On sait que la radioactivité consiste en une désintégration spontanée de l'atome de certains corps simples. Cette désintégration est accompagnée de l'émission de trois radiations de nature et de propriétés différentes : les *rayons* α, constituant une émission d'atomes d'hélium chargés positivement, dont la masse est égale à quatre fois celle de l'atome d'hydrogène et dont la vitesse initiale est de l'ordre de 3 000 kilomètres par seconde ; les *rayons* β, formés d'électrons négatifs animés de vitesses voisines de celle de la lumière, et dont la masse est environ deux mille fois plus petite que celle de l'atome d'hydrogène ; enfin, les *rayons* γ, simples pulsations de l'éther et analogues aux rayons X.

Ces différentes sortes de radiations ont toutes trois le pouvoir d'ioniser l'air. Les particules α sont des ioniseurs excellents ; aussi épuisent-elles rapidement leur énergie dans ce mécanisme et elles sont absorbées dans une couche d'air de quelques centimètres d'épaisseur. Les particules β sont moins actives et en conséquence peuvent traverser plusieurs mètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'air avant d'épuiser leur action ionisante. Les rayons γ sont plus pénétrants encore, et leur intensité atteint encore 36 p. 100 de la valeur initiale après la traversée d'une épaisseur d'air de 100 mètres.

Or, le sol contient du radium et d'autres substances radioactives dont la désintégration donne naissance à de l'***émanation***, produit gazeux lui-même radioactif qui se diffuse dans l'atmosphère en se désintégrant à son tour, émettant des rayonnements α, β et γ qui ionisent l'air. La quantité d'émanation de radium dans l'atmosphère varie beaucoup, mais est toujours extrêmement faible, puisque, sur une épaisseur de 1 kilomètre à partir du sol, la couche d'air qui enveloppe tout notre globe ne contient guère que 250 grammes d'émanation. Un centimètre cube d'air atmosphérique ne contient qu'une à deux molécules d'émanation de radium, contre 30 millions de millions de millions d'autres molécules. Néanmoins, en additionnant l'ionisation produite par les rayons α, β et γ de l'émanation et de ses produits, on arrive à un pouvoir de génération de 1,7 ion par seconde et par centimètre cube de l'atmosphère. Si on tient compte des autres causes d'ionisation, émanation du thorium, action directe du radium du sol par ses rayons γ (la teneur moyenne du sol est en effet de 4.10^{-12} gramme de radium par centimètre cube, dont le rayonnement γ provoque l'apparition de 0,8 ion par centimètre cube), on arrive à un total d'environ 4,35 ions produits par seconde et par centimètre cube, se répartissant comme suit, d'après A. S. Eve :

Rayons.	*Origine.*	*Radium.*	*Thorium.*	*Total.*
α	Air.	1,63	1	2,63
β	—	0,035	0,025	0,06
γ	—	0,035	0,025	0,06
γ	Sol.	0,80	0,80	1,6
Nombre d'ions par cc./minute.		2,5	1,85	4,35

En tenant compte de la vitesse avec laquelle les ions se recombinent, on arrive à la conclusion que, dans un centimètre cube d'air, il existe en moyenne 1 320 ions de chaque signe. Lorsque l'on ne considère que les ions les plus rapides, ce nombre se ramène à 800 ions de chaque signe par centimètre cube.

* * *

Malgré les difficultés que présentent les mesures directes, on peut dire que les expériences ont montré que la radioactivité de l'air est suffisante pour rendre compte de l'ionisation produite. Il n'en est plus de même sur mer : la radioactivité de l'air y est beaucoup plus faible, 2,5 p. 100 seule-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment de celle trouvée au-dessus des terres, et, d'autre part, la teneur de la mer en substances radioactives est infiniment petite. Les causes d'ionisation que nous avons fait intervenir précédemment disparaissent donc, et cependant le nombre des ions par centimètre cube au-dessus de l'océan est aussi grand, sinon plus, qu'au-dessus des terres, comme le montrent les chiffres suivants :

	Nombre d'ions les plus rapides par centimètre cube.	
	Ions positifs.	*Ions négatifs.*
Moyenne des observations terrestres	737	668
— — marines, durant la croisière du *Carnegie*	804	677

C'est alors que l'on fait intervenir la seconde cause d'ionisation : la ***radiation pénétrante***, que l'on peut mettre en évidence de la façon suivante. Si on prend un récipient hermétiquement clos et ne contenant pas d'air radioactif, on constate cependant qu'il s'y produit des ions, à la vitesse à peu près constante de 10 ions par seconde. On peut attribuer cette génération partiellement à l'action des rayons γ émanant des substances radioactives contenues dans le sol, ces rayons traversant les parois métalliques du récipient. Mais, si on répète l'expérience sur mer, c'est-à-dire en l'absence de produits radioactifs, il se forme cependant encore 4 ions par seconde et par centimètre cube dans un récipient métallique. De plus, même sur terre, si on supprime l'action des rayons γ d'origine terrestre, en entourant le récipient d'une chemise d'eau d'épaisseur suffisante, on trouve encore qu'il y a génération de 4 ions par seconde et par centimètre cube.

Enfin, si l'on effectue les observations en ballon, c'est-à-dire à différentes altitudes, on constate que l'ionisation diminue d'abord jusque vers l'altitude de 700 mètres, ce qui s'explique facilement par l'absorption par l'atmosphère des rayons γ issus du sol. Mais, au-dessus de cette altitude, l'ionisation se met à croître, et d'autant plus que l'observation est faite à plus grande hauteur. C'est ainsi qu'à 9 000 mètres de haut, son intensité dépasse de 80 ions par seconde celle qu'on observe à la surface du sol, et le gain, dans le dernier kilomètre seul, est de 20 ions par centimètre cube, ce qui permet de supposer qu'à de plus grandes altitudes encore, l'ionisation doit devenir très considérable.

Tous ces phénomènes montrent nettement qu'il existe une source d'ionisation autre que les substances radioactives contenues dans le sol ou dans la basse atmosphère. On est donc conduit à chercher l'explication dans l'existence d'une radiation provenant d'une source extra-terrestre, radiation dont le pouvoir pénétrant devrait être au moins dix fois supérieur à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celle des rayons γ les plus pénétrants que nous connaissions dans les substances radioactives.

Nous sommes donc ici encore ramenés à l'étude de la radiation γ issue du Soleil et dont les aurores boréales ont déjà révélé l'existence, et l'ionisation de l'air serait due, comme les aurores boréales, aux chocs des corpuscules solaires contre les molécules gazeuses de l'atmosphère. Nous avons dit que la surface du globe était chargée et que l'atmosphère était conductrice. Il en résulte donc un courant, extrêmement faible à la vérité, puisqu'il n'est que de $2\ 10^{-16}$ ampère par centimètre carré de la surface du sol, c'est-à-dire que, pour toute la Terre, il ne dépasse pas 3 000 ampères. Malgré cette intensité minime, en dix minutes la Terre perdrait 90 p. 100 de sa charge électrique.

Il existe donc une source qui recharge perpétuellement le sol, au fur et à mesure que son électricité se dissipe. Ici encore, il faut faire intervenir la radiation pénétrante. L'étude des rayons γ, analogues aux rayons X, et qui sont émis par les substances radioactives, a montré que l'ionisation qu'ils produisent consiste en une émission d'électrons, projetés dans la direction des rayons γ incidents, doués d'une grande vitesse et d'un pouvoir de pénétration d'autant plus considérable que la radiation qui leur donne naissance a un pouvoir pénétrant plus élevé. Il s'ensuit que les électrons provenant de l'ionisation par la radiation extrêmement pénétrante issue du Soleil peuvent parcourir dans l'atmosphère des trajets considérables avant d'être amenés au repos.

Les couches successives de l'atmosphère sont donc traversées par des électrons libérés dans les couches supérieures par la radiation solaire ; ces corpuscules viennent heurter des molécules matérielles, donnant naissance à une nouvelle radiation pénétrante qui provoque à son tour l'émission de nouveaux électrons ; le mécanisme recommence, et, de proche en proche, un flux d'électrons se constitue, qui finalement vient charger la surface du sol.

En chaque point de l'atmosphère, il y a donc un courant d'électrons dirigés vers le bas, animés de grande vitesse par la radiation pénétrante, et un courant de conduction, en sens inverse, qui ramène l'électricité du sol à l'atmosphère. Un état d'équilibre s'établit alors, et c'est cet état que nous observons.

* * *

Nous venons de parler de l'état électrique normal de la surface terrestre et de l'atmosphère. Il nous reste maintenant à dire quelques mots des ***manifestations extraordinaires*** qui viennent perturber cet état et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont l'importance pratique est considérable : courants telluriques et foudre.

* * *

Les ***courants tèlluriques*** se manifestent par des courants parasites qui circulent dans les lignes télégraphiques et téléphoniques et se juxtaposent aux émissions ordinaires. Leur force électromotrice est parfois considérable, voisine de 1 000 volts, surtout lorsque les lignes sur lesquelles on les observe sont très longues, et il se produit, entre les diverses parties des appareils récepteurs, des étincelles contre lesquelles il faut protéger les installations.

Ces courants ne semblent pas avoir de rapports avec les circonstances atmosphériques, mais, au contraire, ils paraissent être reliés très étroitement avec les phénomènes magnétiques dont la Terre est le siège. En particulier, ils présentent comme ceux-ci des variations périodiques et, lorsque leur intensité est anormale, on constate l'apparition simultanée d'aurores boréales, de taches solaires de grandes dimensions, d'orages magnétiques intenses, et souvent aussi d'importants mouvements sismiques. Ces coïncidences sont suffisantes pour que l'on puisse considérer les courants telluriques comme en relation directe avec l'activité solaire.

* * *

La ***foudre***, au contraire, est un phénomène essentiellement terrestre aussi le mécanisme de l'éclair est-il mieux connu. Franklin a montré, vers le milieu du XVIII^e^ siècle, que l'éclair et la décharge d'une machine électrostatique sont des phénomènes identiques. Il y a pourtant une différence importante qui semble parfois avoir passé inaperçue : c'est que la distribution des charges électriques génératrices de la décharge n'est pas la même dans les deux cas. Tandis qu'elles sont localisées à la surface des corps conducteurs de la machine électrostatique dans les expériences de laboratoire, elles sont au contraire distribuées irrégulièrement au sein de la masse énorme de nuages dans le cas des éclairs. Par suite, les deux décharges se différencieront par un certain nombre de détails.

Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, il faut que l'air ait été ionisé avant que la décharge puisse passer, et cette condition semble se réaliser en général d'une façon progressive et spasmodique, c'est-à-dire qu'une petite décharge se produit initialement, s'étendant sur une petite distance, suivie d'une autre progressant un peu plus loin, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'espace entre les deux pôles soit suffisamment ionisé pour permettre la décharge franche, l'étincelle. Les photographies d'éclairs prises sur les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plaques animées de mouvements rapides montrent nettement ce caractère pulsatoire et la façon dont l'éclair se fraye peu à peu son chemin à travers l'atmosphère. Elles montrent également que l'éclair est constitué par plusieurs décharges extrêmement rapprochées.

* * *

Sans nous attarder à décrire les diverses apparences que peuvent présenter les éclairs, il reste à expliquer la ***genèse de la décharge initiale***, qui est encore obscure à l'heure actuelle. Si on s'appuie sur les résultats de laboratoire, il faut une différence de potentiel d'environ 30 000 volts pour produire une étincelle de 1 centimètre de longueur, et il est bien évident que l'on ne peut extrapoler dans le cas de l'éclair, car on arriverait à des potentiels fantastiques pour des éclairs de 2 à 3 kilomètres de longueur. De plus, s'il existait une différence de potentiel aussi énorme, la vitesse de chute des gouttes d'eau et leur dimension seraient fortement influencées. En effet, les gouttes de pluie d'orage sont chargées et portent souvent jusqu'à 6 unités électrostatiques d'électricité par centimètre cube. Dans un champ de 30 000 volts par centimètre, la force électrique s'exerçant sur les gouttes d'eau serait environ 0,6 de la force de gravitation, de sorte que, suivant le sens du champ, la chute des gouttes serait ou extrêmement ralentie ou au contraire tellement accélérée que les gouttes se briseraient en gouttes très petites, ce qui n'est pas le cas.

Les théories modernes admettent que la distribution des charges électriques à l'intérieur d'un nuage orageux est la suivante : la portion inférieure du nuage est très fortement chargée positivement et la partie supérieure est chargée d'électricité négative, de sorte que la décharge de la couche positive peut se faire soit vers le sol, soit vers la partie supérieure du nuage, ce qui est bien conforme à l'observation. D'autre part, à l'intérieur du nuage existe un régime troublé de vents ascendants déterminant, au point de vue électrique, la formation de colonnes d'air ionisé ou de vapeur d'eau chargées négativement et disposées verticalement entre deux surfaces horizontales (les limites supérieure et inférieure du nuage) chargées de signes contraires.

C'est cette distribution en volume particulière des charges qui permet de comprendre le mécanisme de l'éclair.

* * *

Il est intéressant de donner l'***ordre de grandeur*** tout au moins des ***caractéristiques des éclairs***. Leur durée tout d'abord ; elle semble varier, d'après les mesures de De Blois, de 0,0002 à 0,0006 seconde pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des éclairs uniques, ceux durant un dixième de seconde ou plus étant certainement multiples, constitués par des séries de décharges se produisant à des intervalles très rapprochés et suivant le même chemin.

Les décharges peuvent se produire entre le nuage et la Terre, entre deux nuages différents ou à l'intérieur d'un nuage, ce qui fait que leur longueur peut être extrêmement différente, variant, suivant les cas, de 2 à 3 kilomètres à plus de 15 kilomètres.

Ces décharges, même lorsqu'elles sont multiples, ne sont pas alternatives; le sens d'écoulement de l'électricité est toujours le même, contrairement à ce qui se passe dans la décharge d'un condensateur. Les actions électriques provoquées par la foudre ont nettement mis ce résultat en évidence.

* * *

Un des phénomènes les plus curieux de la décharge électrique est l'écrasement des conducteurs creux, écrasement qui permet de se faire une idée tout au moins approximative de l'intensité du courant et de la quantité d'électricité mise en jeu ; aussi allons-nous y consacrer quelques lignes.

On constate souvent que la tige creuse d'un paratonnerre frappé par la foudre est non seulement fondue à sa partie terminale, mais encore écrasée sur une grande longueur. L'explication de cette déformation par la pression résultante d'une onde explosive dans l'air due à l'échauffement brusque de l'air le long du trajet de l'étincelle est inadmissible, ainsi que l'ont montré Pollock et Barraclough. Ces auteurs attribuent les déformations mécaniques observées à des actions attractives électromagnétiques.

On sait en effet que chaque fibre longitudinale d'un conducteur parcouru par un courant est attirée par ses voisines, par suite des actions mutuelles des champs magnétiques dus à leurs courants respectifs, la pression « magnétique » totale résultante ayant pour effet de comprimer le conducteur. Si celui-ci est creux et si la résistance mécanique de sa paroi est affaiblie par suite de l'échauffement dû au passage d'un courant intense, on conçoit qu'il puisse s'écraser, comme on l'observe dans le cas des tiges de paratonnerre.

Northorp a calculé la pression P ainsi exercée par un courant d'intensité I circulant dans un conducteur creux cylindrique de rayon extérieur a et de rayon intérieur b. Cette pression est donnée par :

$$P = \frac{I^2}{100\,\pi\,(a^2 - b^2)}\left(1 + \frac{2\,b^2}{a^2 - b^2}\,\log_e \frac{b}{a}\right).$$

Par exemple, si le conducteur a 18 millimètres de diamètre extérieur,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

16 millimètres de diamètre intérieur, et si on admet que, à la température à laquelle le métal est porté, il suffit d'une pression de 1 atmosphère pour amener l'écrasement du tube, on trouve qu'un courant de 19 500 ampères environ produira ce résultat.

On peut raisonner d'une autre façon. Généralement, les soudures et brasures des tiges de paratonnerre sont fondues par le passage de la décharge, ce qui nécessite que les pièces aient été portées à une température d'au moins 1 050°. Connaissant la résistance de la tige en expérience, la chaleur spécifique du cuivre à haute température (0,11 environ) et si on admet que la durée de la décharge est 0,01 seconde, on trouve facilement l'intensité minima du courant qui a parcouru le conducteur. Le calcul donne 90 000 ampères comme valeur moyenne, ce qui correspond sans doute à une intensité maxima de 100 000 ampères.

Cette intensité, si on se reporte à la formule précédente, produit une pression de $2\,638 \times 10^4$ dynes par centimètre carré, soit environ 25 kilogrammes, amplement suffisante pour expliquer les déformations mécaniques subies par le conducteur. Une intensité de 90 000 ampères pendant 0,01 seconde correspond à 900 coulombs, soit 27×10^{11} unités électrostatiques d'électricité, charge énorme si on la compare à celles que l'on peut emmagasiner dans les condensateurs de laboratoire, mais cependant très petite si on se rappelle qu'elle ne peut produire l'électrolyse que de $0^{gr},084$ d'eau! Il ne faut pas oublier non plus que souvent les décharges ne produisent pas de déformations mécaniques, c'est-à-dire qu'elles sont beaucoup plus faibles.

Ainsi, pour terrifiantes que paraissent les manifestations électriques atmosphériques, elles ne mettent en jeu que des quantités d'électricité relativement très faibles. Cependant, elles n'en constituent pas moins un danger pour les installations électriques aériennes, et nous verrons qu'elles ont nécessité, pour se défendre contre elles, la création de tout un matériel de protection extrêmement important.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME PARTIE

PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XIV

LES MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES EN ÉLECTROTECHNIQUE

Les isolants. — Décharge conductive. — Résistivité. — Décharge disruptive. — Distance explosive. — Rigidité électrostatique. — Revue des principales matières isolantes : amiante, arcanson, ardoise, bakélite, basalte, bitumes, caoutchouc, chatterton, diélectrine, ébonite, galalithe, gutta-percha, gomme laque, huiles, marbre, mica, papier, paraffine, porcelaines, quartz, résines, soufre, stéatite, verres. — Les conducteurs solides. — Le cuivre : le cuivre de Matthiessen. — Les bronzes. — Le fer. — Les aciers. — L'aluminium. — Comparaison entre le cuivre et l'aluminium. — Le duralumin. — Conducteurs mixtes. — Le zinc. — Les alliages. — Variations de la résistivité en fonction de la température. — Le charbon. — Les conducteurs liquides. — Conductibilité des électrolytes. — Les matériaux magnétiques. — Aciers. — Classifications d'Osmond. Choix suivant les usages.

Les matériaux dont on se sert pour la construction des appareils électriques doivent remplir un certain nombre de conditions spéciales concernant leurs propriétés isolantes, conductrices ou magnétiques. La mise en service d'installations à haut voltage, à grande intensité, le développement de la télégraphie sans fil ont rendu plus impérieuses encore les exigences des électriciens. Aussi de nombreux produits ont-ils été étudiés afin de satisfaire aux divers besoins de l'industrie électrotechnique. Dans ce chapitre, nous les passerons rapidement en revue, ayant simplement pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

but de donner aux lecteurs une vue générale de la question. Nous étudierons successivement les isolants, les conducteurs et les matériaux magnétiques.

LES ISOLANTS

Les isolants sont employés pour séparer deux corps conducteurs entre lesquels existe une différence de potentiel, leur but étant d'éviter que l'un d'eux ne se décharge sur l'autre. Or cette décharge, suivant la différence de potentiel existant entre les deux conducteurs, peut avoir lieu de deux manières différentes.

Si la différence de potentiel est peu élevée, la décharge est dite *conductive* et a lieu d'une manière continue, suivant la loi d'Ohm, en donnant un courant dont l'intensité est $I = \frac{E}{R}$, E étant la différence de potentiel entre les deux conducteurs et R la résistance de l'isolant. Par suite, dans le cas considéré, la valeur des isolants dépendra de leur plus ou moins grande résistance et on les classera d'après leur *résistivité* $\left(\rho = \frac{Rs}{l}\right)$ exprimée en millions de mégohms par centimètre.

Nous donnons ci-dessous quelques résistivités d'isolants, à la température ordinaire, afin de fixer l'ordre de grandeur de cette quantité.

Air sec	Pratiquement infinie.
Paraffine	34 000
Ébonite	28 000
Gomme laque	9 000
Gutta-percha	450
Mica	80
Cristal	6 000
Verre ordinaire	90
Porcelaine	2,000
Marbre blanc	0,008
Ardoise	0,0002

On voit que les substances constituant les tableaux sur lesquels on monte les différents organes de commande des appareils électriques, interrupteurs, commutateurs, etc., le marbre et l'ardoise, sont de très mauvais isolants, et, lorsque les tensions sont élevées, il faut prendre des précautions spéciales pour éviter les fuites électriques.

* * *

Si la différence de potentiel entre les deux conducteurs est considérable, la décharge se produit brusquement, par une étincelle jaillissant d'un corps à l'autre ; elle est dite *disruptive*. Or les isolants ne se classent pas du tout dans le même ordre, suivant que l'on considère leur résistance à la décharge

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conductive ou à la décharge disruptive. C'est ainsi que l'air, qui est le meilleur isolant pour la décharge conductive, est très médiocre lorsque l'on considère la décharge disruptive. En général, les isolants liquides sont les meilleurs dans ce cas.

On caractérise les isolants, lorsqu'il s'agit de s'opposer aux décharges disruptives, par leur ***distance explosive***, c'est-à-dire la distance à laquelle l'étincelle jaillit entre deux conducteurs séparés par l'isolant. Voici quelques chiffres donnant la distance explosive exprimée en centièmes de millimètre en fonction de la différence de potentiel V exprimée en milliers de volts.

Mica	0,24 V
Fibre	7,65 V
Papier paraffiné	3 V
Paraffine fondue	12,40 V
Huile de lin cuite	12,50 V
Huile brute	60 V

* * *

On désigne souvent sous le nom de ***rigidité électrostatique*** le rapport de la différence de potentiel disruptive à l'épaisseur ; on l'évaluera par exemple en milliers de volts par centimètre. Voici quelques chiffres à titre d'indication :

Ébonite	300 à 1 100
Fibre	20
Verre	300 à 1 500
Gutta-percha	80 à 200
Air liquide	40 à 90
Paraffine fondue	75
— solide	300 à 450
Caoutchouc	160 à 500
Mica	1 500

A côté de ces propriétés purement électriques, les isolants doivent encore satisfaire à un certain nombre de conditions mécaniques et physiques : ténacité, résistance aux vibrations, imperméabilité à l'humidité, indifférence aux agents chimiques, résistance à la chaleur, etc.

Étant donné le grand nombre de substances isolantes actuellement employées en électrotechniques et la variété de leur origine, il est impossible d'établir une classification rationnelle de ces substances ; nous avons donc suivi simplement la classification alphabétique dans les lignes qui vont suivre.

* * *

Amiante — L'amiante ou asbeste, silicate hydraté de chaux et de magnésie avec des traces de fer et d'alumine, se rencontre en France dans la Haute-Loire, la Savoie, les Pyrénées, en Russie, en Italie et au Canada. On ne l'a utilisée que récemment pour ses propriétés isolantes, ses principaux emplois reposant auparavant sur ses propriétés calorifuges.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sous forme de fibres, on l'emploie pour garnir les conducteurs électriques, le tissu d'amiante étant plongé dans une solution de ciment. On évite ainsi la carbonisation lente qui se produit toujours lorsque les fils conducteurs sont recouverts de coton.

La *porcelaine d'amiante*, qui constitue un très bon isolant, s'obtient en transformant l'amiante en poudre impalpable par les moyens mécaniques et en la délayant ensuite dans l'eau après l'avoir lavée aux acides forts. Le produit ainsi obtenu forme une matière plastique qu'on peut, à la façon de l'argile, tourner, mouler, couler, puis cuire comme la porcelaine vers 1 600°, température nécessaire à sa vitrification. On peut l'utiliser non seulement pour la confection des supports et des plaques de surface plane, mais également pour celle des pièces moulées, telles qu'intérieurs de douilles de lampes à incandescence, interrupteurs, etc. Son pouvoir isolant est supérieur à celui de la porcelaine ordinaire.

On prépare également des isolants divers à base d'amiante, tels que le *réfragor* (amiante, 10 ; oxyde de plomb ou de manganèse, 1 ; huile de lin, 3), et la *ténacite* (amiante résines et bases alcalino-terreuses), utilisés pour la confection des fiches de connexion, disques, bornes, etc.

Arcanson. — C'est une résine jaunâtre obtenue par distillation de la térébenthine brute. On l'appelle souvent aussi colophane. On en confectionne des mastics isolants, dont voici une formule due à G. Planté :

Arcanson	1 000
Suif ou cire jaune	100
Plâtre albâtre pulvérisé	250
Noir de fumée (colorant)	2,5

Pour isoler les fils des bobines d'induction, on peut se servir simplement d'un mélange de deux parties d'arcanson pour une de cire.

Ardoise. — C'est un isolant assez médiocre, car, lorsqu'il a été mouillé, il ne reprend que très lentement sa valeur d'isolement. C'est ainsi qu'une plaque mouillée vernie sur les deux faces, qui avait une résistance d'isolement superficiel de 0,047 mégohm, au bout d'une heure ne présente encore qu'une résistance de 1,8 mégohm, tandis que la résistivité moyenne est de 250 mégohms.

Les propriétés semi-conductrices de l'ardoise proviennent de la présence dans sa masse de sulfures métalliques (cuivre et fer). Elle absorbe aussi trop facilement l'humidité et ne la laisse évaporer que très lentement. Elle a cependant l'avantage de coûter moins cher que le marbre et de se laisser facilement travailler. On l'utilise pour les tableaux de distribution, socles d'interrupteurs, etc.

Bakelite. — On donne ce nom à une résine artificielle obtenue par l'action du formol sur le phénol. On peut distinguer trois produits correspondant à trois stades de condensation.

La résine à l'état A correspondant au premier stade est liquide, mais devient rapidement solide si l'on pousse légèrement la condensation : on lui fait généralement subir cette dernière opération si l'on ne prévoit pas son utilisation directe en résine liquide. A l'état solide, elle est friable, fusible et soluble dans les alcools. Elle pourra donc être soit pulvérisée, soit coulée ou refondue, soit dissoute dans l'alcool, suivant l'usage auquel elle est destinée.

Les vernis à la bakelite servent pour l'imprégnation des enroulements de machines ; le papier traité par ce vernis peut servir à faire des cubes isolants. La bakelite A réduite en poudre est moulée facilement (bacs d'accumulateurs, pièces isolantes de téléphone, etc.).

Au deuxième stade, la résine B est celle qui est obtenue en laissant transformer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lentement la résine du premier stade, à une température peu élevée. Elle est alors solide et dure ; elle se ramollit à chaud et se ressoude facilement à elle-même sous l'effet de la pression.

Enfin, l'action prolongée de la chaleur combinée avec la pression achève la transformation du produit et l'amène à son état final, l'état C. Cette résine a des propriétés toutes différentes des précédentes : elle est dure, infusible et résiste à l'action de la plupart des dissolvants.

On peut la travailler comme un métal, et elle présente une grande résistance à la traction, à la pression et au choc.

La bakelite n'est pas hygroscopique, ne se décompose pas avant 250°, et sa rigidité diélectrique est de 20 000 volts environ par millimètre.

Basalte. — On donne le nom de basalte à des roches très dures, plus ou moins compactes, noires ou grises, quelquefois verdâtres ou bleuâtres, qu'on trouve en abondance dans la nature et qui sont d'origine éruptive.

L'analyse chimique donne pour principes constituants du basalte, la silice (50 à 60 p. 100), l'alumine (10 à 15 p. 100), l'oxyde de fer (20 à 25 p. 100), enfin quelques parties de chaux, de soude, de potasse et de magnésie.

Les roches basaltiques sont très répandues dans le monde. En France, on en trouve surtout en Auvergne et dans les Alpes-Maritimes. En Allemagne, on en rencontre en Saxe, en Bohême, et sur les bords du Rhin, dans le voisinage de Cologne. Le basalte est abondant en Amérique, particulièrement dans la chaîne des Andes.

Le basalte est une pierre extrêmement dure. Sa dureté est très supérieure à celle du granit ; aussi est-il employé depuis fort longtemps dans la confection des routes et dans la construction des édifices (marches d'escalier) et des ouvrages d'art (arches de pont, murs de soutènement).

Sa densité est supérieure à celle du granit. Sa résistance électrique est très grande, puisque des plaques de 18 millimètres d'épaisseur ne sont percées dans l'huile que pour une tension de 55 000 volts environ.

On se sert du basalte pour préparer par un moulage à chaud des isolateurs dans lesquels, au moment de la solidification, on peut incorporer des pièces de fer même assez volumineuses, ce qui supprime les scellements au soufre par exemple. Ces isolateurs présentent une très grande résistance de fuite, par suite de la présence à la surface des pièces d'une sorte de « couverte » vitreuse qui va en s'atténuant de la périphérie à l'intérieur de la masse.

Ils sont employés pour supporter le rail de prise de courant des chemins de fer électriques. Sous forme de plaques, le basalte sert à recouvrir ces rails dans la traversée des gares, aux bifurcations, etc.

Bitumes. — La poix, le goudron et le bitume sont souvent employés pour l'isolement des conducteurs de bas voltage. En général, le bitume est utilisé après vulcanisation ; il contient alors 5 à 20 p. 100 de soufre. Dans beaucoup d'applications, pour les boîtes de jonction des câbles par exemple, on lui ajoute des matières inertes, plâtre, argile, etc., de façon à obtenir un remplissage peu coûteux. La *dialite*, isolant particulièrement efficace contre l'humidité, est une composition à base de bitume.

Caoutchouc. — Il provient de la dessiccation et de la coagulation par la chaleur du suc blanc laiteux s'écoulant de certains arbres des régions tropicales lorsqu'on a incisé leur écorce. Traité par des dissolvants et des réactifs convenables, ce suc donne finalement le caoutchouc ordinaire, de teinte grisâtre. C'est un carbure d'hydrogène de formule $(C^5H^8)^n$, polymère de l'isoprène, soluble dans l'éther, le sulfure de carbone, les huiles essentielles, etc.

Le caoutchouc pur possède la propriété de se souder à lui-même par simple compression. On utilise cette propriété pour la confection des câbles isolés au caout-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chouc : un simple ruban de caoutchouc est replié autour du câble de cuivre nu et donne une gaine continue par soudure des deux bords rapprochés du ruban.

Le caoutchouc pur devient visqueux vers 100° et est cassant à basse température, vers 8° déjà. Aussi les limites de température dans lesquelles on peut l'employer sont pratiquement très voisines, 10° et 35° par exemple. Sa résistivité est considérable : 10 900 millions de mégohms-centimètre.

On étend les limites de température entre lesquelles le caoutchouc possède ses propriétés élastiques, en le *vulcanisant*. Sa résistance mécanique est considérablement augmentée par ce traitement et en même temps il est moins sensible à l'action de l'air. Il ne durcit plus par le froid et ne fond qu'au-dessus de 200°. Sa résistance à 24° est de $7\,500 \times 10^6$ mégohms-centimètre. Le seul inconvénient du caoutchouc vulcanisé est de ne pouvoir être appliqué directement sur le cuivre des conducteurs, car le soufre qu'il renferme attaquerait le métal. On est alors obligé de galvaniser celui-ci.

La vulcanisation consiste à incorporer au caoutchouc une certaine quantité de soufre, soit par chauffage en étuve à une température de 140° pendant plusieurs heures, soit par action d'un mélange de chlorure de soufre et de sulfure de carbone.

Le caoutchouc vulcanisé contient 10 à 25 p. 100 de soufre, dont pas plus de 2 à 3 p. 100 est combiné chimiquement ; très souvent, on y incorpore des substances inertes : craie, sulfate de baryum, résine, afin d'augmenter sa densité (aux dépens de ses qualités) ou des substances colorantes : blanc de zinc, céruse, minium, sulfure d'antimoine, etc., mais les qualités isolantes du caoutchouc vulcanisé sont alors diminuées.

Chatterton. — Il sert surtout à fabriquer des rubans destinés à l'isolement des câbles électriques. Sa composition moyenne correspond à la formule suivante :

Gutta-percha	3
Goudron de Norvège	1
Résine	1

On imprègne à chaud des rubans de coton, et on laisse sécher avant de les enrouler. L'intérêt que présente le chatterton est de servir d'intermédiaire entre le cuivre du conducteur et la gutta-percha, celle-ci n'adhérant pas au métal.

Diélectrine. — C'est un mélange de soufre et de paraffine fondus ; sa couleur est légèrement jaunâtre, sa résistance mécanique analogue à celle du celluloïd. Son pouvoir diélectrique est moyen. On peut la travailler au tour.

Ébonite. — Si on incorpore 20 à 30 p. 100 de soufre dans le caoutchouc, on obtient le *caoutchouc durci* ou *ébonite*. C'est une masse noir jaunâtre, cornée, ayant la dureté du marbre ou de l'ivoire, à cassure conchoïdale, résistant aux acides, à l'action de l'air et de l'eau.

Ses propriétés électriques sont remarquables, puisque l'étincelle ne traverse une lame d'ébonite de 1 millimètre que pour des potentiels de 30 000 à 50 000 volts, à condition naturellement que les composants (la charge en particulier) ne contiennent pas de métaux ou d'oxydes métalliques. Son seul inconvénient est son inflammabilité.

L'ébonite peut être tournée, limée, etc., et est susceptible d'un beau poli ; mais son travail est assez pénible, car le soufre qu'elle contient en grande quantité use les outils par sulfuration et il faut les affûter fréquemment.

Fibre. — On la prépare généralement en traitant les fibres de bois par le chlorure de zinc et l'acide sulfurique ; les fibres partiellement dissoutes sont agglomérées sous une pression considérable (500 atmosphères), puis séchées. Ce séchage est très long et jamais parfait, et on ne parvient jamais à éliminer l'eau et les matières dissolvantes acides qui nuisent aux propriétés électriques du produit final. Aussi la fibre,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bien qu'elle se laisse facilement travailler, ne peut être employée que dans les installations où l'air est toujours sec et où le potentiel ne dépasse pas quelques centaines de volts. On s'en sert abondamment dans le petit appareillage (prises de courant, bornes, interrupteurs ordinaires, etc.).

Galalithe. — C'est un corps provenant de la solidification de la caséine du lait de vache écrémé auquel on a enlevé tous ses éléments aqueux par un traitement approprié, et qui se laisse travailler comme l'ébonite. Il possède une grande résistivité.

Gutta-percha. — C'est un produit analogue au caoutchouc, provenant d'un arbre croissant en Malaisie. On l'extrait en épuisant par le toluène les feuilles sèches ou fraîches. Ce n'est pas un carbure d'hydrogène comme le caoutchouc, mais un mélange de trois substances :

Gutta proprement dite ($C^{20}H^{22}$)	75 à 80 p. 100.
Albane ($C^{20}H^{22}O^{2}$)	20 à 15 —
Fluravile ($C^{20}H^{22}O$)	4 à 6 —

Ces deux derniers corps sont des résines qui augmentent la résistivité de la gutta-percha (voisine de 500.10^{6} mégohms-centimètre), ainsi que sa rigidité diélectrique (il faut environ 15 000 volts pour percer une lame de 1 millimètre), mais nuisent à sa conservation ; cristallisant peu à peu, ils désagrègent la gutta et lui font perdre son élasticité.

La gutta résiste mieux que le caoutchouc à l'action des alcalis et des acides dilués. Elle ne peut être vulcanisée, ce qui la différencie nettement du caoutchouc.

Ses propriétés électriques varient considérablement avec la température et la pression, ce qui est très important pour l'établissement des câbles sous-marins. C'est ainsi qu'à une profondeur de 4 000 mètres, sa résistance spécifique est plus que doublée. Elle n'adhère pas au cuivre, de sorte qu'on est obligé d'interposer entre le conducteur et la gomme une couche de chatterton (voir ce mot).

La principale propriété mécanique de la gutta est sa grande puissance d'extension, bien qu'à la température ordinaire sa dureté soit comparable à celle du bois. Entre 50° et 100°, elle devient plastique et peut être travaillée.

Gomme laque. — La gomme laque est une résine produite par la piqûre d'un insecte dans les jeunes branches d'un certain nombre d'arbres des Indes.

Les vernis à base de gomme laque sont très employés en électricité. Ils ont un certain nombre de propriétés qui justifient leur emploi. Après étuvage, la gomme laque adhère fortement aux fils ou papiers qu'elle recouvre et forme un enduit résistant faisant bloc avec les parties vernies. Ces vernis sèchent très vite. Enfin, la résistance spécifique de la gomme laque est de 9 000 mégohms-centimètre à la température ordinaire.

La gomme laque a l'inconvénient d'absorber l'humidité atmosphérique; aussi doit-on en général recouvrir l'enduit de gomme laque d'une couche de paraffine.

Les enduits à la gomme laque sont très nombreux et sont constitués soit par une simple dissolution de la résine dans l'alcool à 40° Baumé, soit par une solution dans l'alcool de mélanges de gomme laque et de gomme sandaraque ou de résine blanche, avec addition dans certains cas de caoutchouc, de gutta-percha, de baume du Canada, etc.

Huiles. — La plupart des huiles ont une résistivité suffisante pour pouvoir être utilisées comme isolants. Les conditions qu'on leur impose dépendent évidemment de l'usage auquel on les destine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les interrupteurs à haute tension, on se sert de l'huile pour faciliter l'extinction de l'arc au moment de la rupture, tout en augmentant l'isolement des diverses pièces de l'interrupteur. Il faut dans ce cas que l'huile ne renferme ni acides ni dérivés sulfurés capables d'attaquer le métal des contacts ; elle ne doit pas se carboniser trop rapidement sous l'action de l'arc de rupture, ni donner des dépôts et sédiments. Enfin, son point d'inflammation doit être aussi élevé que possible.

Dans les transformateurs, on emploie de l'huile lourde ou de l'huile résineuse, afin d'empêcher l'humidité de venir diminuer la valeur de l'isolement.

Les huiles légères, en effet, ont tendance à absorber l'humidité de l'air, et, au bout de quelques jours, leur résistivité peut avoir diminué de ce fait de 25 p. 100 et même plus.

Les huiles servent à préparer de nombreux isolants ; on en imprègne des toiles de lin, de coton, etc., qui résistent à des tensions élevées. Dans certains cas, on ajoute aux huiles servant à l'imprégnation des substances telles que le minium, qui diminuent leur inflammabilité et leur hygroscopicité. Des vernis à l'huile sont également utilisés pour recouvrir les fils électriques.

Voici quelques chiffres relatifs à la résistivité moyenne de certaines huiles :

Huile de goudron de bois.....	1 670.10⁶ mégohms-centimètre.
Huile d'olive.....	1.10⁶ mégohms-centimètre.
Huile lourde de paraffine.....	8.10⁶ —

Marbre. — On l'emploie surtout pour faire des tableaux de distribution, des coupe-circuits, etc. La résistivité est de l'ordre de 10 mégohms. La variation de la résistance d'isolement est considérable suivant l'état d'humidité des plaques, mais, lorsque le marbre est poli, il reprend rapidement sa résistance d'isolement. C'est ainsi que, dans un essai, après avoir soumis une plaque de marbre à un jet de vapeur pendant deux minutes, sa résistance d'isolement de surface était tombée à 0,37 mégohm, et au bout d'une heure elle avait repris une valeur de 270 mégohms.

Mica. — C'est un isolant excellent, sa résistivité est de plus de 50 millions de mégohms par centimètre à 14°. Au point de vue chimique, c'est un silicate d'alumine et de potasse avec de petites quantités d'oxydes de fer, de manganèse et de magnésium. On le trouve surtout au Canada, en Chine, au Pérou, dans les Indes et en Russie.

Le mica du Canada et celui du Bengale sont particulièrement recherchés, car ces variétés, de couleur ambrée, possèdent la plus grande résistivité.

Si, à la température ordinaire, le mica se comporte comme un isolant parfait, il n'en est plus de même aux températures élevées. Au-dessus de 200°, le mica acquiert une conductibilité partielle qui croît assez rapidement avec le temps de chauffe. Si on laisse refroidir la lame, elle reste conductrice à la température ordinaire, mais il suffit de laver ses bords avec de l'alcool, puis de dessécher pendant quelques minutes à 140°, pour lui rendre ses propriétés premières. Cette conductibilité accidentelle serait donc due à une altération de la surface du minéral.

Certains corps, en particulier les huiles de lin et de paraffine, exercent une influence conductrice sur les propriétés du mica. En effet, bien que les deux substances, huile et mica, prises séparément, soient des isolants de première qualité, la présence de l'huile sur le mica abaisse le pouvoir isolant de celui-ci dans une telle proportion qu'il peut, dans certains cas, ne plus supporter que la moitié de la tension à laquelle il résiste à l'état sec.

Le phénomène est le même, quelle que soit la nature chimique de l'huile employée. L'eau, adhérant même légèrement à la surface du mica, supprime cette action. Au point de vue pratique, il convient donc d'éviter tout contact direct entre l'huile et le mica ; il faut, par conséquent, protéger les collecteurs isolés au mica et disposés au voisinage d'un palier dans les machines dynamos. Il est même avantageux d'éli-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

miner toute pièce de mica dans la construction des transformateurs isolés à l'huile, le contact des deux substances pouvant nuire considérablement au rendement et à la conservation de ces appareils.

Les grandes feuilles de mica coûtent extrêmement cher, de l'ordre de 100 francs le kilogramme. Aussi emploie-t-on des succédanés du mica, tels que la *micanite* et la *micacémentite*.

La *micanite* est un aggloméré de mica et de gomme laque pouvant rivaliser avec le mica au point de vue isolant.

On prépare l'aggloméré en enduisant de gomme laque une feuille de papier et en projetant sur la surface ainsi préparée de la poudre de mica. Celle-ci se prend dans la gomme liquide et le tout se solidifie ; après dessiccation complète, on reforme une seconde épaisseur du mélange, puis une troisième, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la plaque ait l'épaisseur désirée. On la soumet alors à une assez forte pression (140 kilogrammes par centimètre carré) en même temps qu'elle est chauffée par la vapeur. Le produit qu'on obtient après refroidissement est remarquable par son homogénéité, car il est totalement exempt de crevasses. Il se laisse scier, couper et percer très facilement.

La *micacémentite* est préparée dans le but d'éviter la désagrégation rapide des vernis protecteurs des bobines inductrices des moteurs de traction. Après avoir enroulé chaque tour de spire et passé la couche de vernis isolant, on saupoudre de micacémentite de façon à boucher les vides existant entre les spires. Lorsque l'enroulement est terminé, on sèche à l'étuve pendant quarante-huit heures à 80° environ.

Papier. — C'est un très bon isolant lorsqu'il est sec ; aussi l'emploie-t-on en général imprégné de paraffine ou d'huile. On s'en sert pour de multiples usages : séparation des tôles dans toutes les parties feuilletées des appareils électriques (induits de dynamos, noyaux de transformateurs, diélectriques de condensateurs, etc.).

La résistivité du papier est très grande, de l'ordre de 3 000.10^6 mégohms par centimètre, mais elle est fonction de la pression, décroissant rapidement quand celle-ci augmente, c'est-à-dire quand la cohésion de la substance est meilleure. Elle varie également beaucoup avec la composition chimique du papier.

On utilise en général du papier de manille disposé en couches régulières, adhérent bien entre elles et ayant subi préalablement une dessiccation dans le vide.

On fabrique couramment des câbles dont l'isolant est en papier, aussi bien pour les lignes téléphoniques souterraines que pour les installations à haute tension ; seulement, comme la rigidité diélectrique du papier est inférieure à celle du caoutchouc, il faut, dans ce dernier cas, employer des épaisseurs très fortes de papier.

Il semble aussi que le papier et le carton résistent mieux aux applications de courant continu qu'à celles de courant alternatif. C'est ainsi qu'un échantillon de carton glacé de 5 millimètres d'épaisseur, percé deux fois au bout de deux minutes par une différence de potentiel alternative de 10 000 volts, a pu résister douze minutes à une tension continue de plus de 15 000 volts et n'a cédé qu'après quatre minutes à 25 000 volts continus.

Paraffine. — On désigne sous ce nom des mélanges de carbures d'hydrogène saturés solides, fondant entre 45° et 90° et que l'on obtient par distillation soit de l'ozokérite (cire fossile que l'on rencontre dans les Karpathes et le Caucase), soit de la houille, du pétrole et de certains schistes.

La paraffine de bonne qualité est blanche et sans odeur. Sa résistivité est très élevée. On l'emploie parfois à la place de l'huile dans les transformateurs. Lorsqu'on veut en confectionner des plaques, supports, etc., on lui incorpore en général de la résine et de la chaux dans des proportions analogues à celles-ci :

Paraffine	75
Chaux éteinte	10
Résine	15

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On utilise surtout la paraffine pour imprégner les papiers destinés à la fabrication des *tubes isolateurs* dont on recouvre les fils conducteurs que l'on désire protéger de l'humidité.

Porcelaines. — La porcelaine employée en électrotechnique est de la porcelaine dure, c'est-à-dire un produit céramique composé de matières premières minérales transformées par l'action du feu en un minéral nouveau.

Ces matières premières sont des kaolins, des argiles, des pegmatites, des silices, des feldspaths et quelquefois du carbonate de calcium. Elles fournissent les constituants élémentaires : silice, alumine, alcalis, chaux.

Par cuisson à une température de 1 400° environ, le mélange de ces matières se transforme en un corps isolant au point de vue électrique, de densité sensiblement égale à 2,25, blanc, sonore, translucide, rayant les aciers les plus durs, imperméable à l'eau, inattaquable à tous les acides, sauf l'acide fluorhydrique, résistant à l'action des alcalis, supportant sans rupture des changements de température brusques de 60° C. pour les grandes pièces et de plus de 100° C. pour les petites pièces, ce qui permet de sceller, quand il est nécessaire, la porcelaine au plomb fondu et d'employer cette matière à la construction des bougies d'automobile. La porcelaine se présente sous deux variétés cuisant à la même température et ayant les mêmes qualités au point de vue diélectrique : 1° non revêtue de couverte, elle est dite biscuit de porcelaine ; 2° revêtue de couverte, elle constitue la porcelaine proprement dite. Sous un troisième aspect : cuite à 900°, on l'appelle « dégourdi de porcelaine ».

La *couverte* a la même composition qualitative que la pâte, à l'exception absolue des sels de plomb et de borax.

Cette couverte, quoique plus fusible que la pâte, est inattaquable aux acides, ne subit pas d'altération du fait des agents atmosphériques ; de plus, elle ne fendille pas à la surface de la pâte comme le font, au bout d'un temps plus ou moins long, toutes les couvertes de grès ou de faïence.

La porcelaine n'est pas hygroscopique comme le verre, de sorte qu'il est plus facile de lutter contre l'humidité superficielle en donnant aux isolateurs des formes appropriées que nous étudierons plus loin.

La porcelaine est employée dans tout l'appareillage destiné aux installations intérieures : boîtes de dérivation, interrupteurs, douilles de lampes, coupe-circuit, poulies, etc.

La rigidité diélectrique de la porcelaine est grande ; il faut une tension de 92 000 volts pour perforer une épaisseur de 1 centimètre lorsque la porcelaine est bien homogène.

Quartz. — La silice fondue est un isolant bien supérieur au verre ; sa résistivité est de 2.10^8 mégohms par centimètre entre 15 et 150°, et sa rigidité diélectrique de 200 000 volts-centimètre. Aussi peut-elle être utilisée pour la confection des bornes de transformateurs isolateurs, entrées de cabines de transformation, etc., lorsqu'on opère à très haut voltage.

Résines. — On se sert, pour la préparation des vernis isolants, d'un grand nombre de résines, gomme laque (voir ce mot), colophane ou arcanson (voir ce mot), cire blanche, baume du Canada, gomme copal, ambre, etc. Ils donnent tous un excellent isolement et adhèrent fortement aux conducteurs.

Soufre. — On s'en sert particulièrement pour cimenter les cloches d'isolateurs de verre ou de porcelaine aux tiges métalliques qui les supportent, et pour préparer des mastics isolants résistant à la chaleur et aux acides.

Pour cimenter les isolateurs, on prend un mélange de 100 parties de soufre en canon et de 12 parties de limaille de fer. Pour le mastic, une bonne composition est la suivante : soufre, 100 ; suif, 2 ; résine, 2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le soufre brut, même fondu, est un excellent isolant. On sait que ce corps présente deux variétés allotropiques (soufre octaédrique, soufre prismatique) et une autre variété dite soufre mou. Par suite de ces propriétés, la résistance électrique du soufre a une allure très complexe et très intéressante au point de vue physique.

Pour les applications, il suffit de considérer le soufre solide. Sa résistivité varie considérablement avec la température, comme le montrent les nombres suivants :

Température.	*Résistivité en mégohms-centimètre.*
112°	$7{,}39 \times 10^6$
110°	$13{,}5 \times 10^6$
100°	65×10^6
77°	$1\,210 \times 10^6$
69°	$3\,930 \times 10^6$

Aux températures inférieures, la résistivité est pratiquement infinie.

Stéatite. — C'est une sorte de talc compact et granulaire de couleur gris clair ou verdâtre, constitué par un silicate de magnésie hydraté que l'on rencontre dans le Gard, l'Ariège et les Pyrénées-Orientales. Très facile à travailler, cette substance est un bon isolant, mais sa résistance mécanique est plus faible que celle du marbre et elle se fendille et s'effrite beaucoup plus facilement.

Verres. — Les verres sont d'excellents isolants, leur résistivité étant voisine de 90 millions de mégohms-centimètre pour le verre ordinaire. Leur rigidité diélectrique est aussi considérable : une feuille de verre à vitre de $0^{mm},8$ d'épaisseur résiste à plus de 60 000 volts continus. Quand la tension appliquée est alternative, la rigidité est moindre.

Le verre a des qualités isolantes supérieures à celles de la porcelaine, mais il est très hygroscopique et condense facilement l'humidité sur sa surface ; aussi, lorsqu'on veut limiter la perte électrique, est-on obligé de recouvrir le verre avec un vernis à la paraffine par exemple.

Le verre sert à préparer des bacs d'accumulateurs, et surtout des isolateurs destinés aux lignes aériennes à haute et basse tension, emploi dans lequel il peut lutter avantageusement avec la porcelaine.

La résistivité du verre varie avec la température. Voici, à titre d'exemple, quelques nombres relatifs à un verre ordinaire à base de soude et de chaux de densité 2,530 (Foussereau) :

61°	$0{,}705.10^6$ mégohms-centimètres.
20°	91.10^6 —
— 17°	$7\,970.10^6$ —

Le cristal est le plus résistant des verres, environ 1 500 fois plus que le verre ordinaire, tandis que le verre dur de Bohême est 10 fois moins résistant que le verre ordinaire.

Nous ne dirons rien d'un grand nombre d'isolants dont la composition est tenue secrète par leurs fabricants, tels que la cégéite, la gummite, la hardite, la roburine, la lactolithe, l'isolit, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LES CONDUCTEURS

Le ***cuivre*** est le métal qui convient le mieux pour les conducteurs électriques. En effet, lorsqu'il est pur, sa conductibilité est très grande et atteint celle de l'argent. Mais il suffit de traces d'impuretés pour que sa conductibilité baisse dans de grandes proportions. Par exemple, un cuivre à 99 p. 100 a une conductibilité de 86 (évaluée en unités arbitraires), tandis que le cuivre ne titrant que 98,76 a seulement une conductibilité de 42 (évaluée avec la même unité arbitraire). Aussi est-on obligé de n'utiliser en électrotechnique que du cuivre électrolytique, à cause de sa grande pureté.

Pour évaluer les conductibilités des divers échantillons de cuivre, on prend pour terme de comparaison un échantillon type, dit *cuivre de Matthiessen*, dont on désigne arbitrairement la conductibilité 100, de sorte qu'un cuivre ayant une conductibilité de 90 a une conductibilité égale à 90 p. 100 de celle du cuivre étalon de Matthiessen.

La résistivité du cuivre de Matthiessen est de 1,593 microhm-centimètre à 0°, et son coefficient de température à 20° est égal à 0,00388.

Le choix de cet étalon est absolument arbitraire ; ce n'est même pas du cuivre pur, car on a souvent des cuivres dont la conductibilité est mesurée par des nombres supérieurs à 100 (102, 103, par exemple).

La Commission électrotechnique internationale de 1913, tenue à Berlin, a cherché à remédier à cet inconvénient et a défini le *cuivre type recuit* dont la résistivité à 0° est de 1,588 microhm-centimètre, avec un coefficient de température à 20° égal à 0,00393 (à masse constante, c'est-à-dire la résistance conservée entre deux prises de potentiel rigidement attachées au fil). Ce coefficient est positif, c'est-à-dire que la résistance *augmente* quand la température s'élève. C'est par rapport à ce nouvel étalon que doivent être maintenant classés les différents échantillons de cuivre.

Quel que soit l'étalon adopté, le système de classification des cuivres est irrationnel ; il vaudrait beaucoup mieux donner en valeur absolue la résistivité de l'échantillon considéré. Mais les fabricants n'ont pas encore renoncé à leurs anciennes habitudes.

* * *

Les bronzes. — Si la conductibilité électrique est la propriété la plus importante à considérer lorsque les fils électriques ne sont soumis qu'à des efforts mécaniques très faibles, comme dans les enroulements

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des transformateurs, des induits et même des rotors de dynamos, il n'en est plus de même lorsque les fils sont destinés à la construction des lignes télégraphiques, téléphoniques, de transport de force, etc. Dans ces cas, en effet, la ligne est supportée par des poteaux assez éloignés les uns des autres et tend à se rompre sous l'action de son propre poids et des actions mécaniques extérieures (vent, dépôts de verglas, etc.). Il faut donc, en même temps qu'une bonne conductibilité, rechercher un résistance à la rupture élevée.

Or le cuivre pur se rompt sous un effort relativement faible (28 kilogrammes par millimètre carré) ; on est conduit à lui incorporer d'autres éléments afin de réaliser un alliage dont les propriétés mécaniques soient satisfaisantes. Ce sont les *bronzes*.

La composition de ces bronzes varie considérablement, ainsi que leurs propriétés électriques et mécaniques, comme on peut s'en rendre compte par le tableau suivant.

Nature.	*Ténacité en kilogrammes par millimètre carré.*	*Conductibilité par rapport à l'étalon Matthiessen.*	*Résistivité à 0° en microhms-centimètre.*	*Coefficient moyen de température à 20°.*
Bronze phosphoreux.				
Haute conductibilité	44,9	98-100	1,6	
Fils télégraphiques	48	99	1,6	0,00394
Fils téléphoniques	82	28	5,6	0,00394
Bronze siliceux.				
Télégraphique A	45	97	1,65	0,0039
— B	50	80	1,82	0,0035
— C	75	42	3,84	0,0023
Bronze chromé.				
Télégraphique	45	98,5	1,641	
Téléphonique	75	34,5	4,71	
Longue portée	100	20	7,8	
Bronze à 2 p. 100 d'étain	75	35	4,57	0,00152
Bronze téléphonique L. W	80	50	3,23	0,0032

On remarque que la conductibilité et la ténacité varient en sens inverse, un fil très résistant au point de vue mécanique l'est aussi au passage de l'électricité : sa conductibilité est faible.

* * *

Le ***fer*** a été utilisé pendant quelque temps pour équiper les lignes télégraphiques aériennes avant la mise au point des bronzes. Mais si le fer et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

surtout l'acier ont une grande résistance à la rupture, leur faible conductibilité électrique impose l'emploi de conducteurs beaucoup plus gros, et, à longueur et résistances égales, une ligne de fer pèse 6,6 fois plus qu'une ligne de cuivre. Voici quelques nombres permettant de fixer les idées :

Nature.	*Ténacité en kg. par millimètre carré.*	*Conductibilité par rapport à l'étalon Matthiessen.*	*Résistivité à 0° en microhms-cm.*	*Coefficient moyen de température à 20°.*
Fer pur	»	17,5	9,865	0,00625
Fil d'acier	100	10,8	15,803	0,00390
Fil de fer homogène	»	12	13-273	0,00414
Fil de fer ordinaire	38	11,4	13,906	0,00420
Acier à 0,13 p. 100 de manganèse (Hadfield)	160	2,1	75	0,00136

Dans les aciers au carbone, la résistivité augmente avec la teneur en carbone.

Dans les aciers au manganèse, la teneur en carbone ne semble pas avoir d influence ; la résistivité passe par un maximum pour une teneur de 12 à 13 p. 100 de manganèse.

Dans les aciers au nickel, pour une même teneur de nickel, la résistivité augmente considérablement avec la teneur en carbone.

Un autre inconvénient du fer est son aimantation, qui correspond, surtout lorsque la ligne est alimentée en courant alternatif, à une perte considérable.

Pour les lignes téléphoniques en particulier, l'aimantation transversale du fer fait que les lignes même rectilignes présentent un coefficient de self-induction considérable, qui entraîne une augmentation apparente de résistance qui affaiblit rapidement les signaux téléphoniques.

On a cherché à tourner la difficulté en constituant des câbles mixtes dont l'âme centrale est en fer ou en acier et la périphérie formée de conducteurs de cuivre. En fait, un certain nombre de lignes téléphoniques sont ainsi équipées ; par exemple, la ligne New-York-Chicago (1 625 kilomètres) est formée de fils dont l'âme en acier a 4 millimètres de diamètre, la gaine de cuivre ayant une épaisseur de $1^{mm},5$, ce qui donne pour le conducteur un diamètre total de 7 millimètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsqu'il s'agit d'alimenter les lignes de traction électrique par le système dit du troisième rail, on est forcé de se servir de conducteurs en fer, puisque les rails de roulement servent de conducteurs de retour d'une part et que, d'autrepart, le rail de prise de courant, pour des raisons économiques et mécaniques, est également en acier.

La résistance des rails de roulement théoriquement n'intervient pas, puisque, n'étant pas isolés, le courant revient également par la terre ; mais, pour réduire au minimum les courants vagabonds, on est conduit à donner aux rails la meilleure conductibilité possible.

On peut admettre qu'un rail de $38^{kg},75$ au mètre courant, en acier contenant 0,4 à 0,5 p. 100 de fer et 0,7 p. 100 de manganèse, a une résistance d'environ 36 microhms par mètre courant, c'est-à-dire une résistivité de 18 microhms-centimètre environ.

En diminuant la proportion de carbone et de manganèse, on arrive à une résistivité de 14 microhms-centimètre environ pour un rail en acier correspondant à la composition suivante :

Carbone	0,2	p. 100
Manganèse	0,4	—
Soufre	0,05	—
Phosphore	0,1	—

* * *

L'***aluminium*** tend de plus en plus à jouer un grand rôle dans l'industrie électrique. Ce n'est guère qu'en 1898, lorsque son prix de revient fut tombé suffisamment bas, que son utilisation fut sérieusement envisagée, en Amérique d'abord, puis en Europe.

Bien que l'aluminium soit moins bon conducteur que le cuivre, sa légèreté est une qualité si précieuse, pour les lignes aériennes en particulier, que, malgré la résistance des constructeurs à cette innovation qui venait troubler leurs habitudes et leurs traditions, de très importants réseaux aériens et souterrains sont actuellement équipés avec de l'aluminium. Dans le cahier des charges des chemins de fer de l'État, en 1913, l'aluminium a une place équivalente à celle du cuivre.

Le seul inconvénient de l'aluminium est sa faible résistance mécanique, qui tombe à 9 kilogrammes par millimètre carré quand il est recuit. Il faut donc augmenter la section du conducteur, et par suite perdre une partie du bénéfice de la légèreté du métal. Aussi les nombreuses discussions sur les mérites comparés du cuivre et de l'aluminium ne sont-elles pas encore terminées.

L'aluminium commercial doit contenir au moins 99 p. 100 d'aluminium, les éléments étrangers, fer et silicium principalement, qu'on y incorpore

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

afin d'augmenter sa ténacité, ne doivent pas dépasser 1 p. 100. Dans le tableau suivant, nous donnons les propriétés de l'aluminium commercial ainsi défini et celles du cuivre commercial, afin de permettre les calculs de comparaisons technique et économique.

	Aluminium.	*Cuivre.*
Densité (métal écroui)	2,7	8,95
Chaleur spécifique (eau = 1)	0,203	0,092
Conductibilité thermique (argent = 10)	35	70
Résistivité à 0° écroui (microhms-centimètre)	2,722	1,63
Résistivité à 0° recuit	2,68	1,60
Résistivité à 20° écroui	2,95	1,76
Résistivité à 20° recuit	2,89	1,72
Coefficient de température à 20°	0,00419	0,0039
Conductibilité électrique	60	100
Coefficient de dilatation linéaire	0,0000228	0,000016
Tension de rupture en kilogrammes par millimètre carré :		
Écroui	20	42
Recuit	9	22
Limite d'élasticité en kg. par millimètre carré	11 à 12	23 à 25
Allongement à la rupture du métal :		
Écroui	2 p. 100	2 p. 100
Recuit	25 p. 100	35 p. 100
Rapport des sections à égalité de conductibilité	1,666	1
Rapport des diamètres à égalité de conductibilité	1,29	1
Rapports des poids à égalité de conductibilité	50,25	100
Rapports des sections à égalité d'échauffement	1,405	1
Rapports des poids à égalité de section	42	100
Rapports des conductibilités à égalité de section	0,6	1
Rapports des poids à égalité de section	30	100

On sait que, lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant alternatif rapide, la densité du courant n'est pas la même dans toute la section : elle est plus faible au centre qu'à la périphérie, et cela d'autant plus que la fréquence est plus élevée, la perméabilité du métal plus grande, sa résistivité plus faible et le conducteur plus gros. C'est l'effet de surface (*skin effect* des Anglais).

Lorsque l'on se sert des conducteurs en aluminium pour les transmissions téléphoniques et télégraphiques multiples, la fréquence des courants peut atteindre 500 000 par seconde. A ce moment, l'effet de surface, que l'on peut négliger dans les courants ordinaires à 25 ou 50 périodes, devient important, et la résistance effective du conducteur varie comme le montre le tableau suivant :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Résistances en ohms par kilomètre à 0°.

Diamètre.	*1 millimètre.*		*2 millimètres.*		*3 millimètres.*	
Fréquences.	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu
0	34,4	20,75	8,6	5,18	3,82	2,31
10×10^4	42,6	30,7	18,7	14,2	11,85	9,15
20×10^4	55,2	41,5	25,5	19,2	16,4	12,6
30×10^4	66,3	49,8	30,4	23,3	19,85	15,25
40×10^4	75	57	35,6	26,7	22,8	17,55
50×10^4	82,6	62,4	38,6	29,8	25,3	19,6

On sait que l'aluminium, aux hautes fréquences, n'est plus que 1,3 fois plus résistant que le cuivre, tandis que, pour le courant continu, il est 1,66 fois plus résistant.

Comme pour le cuivre, dont la résistance mécanique est peu élevée, on a cherché à fabriquer des alliages d'aluminium pour remédier à ce défaut. En particulier, le *duralumin*, dont la résistance mécanique et la dureté dépassent le double de la résistance mécanique et de la dureté de l'aluminium pur, a une conductibilité environ moitié de celle du cuivre pur, c'est-à-dire comparable à celle du bronze dur. C'est un alliage de composition approximative :

Aluminium	95 p. 100
Cuivre	3 à 4 —
Magnésium	1 —

On peut également réaliser des *conducteurs mixtes*, aluminium-acier, constitués par une âme en acier de haute résistance mécanique sur laquelle sont câblés les fils d'aluminium en une ou plusieurs couches.

* * *

Au début de la guerre, le ***zinc*** a été proposé comme un substitut du cuivre; mais sa faible résistance mécanique d'une part, d'autre part son instabilité chimique (sous l'action du froid, le zinc cristallise) et sa sensibilité aux vibrations ont limité son emploi aux installations intérieures et aux fils isolés.

* * *

De nombreux ***alliages*** servent à fabriquer des appareils électriques : alliages très résistants pour les rhéostats ; alliages spéciaux pour résistances

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de chauffage, pour appareils de mesure, etc. Leur étude détaillée nous entraînerait trop loin, et nous nous contenterons de donner ci-dessous quelques indications sur les plus employés.

	Conductibilité par rapport à l'étalon Matthiessen.	*Résistivité à 0° en microhms-centimètre.*	*Coefficient moyen de température à 20°.*
Laiton (Cu 66 p. 100, Zn 34 p. 100)	3,2	5,5	0,001
Constantan (Cu 60 p. 100, Ni 40 p. 100)	3,2	50	0,000
Rhéostatine (Fe 70 p. 100, Ni 30 p. 100)	»	86	0,0007
Maillechort (Cu 60 p. 100, Zn 25 p. 100, Ni 15 p. 100)	5,3	30	0,00036
Manganine (Cu 84 p. 100, Ni 4 p. 100, Mn 12 p. 100)	»	46,7	0,00000
Rhéostan (Cu 55 p. 100, Ni 25 p. 100, Zn 15 p. 100, Fe 5 p. 100)	3	52,5	0,00041
Acier invar (Ni 36 p. 100, Fe 64 p. 100)	»	75	0,002
Ferro-nickel (Fe 74 p. 100, Ni 25 p. 100, C 0,8 p. 100)	2	78,3	0,00093
Alliage R. N. C. 1	»	100	0,00030
— 2	»	103	0,00025
— 3	»	96	0,00015

* * *

Il est à remarquer que, pour tous les corps métalliques, la conductibilité *diminue* quand la température *s'élève*. La résistivité diminue donc quand la température s'abaisse, et cette diminution est très rapide à basse température, de sorte qu'au voisinage du zéro absolu, la résistivité devient nulle. C'est-à-dire qu'un courant électrique induit dans un circuit conducteur fermé à la température de — 273° continuera à y circuler indéfiniment.

Les expériences de Kamerling Onnes ont montré qu'il en est bien ainsi, et que, pour certains métaux, la résistance s'annule même avant le zéro absolu. Le tableau suivant donne quelques résultats d'expériences de Nicolai à ce sujet.

Température en degrés centigrades.	*Résistivité en microhms-centimètre.*				
	ALUMINIUM	ARGENT	FER	PLOMB	PLATINE
400	7,991	3,772	43,345	»	25,985
200	5,172	2,076	23,928	38,047	18,885
100	3,858	2,007	16,630	27,844	15,102
0	2,618	1,505	10,681	19,803	11,193
— 25	2,321	1,350	9,308	17,958	10,234
— 100	1,538	0,916	5,929	12,610	7,212
— 180	0,641	0,419	2,653	6,648	3,580
— 260	»	0,000	»	»	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 181 traduit géographiquement ces résultats.

* * *

Le ***charbon*** entre dans la confection d'un grand nombre de conducteurs employés en électrotechnique. Citons simplement :

1° Les charbons pour l'éclairage au moyen de lampes à arc.

2° Les frotteurs pour dynamos et moteurs électriques, presque toujours à base de charbon ou de graphite éventuellement mélangé de métaux divers.

3° Des pièces en charbon ou en graphite de qualité analogue à celle des balais destinées à établir des contacts sur des pièces spéciales d'appareillage : disjoncteurs, rupteurs, etc.

L'emploi du charbon est plus avantageux que celui des métaux, par suite de la résistance du charbon aux actions désagrégeantes des arcs produits à chaque ouverture ou fermeture du circuit.

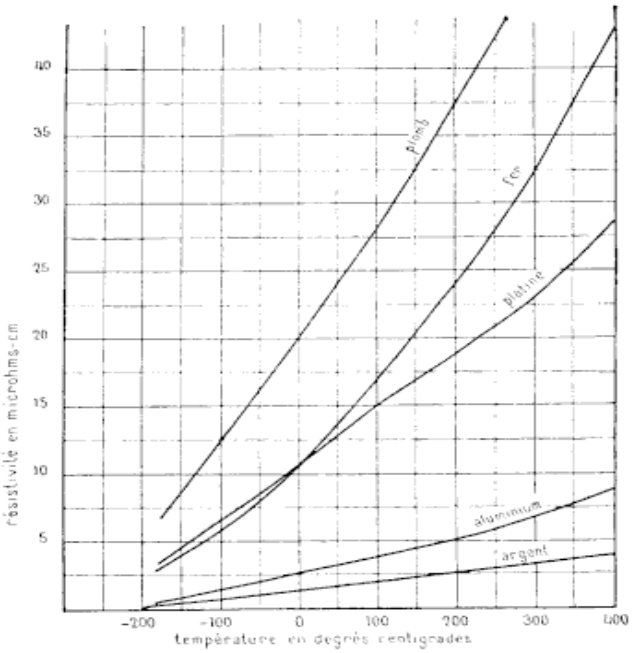


Fig. 181. — Variation de la résistivité en fonction de la température.

4° L'industrie électrochimique et électrométallurgique absorbe des tonnages extrêmement importants d'électrodes dont les dimensions peuvent être très considérables.

5° La soudure et le découpage électrique utilisent tantôt des électrodes métalliques, tantôt des électrodes en charbon ; ces dernières sont même à préférer pour les travaux exécutés sur des pièces en fonte, et aussi pour les découpages.

6° De petites pièces en charbon de qualité spéciale sont employées en téléphonie (plaques de microphones, grenaille, etc.).

7° Des agglomérés de charbon ou de graphite et de matière isolante sont employés pour fabriquer des résistors spéciaux pour fours chauffés électriquement. Dans certains cas, ces résistors, au lieu d'être agglomérés, ont constitués simplement par du charbon granulé de grosseur convenables.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8° D'autres agglomérés analogues, mais en général très pauvres en graphite ou en charbon, et qui sont principalement à base de carborundum, servent comme résistances très élevées dans des dispositifs de parafoudres ou résistances chauffantes non soustraites à l'action de l'air. Ils sont employés aussi en T. S. F.

9° Les piles électriques comportent à peu près toutes une anode en charbon. Cette anode peut être recouverte d'une couche dépolarisante constituée par un comprimé de graphite naturel ou artificiel et de bioxyde de manganèse ; dans certains cas, elle est poreuse, de manière à permettre la dépolarisation directe au moyen de l'air.

10° Le charbon ou le graphite sont employés enfin dans des cas spéciaux, par exemple dans des fours électriques lorsque le creuset ou le tube en graphite doit servir en même temps de résistor.

Suivant les emplois auxquels on le destine, le charbon présente des caractéristiques électriques différentes. Nous verrons au chapitre sur l'éclairage comment on prépare les charbons de lampes à arc, et à propos des moteurs électriques nous exposerons succinctement la fabrication des balais de dynamo.

* * *

Il nous reste à dire quelques mots des ***conducteurs liquides*** que l'on rencontre dans diverses applications. Leur conductibilité est d'origine ionique, c'est-à-dire repose sur un tout autre phénomène que la conductibilité des métaux (voir chapitre *Électrolyse, Théorie des ions*). Nous donnerons, afin de fixer les idées, les résistivités de quelques solutions, d'après Kohlrausch.

Teneur en p. 100 du corps anhydre.	*Résistivité à 18°.*						
	SO^4H^2	NO^3H	HCl	KOH	NaOH	NaCl	KCl
5	4,8	3,35	2,53	6,7	5,08	14,87	14,46
10	2,56	2,2	1,59	3,05	3,20	8,25	7,36
15	1,84	1,65	1,34	2,3	2,89	6,09	4,95
20	1,53	1,40	1,31	1,95	3,06	5,11	3,73
25	1,39	1,30	1,40	1,85	3,8	4,68	
30	1,35	1,27	1,51				
50	1,83	1,58					
80	9,09						

La figure 182 traduit ces résultats. On constate nettement l'existence d'une résistivité minima, c'est-à-dire d'une conductibilité maxima, pour une certaine teneur de chacun des corps.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LES MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Tous les matériaux magnétiques utilisés en électrotechnique ont pour élément constitutif essentiel le fer, et ils varient depuis la fonte jusqu'au fer pur, en passant par la gamme de tous les aciers.

Les propriétés magnétiques sont extrêmement variables suivant la composition chimique des fers ou des aciers, suivant leurs propriétés

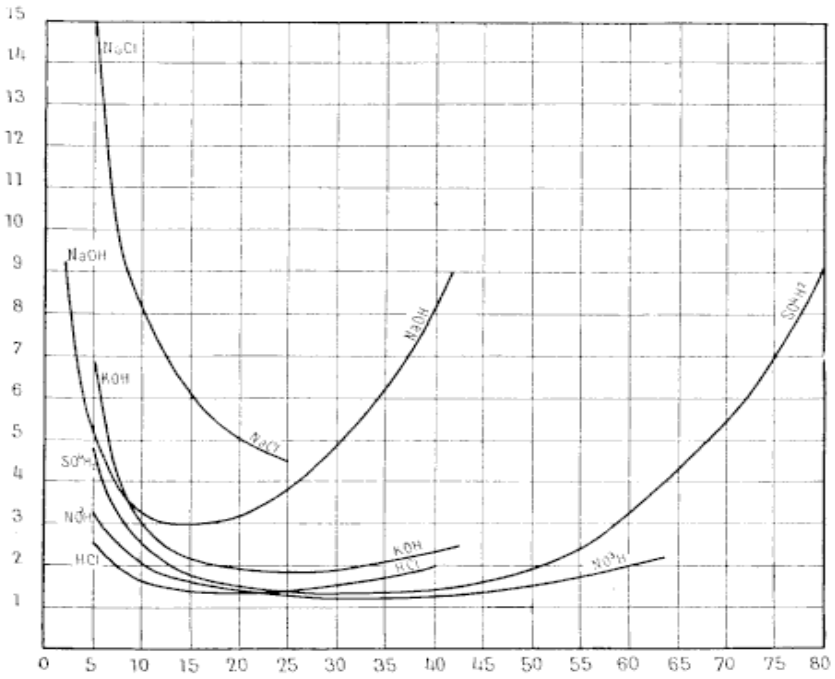


Fig. 182. — Résistivité de quelques électrolytes à 18°.

physiques, etc. Quatre à cinq millièmes pour cent de manganèse suffisent pour diminuer notablement les qualités magnétiques d'un acier. La trempe et le recuit modifient la force coercitive des aciers. Aussi ne peut-on donner, pour chaque type d'acier utilisé, que quelques indications générales.

La figure 183 représente la variation de l'intensité d'aimantation I en fonction du champ lorsque celui-ci varie de 0 à 50 unités C. G. S. On voit combien l'allure de la courbe est différente d'un échantillon à l'autre.

En pratique, on détermine de préférence non l'intensité d'aimantation qui intervient rarement dans les calculs, mais l'*induction magnétique* ω ($\omega = \mu H$, μ étant la perméabilité magnétique).

Pour le fer très pur, on constate que le recuit augmente la perméabilité et diminue l'hystérésis. L'expérience a montré que, si l'on ajoute au fer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de très faibles quantités de carbone et de silicium, on obtient des produits ayant des propriétés magnétiques supérieures à celles du fer pur, en particulier au point de vue de la diminution de l'hystérésis.

On a trouvé que l'augmentation de la teneur en carbone d'un acier diminue sa perméabilité.

Osmond classe les aciers, au point de vue magnétique, de la façon suivante :

1° *Aciers non magnétiques* : présence de 25 p. 100 de nickel ou de

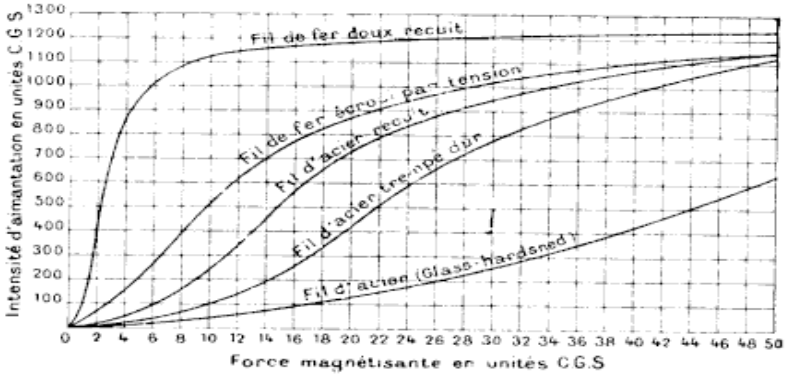


Fig. 183. — Variation de l'aimantation en fonction du champ.

13 p. 100 de manganèse; aciers à teneur moindre en nickel et manganèse, mais à teneur plus élevée en carbone.

2° *Aciers magnétiques ne conservant pas une aimantation permanente* : aciers au carbone refoidis lentement; aciers à 0 à 12 p. 100 de nickel ou 0 à 3,5 p. 100 de manganèse.

3° *Aciers magnétiques conservant l'aimantation* : aciers ordinaires trempés ; aciers à basse teneur en carbone et contenant de 12 à 24 p. 100 de nickel ou 3,5 à 7 p. 100 de manganèse.

Les aciers à coupe rapide trempés sont très peu magnétiques. Le nickel est fortement magnétique, mais, pur, il perd ses propriétés vers 340° et, dans ses alliages, à partir de 50 p. 100 de cuivre, 45 p. 100 d'antimoine, 10 p. 100 de chrome.

Certains alliages de manganèse sont légèrement ferro-magnétiques. L'alliage manganèse-aluminium est magnétique pour certaines teneurs, surtout en présence de cuivre. L'alliage manganèse-étain présente un maximum magnétique correspondant à $SnMn^4$. Les alliages de Heusler (Mn-Cu-Al ou Mn-Cu-Sn) jouissent également de cette propriété. Les aciers au cobalt ont aussi des propriétés magnétiques remarquables

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Suivant les usages auxquels on les destine, on choisit dans toute la série des alliages ceux qui présentent les qualités les plus désirables : lorsqu'il s'agit, par exemple, d'*inducteurs*, c'est-à-dire lorsqu'on cherche à entretenir un flux magnétique fixe dans un circuit donné, on recherche surtout une *haute perméabilité*, de façon à ne pas avoir une trop grande dépense de courant dans les ampères-tours magnétisants. Dans ce cas, la question de l'hystérésis est en général de peu d'importance.

Au contraire, pour construire des *induits*, rotors de dynamos, alternateurs, transformateurs, etc., comme ces pièces sont le siège de renversements du flux plus ou moins rapides et plus ou moins fréquents, il faut tout d'abord, pour éviter les courants de Foucault, les construire en tôles superposées et isolées les unes des autres, ce qui limite le choix des matériaux aux tôles de fer et d'acier. De plus, on s'attachera à avoir la plus petite perte possible par *hystérésis*. Sauf pour les transformateurs, où tout le circuit magnétique est formé avec les tôles considérées, et où la perméabilité influe notablement sur le courant à vide, cette grandeur magnétique ne joue pas le rôle principal, à l'opposé de ce qui se produit dans le cas des inducteurs. On se sert dans ce cas d'aciers au silicium (2 à 4 p. 100 environ). Par le recuit, on arrive à conférer des propriétés remarquables aux tôles ordinaires, mais, au bout de quelque temps de service, elles « vieillissent », et on observe un relèvement progressif de l'hystérésis.

Pour la confection des *aimants permanents*, c'est une grande *force coercitive* que l'on recherche beaucoup plus qu'une grande induction résiduelle. A ce point de vue, d'après Mme Curie, la meilleure proportion de carbone est voisine de 1,2 p. 100 ; l'adjonction de certains métaux : chrome, tungstène, molybdène, améliore le champ coercitif.

Nous ne donnons aucun chiffre, car, ainsi que nous l'avons dit au début, l'état physique et les impuretés chimiques ont une importance dont il est impossible de tenir compte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV

LES PILES

Généralités. — Description des diverses piles. — Pile de Volta. — Pile Daniell. — Pile Carré. — Pile Callaud. — Pile Cabaret. — Pile Meidinger. — Pile Bunsen. — Pile bouteille de Poggendorff. — Pile O'Keenan. — Pile Leclanché. — Pile Leclanché-Bertier. — Pile Bergonié. — Pile Lalande et Chaperon. — Piles sèches. — Pile Féry. — Pile A. D. — Pile Neu. — Piles étalons. — Elément Clark. — Elément Weston. — Résistance intérieure des piles. — Capacité des piles.

La génération du courant électrique à l'aide d'actions chimiques est le plus ancien mode connu, puisque c'est il y a plus de cent ans que la pile de Volta révolutionna la science en mettant enfin à la disposition des expérimentateurs une source capable de débiter des quantités d'électricité considérables.

Pendant de longues années, les piles furent les seules sources d'électricité industrielle, et c'est grâce à elles que le télégraphe et même l'éclairage par lampes à arc purent se développer, sans compter les applications électrochimiques, telles que la galvanoplastie.

Lorsque Garnier construisit l'Opéra, c'est à une énorme batterie de piles Bunsen, installée dans les sous-sols, que l'on demanda de fournir le courant destiné à alimenter les lampes à arc qui éclairaient la scène. De nos jours encore, les chemins de fer emploient des piles pour actionner certains signaux et l'électricité domestique les utilise pour de multiples applications. Nous avons exposé la théorie des piles; il nous reste à décrire les divers modèles actuellement en service, ainsi que les piles réversibles, ou accumulateurs, dont les applications sont extrêmement importantes. Ce sera le but de ce chapitre.

* * *

La pile de ***Volta***, sous sa forme la plus simple, utilise le couple :

Cuivre (+) | Acide sulfurique | Zinc (—)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Elle est représentée schématiquement figure 184.

Les réactions dont elle est le siège sont les suivantes : au pôle négatif (zinc), l'acide sulfurique attaque le métal, produisant du sulfate de zinc qui reste en solution, tandis qu'au pôle positif (cuivre) on observe un dégagement d'hydrogène. Le dégagement gazeux autour de l'électrode l'entoure d'une gaine mauvaise conductrice de l'électricité, qui augmente en fur et à mesure du fonctionnement, accroît la résistance intérieure de la pile et diminue sa force électromotrice, de sorte qu'au bout de quelque temps, le passage du courant cesse. On dit que la pile est *polarisée*.

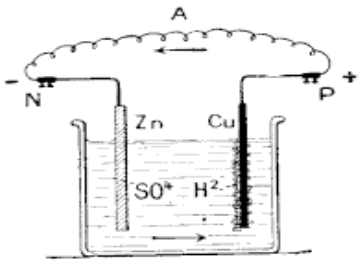


Fig. 184. — Pile Volta.

La lutte contre la polarisation est le principal problème que posent les piles, au point de vue pratique, et la valeur des différentes piles dépend de l'efficacité des substances oxydantes employées comme dépolarisants, pour empêcher la formation de la gaine d'hydrogène au pôle positif.

Les dépolarisants peuvent être liquides, solides ou gazeux ; les plus employés sont :

Le sulfate de cuivre (pile Daniell et modifications).
L'acide nitrique (pile Bunsen et modifications).
L'acide chromique (pile Poggendorff et modifications).
Le bioxyde de manganèse (pile Leclanché et modifications)
L'oxyde de cuivre (pile Lalande et Chaperon).
L'oxygène de l'air (piles Féry, Neu, A. D.).

Nous allons dire quelques mots de chacune de ces piles.

* * *

La pile ***Daniell*** est la plus simple des modifications de la pile initiale de Volta. Elle se compose, comme le représente la figure 185, d'une lame de zinc amalgamé (1) plongeant dans l'eau additionnée d'acide sulfurique, l'autre électrode, en cuivre, étant enveloppée d'une solution de sulfate de cuivre destinée à empêcher la polarisation et renfermée dans un vase poreux. La formule de la pile Daniell est la suivante :

$$\underset{+}{Cu} \mid SO^4Cu \mid SO^4H^2 \mid \underset{-}{Zn}.$$

(1) Quand la pile ne fonctionne pas, en circuit ouvert comme on dit, le zinc impur est attaqué par l'acide, ce qui produit une usure inacceptable de l'électrode. Aussi emploie-t-on du zinc amalgamé (traité par une certaine quantité de mercure), qui n'est pas attaqué en circuit ouvert et, de plus, ne se polarise pas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les réactions dont elle est le siège peuvent s'expliquer très facilement : dans la pile, le courant va du zinc au cuivre. En traversant le sulfate de cuivre, il le décompose, le cuivre se déposant sur la lame de cuivre et le radical sulfurique s'unissant à l'hydrogène que nous cherchons à éliminer.

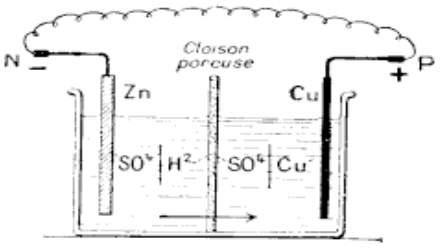


Fig. 185.

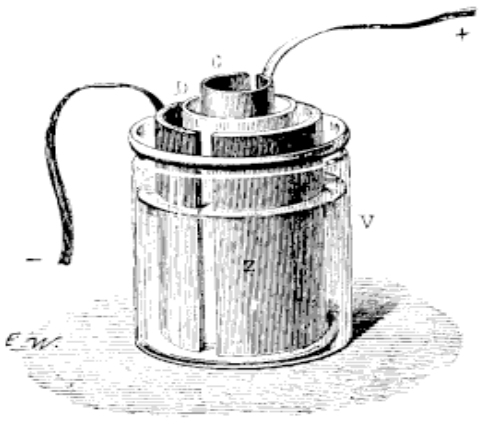


Fig. 186. — Pile Daniell.

pour redonner l'acide sulfurique. A l'électrode de zinc, l'action est, comme précédemment, attaque avec formation de sulfate de zinc et production d'hydrogène. On a donc :

Autour du zinc :

$$SO^4H^2 + Zn = SO^4Zn + H^2.$$

Autour du cuivre :

$$SO^4Cu + H^2 = SO^4H^2 + Cu.$$

Nous pouvons également interpréter les résultats par la théorie des ions ; en solution, le sulfate de cuivre et l'acide sulfurique sont décomposés (tout au moins partiellement) en leurs ions $\overline{\overline{SO^4}}$, $\overset{++}{Cu}$ d'une part et $\overline{\overline{SO^4}}$, $\overset{++}{H^2}$ d'autre part. Dans l'intérieur de la pile, c'est le cuivre qui constitue l'électrode négative, puisque le courant va du zinc au cuivre. Par suite, Cu et H^2 se déplacent vers le cuivre, tandis que les deux anions SO^4 se dirigent vers le zinc. Le cuivre de dépose sur l'électrode, et l'hydrogène $\overset{+}{H}$, rencontrant $\overline{SO^4}$ issu du sulfate de cuivre, se combine avec lui. L'autre anion $\overline{\overline{SO^4}}$ va vers le zinc et s'unit avec lui pour donner du sulfate de zinc.

En résumé, au cours du fonctionnement, le zinc se transforme continuellement en sulfate de zinc, tandis qu'une quantité équivalente de cuivre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

se dépose. La solution de sulfate de cuivre s'appauvrit donc continuellement, tandis que, dans l'autre compartiment, la solution s'enrichit en sulfate de cuivre.

La pile Daniell est extrêmement constante et donne une force électromotrice de 1,08 volt, mais sa résistance intérieure est assez grande (4 à 5 ohms) par suite de la présence d'un vase poreux séparant les deux solutions (fig. 186). De plus, au cours du fonctionnement, les pores du vase se bouchent par des dépôts de sulfate de cuivre, ce qui augmente encore la résistance intérieure, de sorte que l'on ne peut débiter avec la pile Daniell des intensités notables.

Aussi a-t-on cherché à la perfectionner en supprimant le vase poreux à l'aide de divers artifices.

* * *

Dans la pile ***Carré***, on emploie un vase en parchemin, ce qui permet d'abaisser la résistance intérieure à un dixième d'ohm environ, ce qui est un résultat très remarquable pour une pile de ce genre.

* * *

Dans la pile ***Callaud***, on supprime totalement le vase poreux et on utilise, pour séparer les liquides, leur différence de densité, le sulfate de cuivre en solution saturée étant plus dense que la solution acidulée.

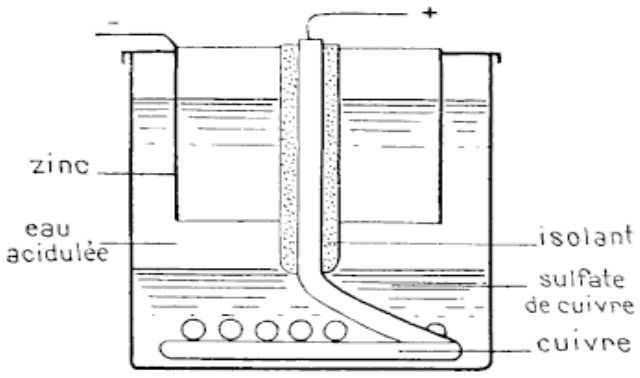


Fig. 187. — Pile Callaud.

La figure 187 montre le schéma de la construction. La plaque de cuivre placée au fond du vase, et recouverte d'une solution de sulfate de cuivre dont on assure la saturation en ajoutant un excès de cristaux, est reliée à la borne positive par un fil de cuivre assez gros et isolé par un épais revêtement de gutta-percha. La lame de zinc est disposée à la partie supérieure et plonge dans une solution acidulée faible. Pour le remplissage, on verse dans le récipient de l'eau acidulée peu concentrée et, à l'aide d'un entonnoir qui va jusqu'au fond, on introduit une solution concentrée de sulfate de cuivre. Ce liquide, étant plus dense que l'eau acidulée, se répand au fond du vase, et les deux liquides restent superposés à cause et leur différence de densité. Si l'on a soin de ne pas agiter les liquides et de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne pas transporter l'élément, les liquides restent séparés très longtemps et ne se mélangent pas plus vite que s'ils étaient séparés par un vase poreux.

* * *

Dans un modèle dû à M. ***Cabaret*** (fig. 188), on remplace la plaque de cuivre et le fil qui la termine par un tube de plomb qui reste inattaqué et dont l'extrémité inférieure est évasée de façon à former à la fois le pôle positif remplaçant la plaque de cuivre et un support pour la boîte que l'on remplit de cristaux de sulfate de cuivre pour entretenir la pile.

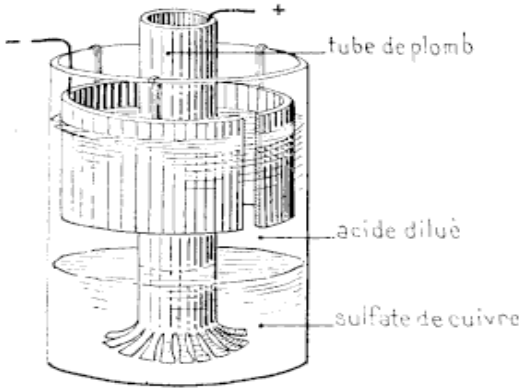


Fig. 188. — Pile Cabaret.

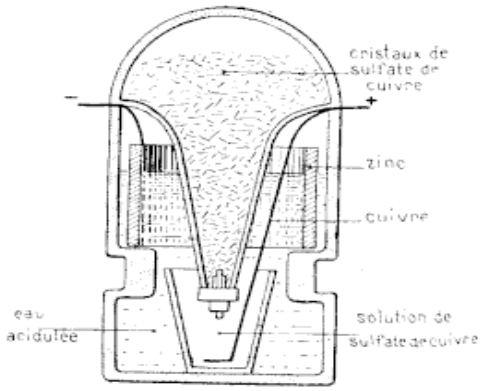


Fig. 189. — Pile Meidinger.

* * *

Quand les piles doivent rester montées pendant très longtemps (comme dans les installations télégraphiques), on leur donne la forme représentée figure 189, qui est due à ***Meidinger***.

Le pôle positif est formé par un fil de cuivre en spirale, terminé par un bout isolé qui sort du vase. Cette spirale est disposée au fond d'un gobelet rempli de sulfate de cuivre et dans lequel aboutit le bouchon percé d'un ballon renversé plein de cristaux de sulfate de cuivre. Le vase extérieur, rétréci vers son milieu, empêche le mélange des deux solutions ; le cylindre de zinc repose directement sur l'évidement. Cette pile a une grande résistance intérieure par suite de la forme de son récipient, mais peut fournir pendant des mois, sans surveillance, des courants faibles, mais constants.

Le seul entretien consiste à renouveler le sulfate de cuivre quand il est épuisé et à enlever une partie de la solution acide lorsqu'elle s'est trop enrichie en sulfate et à la remplacer par de l'eau pure.

Dans la pile ***Bunsen***, le dépolarisant est de l'acide nitrique et, comme le cuivre serait attaqué par cet acide, on le remplace par une lame de charbon à laquelle est fixé le conducteur qui sert de pôle positif. La formule de cette pile est donc :

Charbon (+) | Acide nitrique | Acide sulfurique | Zinc (−).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 190 en montre la constitution. L'acide nitrique est placé dans le vase, l'électrode de zinc amalgamé l'entoure complètement et l'électrode de charbon, en charbon de cornue, assez volumineuse afin de ne présenter qu'une faible résistance électrique, porte une vis, permettant d'y fixer les conducteurs extérieurs.

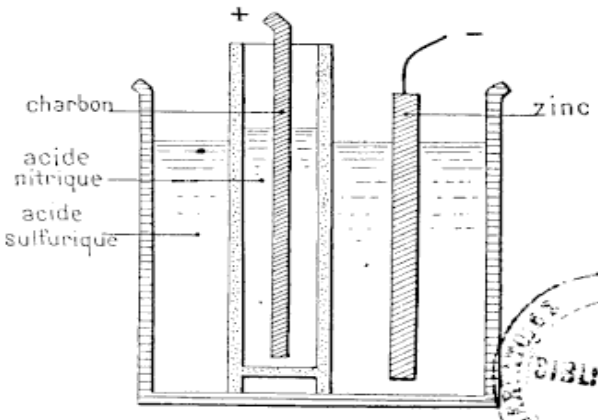


Fig. 190. — Pile Bunsen.

Comme dans les piles de Volta, de Daniell, le zinc forme du sulfate de zinc, tandis que l'hydrogène réduit l'acide nitrique :

$$NO^3H + H = NO^2 + H^2O.$$

Il y a donc dégagement de vapeurs rouges de peroxyde d'azote, ce qui est un gros inconvénient de cette pile et limite ses applications. Elle a cependant une force électromotrice considérable, 1,8 volt, et sa résistance, grâce à la bonne conductibilité de l'acide nitrique, n'est que de 0,1 ohm environ, ce qui fait qu'elle peut débiter une intensité considérable, pendant un temps assez court cependant, car l'acide nitrique s'épuise et on n'a pas la ressource de l'enrichir en marche, comme dans les piles précédentes.

* * *

Pour remédier à ces inconvénients, ***Poggendorff*** a remplacé l'acide nitrique par l'acide chromique, oxydant également très énergique, et, comme le prix de cet acide pur est assez élevé, on le produit directement dans la pile par action de l'acide sulfurique sur du bichromate de potassium ou de sodium, d'où le nom de pile au bichromate donné à cet élément.

Les électrodes sont en charbon et en zinc soigneusement amalgamé, et la réaction de la pile peut s'écrire :

$$3\,Zn + Cr^2O^7K^2 + 7\,SO^4H^2 = SO^4K^2(SO^4)^3Cr^2 + 3\,SO^4Zn + 7\,H^2O.$$

Il y a formation d'alun, de potasse et de chrome, de sulfate de zinc, et disparition du zinc de l'électrode, du bichromate et de l'acide sulfurique (c'est-à-dire de l'acide chromique).

La force électromotrice de cet élément est considérable, elle est de 2 volts, et sa résistance intérieure est très faible, car les solutions qu'elle renferme sont très conductrices. Par suite, on peut en tirer une intensité de plusieurs ampères, ce qui fait qu'on l'emploie avec succès dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

expériences de laboratoire, les petits éclairages domestiques et les applications médicales.

Pour ces derniers usages, on a été conduit à renverser la disposition de la pile Daniell ou Bunsen : le zinc et l'eau acidulée sont à l'intérieur du vase poreux, tandis que le dépolarisant est à l'extérieur, ainsi que le charbon positif. Cette disposition augmente le volume du dépolarisant et permet de recharger la pile moins souvent.

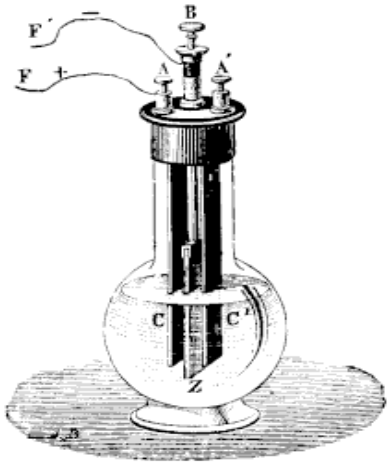


Fig. 191. — Pile au bichromate.

Le plus fréquemment, la pile de Poggendorff se présente sous la forme d'une pile bouteille (fig. 191) qui ne contient qu'un seul liquide formé par :

Eau	1 000	grammes.
Bichromate de potassium	100	—
Acide sulfurique	200	—

Sa construction est la suivante. Les deux lames de charbon, sont portées par une plaque annulaire de cuivre, fixée sous une plaque isolante en ébonite ; cette plaque d'ébonite sert de couvercle à un vase de verre contenant la solution acide de bichromate. La lame de zinc est portée par une tige, qui coulisse dans un tube de cuivre ajusté sur le couvercle ; on peut donc à volonté plonger le zinc dans le liquide ou l'en retirer. Deux bornes, reliées, l'une à la tige, l'autre à la plaque de cuivre qui porte les charbons, constituent les pôles de cette pile.

* * *

Les piles à dépolarisant liquide ont l'inconvénient d'exiger des manipulations désagréables pour leur recharge ; aussi a-t-on cherché à utiliser des dépolarisants solides, qui peuvent être soit des plaques d'accumulateur *sulfatées* (pile O'Keenan), soit le bioxyde de manganèse (pile Leclanché), soit le bioxyde de cuivre (pile Lalande et Chaperon).

La pile ***O'Keenan*** (fig. 192) fonctionne comme une pile Daniell, le dépolarisant étant seulement du sulfate de plomb au lieu du sulfate de cuivre. Comme ce sel est insoluble, on n'aura pas à craindre le mélange des liquides. De plus, lorsque le pôle positif est épuisé, il suffit de mettre la plaque à l'air pour que le plomb spongieux s'oxyde et, en trempant ensuite au bout de quelques heures la plaque dans l'acide sulfurique, on reforme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le sulfate et la plaque peut de nouveau être montée dans la pile.

L'inconvénient de cette pile, très pratique et peu coûteuse à d'autres points de vue, est de n'avoir qu'une force électromotrice de 0,5 volt environ.

* * *

La pile **Leclanché** est certainement la plus répandue des piles. Elle utilise un couple différent de celui des piles précédentes et qui est le suivant :

Charbon (+) | Chlorhydrate d'ammoniaque | Zinc (—).

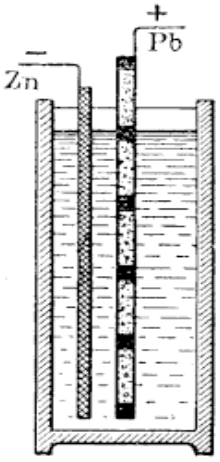


Fig. 192. Pile O'Keenan.

La pile Leclanché ordinaire se compose (fig. 193) d'un vase poreux renfermant un mélange de charbon de cornue et de bioxyde de manganèse en grains tassés autour d'une électrode de charbon constituant le pôle positif. Ce vase poreux est introduit dans le récipient extérieur qui contient un crayon de zinc et une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque. Celui-ci est sans action sur le zinc lorsque le circuit est ouvert, mais, sitôt que la pile débite, le chlorhydrate d'ammoniaque est décomposé, le chlore se porte sur le zinc et le transforme en chlorure qui reste en solution ; le radical ammonium AzH^4 se dirige vers le pôle positif et donne de l'ammoniaque et de l'hydrogène qui, réagissant sur le bioxyde de manganèse, donne de l'eau et du sesquioxyde. La réaction chimique peut être représentée globalement par :

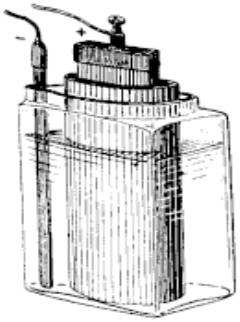


Fig. 193. — Pile Leclanché, modèle primitif.

$$Zn + 2\,AzH^4Cl + 2\,MnO^2 = ZnCl^2 + H^2O + 2\,AzH^3 + Mn^2O^3.$$

Probablement l'ammoniaque formée se combine en grande partie avec le chlorure de zinc pour former un sel double $ZnCl^2\ 2\ AzH^3$ qui reste en solution.

En général, on ajoute dans la pile du chlorure de zinc, sel déliquescent, qui compense la perte d'eau par évaporation et empêche la formation des arborescences et des sels grimpants sur les parois de la pile.

On peut monter la pile Leclanché soit avec le chlorure d'ammonium, soit avec le chlorure de zinc (Gaiffe) ; mais la force électromotrice, dans ce cas, tombe de 1,48 volt à 1,2 volt. On a même proposé d'utiliser du chlorure de manganèse, mais son prix est beaucoup plus élevé et est un obstacle à son emploi. L'addition au bioxyde de manganèse de grains de charbon ou de graphite a pour but de rendre la masse conductrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un autre perfectionnement a été la suppression du vase poreux qui augmente la résistance intérieure, en constituant l'électrode positive par un sac de toile à larges mailles et l'emploi d'une électrode négative circulaire de grande surface. La résistance intérieure tombe alors à un dixième d'ohm. La force électromotrice monte à 1,57 volt en service normal. Dans les éléments **Léclanché-Barbier**, le vase poreux est supprimé ; le pôle positif est constitué par un aggloméré de charbon et de peroxyde de manganèse, formant un cylindre creux, au milieu duquel se trouve, bien isolé par de la porcelaine, le bâton de zinc amalgamé négatif. Le charbon est maintenu dans le col du vase de verre par un anneau de caoutchouc formant fermeture étanche (fig. 194).

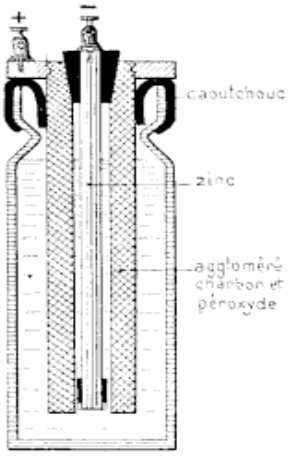


Fig. 194. — Pile Leclanché-Barbier.

* * *

La pile **Bergonié** est une pile Leclanché, mais dont la résistance intérieure est très réduite par suite de l'emploi d'une solution de chlorure d'ammonium très concentrée (130 p. 100). Sa résistance intérieure est de 0,1 ohm environ.

* * *

La pile **Lalande et Chaperon** (fig. 195) a une résistance intérieure encore plus faible (0,03 ohm), mais une force électromotrice faible, 0,8 volt. Elle utilise le bioxyde de cuivre comme dépolarisant et l'électrolyte est une solution de potasse caustique. Le couple utilisé est :

$$\underset{+}{\text{Cuivre}} \mid \text{Potasse} \mid \underset{-}{\text{Zinc}}$$

Lorsque le circuit est fermé, la potasse se trouve décomposée et s'unit au zinc pour former du zincate de potasse :

$$Zn + 2\,KOH = ZnK^2O^2 + 2\,H.$$

L'hydrogène qui se dégage se porte sur le bioxyde de cuivre et le réduit :

$$2\,H + CuO = H^2O + Cu.$$

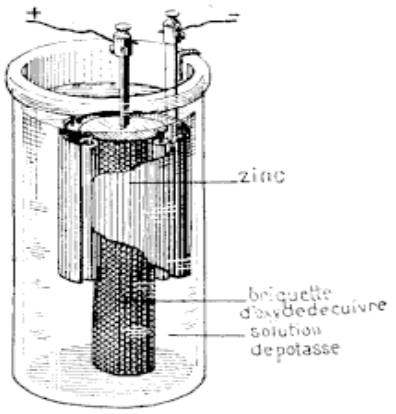


Fig. 195. — Pile Lalande et Chaperon.

Il reste donc du cuivre métallique comme dans la pile Daniell, et il n'y a pas de dégagement gazeux. On constitue le pôle positif par une briquette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'oxyde de cuivre (95 p. 100) comprimé avec de l'argile (5 p. 100) que l'on cuit au four.

Un des graves inconvénients de cette pile est l'emploi de potasse caustique, corps très dangereux à manier et qui, de plus, à l'air, se transforme en carbonate de potasse, enlevant ainsi à la pile une partie de son efficacité.

* * *

Pour éviter l'inconvénient des liquides, on enrobe l'électrolyte dans une matière inerte (sciure de bois, gélose, etc.) ; l'électrode positive est placée au centre ; le zinc forme l'enveloppe extérieure, et l'ensemble est rendu hermétique par un revêtement de cire. On a ce qu'on appelle très improprement une « ***pile sèche*** ». Ces piles sont presque toutes du type Leclanché, et leurs emplois multiples (lampes de poche, sonneries de téléphone, etc.).

Leur force électromotrice est assez élevée (1,5 volt environ), mais leur résistance intérieure est considérable (0,5 ohm environ), ce qui limite le courant qu'elles peuvent fournir. D'autre part, elles s'usent extrêmement vite, même lorsqu'elles ne fonctionnent pas. Le zinc se recouvre d'une couche blanche d'oxychlorure qui empêche l'attaque du métal par la solution excitatrice. C'est pourquoi il est préférable, chaque fois que cela est possible, d'employer des piles ordinaires ou de petits accumulateurs à liquide immobilisé dont nous parlerons plus loin.

* * *

Malgré les nombreuses recherches auxquelles ont donné lieu les piles depuis un siècle, les savants modernes n'ont pas perdu tout espoir d'obtenir un meilleur rendement de l'énergie disponible dans les piles, et peut-être celles-ci, dans un avenir assez proche, reprendront-elles une place importante dans un grand nombre d'applications dans lesquelles les machines génératrices dynamiques les avaient totalement supplantées.

Les progrès actuels résultent, non de l'utilisation des couples nouveaux, à force électromotrice élevée, mais du fait que le dépolarisant adopté est l'oxygène de l'air, qui ne coûte rien, est disponible en quantités illimitées et se distribue automatiquement dans la pile au cours de son fonctionnement, sans nécessiter aucune surveillance. Nous citerons les piles Féry, la pile A. D. et la pile Neu, et ces exemples suffisent pour montrer l'intérêt des recherches dans la voie du dépolarisant atmosphérique.

Le pile ***Féry*** est constituée par un couple

$$\underset{+}{\text{Charbon}} \mid \text{Chlorure d'ammonium} \mid \underset{-}{\text{Zinc}}$$

comme la pile Leclanché.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 196 montre comment elle est construite : la plaque de zinc est placée horizontalement au fond du vase qui contient la solution ammoniacale. Le cylindre de charbon formant électrode positive repose sur la plaque de zinc, dont il est isolé par une rondelle de bois. Un fil de cuivre isolé relie la plaque de zinc à la lame négative de l'élément, tandis que le charbon dépasse le niveau du liquide et est facilement accessible.

Le principe du fonctionnement est le suivant (fig. 197). Lorsque la pile débite, le sel ammoniac se décompose ; le chlorure de zinc, qui prend naissance, forme une couche *lourde* qui reste autour du zinc, tandis que l'ammonium, qui se porte autour du charbon, se scinde en hydrogène et

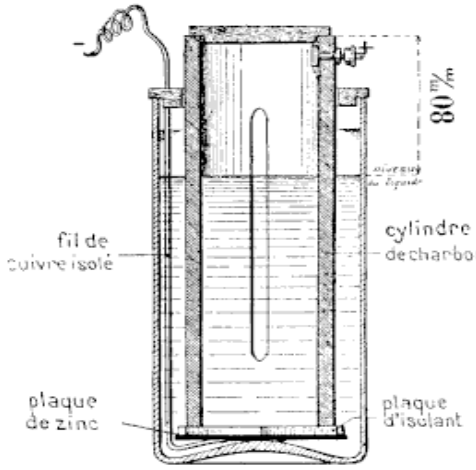


Fig. 196. — Pile Féry.

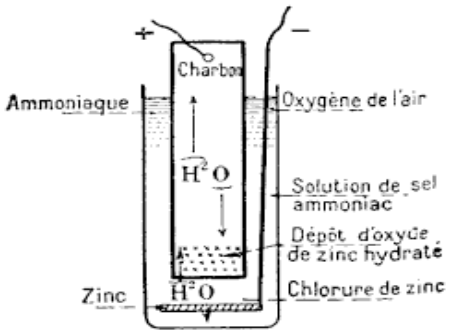


Fig. 197. — Mécanisme de fonctionnement de l'élément Féry.

en gaz ammoniac (AzH^3). Ce dernier se dissout en donnant une couche *légère* qui monte à la surface de l'élément. Il en résulte que le charbon est recouvert, dans sa partie inférieure, d'hydrogène, tandis que la partie supérieure baigne dans un liquide saturé d'oxygène de l'air dissous dans les couches superficielles du liquide. Le charbon joue le rôle de catalyseur entre l'oxygène de l'air et l'hydrogène qui produit la polarisation, et ceci, grâce en particulier à sa position verticale. En effet, le couple de dépolarisation résultant de la dissymétrie électrochimique entre les deux parties inférieure et supérieure du charbon fonctionne en même temps que le couple principal. L'oxygène qui se dégage, sous son influence, à la partie inférieure du charbon, se combine avec l'hydrogène provenant de la polarisation du couple principal, tandis qu'à la partie supérieure du charbon, il se produit un dégagement d'hydrogène qui se combine à l'oxygène dissous dans le liquide

Le succès de l'élément Féry provient notamment de la disposition

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

horizontale de l'électrode négative, au fond du vase, c'est-à-dire à l'abri de l'oxydation pouvant résulter de son contact avec l'air ; de plus, grâce à la couche de chlorure de zinc qui se forme autour de la plaque, elle est également protégée contre l'ammoniac qui attaque le zinc.

La force électromotrice de l'élément Féry est de 1,5 volt, et l'utilisation des matières est très bonne :

« Un élément à grand débit, monté dans un vase carré de 10 × 10 centimètres et de 14 centimètres de haut, contenant 750 centimètres cubes d'eau et 190 grammes de sel ammoniac, avec un zinc de 135 grammes, peut fournir, en service continu ou intermittent, une énergie totale correspondant à 105 ampères-heure.

« Pour un tel élément, le régime peut être maintenu rigoureusement continu à 150 milliampères. La force électromotrice de l'élément est de 1,4 volt ; la différence de potentiel, à ce régime, est de 0,9 volt au début, se maintient au-dessus de 0,7 volt pendant les deux tiers de la décharge, que l'on considère comme terminée lorsque la pile atteint 0,5 volt.

« Le même élément peut fournir un courant d'intensité égale à 1,5 ampère sous une différence de potentiel de 0,9 volt pour les contacts instantanés. »

Ces piles sont utilisées dans les bureaux télégraphiques de certaines villes.

* * *

La pile ***A. D.*** utilise le même couple que l'élément Féry, mais le mécanisme en est un peu différent. Le charbon constitue une chambre de réaction, car il est très poreux aux gaz, mais non aux liquides, et l'hydrogène se combine avec l'oxygène qui s'y trouve dissous, tandis que l'ammoniac passe en solution dans l'eau provenant de cette réaction. Cette dissolution provoque dans la chambre de réaction une dépression partielle qui assure l'appel d'une nouvelle quantité d'ammoniac et d'oxygène. De plus, l'électrode positive est disposée de façon à produire un couple secondaire qui régénère partiellement le chlorure d'ammonium et assure une usure moindre du zinc. La force électromotrice est voisine de 1,2 volt.

* * *

La pile ***Neu*** (fig. 198) est différente des précédentes en ce que le couple utilisé est le couple :

$$\underset{+}{\text{Fer}} \mid \text{Potasse} \mid \underset{-}{\text{Zinc}}.$$

L'électrode de zinc est disposée sous forme d'un cylindre placé le long de la paroi interne du vase ; l'électrode positive, en fer, occupe le centre d'un sac en toile d'amiante rempli de charbon de cornue concassé. Le sac dépasse le niveau du liquide suffisamment pour que la pile puisse large-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment « respirer » l'air ambiant. La force électromotrice est de 1 volt environ.

La pile n'use pas en circuit ouvert, sa résistance intérieure est faible, le niveau du liquide se maintient automatiquement constant à cause du degré de concentration de la solution de potasse qui est tel que l'humidité de l'air est suffisante pour éviter toute évaporation.

Lorsqu'on regarnit la pile, on lessive le sac d'amiante à l'esprit de sel et on le regarnit de grains neufs de charbon de cornue, de façon à avoir toujours la porosité voulue de l'électrode positive.

Un élément de 20 centimètres de hauteur et 12 centimètres de diamètre,

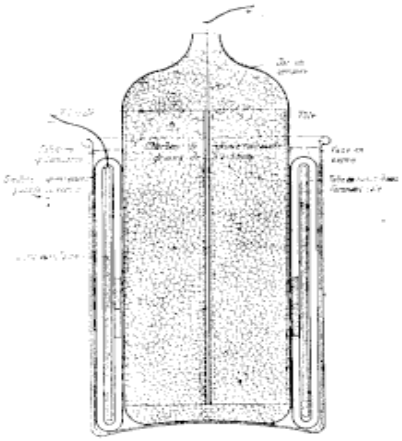


Fig. 198. — Pile Neu.

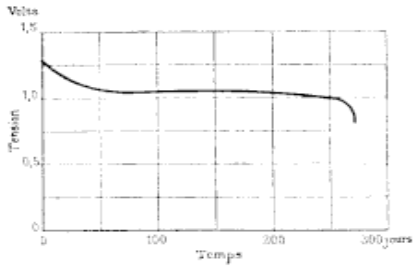


Fig. 199. — Variation de la tension de la pile Neu en fonction du temps pour un débit de 50 milliampères.

débitant 50 milliampères, a fonctionné pendant trois cents jours, donnant 330 ampères-heure (fig. 199).

On voit donc que, dans les piles nouvelles, le rendement de la matière est considérablement amélioré par rapport aux anciennes piles à dépolarisants solides ou liquides.

* * *

Il est un autre genre de piles dont il nous reste à parler : ce sont les *piles étalons*. Ces piles sont destinées non à fournir du courant, et il faut même éviter de les faire débiter, mais une force électromotrice de valeur parfaitement connue et qui puisse servir, dans les mesures électriques de potentiel, d'élément de référence.

Les conditions à remplir par ces piles sont les suivantes :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° Les produits dont elles sont composées doivent être parfaitement définis chimiquement ;

2° Lorsqu'on les place dans les mêmes conditions (de température particulièrement), elles doivent redonner identiquement la même force électromotrice ;

3° Si elles débitent accidentellement, elles doivent ensuite revenir à leur état initial ;

4° Enfin, les substances employées doivent être en équilibre chimique stable, ou, si cette condition n'est pas réalisable, la diffusion à l'intérieur de ces piles doit être très lente.

Les principales piles étalons que l'on a proposées sont les suivantes :

Zn	SO^4Zn	SO^4Hg^2	Hg (Clark).
Zn	SO^4Zn	HgO	Hg (Gouy).
Zn	$ZnCl^2$	AgCl	Ag (de la Rue).
Zn	$ZnCl^2$	Hg^2Cl^2	Hg (Helmholtz, Ostwald).
Cd	SO^4Cd	SO^4Hg^2	Hg (Weston).

Nous ne décrirons que deux de ces piles : l'élément Clark et l'élément Weston.

* * *

La pile ***Clark*** a généralement la forme de la figure 201, due à lord Rayleigh. Une des branches est remplie sur un cinquième de sa hauteur environ par un amalgame de zinc : l'autre contient du mercure recouvert de sulfate mercureux. Le reste de l'appareil est rempli d'une solution saturée de sulfate de zinc. La réaction de la pile Clark est :

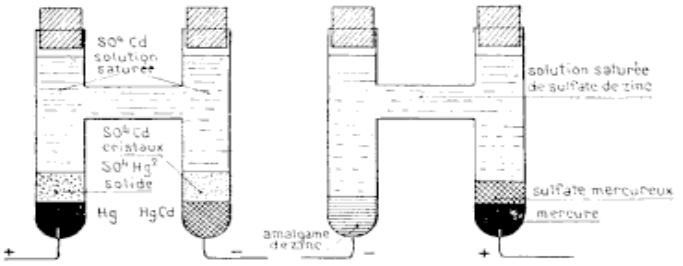


Fig. 200. — Élément Weston. Fig. 201. — Élément Clark.

$$Zn + SO^4Hg^2 \rightleftharpoons SO^4Zn + Hg^2.$$

La réaction est réversible, le sens de gauche à droite correspondant à la décharge. La force électromotrice, fonction de la température, a les valeurs suivantes :

A 15°	1,4328	volt.
A 20°	1,4267	—
A 30°	1,4134	—

Une forme plus robuste, dite forme du *Board of Trade*, est représentée figure 202.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

L'élément **Weston** ne diffère de l'élément Clark que par le remplacement du zinc par le cadmium. Sa formule est :

$$\underset{-}{\text{Cadmium}} \mid \text{Sulfate de cadmium} \mid \text{Sulfate mercureux} \mid \underset{+}{\text{Mercure}}$$

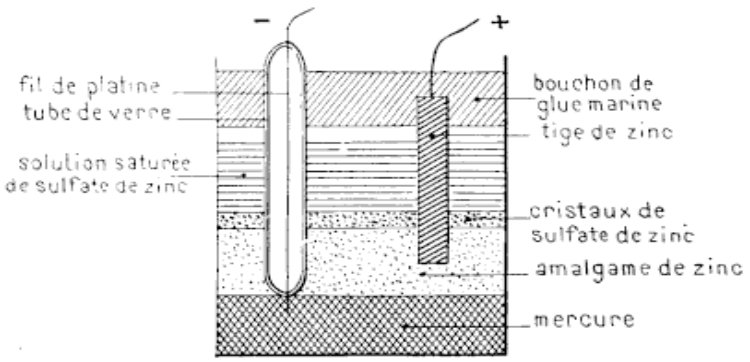


Fig. 202. — Élément Clark.

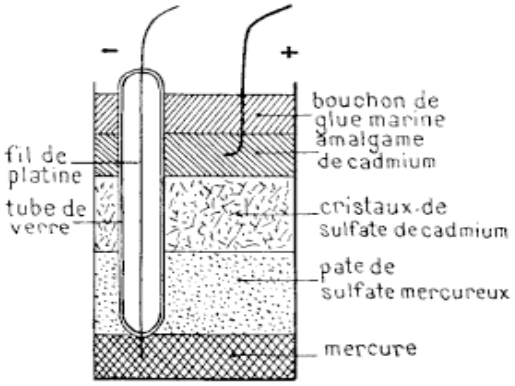


Fig. 203. — Élément Weston.

et la réaction qui s'y passe est :

$$Cd + SO^4Hg^2 \rightleftharpoons SO^4Cd + Hg^2.$$

La force électromotrice est de 1,0183 volt et est pratiquement constante à toutes les températures usuelles, ce qui fait que cette pile tend à supplanter l'élément Clark. La forme de laboratoire et la forme pratique sont représentées figures 200 et 203.

* * *

La ***résistance intérieure des piles*** est, comme nous l'avons vu, un facteur essentiel de leur valeur pratique. En effet, si E est la force électromotrice d'une pile, r sa résistance intérieure et R celle du circuit d'utilisation, l'intensité I du courant qui circule dans le circuit est donnée par :

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Si nous supposons qu'on court-circuite la pile (ce que l'on ne doit jamais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

faire), R sera alors nul et l'intensité I dans ce cas est l'intensité maxima que peut donner la pile. Si l'on calcule cette intensité, on trouve, pour le classement des piles, l'ordre suivant :

Daniell.....	$I_{maximum}$ de l'ordre de	2	ampères.
Leclanché.....	—	—	5	—
Bunsen.....	—	—	10	—
Lalande et Chaperon.....	—	—	25	—
Poggendorff.....	—	—	40	—

Ceci ne veut pas dire que l'on puisse obtenir ces ampérages, puisqu'il se produirait forcément une polarisation importante, mais que certaines piles peuvent, sur un circuit de résistance donnée, débiter une quantité d'électricité beaucoup plus considérable que d'autres.

La ***capacité*** est une autre donnée intéressante. On sait qu'un courant de 1 ampère correspond au passage de 1 coulomb par seconde dans le circuit, et que 1 coulomb libère $0^{mg},327$ de cuivre et $0^{mg},337$ de zinc par exemple dans une pile Daniell. En pratique, pour avoir un terme de comparaison avec les accumulateurs, on calcule la capacité des piles en ampères-heure.

Pour fixer les idées, nous dirons que la capacité d'une pile Leclanché moderne à gros sac peut atteindre 250 ampères-heure, ce qui veut dire que la quantité totale d'électricité que peut fournir la pile est de :

$$250 \times 3\,600 = 900\,000 \text{ coulombs.}$$

(Un ampère-heure vaut en effet 3 600 coulombs.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVI

LES ACCUMULATEURS

Réversibilité des accumulateurs. — Fonctionnement à la décharge et à la charge. — L'accumulateur au plomb. — Caractéristiques ; force électromotrice ; résistance intérieure ; différence de potentiel aux bornes ; capacité. — Influence de l'intensité de décharge, de l'épaisseur des plaques, de la concentration de l'électrolyte, de la température. — Les actions locales dans les accumulateurs : sulfatation ; actions électrochimiques. — Rétablissement de la force électromotrice après repos à la charge et à la décharge. — Construction des accumulateurs : électrodes à grande surface, à oxydes rapportés. Grilles simples, grilles doubles, grilles en deux pièces. — L'empâtage des plaques. — La formation des accumulateurs. — Choix de l'électrolyte. — Les bacs. — Perfectionnements récents. — L'accumulateur Edison au fer-nickel. — Groupement des piles et des accumulateurs : tension, parallèle, mixte. — Dangers des groupements en parallèle et mixte. — Force électromotrice et différence de potentiel aux bornes.

Un accumulateur est une pile électrique qui possède la propriété d'être ***réversible***, c'est-à-dire de pouvoir être régénérée, après son épuisement, par le passage d'un courant électrique de sens inverse au sens du courant de décharge. Cette condition implique forcément que les réactions chimiques soient les mêmes, mais de sens contraire, pendant les deux opérations. C'est le cas, par exemple, pour l'élément Weston dont la formule est :

$$Hg \mid SO^4Hg^2 \mid SO^4Cd \mid Hg + Cd,$$

la réaction réversible qui s'y produit étant :

$$Cd + SO^4Hg^2 \rightleftarrows 2\,Hg + SO^4Cd.$$

De même, la pile Daniell :

$$Zn \mid SO^4Zn \mid SO^4Cu \mid Cu$$

est une pile réversible, la réaction chimique dont elle est le siège étant réversible :

$$Zn + SO^4Cu \rightleftarrows SO^4Zn + Cu.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Depuis la découverte, par le physicien français Gautherot (1801), du principe de la réversibilité, de nombreux accumulateurs, basés sur les couples électrochimiques les plus divers, ont été réalisés, mais c'est l'accumulateur au plomb, qui date des travaux de Planté (1859), qui reste le plus pratique actuellement. Aussi allons-nous l'étudier en détail, et nous dirons seulement quelques mots des autres types d'accumulateurs que l'on a proposés dans ces dernières années.

* * *

L'accumulateur au plomb est basé sur le couple réversible :

Peroxyde de plomb | Acide sulfurique | Plomb.

Considérons un élément sous sa forme la plus simple (fig. 204) ; on peut expliquer de la façon suivante les phénomènes qui se produisent dans l'accumulateur.

A la ***décharge***, l'ensemble fonctionne comme une véritable pile, le courant circulant dans la pile de la cathode à l'anode. Sous son action, l'acide sulfurique est électrolysé : l'hydrogène se dégage à l'anode, le radical acide se portant sur la cathode. On a :

$$SO^4H^2 = \overset{+}{H^2} + \overset{-}{SO^4}.$$

Aux électrodes se produisent les réactions secondaires suivantes :
A l'anode :

$$PbO^2 + H^2 + SO^4H^2 = SO^4Pb + 2\,H^2O\,;$$

par suite, le peroxyde de plomb disparaît et est transformé en sulfate.
A la cathode :

$$Pb + SO^4 = SO^4Pb\,;$$

donc le plomb de la cathode est attaqué et transformé également en sulfate.
Si on ajoute les deux équations, on a :

$$PbO^2 + 2\,SO^4H^2 + Pb = PbSO^4 + 2\,H^2O + PbSO^4.$$

Il y a donc formation de sulfate de plomb aux deux électrodes, et la matière active est constituée à la fin de la décharge par un mélange de peroxyde et de sulfate de plomb à l'anode et un mélange de plomb spongieux et de sulfate de plomb à la cathode.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En même temps, il y a disparition de deux molécules d'acide sulfurique et formation de deux molécules d'eau, d'où diminution de la concentration de l'électrolyte.

Pendant la ***charge***, l'accumulateur fonctionne comme une simple cuve électrolytique (fig. 204). Le courant pénètre dans l'élément par

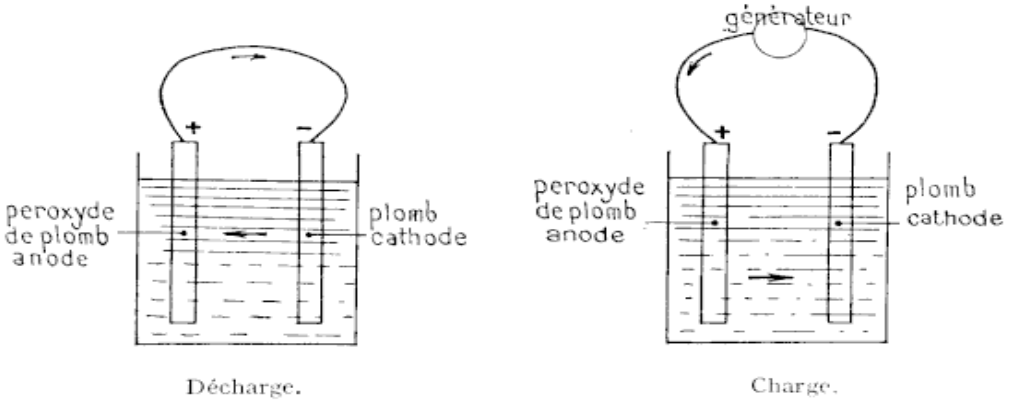


Fig. 204. — Fonctionnement d'un accumulateur.

l'anode, traverse l'électrolyte en allant de l'anode à la cathode et sort par la cathode.

De nouveau, l'acide sulfurique est électrolysé, mais maintenant l'hydrogène est dégagé à la cathode et le radical acide se porte à l'anode, où il se combine à l'eau avec mise en liberté d'oxygène, suivant la réaction :

$$SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O.$$

Tout se passe donc comme si c'était l'eau qui était électrolysée, tout comme dans le voltamètre ordinaire. Mais l'hydrogène et l'oxygène réagissent avec la matière des électrodes et donnent les réactions secondaires suivantes :

A l'anode :

$$SO^4Pb + O + H^2O = PbO^2 + SO^4H^2.$$

A la cathode :

$$SO^4Pb + H^2 = SO^4H^2 + Pb.$$

De sorte que, si l'on additionne les deux équations pour avoir la réaction globale, on a :

$$SO^4Pb + 2\,H^2O + SO^4Pb = PbO^2 + 2\,SO^4H^2 + Pb$$

qui est l'inverse de l'équation de décharge.

La théorie des ions permet l'explication satisfaisante du processus de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

charge et de décharge d'après la double sulfatation. Si l'on admet que le peroxyde de plomb possède une certaine solubilité dans l'eau (Le Blanc), on a les réactions suivantes à la décharge :

(1) $$PbO^2 + 2\,H^2O = \overset{++++}{Pb} + 4\,\overline{OH}$$

(2) $$\overset{++++}{Pb} + Pb + 2\,\overline{\overline{SO^4}} = 2\,PbSO^4$$

(3) $$4\,\overline{OH} + 4\,\overset{+}{H} = 4\,H^2O.$$

Le peroxyde en solution se dissocie en ions Pb tétravalents (1). Ces ions cèdent deux charges positives à la cathode, par le circuit extérieur, de sorte que celle-ci envoie à son tour des ions $\overset{++}{Pb}$ en solution qui s'unissent, comme les premiers redevenus bivalents, aux ions $\overline{SO^4}$ (2). A la charge, on a les équations :

(4) $$2\,PbSO^4 \text{ solide} = 2\,\overset{++}{Pb} + 2\,\overline{\overline{SO^4}}$$

(5) $$2\,\overset{++}{Pb} = \overset{++++}{Pb} + Pb$$

(6) $$\overset{++++}{Pb} + 4\,\overline{OH} = PbO^2 + 2\,H^2O$$

(7) $$4\,\overset{+}{H} + 2\,\overline{\overline{SO^4}} = 2\,H^2SO^4.$$

Le sulfate de plomb envoie en solution des ions Pb bivalents aux deux pôles (4). Puis les ions bivalents de la positive prennent deux charges positives et passent à l'état d'ions tétravalents, tandis que les ions bivalents à la négative abandonnent leurs deux charges et se précipitent à l'état métallique (5). De même, à la positive, le peroxyde de plomb se reprécipite dès que la concentration des ions de plomb tétravalents atteint celle qui correspond à la limite de solubilité du peroxyde (6).

D'après Liebenow, on pourrait considérer la positive comme réversible par rapport aux ions $\overline{\overline{PbO^2}}$, de même que la négative est réversible par rapport aux ions $\overset{++}{Pb}$. A la décharge, la négative se comporte comme dans l'hypothèse précédente, pendant que les ions $\overline{PbO^2}$ de la positive réagissent sur les ions $\overset{+}{H}$ d'après les équations :

$$\overline{\overline{PbO^2}} + 4\,\overset{+}{H} = \overset{++}{Pb} + 2\,H^2O$$

et

$$\overset{++}{Pb} + \overline{\overline{SO^4}} = PbSO^4.$$

A la charge, les phénomènes inverses ont lieu, le sulfate de plomb se dissociant de la façon suivante :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$2\,PbSO^4 + 2\,H^2O = \overset{++}{Pb} + 4\,\overset{+}{H} + \overset{--}{PbO^2} + 2\,\overset{--}{SO^4},$$

et les ions $\overset{++}{Pb}$ et $\overset{--}{PbO^2}$ cédant simplement leurs charges pour redonner le plomb spongieux et le peroxyde de plomb.

* * *

Il nous faut maintenant étudier les ***caractéristiques de l'accumulateur au plomb*** : force électromotrice, résistance intérieure, différence de potentiel aux bornes, capacité, etc., en fonction des divers facteurs sur lesquels nous pouvons influer (concentration de l'électrolyte, régime de charge et de décharge, etc.).

Nous commencerons par l'étude de la ***force électromotrice.*** Cette étude a été rendue précise dans ces dernières années par l'emploi d'électrodes auxiliaires. En effet, la force électromotrice, comme la différence de potentiel aux bornes, dépendent du potentiel de chaque électrode et par suite, il est indispensable, si l'on veut avoir une vue nette du phénomène, de mesurer les variations de ce potentiel séparément pour chacune d'elles. On emploie pour cela une petite électrode supplémentaire que l'on place dans l'élément et par rapport à laquelle on détermine le potentiel de la positive et de la négative. Nous n'entrerons pas dans le détail de la constitution de ces électrodes supplémentaires, qui doivent satisfaire aux conditions suivantes : être insolubles dans l'électrolyte, être impolarisables et avoir un potentiel constant. Donnons seulement les résultats.

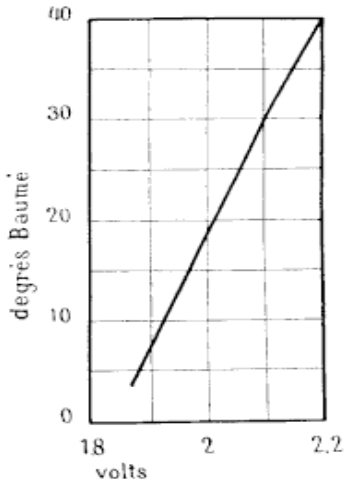


Fig. 205. — Variation de la force électromotrice d'un accumulateur en fonction de la concentration de l'électrolyte.

La force électromotrice varie considérablement avec la concentration de l'électrolyte, ainsi que l'expérience le montre et que la théorie thermodynamique établie par Dolezalek permet de le prévoir.

La figure 205 montre l'allure de la variation d'après les nombres de Dolezalek, et le tableau suivant donne les résultats expérimentaux d'après plusieurs auteurs. Les différences constatées sont dues principalement à la difficulté d'égaliser la densité de l'acide à l'extérieur des plaques et dans le sein de l'électrolyte extérieur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Variation de la force électromotrice avec la concentration, d'après Gladstone et Hibbert, Streintz, Dolezalek et Jumau.

Degrés Baumé.	Densité de l'acide.	SO^4H^2 p. 100.	SO^4H^2 en grammes par litre.	Force électromotrice en volts.			
				Streintz.	Gladstone et Hibbert.	Dolezalek.	Jumau.
5,9	1,044	6,7	70	1,889	1,887	1,892	1,867
8,4	1,063	9,2	98	1,907	1,898	1,917	1,889
10	1,075	10,8	116	1,920	1,910	1,930	1,901
15	1,116	16,2	181	1,957	1,943	1,975	1,928
20	1,162	22,2	258	1,997	1,983	2,019	1,963
25	1,210	28,4	344	2,043	2,039	2,060	2,001
30	1,263	34,7	438	2,096	2,098	2,107	2,048
35	1,320	41,6	549	2,163	2,156	2,161	2,096
40	1,383	48,3	668	2,227	»	2,217	2,147

La formule suivante, due à Dolezalek, donne la force électromotrice à zéro degré en fonction de la teneur c de l'électrolyte en molécules-grammes par litre :

$$E_c = 1{,}917 + 0{,}120 \log c + 0{,}001\, c.$$

L'accord avec les nombres expérimentaux est très satisfaisant.

L'influence de la température sur la force électromotrice est beaucoup plus faible. Le coefficient de température $\frac{dE}{dt}$ a des valeurs tantôt positives, tantôt négatives, suivant la concentration de l'électrolyte. Il est positif pour les densités d'acide supérieures à 1,044 (avec un maximum de 0,38 millivolt par degré pour une densité de 1,125 correspondant à 2 molécules-grammes d'acide sulfurique par litre) et négatif par les densités d'acide inférieures. Pour $c = 0{,}7$ molécule-gramme par litre, la force électromotrice est indépendante de la température.

Au point de vue du fonctionnement de l'accumulateur, on voit donc que l'élément rempli d'acide de densité usuelle s'échauffe pendant la charge et se refroidit pendant la décharge, le coefficient de température étant positif. Au contraire, si la solution d'acide a une densité inférieure à 1,044, c'est l'inverse qui se produit.

* * *

La ***résistance intérieure*** de l'accumulateur au plomb est toujours très faible. Dans les grands éléments, elle est de quelques dix-millièmes d'ohm et, dans les petits, au maximum de quelques centièmes d'ohm. C'est dire que la chute de potentiel qui en résulte est au maximum de quelques

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

centièmes de volt, correspondant à une perte d'énergie de 3 à 4 p. 100 au maximum par effet Joule.

Ce fait est dû à la grande conductibilité des solutions d'acide sulfurique et à la surface importante offerte au passage du courant. Aussi les variations de la résistance intérieure en fonction du régime et suivant les états de charge ou de décharge n'ont aucune importance pratique.

Disons seulement qu'elle augmente pendant la décharge plus rapidement vers la fin : elle peut doubler ou même tripler. Pendant la charge, elle repasse à peu près par les mêmes valeurs en sens inverse.

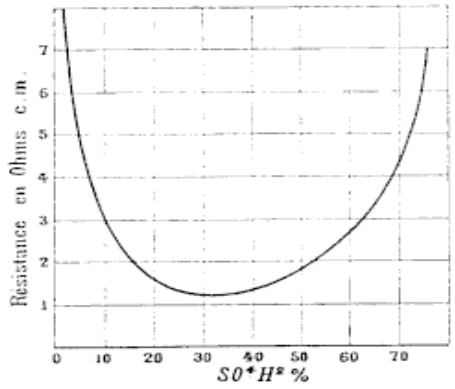


Fig. 206. — Courbe de résistivité des solutions sulfuriques.

L'augmentation de la résistance intérieure à la décharge provient de la diminution de la densité de l'électrolyte, de la formation d'une couche de sulfate sur les électrodes et de la dilution de l'acide dans les pores des plaques. On trouve qu'en général la plus grande variation de résistance provient de la positive ; cependant, vers la fin de la décharge, la négative augmente rapidement de résistance.

A la fin de la charge, la plus grande partie de la résistance intérieure est donnée par l'électrolyte. La résistivité de celui-ci passe par un minimum (1,365 ohm-centimètre à 18°) pour une certaine concentration (30 p. 100 d'acide sulfurique), ainsi que le montre la courbe figure 206, d'après Kohlrausch. La résistance varie également en fonction de la température qui diminue la résistivité de l'acide sulfurique de 1,45 à 1,7 p. 100 par degré pour les densités ordinaires.

* * *

Ayant la force électromotrice et la résistance intérieure de l'accumulateur, il est facile de tirer la valeur de la ***différence de potentiel aux bornes*** e qui est donnée par :

$$e = E \pm iR,$$

le signe $\pm$ s'appliquant suivant que l'élément est en charge ou décharge.

La figure 207, d'après Dolezalek, montre la variation de la différence de potentiel pour une densité de courant de 0,5 ampère par décimètre carré

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de surface d'électrode et une concentration d'acide de 20 p. 100. L'allure est la même dans tous les cas.

La courbe de décharge présente d'abord une baisse rapide AE, due à ce que la formation de sulfate produit une diminution de concentration de l'acide dans le voisinage immédiat de la matière active. Pendant la plus grande partie de la décharge, de E en F, le voltage baisse lentement, par suite de la diminution de densité de l'acide et de la difficulté de plus en plus grande qu'éprouve l'acide à se diffuser. Enfin, la chute brusque du voltage a lieu quand la diffusion devient incapable d'amener à l'intérieur l'acide nécessaire, les pores se bouchant sur les plaques par suite de la formation du sulfate de plomb. D'après Dolezalek, le minimum E doit être attribué à la formation d'une solution sursaturée de sulfate de plomb.

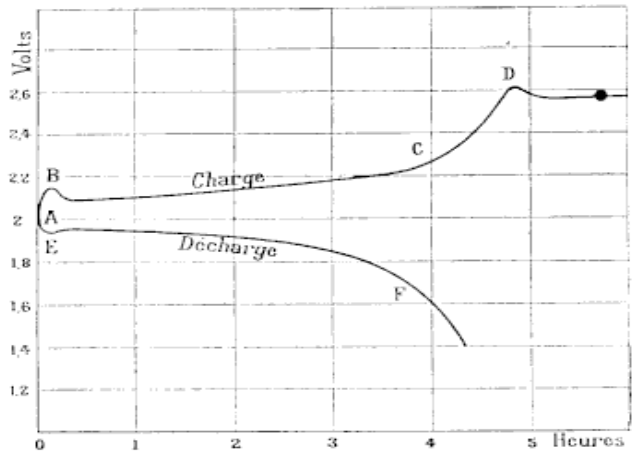


Fig. 207. — Courbe de charge et décharge de l'accumulateur au plomb.

Pendant la charge, l'augmentation initiale provient de la mise en liberté de l'acide sulfurique par suite de la décomposition du sulfate. En B, on observe parfois un maximum lorsque la quantité de sulfate formée pendant la décharge a été assez considérable pour que la résistance initiale au début de la charge ait une valeur élevée. Pendant la plus grande partie de la charge, la montée BC provient de l'augmentation de densité de l'acide dans les pores et de la difficulté de plus en plus grande de la diffusion, la matière active travaillant en profondeur. Vers la fin de la charge, le voltage augmente brusquement au voisinage de D, car on électrolyse alors le sulfate de plomb qui se trouve en solution dans l'acide quand tout le sulfate solide des électrodes a été transformé par le courant. A ce moment, le dégagement gazeux commence à se produire aussitôt que, le sulfate en solution ayant été transformé, c'est l'acide sulfurique qui est électrolysé ; il en résulte que la diffusion de l'acide des plaques est facilitée et la tension baisse légèrement.

* * *

Un des facteurs les plus importants à considérer est la ***capacité*** de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'accumulateur, définie comme la quantité d'électricité que l'on peut retirer d'un accumulateur pendant une décharge poussée jusqu'à la limite pratique, c'est-à-dire jusqu'au crochet F de la courbe de décharge, qui se produit pour une différence de potentiel de 1,8 volt en moyenne. On ne retire donc pas la quantité théorique d'électricité que devrait fournir la matière active.

En pratique, quand on arrête la décharge, on constate que la plus grande partie du plomb spongieux et du peroxyde est restée inutilisée et qu'il existe encore dans l'électrolyte un grand excès d'acide sulfurique. Cela tient à ce que l'acide sulfurique ne pénètre plus assez vite dans les pores de la matière lorsque ce sont les couches profondes de celle-ci qui doivent travailler, et, de plus, ces pores se bouchent par suite de la formation du sulfate.

On est alors conduit à considérer le *coefficient d'utilisation*, qui est le rapport entre le poids de matière qui participe réellement aux réactions et le poids total de cette matière.

Il faut 1 ampère-heure pour libérer $3^{gr},85$ de plomb et $4^{gr},44$ de peroxyde, d'après les lois de Faraday. Il en résulte que, théoriquement, $8^{gr},29$ de matière active pourraient donner 1 ampère-heure, et, par suite, 1 kilogramme donnerait 120 ampères-heure.

Mais il faut tenir compte, comme nous venons de le dire, du fait que toute la matière active ne peut être utilisée, et ce n'est que dans des conditions tout à fait exceptionnelles, et en prenant de multiples précautions, que l'on peut arriver à un coefficient d'utilisation de 60 p. 100. Si, de plus, on tient compte des supports de la matière et des accessoires, le rendement tombe à 25 à 35 p. 100 ; c'est dire que les capacités spécifiques par kilogramme de matière active tombent à 30 à 40 ampères-heure. Théoriquement, on pourrait arriver à 60 ampères-heure. La différence entre ces deux nombres donne la marge que le progrès peut espérer arriver à combler.

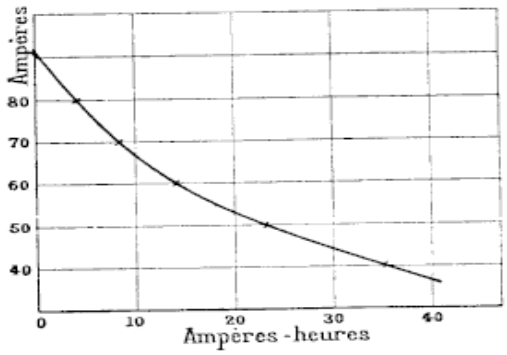


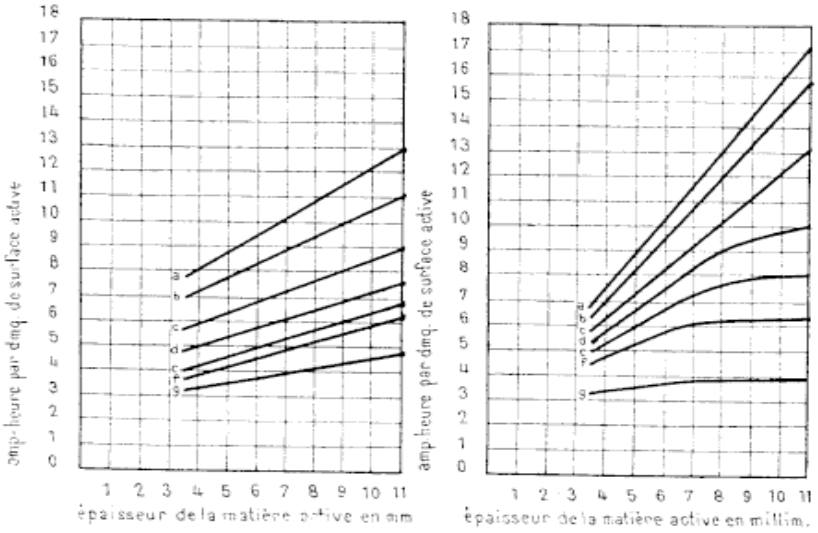
Fig. 208. — Variation de la capacité de l'accumulateur au plomb en fonction du régime de décharge.

* * *

La ***capacité d'un accumulateur*** est d'autre part influencée par un grand nombre de facteurs, et nous allons rapidement passer en revue les effets de chacun d'eux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'***intensité de décharge*** peut faire varier dans de grandes limites



Plaque positive. Plaque négative.

Fig. 209. — Capacités en fonction de l'épaisseur.

a, 0,233 ampère par dm² ; *b*, 0,466 ampère par dm² ; *c*, 0,931 ampère par dm² ; *d*, 1,398 ampère par dm² ; *e*, 1,864 ampère par dm² ; *f*, 2,328 ampères par dm² ; *g*, 3,493 ampères par dm².

la capacité des accumulateurs, comme le montre la figure 208 (Liebenow). Plus la décharge est rapide, plus la capacité diminue. On voit par exemple que si l'accumulateur considéré débite 80 ampères, sa capacité n'est que de 5 ampères-heure environ, tandis que si on ne lui demande que 40 ampères, il présente une capacité sept fois plus grande. De nombreuses formules ont été proposées pour relier la capacité à l'intensité ; il est préférable de déterminer la courbe expérimentalement.

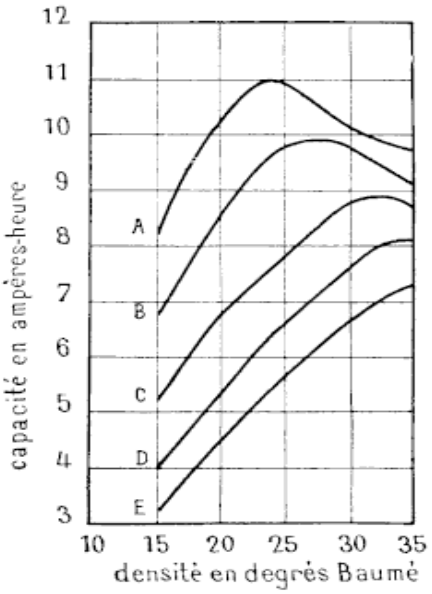


Fig. 210. — Maximum de capacité en fonction de l'intensité de décharge.

A, 0,5 ampère ; B, 0,75 ampère ; C, 1,25 ampère ; D, 2 ampères ; E, 3 ampères.

L'***épaisseur des plaques*** a également une influence notable, comme l'a trouvé M. Jumau auquel nous empruntons les figures 209, relatives, la première aux plaques positives, la seconde aux plaques négatives du type dit à grille (voir plus loin). Plus l'intensité du courant est élevée, et moins on gagne de capacité en prenant des épaisseurs croissantes de ma-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tière active. Les capacités pour les négatives croissent plus rapidement que pour les positives aux régimes faibles et plus lentement aux régimes élevés.

La ***concentration de l'électrolyte*** augmente la capacité de l'accumulateur jusqu'à une certaine densité, puis, lorsque la densité augmente, la capacité diminue.

Jumau a montré que la densité optima est variable suivant le régime de décharge : plus celui-ci est intense, plus la densité optima se déplace vers les fortes concentrations (fig. 210).

De même, le maximum de capacité ne correspond pas à la même densité pour les positives et les négatives, comme le montrent les chiffres suivants :

	Positives.	*Négatives.*
Décharge lente	1,20	1,12
Décharge rapide	1,38	1,20

Ces chiffres, d'ailleurs, n'ont rien d'absolu et ne sont valables que pour le type de plaque étudié.

La ***température***, lorsqu'elle s'élève, fait croître la capacité qui varie, suivant les types de plaques et l'intensité de décharge, de 0,5 p. 100 à 2,2 p. 100 environ par degré.

Enfin, les ***états antérieurs*** ont une influence sur la capacité, et il se produit des effets complexes, qui constituent une véritable hystérésis.

* * *

Il nous faut maintenant dire quelques mots des ***actions locales*** dont les accumulateurs sont le siège. On désigne sous ce nom les actions chimiques qui se produisent sans donner lieu à une libération d'énergie électrique utilisable.

Tout d'abord la ***sulfatation***, nom impropre donné à la cristallisation en gros cristaux du sulfate de plomb pendant le repos de l'accumulateur. On explique ce phénomène par les petites variations de température extérieure qui provoquent la dissolution, puis la cristallisation, du sulfate des électrodes. Cette cristallisation « nourrit » certains cristaux, qui grossissent alors jusqu'à recouvrir toute la plaque d'un dépôt blanchâtre, opaque, de sulfate faiblement soluble et difficilement transformable par le courant. Il en résulte une augmentation considérable de la résistance intérieure et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une diminution de capacité telle que parfois l'accumulateur est mis hors d'usage.

Les ***actions électrochimiques*** qui se produisent entre le support et la matière active qui, n'étant pas de nature chimique identique, donnent lieu à des couples, sont très importantes.

A la négative cependant elles sont très faibles, puisque entre le plomb ou les alliages de plomb du support et la matière active, qui est du plomb spongieux, n'existe pas une grande force électromotrice de contact. Il n'en est pas de même à la positive où, le peroxyde étant en contact avec le plomb doux ou les alliages de plomb des supports, la force électromotrice du couple parasite est égale à celle de l'accumulateur. Quand l'épaisseur de matière active augmente, l'action de ce couple devient heureusement de plus en plus faible.

Les impuretés que l'on peut rencontrer dans les différentes substances qui constituent l'élément, et principalement dans l'acide, ont un rôle néfaste très considérable.

C'est ainsi qu'un acide sulfurique ordinaire contenant comme impuretés, en grammes par litre, 0,05 de fer, 0,072 d'acide chlorhydrique, 0,01 d'arsenic et 0,075 d'oxyde azotique a donné, au bout de vingt jours, une perte de 3 p. 100 à la positive et 18 p. 100 à la négative.

L'acide nitrique attaque le plomb spongieux, qui finalement se trouve sulfaté ; l'acide chlorhydrique agit de même, et de plus attaque le peroxyde qui se transforme en sulfate (formation de chlorure de plomb transformé en sulfate avec régénération de l'acide chlorhydrique). Le fer est néfaste, parce qu'il présente deux degrés d'oxydation qu'il prend successivement au contact des deux électrodes d'après les réactions :

$$2\,SO^4Fe + PbO^2 + 2\,SO^4H^2 = (SO^4)^3Fe^2 + SO^4Pb + 2H^2O$$

et :

$$(SO^4)^3Fe^2 + Pb = 2\,SO^4Fe + SO^4Pb.$$

Pratiquement, il faut donc prendre un acide aussi pur que possible, surtout dépourvu de fer (couleur jaunâtre) et employer des solutions aussi faibles que le permet la capacité de l'accumulateur.

* * *

Les courbes donnant la ***variation de la différence de potentiel*** en charge et en décharge nous ont montré qu'au début de la charge, le voltage monte rapidement et qu'au contraire, il baisse dans la décharge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'on abandonne au repos un accumulateur chargé ou déchargé, on constate le phénomène inverse. Pour l'accumulateur chargé, la force électromotrice décroît d'abord rapidement, puis plus lentement, pour revenir à sa valeur proportionnelle à la densité de l'acide après quelques minutes. C'est l'inverse dans le cas de la décharge. La figure 211, d'après Moore, montre l'allure des courbes de charge et décharge (traits pleins) et de rétablissement de la force électromotrice (traits ponctués). Ce phénomène est dû à la diffusion à travers la matière active du sulfate de plomb (charge) ou de l'acide sulfurique (décharge).

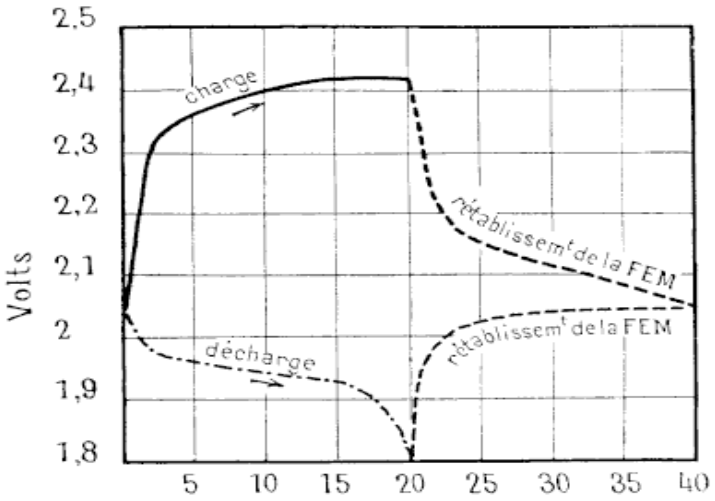


Fig. 211. — Courbes de rétablissement de la force électromotrice par le repos après charge et décharge.

* * *

Dans les pages précédentes, nous avons étudié les phénomènes dont les accumulateurs sont le siège. Grâce à ce que nous avons dit, le lecteur sera à même de saisir la raison des ***multiples spécifications et recommandations que les fabricants d'accumulateurs conseillent*** de suivre afin d'obtenir le meilleur rendement de leurs appareils. Il pourra également interpréter les courbes caractéristiques des batteries fournies par les constructeurs. Aussi n'entrerons-nous pas dans les détails d'entretien des accumulateurs, ce qui ferait double emploi avec les notices très bien établies qui accompagnent chaque appareil. Après avoir ainsi fait la théorie de l'accumulateur, il nous reste à voir comment pratiquement on les construit d'abord, et ensuite comment on les « forme », c'est-à-dire comment on transforme leurs éléments en « matière active ». Les types de plaques d'accumulateurs étant innombrables et, actuellement, donnant tous très sensiblement le même résultat, nous n'en décrirons que quelques exemples caractéristiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

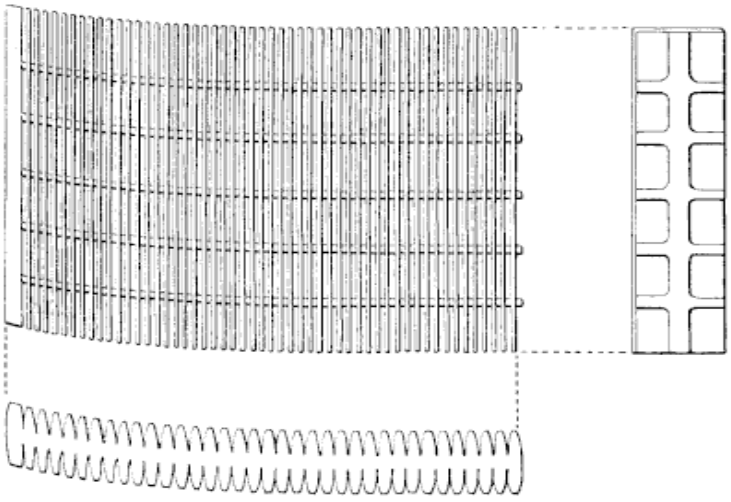
Les ***électrodes***, aussi bien au point de vue historique qu'au point de vue de la fabrication, peuvent être rangées en deux grandes classes :

1° Les *électrodes à grande surface, type Planté*, dans lesquelles la matière active est formée aux dépens du support et est répartie en couche mince sur une surface aussi grande que possible.

2° Les *électrodes à oxydes rapportés, type Faure*, dans lesquelles la matière active est insérée dans un support en plomb qui sert en même temps de conducteur de courant, mais n'est pas attaqué par l'électrolyte.

* * *

Les ***électrodes à grande surface*** sont entièrement en plomb pur ; elles sont formées d'une âme de forme quelconque, munie de dents ou



Plaques à grande surface.

Fig. 212. — Plaque à âme Tudor.

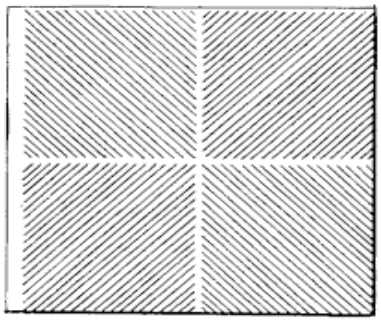


Fig. 213. — Plaque Pfaff.

nervures ayant une forme et une disposition curieusement variable. La figure 212 montre un fragment de plaque à grande surface (Tudor), et la figure 213 une autre disposition des lamelles inclinées à 45° (Pfaff) afin de rendre la plaque indéformable.

Les ***électrodes à oxydes rapportés*** sont constituées par un grillage en plomb antimonié afin d'augmenter leur résistance mécanique et de diminuer leur attaque par les acides. On peut les rapporter à trois types principaux :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° Grilles simples ;
2° Grilles en deux pièces et plaques à cadres ;
3° Grilles doubles en une seule pièce.

Les *grilles simples* (Faure-Selton, etc.), dont la figure 214 montre un type.

Plaques à oxydes rapportés. Grille simple.

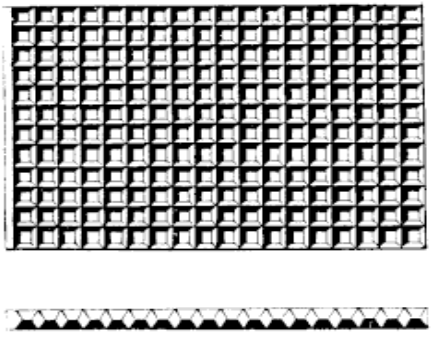


Fig. 214. — Grilles Faure-Selton.

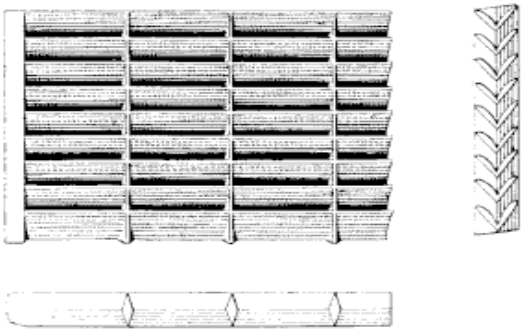


Fig. 215. — Plaque à augets.

forment des alvéoles dans lesquels on introduira les pastilles.

Malheureusement, étant donnée la forme même des alvéoles, on voit que les pastilles ont une tendance à sortir de leur logement sous l'action

Grilles en deux pièces.

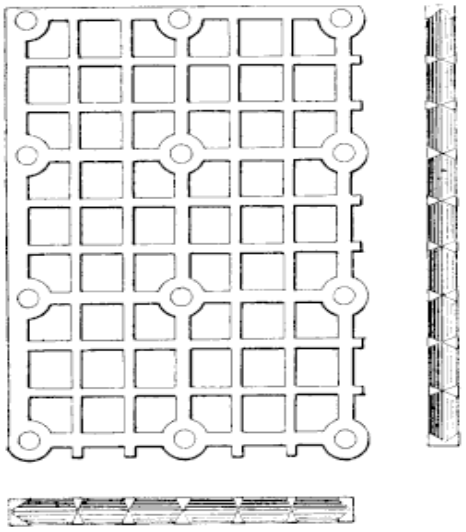


Fig. 216. — Grille Gadot.

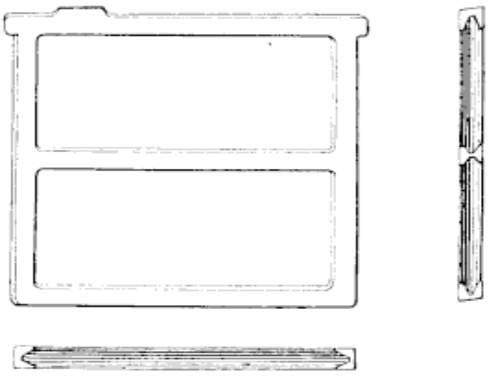


Fig. 217. — Plaque à cadre Dinin.

des dégagements gazeux et des changements de constitution physique et chimique résultant du fonctionnement, ce qui diminue la capacité de la plaque et peut provoquer des courts-circuits. Aussi, dans certaines

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plaques (T.E.M., par exemple), donne-t-on aux logements la forme d'augets (fig. 215).

Afin de maintenir la substance active dans ses alvéoles, on constitue la *grille en deux pièces* (Gadot), dont les barreaux, de section triangulaire, sont opposés par le sommet ; l'assemblage est fait par rivets de plomb, et il est facile de voir (fig. 216) que les pastilles ne peuvent plus sortir de leur logement.

On peut rapprocher de ce type les plaques à grandes pastilles ou *à cadres* (Dinin), dans lesquelles les pastilles ont à peu près la même action que celles des plaques en deux pièces, mais des dimensions beaucoup plus grandes (fig. 217).

Grille double.

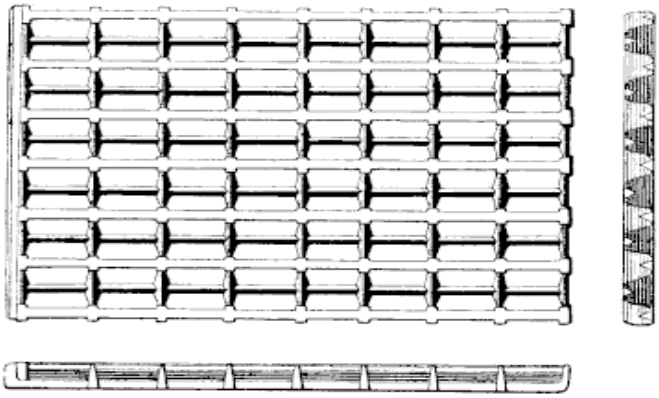


Fig. 218. — Grille double en une seule pièce (Dinin).

Actuellement, ce sont les *grilles doubles en une seule pièce* qui sont les plus employées (Dinin, etc.). Les barreaux triangulaires ou trapézoïdaux sont disposés horizontalement et alternés, les sommets tournés vers l'extérieur. Des nervures verticales ayant la même épaisseur que la plaque, comme dans les grilles simples, les réunissent entre eux. La figure 218 montre clairement comment on obtient ainsi des pastilles ayant toute la hauteur de la plaque et maintenues solidement par les barreaux alternés.

* * *

Ayant ainsi réalisé le support de la matière active, l'opération suivante de la fabrication est l'***empâtage***, qui consiste à remplir les alvéoles de matière active. Les mélanges que l'on emploie sont très variés, et chaque constructeur garde le sien jalousement secret, persuadé qu'un certain produit spécial qu'il y incorpore confère à l'accumulateur des qualités précieuses. Voici quelques formules classiques :

Positives : 1 partie litharge, 3 parties minium délayés avec acide sulfurique à 15° B.
Négatives : 1 partie minium, 3 parties litharge délayés avec acide sulfurique à 10° B.

Certains constructeurs remplacent en totalité ou partiellement l'acide

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sulfurique par des sulfates, prenant, par exemple, des formules analogues aux suivantes :

Positives : 80 minium, 10 litharge, 10 sulfate de magnésie, solution sulfurique à 15° B.
Négatives : 10 minium, 80 litharge, 10 sulfate de magnésie, solution sulfurique à 10° B.

On ajoute parfois de la glycérine au mélange, afin d'obtenir du sulfoglycérate de plomb ; dans d'autres cas, on malaxe le minium avec une solution de potasse caustique qui durcit la masse ; enfin, on incorpore parfois des liants organiques les plus variés, depuis l'anthracène en solution acétique jusqu'à la pyridine en solution alcoolique, en passant par tous les liants ordinaires : essences, brai, asphalte, bitume, etc.

L'empâtage, qui est une opération très délicate et de laquelle dépend la vie de l'accumulateur, est presque toujours fait à la main ; pour les négatives seulement, on comprime à la presse à la fin de l'opération, afin d'éviter le retrait de la matière.

* * *

La ***formation*** des accumulateurs est la dernière opération qu'il nous reste à décrire. Elle a pour but de transformer la couche superficielle de plomb pur ou les mélanges de sels des plaques à oxydes rapportés en *peroxyde* de plomb à l'anode et en plomb spongieux à la cathode. Cette transformation comprend deux phases :

1° Transformation chimique formant du sulfate de plomb aux deux électrodes ;

2° Transformation électrochimique oxydant le sulfate à la positive et le réduisant à la négative.

La première opération s'effectue, soit pendant le malaxage des produits constituant les pastilles, soit après, par trempage dans des bains d'acide.

La seconde, dans les cas des plaques à oxydes rapportés, consiste essentiellement en une charge lente (0,2 à 0,5 ampère par décimètre carré de surface totale des électrodes) pendant un long temps (soixante à cent heures) dans une solution d'acide étendue (3° à 10° Baumé).

Pour les plaques à grande surface, il est difficile d'arriver, en une seule opération, à transformer une quantité notable du plomb pur en matière active. Au début, Planté opérait par charges et décharges alternées, mais il fallait un temps très long et une consommation de courant exagérée pour arriver au résultat final.

Dans les méthodes modernes, on ajoute à l'acide sulfurique des substances qui donnent facilement des anions susceptibles de former des sels de plomb plus solubles que le sulfate. Dans ces conditions, le métal

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est toujours découvert et son attaque par l'acide sulfurique plus intense.

Un grand nombre de substances sont susceptibles de remplir ce rôle : citons l'acide nitrique et les nitrates, les chlorates, perchlorates, bichromates, permanganates alcalins, l'acide sulfureux et les sulfites, l'acide tartrique et les tartrates, les acides oxalique, formique, acétique et même le glucose. Nous n'entrerons pas dans l'étude des réactions successives qui se produisent alors pendant la formation.

* * *

L'***électrolyte*** que l'on place dans la cuve de l'accumulateur est de l'acide sulfurique, ainsi que nous l'avons dit, et, pour chaque genre d'accumulateurs, le constructeur recommande une concentration qui donne les meilleurs résultats. Signalons que, pour les petits accumulateurs transportables remplaçant les piles sèches, on utilise ce que l'on appelle l'*électrolyte immobilisé* et qui est presque toujours constitué par un mélange pâteux d'acide sulfurique (1 partie à 30° Baumé, par exemple) et de silicate de soude ou de potasse (3 parties de silicate à 22° Baumé, par exemple). Parfois, on ajoute en plus de l'amiante en poudre. Naturellement, la résistance intérieure des éléments est considérablement augmentée et leur capacité très réduite.

* * *

Quant aux ***bacs***, ils doivent être inattaquables à l'acide sulfurique et avoir une résistance suffisante aux actions mécaniques et calorifiques. On les constitue en verre, ébonite, celluloïd, et certaines substances moulées (ambroïne, etc.).

* * *

Le développement de l'industrie automobile d'une part, de la télégraphie sans fil de l'autre ont donné à la fabrication des accumulateurs une extension considérable. Les accumulateurs de traction, ceux destinés à l'éclairage, à la propulsion des sous-marins, ont également un vaste domaine d'utilisation ; aussi l'accumulateur au plomb a-t-il été l'objet de nombreux perfectionnements dans ces dernières années, aussi bien dans la construction mécanique proprement dite (rigidité des plaques, isolement et prévention des courts-circuits intérieurs, diminution du poids total) que dans les propriétés électriques.

Actuellement, de gros accumulateurs peuvent supporter sept cents

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

décharges complètes sans que leurs plaques négatives aient perdu leurs propriétés et, en ce qui concerne le poids total, on est arrivé aux chiffres moyens suivants :

Batteries de démarrage et éclairage.

Tension : 6 volts.

Capacité. Ampères-heure.	*Poids de la batterie. Kilogrammes.*
40	15
60	20
80	25
100	30
Tension : 12 volts.	
40	26
60	35
80	45
190	58

* * *

Est-il possible de faire mieux en s'adressant à d'autres métaux que le plomb et d'autres électrolytes que l'acide sulfurique ?

Nous ne passerons pas en revue les nombreux essais qui ont été faits, sans grand succès pratique d'ailleurs (accumulateurs au zinc, remplacement du plomb de la cathode par le cadmium ou le cuivre, accumulateurs à gaz, accumulateurs aux halogènes, remplacement de l'acide sulfurique par des électrolytes alcalins, etc.).

Le seul accumulateur qui soit à l'heure actuelle en exploitation commerciale est l'accumulateur fer-nickel, proposé par Edison en 1901.

Nous en dirons seulement quelques mots, car sa théorie est encore très obscure et on n'est pas encore absolument certain de la composition même de la matière active.

Cet accumulateur est fondé sur la réversibilité du couple :

$$\text{Oxyde de nickel} - \text{Potasse} - \text{Fer.}$$

D'après Jugner, la formule de la réaction globale serait :

$$NiO^2 + 2\,Fe\,(OH)^2 + H^2O \rightarrow NiO + 2\,Fe\,(OH)^3.$$

tandis que Jumau admet :

$$Fe + KOH + Ni^2O^3 \rightleftarrows FeO + KOH + 2\,NiO.$$

L'allure de la décharge et de la charge est représentée schématiquement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

figure 219. On voit qu'elle est analogue à celle de l'accumulateur au plomb.

Les avantages que présentent ces accumulateurs résident dans leur robustesse et l'absence de sulfatation. L'électrolyte ne participant pas à la réaction, on peut en réduire le volume, et, par suite, le poids de l'accumulateur, comparé à l'accumulateur au plomb et rapporté à l'unité de capacité, est beaucoup plus réduit. Mais l'écart ne subsiste plus en sa faveur si on rapporte le poids à l'unité d'énergie. Il ne faut pas oublier, en effet, dans cette comparaison, que la tension aux bornes d'un élément au fer-nickel n'est que de 1,6 volt au début de la charge, au lieu de 2,2 volts pour les accumulateurs au plomb.

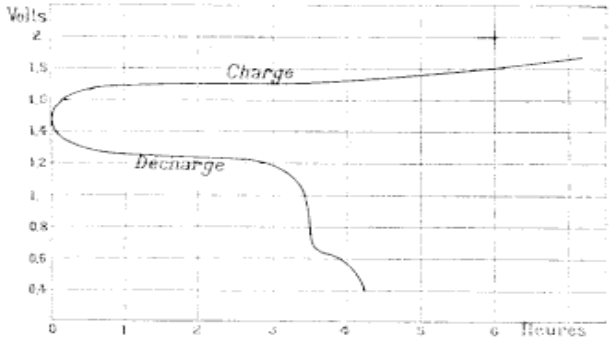


Fig. 219. — Courbes de charge et décharge de l'élément alcalin nickel-fer.

Mais, d'autre part, l'accumulateur alcalin ne date que de 1901, et l'on sait qu'il a fallu de nombreuses années pour amener l'élément au plomb à son état actuel de perfectionnement.

GROUPEMENT DES PILES ET ACCUMULATEURS

Piles ou accumulateurs ne donnent qu'une force électromotrice très petite, de l'ordre de 2 volts, et nous avons vu qu'on ne peut leur demander, même sous ce faible voltage, un débit considérable, sous peine de les polariser, de les épuiser ou de les détériorer. Mais, dans la pratique, on ne peut accepter de se soumettre à ces restrictions. Sauf dans des cas très particuliers (petites lampes de poche, par exemple), on emploie plusieurs générateurs simultanément, et ceci nous amène à dire quelques mots des différentes façons dont on peut les grouper suivant le but à atteindre.

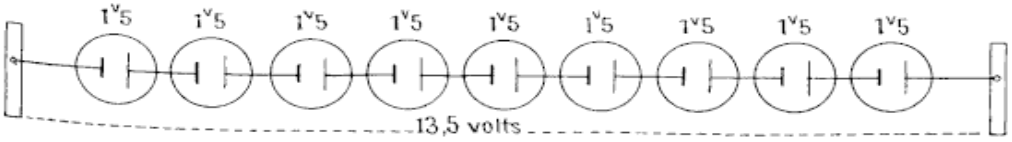


Fig. 220. — Montage en série.

Le premier mode d'association est le couplage en ***tension*** ou en ***série***. Les éléments sont reliés les uns aux autres par leurs pôles de nom contraire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 220). Dans ces conditions, les forces électromotrices s'ajoutent, ainsi que les résistances. C'est-à-dire que tout se passe comme si on avait une pile unique dont la force électromotrice serait nE et la résistance nr, n étant le nombre des piles ainsi groupées.

Remarquons que le courant « maximum » que l'on peut obtenir d'une telle association en court-circuitant l'ensemble est seulement égal au courant débité par un élément seul.

Si la résistance du circuit extérieur est R, l'intensité du courant qui y circule est :

$$I = \frac{nE}{nr + R}.$$

Ce mode de groupement est particulièrement indiqué lorsque le circuit extérieur présente une grande résistance. En effet, on peut négliger dans ces conditions le terme nr devant le terme R, et le courant peut alors s'exprimer par :

$$I = \frac{nE}{R},$$

il est sensiblement proportionnel au nombre d'éléments associés.

Un second mode de groupement est le groupement en ***parallèle*** ou en ***quantité***, dans lequel on réunit toutes les piles de même nom. Pour réaliser pratiquement ce montage, on peut employer deux barres de cuivre

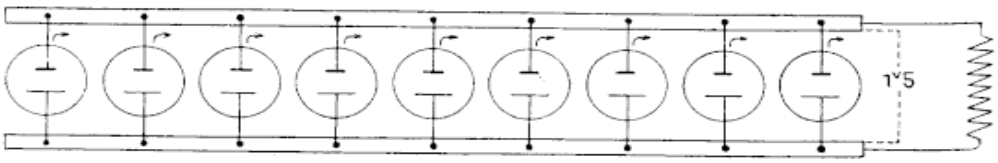


Fig. 221. — Montage en parallèle.

portant des vis de prise de courant ; sur l'une on fixera les fils provenant des pôles positifs et sur l'autre les fils provenant des pôles négatifs (fig. 221).

Il est facile de voir que la force électromotrice reste la même que celle d'un élément E, mais que la résistance intérieure est égale à celle d'un élément divisée par le nombre d'éléments associés : $\frac{n}{r}$. Le courant « maximum » que l'on peut obtenir a pour expression :

$$i = \frac{E}{\frac{r}{n}}.$$

c'est-à-dire qu'il est n fois plus grand que celui fourni par un seul élément.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si R est la résistance du circuit extérieur, on a, pour valeur de l'intensité qui y circule :

$$I = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}.$$

Ce mode de couplage convient spécialement au cas où le conducteur extérieur a une résistance très petite par rapport à celle d'un des éléments.

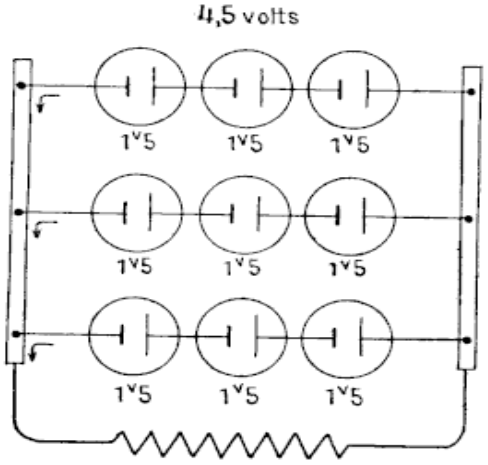


Fig. 222. — Montage mixte.

En résumé, avec le montage en série, on peut obtenir des forces électromotrices aussi grandes que l'on veut, mais un débit limité ; avec le couplage en parallèle, on peut fournir des courants de plus en plus intenses, mais de force électromotrice faible. En combinant ces deux modes de couplage, on a le ***groupement mixte*** qui permet de réaliser toutes les combinaisons que l'on désire (fig. 222). Il est facile de montrer que si, on forme n séries de m éléments et qu'on couple les n séries en parallèle, l'ensemble se comporte comme un élément unique dont la force électromotrice est mE et la résistance intérieure $\frac{mr}{n}$. L'intensité qui passe dans le circuit extérieur de résistance R est :

$$I = \frac{mE}{\frac{mr}{n} + R} = \frac{E}{\frac{r}{n} + \frac{R}{m}}.$$

Pour que I soit maximum, il faut que le dénominateur soit minimum. On remarque que le produit de ses deux termes est constant, puisqu'il est égal à $\frac{Rr}{mn}$, mn étant le nombre total des éléments. Il s'ensuit, d'après un théorème de mathématiques, que la somme sera minime lorsque les deux termes seront égaux. Il faudra donc que :

$$\frac{r}{R} = \frac{n}{m}.$$

Si cette relation est satisfaite, $\frac{mr}{n} = R$, et la résistance de l'ensemble est alors égale à celle du circuit extérieur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Nous ne dirons rien de plus sur le groupement des éléments, car le seul qui soit à recommander est le couplage en *série*. Il faut absolument éviter le couplage en parallèle et le couplage mixte, nous allons dire pourquoi.

Prenons un exemple concret : supposons que l'on associe en parallèle une pile Leclanché et un accumulateur ; nous réunissons leurs pôles de même nom, mais les forces électromotrices étant différentes (2 volts et 1,5 volt), l'accumulateur débitera dans l'élément Leclanché, et cela en pure perte (fig. 223).

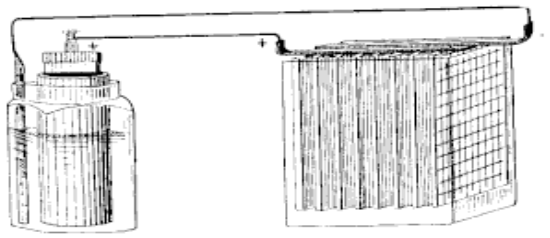


Fig. 223. — Association en parallèle d'un accumulateur et d'une pile Leclanché.

Sans prendre un cas aussi frappant, on peut dire que jamais deux générateurs n'ont exactement la même force électromotrice (variation de concentration de l'électrolyte dans un accumulateur, pureté plus ou moins grande des produits chimiques des piles, polarisation plus ou moins marquée des divers éléments). Or si on a, par exemple, quarante éléments d'accumulateurs groupés en deux séries de vingt éléments montées en parallèle, si on admet une différence d'un centième de volt seulement par élément d'une des séries (dont l'acide, par exemple, a été récemment renouvelé), on a 0,20 volt d'excès de force électromotrice de cette série sur l'autre, ce qui est plus que suffisant pour qu'elle débite dans cette dernière lorsqu'on les accouple en parallèle.

Si l'on veut avoir de grands débits, il faudra prendre de grands éléments capables de les fournir, plutôt que de monter des éléments plus petits en parallèle ; on sera sûr de faire une économie notable en fin de compte.

* * *

Une discrimination très nette doit être faite entre la ***force électromotrice*** des piles et la ***différence de potentiel aux bornes***. Nous avons vu que si E est la force électromotrice de la pile mesurée en circuit ouvert, l'intensité circulant dans un circuit extérieur de résistance R est :

$$I = \frac{E}{r + R},$$

d'où :

$$E = Ir + IR.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais, la résistance R étant parcourue par un courant I, la *différence de potentiel* aux bornes de la pile est, d'après la loi d'Ohm :

$$V = IR$$

c'est-à-dire que :

$$E = Ir + V$$

ou encore :

$$I = \frac{E - V}{r}.$$

Nous pouvons chercher dans quelles conditions le rendement de la pile sera maximum, ce rendement étant défini par le rapport entre l'énergie récupérée dans le circuit VI et l'énergie fournie par la pile EI; il est donc égal à $\frac{V}{E}$, ou encore à :

$$\frac{E - Ir}{E} = 1 - \frac{r}{E} I.$$

Ce rendement augmente à mesure que l'intensité du courant décroît. Cela signifie que l'on utilise une fraction d'autant plus grande de l'énergie chimique mise en jeu dans la pile que l'intensité du courant est plus faible.

Dans certains cas, on a intérêt à sacrifier le rendement et à faire rendre à la pile la puissance maxima dans le circuit extérieur. Cherchons à quelle condition ce résultat est atteint. La puissance utile P est égale à VI, ou :

$$P = \frac{V(E - V)}{r}.$$

Or le dénominateur de cette expression est constant, tandis que le numérateur est le produit de deux termes (V et E — V) dont la somme est constante (égale à E). Par suite, leur produit sera maximum quand ces deux termes seront égaux, c'est-à-dire que :

$$V = E - V$$

ou :

$$V = \frac{E}{2}.$$

Cette condition nécessite, comme on peut le voir très facilement, que :

$$r = R.$$

Donc pour que la pile travaille dans les conditions de puissance maximum, il suffit que la résistance extérieure soit égale à la résistance inté-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rieure. A ce moment, le rendement est égal à 50 p. 100, c'est-à-dire qu'il y a la moitié seulement de l'énergie disponible.

Pratiquement, on aurait intérêt à travailler à un meilleur rendement, mais alors la puissance serait quelquefois insuffisante, et il faut faire un compromis.

Il est facile de montrer par un calcul élémentaire que, quel que soit le mode de couplage utilisé, le travail maximum, rapporté à chaque élément, est toujours le même.

* * *

Il est difficile, surtout actuellement, de donner des ***prix de revient de l'énergie*** électrique produite soit par les accumulateurs, soit par les piles. Mais il est certain que ces derniers générateurs sont beaucoup plus coûteux que les accumulateurs. La pile est un générateur de luxe, dont l'emploi doit être limité aux applications où la question de prix de revient est insignifiante et où l'on n'a besoin que de faibles quantités d'énergie. Au contraire, les accumulateurs ont de multiples applications industrielles (batteries tampons, en particulier).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVII

MACHINES GÉNÉRATRICES D'ÉLECTRICITÉ

Anneau tournant de Delezenne. — Dynamo à courant continu. — Principe. — Inducteurs. — Formes diverses. — Excitation. — Auto-excitation. — Excitation en série. — Excitation en dérivation. — Excitation compound. — Caractéristiques des divers modes d'excitation. — Induit. — Enroulement en anneau, enroulement en tambour. — Représentation des schémas d'enroulement. — Enroulement imbriqué. — Enroulement ondulé. — Le collecteur et les balais. — Calage des balais. — La commutation. — Pôles auxiliaires de commutation. — Enroulements compensateurs. — Couplage des dynamos. — Réalisation pratique. — Inducteur : culasse, noyau polaire, pièces polaires. — Induit : denté, à encoches, enroulements. — Collecteur. — Balais, caractéristiques et emplois : densité de courant, chute de tension au contact. — Alternateurs. — Généralités. — Alternateurs multipolaires. — Enroulement des alternateurs. — Alternateurs à inducteurs tournants. — Enroulement : ondulé, imbriqué. — Alternateurs polyphasés. — Enroulement en tambour. — Fréquence du courant alternatif. — Disposition des inducteurs. — Groupement en triangle et en étoile. — Réaction d'induit. — Caractéristiques des alternateurs : caractéristique à circuit ouvert ; caractéristique externe. — Puissance des alternateurs. — Couplage des alternateurs. — Indicateur de phase. — Fréquencemètres. — Construction des alternateurs. — Stator. — Rotor. — Alternateurs de différentes puissances. — Montage. — Bobinage. — Ventilation des alternateurs.

La production du courant électrique par les piles ou les accumulateurs est extrêmement coûteuse et conduirait, lorsque l'on envisage les emplois industriels, à des installations si volumineuses et si incommodes qu'elles seraient pratiquement inutilisables. Au contraire, les phénomènes d'induction fournissent une solution élégante du problème et que l'on peut dire illimitée, puisque actuellement des machines génératrices en service développent des puissances de 45 000 kilowatts.

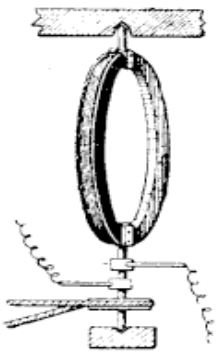


Fig. 224.

L'***anneau tournant de Delezenne*** peut être considéré comme la première machine génératrice d'électricité industrielle. On sait en quoi il consiste : un cadre circulaire était monté sur un axe de rotation vertical (fig. 224). Les extrémités de la bobine enroulée sur ce cadre étaient réunies à deux bagues métalliques sur lesquelles s'appuyaient deux frotteurs eux-mêmes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

reliés au circuit extérieur. En faisant tourner le cadre dans le champ magnétique terrestre, on constate qu'il se produit aux bornes une force électromotrice alternative E, dont la valeur est donnée à chaque instant par :

$$E = \omega n S H \sin \omega t,$$

S étant la surface du cadre, n le nombre de tours de fil (nS, par conséquent, la surface totale du circuit électrique tournant), ω la vitesse angulaire et H l'intensité du champ magnétique.

Naturellement, la force électromotrice E est très faible dans l'expérience que nous venons de rappeler et, pour obtenir des courants utilisables industriellement, les ingénieurs ont été conduits à intensifier les facteurs dont elle dépend. La formule nous montre immédiatement que le résultat peut être atteint en agissant simultanément sur les trois facteurs suivants :

1° Augmentation de la vitesse de rotation ω (elle atteint couramment 1 500 à 3 000 tours par minute).

2° Augmentation de la surface à travers laquelle le flux varie (nS), et, pour cela, emploi de bobines de surface et de nombre de tours de fil convenables.

3° Augmentation du champ H par l'emploi d'électro-aimants puissants remplaçant le champ magnétique terrestre et de masses métalliques concentrant les lignes de force.

Ces transformations compliquent le phénomène, car les conditions simples réalisées dans l'expérience théorique n'existent plus, et nous en dirons quelques mots plus loin. Quoi qu'il en soit, on voit donc que le courant alternatif est celui qui se présente comme le plus simple à produire et cependant, fait assez curieux, son emploi ne s'est développé pratiquement que longtemps après celui du courant continu.

DYNAMOS PRODUISANT DU COURANT CONTINU

Voyons comment, en modifiant les dispositifs de la génératrice à courant alternatif, on a pu arriver à produire du courant continu.

A cet effet, reprenons la machine théorique à courant alternatif (fig. 225, à gauche). Aux deux extrémités du cadre ABCD rectangulaire tournant entre les pôles N et S d'un aimant (ou d'un électro-aimant), des balais H et G recueillent sur les bagues E et F le courant sinusoïdal dont le graphique inférieur donne la variation de la force électromotrice en fonction de la position de rotation du cadre (la position initiale correspondant au cadre horizontal). Supposons maintenant que les deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

extrémités du cadre soient réunies à une seule bague, mais divisée en deux moitiés E et F, comme l'indique la figure de droite; il est facile de voir que les deux frotteurs H et G recueilleront alors un courant dont la force électromotrice variera comme l'indique le graphique de la figure. Bien que constant en direction, le courant n'est pas constant en valeur dans le circuit extérieur, et la force électromotrice oscille dans ce circuit.

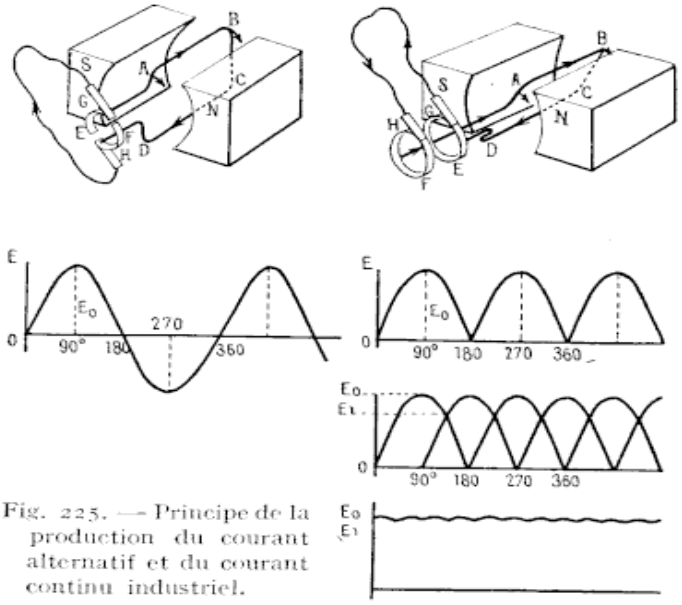


Fig. 225. — Principe de la production du courant alternatif et du courant continu industriel.

Disposons alors deux cadres rectangulaires l'un par rapport à l'autre; dans ces conditions, le collecteur est divisé en quatre segments égaux. Chacun des cadres donne une force électromotrice analogue à la précédente, mais décalée de 90°, et la force électromotrice recueillie par les balais H et G oscillera alors entre les valeurs E_0 et E_1. Nous aurons donc diminué l'amplitude de sa variation. Si, au lieu de deux cadres, nous en considérons un plus grand nombre, il est facile de voir que l'amplitude de variation $E_0 - E_1$ diminue de plus en plus et, finalement, l'ondulation de la force électromotrice sera suffisamment faible pour qu'on la considère comme nulle pratiquement. On aura alors ce que l'on appelle du *courant continu*.

Nous allons, suivant l'usage généralement admis, commencer par l'étude des générateurs de courant continu. Nous parlerons ensuite des alternateurs.

* * *

Tout ***générateur d'électricité*** comporte comme organes essentiels :

Un *inducteur* ayant pour fonction de produit un champ magnétique puissant ;

Un *induit* muni d'un collecteur placé dans le champ produit par l'inducteur et dans lequel se développent des courants d'induction ;

Des *balais* reliant la dynamo au circuit d'utilisation.

Passons-les successivement en revue.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les ***inducteurs***, sauf pour les générateurs de très faible puissance, sont des électro-aimants dont les pôles ont une forme concentrique à l'induit. Ils sont constitués par trois parties principales : les *noyaux* en fer doux sur lesquels on enroule les bobines d'aimantation ; la *culasse* en fonte qui les réunit, et les *pièces polaires* entre lesquelles tourne l'induit.

Dans les modèles primitifs (Edison, fig. 226 ; Gramme, fig. 227), dont la forme rappelle celle de l'électro-aimant classique, les bobines étaient trop exposées aux chocs, aux intempéries. Les machines étaient très volumi-

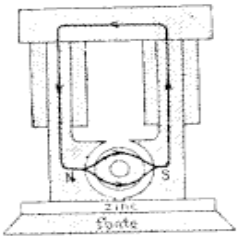


Fig. 226. — Type inférieur (Edison).

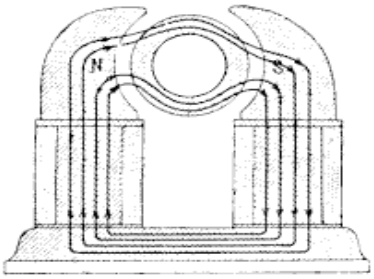


Fig. 227. — Type supérieur (Gramme).

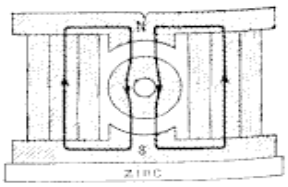


Fig. 228. — Type symétrique (Manchester).

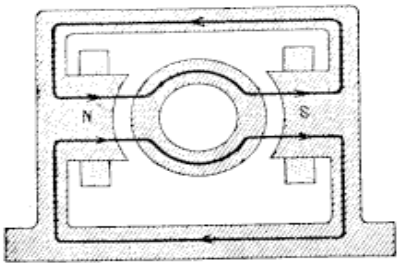


Fig. 229. — Inducteur cuirassé rectangulaire.

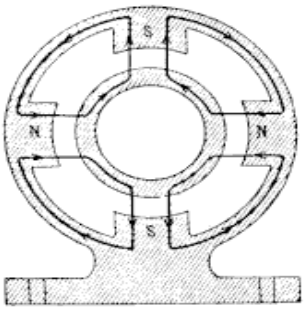


Fig. 230. — Inducteur cuirassé circulaire.

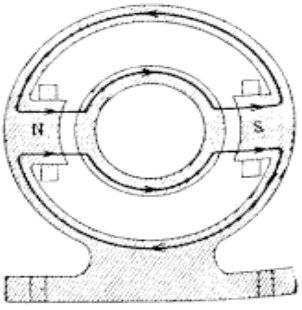


Fig. 231. — Inducteur à 4 pôles.

Diverses formes d'inducteurs.

neuses et, de plus, les pertes de flux étaient considérables. Aussi a-t-on complètement abandonné ces dispositifs dans les machines modernes. Le type symétrique dit Manchester (fig. 228) donne un flux symétrique bien utilisé ; on lui reproche cependant un encombrement trop grand.

Les machines modernes sont du type *cuirassé*, dont la figure 229 donne les caractéristiques générales. Les électro-aimants sont *intérieurs* et très rapprochés de la périphérie de l'induit, ce qui évite la dispersion des lignes de force. La carcasse de la dynamo en fonte ferme l'intérieur et met les organes à l'abri de tout accident mécanique. On remarque de plus que les deux moitiés de la carcasse sont magnétiquement montées en parallèle. Une des complications de construction tient justement à cette concentration du système électrique à l'intérieur d'une enveloppe fermée. La température

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tend à s'y élever par suite du dégagement de chaleur par effet Joule, aussi bien dans les bobines d'excitation que dans le bobinage de l'induit, et il faut soit limiter l'intensité des courants dans la machine, soit la munir, lorsque les puissances deviennent notables, de dispositifs de ventilation.

Les dynamos dont nous venons de parler sont dites *bipolaires*, car le circuit inducteur possède deux pôles. Il est cependant possible, et même nécessaire, pour les puissances assez fortes, de donner à l'inducteur un plus grand nombre de pôles. Les bobines excitatrices doivent être montées de façon que le courant qui y circule y ait le sens convenable, afin que les pièces polaires présentent successivement un pôle nord, un pôle sud, un pôle nord, un pôle sud (fig. 230 et 231).

On construit des dynamos à six, huit pôles et même plus, d'après le même principe. Les dynamos bipolaires sont de moins en moins courantes, même pour les faibles puissances, car les machines multipolaires permettent de réduire la vitesse angulaire et facilitent la commutation.

* * *

Pour produire le champ magnétique, il faut que les enroulements des électro-aimants soient parcourus par un courant continu. Autrement dit, il faut que les électro-aimants soient excités. Cette ***excitation*** peut être obtenue de plusieurs manières.

Dans certaines dynamos, le courant d'excitation est fourni par une source indépendante, dynamo ou batterie d'accumulateurs. On dit que la dynamo est à ***excitation indépendante*** (fig. 232).

Le plus souvent, on utilise l'***auto-excitation***, c'est-à-dire que les électro-aimants sont alimentés par le courant que produit la dynamo elle-même. L'auto-excitation s'explique par l'existence du magnétisme rémanent dans les électro-aimants. Supposons, en effet, que le fil des inducteurs soit relié aux balais et que l'induit soit mis en rotation par le moteur mécanique avec lequel il est accouplé. Le faible champ dû au magnétisme rémanent donne un courant induit peu intense qui, passant, en totalité ou en partie, dans les inducteurs, leur communique une aimantation plus forte. Il en résulte une augmentation du courant induit et, le même phénomène se reproduisant, la machine *s'amorce* peu à peu et arrive à son régime normal.

Le mode de couplage du circuit inducteur et du circuit induit d'une dynamo auto-excitatrice peut être réalisé de trois façons différentes : série, dérivation et compound ou composée. Nous allons les passer en revue.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans l'***excitation en série***, les bobines inductrices sont parcourues par le courant total de la machine (fig. 233). Elles sont donc constituées par un

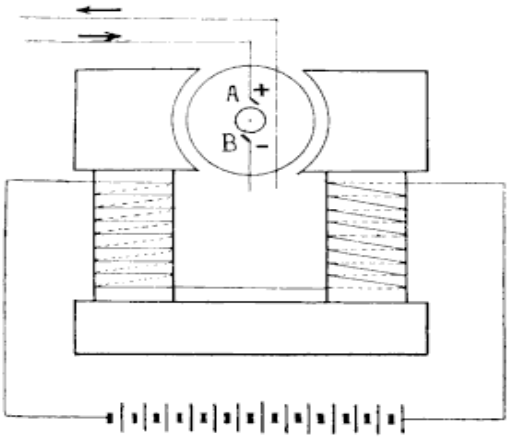


Fig. 232. — Excitation indépendante.

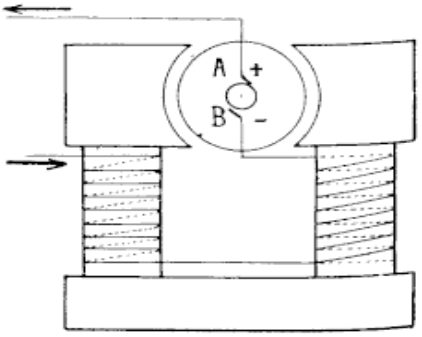
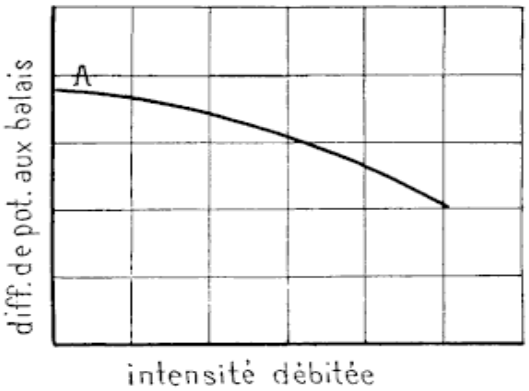
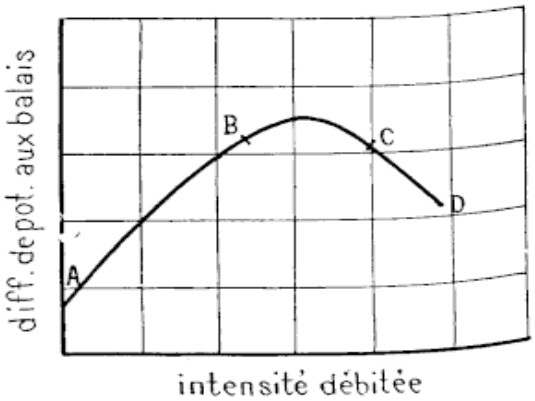


Fig. 233. — Excitation en série.





fil de grand section, afin d'éviter un échauffement anormal et pour que la puissance absorbée par l'excitation soit faible.

L'***excitation en dérivation*** ou ***shunt*** est réalisée en reliant aux deux balais deux circuits : l'un, à fil fin, sert à l'alimentation des noyaux de l'inducteur ; l'autre est le fil de ligne (fig. 234).

Enfin, les dynamos à ***excitation compound*** comportent deux circuits d'alimentation des bobines : l'un, à fil gros et court, en série avec le circuit d'utilisation ; l'autre, à fil fin et long, est mis en dérivation soit aux bornes des balais, c'est ce que l'on appelle alors la *courte dérivation*, soit à l'extrémité d'un des balais et à l'extrémité de l'excitation série, c'est la *longue dérivation*, beaucoup moins employée (fig. 235).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Quelles sont les caractéristiques de ces divers modes d'excitation ? En particulier, lorsque l'on fait tourner la dynamo à une certaine vitesse

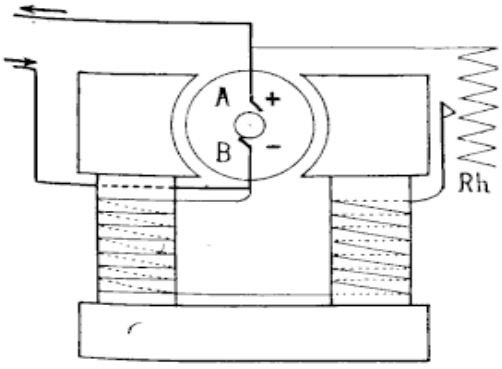


Fig. 234. — Excitation en dérivation ou shunt.

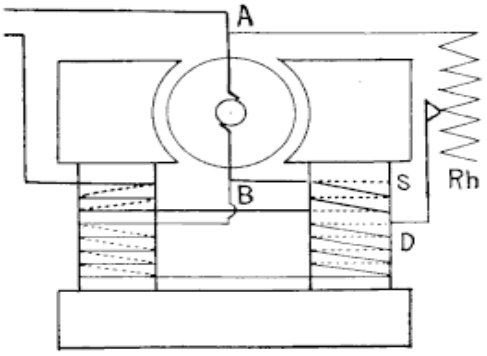
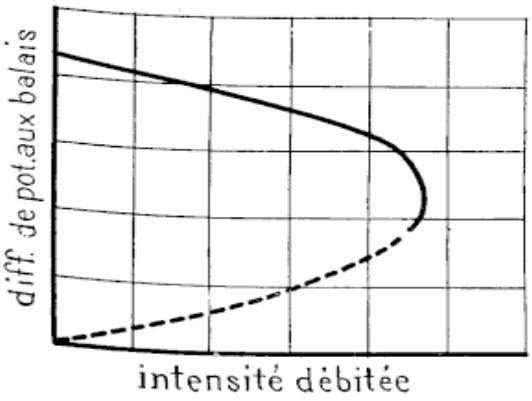
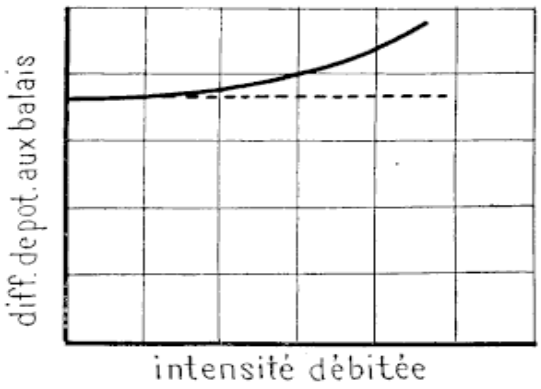


Fig. 235. — Excitation compound.





constante, comment le courant s'établit-il, c'est-à-dire comment la dynamo « s'amorce-t-elle » et comment se comporte-t-elle lorsque l'intensité qu'on lui fait débiter dans le circuit d'utilisation augmente progressivement ?

Pour répondre à ces questions, il suffit de tracer ce que l'on appelle la ***caractéristique externe*** de la machine qui donne la *tension* aux *bornes* relevée sur la génératrice en fonction des courants fournis au réseau extérieur (1).

(1) On appelle cette courbe caractéristique externe ou en charge par opposition à la caractéristique interne ou à vide qui donne la valeur de la *force électromotrice* en fonction de l'intensité du courant d'excitation. Cette courbe a la même allure pour toutes les dynamos et est analogue à la courbe d'aimantation d'un circuit magnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour l'excitation indépendante, le voltage part de la valeur de la force électromotrice et décroît au fur et à mesure que l'intensité débitée augmente (fig. 232).

Il est évident que ***la dynamo série ne peut pas s'amorcer en circuit ouvert***, car alors il ne passe aucun courant dans les inducteurs. Tout se passe comme si une résistance infinie était insérée entre ses bornes. Si on diminue progressivement cette résistance, il arrivera que, pour une certaine valeur, appelée *résistance critique*, la machine s'amorcera et donnera sa force électromotrice de régime. Si on diminue encore la résistance, le courant continue à sortir dans le circuit, puis, à partir d'une certaine valeur, la capacité de débit possible du circuit dépasse la puissance de production de la génératrice, et, bien que l'intensité du courant continue à croître, le voltage aux bornes diminue.

La caractéristique externe a l'allure représentée figure 233 pour chaque vitesse de la machine: une partie rapidement ascendante AB, partant du point A, correspondant à la petite force électromotrice due au magnétisme rémanent ; une région BC où le voltage varie peu quand l'intensité varie notablement ; enfin, une partie plongeante CD. Dans quelle région convient-il de faire travailler la machine ?

La région ascendante AB doit être exclue, parce qu'elle correspond à un fonctionnement instable. En effet, quand l'intensité *diminue* dans le circuit extérieur, c'est-à-dire quand on supprime un appareil d'utilisation, le voltage *diminue* également, et la machine tend à se désamorcer.

La région BC doit également être exclue, bien qu'*a priori* elle corresponde à un fonctionnement particulièrement intéressant, puisque la différence de potentiel aux bornes est sensiblement constante et indépendante du débit. On aurait alors ce que l'on pourrait appeler une machine autorégulatrice à potentiel constant. Malheureusement, cette région est trop peu étendue pour être utilisable et, d'autre part, les machines à excitation en dérivation donnent beaucoup plus sûrement le même résultat. C'est donc dans la partie CD que l'on utilisera la caractéristique des dynamos en série. C'est en effet dans cette région que la stabilité est la plus grande : si l'intensité tend à augmenter, la différence de potentiel aux bornes diminue, ce qui limite rapidement cette augmentation.

Pour régler la marche de la dynamo, on se sert d'un *rhéostat de champ* en dérivation sur le circuit des inducteurs et qui agit alors sur l'excitation. D'après ce que nous venons de dire, la dynamo série, de construction d'ailleurs très simple, présente de graves inconvénients : elle ne s'amorce pas en circuit ouvert ; elle se désamorce pour une trop grande résistance ; lorsqu'un court-circuit se produit à ses bornes, l'induit peut être brûlé. Aussi est-elle peu utilisée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La ***dynamo dérivation*** ou ***shunt***, au contraire, ***s'amorce en circuit ouvert***, puisque tout le courant dû au magnétisme rémanent passe dans les inducteurs. Inversement, si les balais sont réunis par un circuit extérieur de faible résistance, la machine ne s'amorce pas, car la fraction du courant qui passe dans les inducteurs est alors très faible. C'est dire qu'en cas de court-circuit, la machine se désamorce automatiquement.

La caractéristique externe a l'allure représentée sur la figure 234. On voit que le voltage aux bornes est maximum quand la machine ne débite pas (circuit ouvert). Au fur et à mesure que l'intensité augmente dans le circuit extérieur, le voltage baisse. Après une certaine intensité correspondant au point de rebroussement de la courbe, si on diminue encore la résistance extérieure, l'intensité diminue aussi et la machine se désamorce.

Pour maintenir constant le voltage aux bornes de la machine, on agit sur un ***rhéostat de champ*** monté en série sur le circuit d'excitation. Quand le débit extérieur augmente, le voltage tend à diminuer et on le rétablit à sa valeur normale en intensifiant le courant d'excitation par diminution de la résistance variable.

Remarquons que, dans l'excitation shunt, la self des bobines inductrices est considérable, de sorte que, si l'on coupait brusquement le courant d'excitation, des étincelles dangereuses pour la machine se produiraient. Aussi le rhéostat de champ n'a pas de plot mort.

On voit que la machine dérivation possède de précieuses qualités : amorçage à vide, désamorçage s'il se produit un court-circuit qui alors n'est plus fatal à la dynamo. Par contre, la nécessité d'une surveillance constante pour le réglage de l'excitation est un inconvénient assez grave, surtout dans les petites installations.

Enfin, l'***excitation compound*** participe des deux systèmes précédents et est surtout employée pour obtenir un voltage constant aux bornes. Par suite de l'enroulement shunt qu'elle comporte, elle démarre à vide et, au cours du fonctionnement, les enroulements série et shunt compensent les actions de sens opposé qu'entraîne une variation de débit extérieur.

La caractéristique externe d'une dynamo compound parfaite devrait être une droite parallèle aux abscisses. Mais la compensation n'est réalisée pratiquement que pour un seul régime de débit, le débit maximum. On ne peut, en effet, dans la construction de la machine, prévoir des dispositifs faisant varier suivant les régimes le rapport des enroulements série aux enroulements dérivation, ce qui serait nécessaire pour assurer la compensation parfaite (fig. 235).

Ces machines sont utilisées dans les petites installations, car elles ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nécessitent pas de surveillance, de réglage, et surtout dans la traction électrique, car les variations brusques de courant qui se produisent aux arrêts et aux démarrages des trains seraient difficilement suivies par un surveillant d'une machine en dérivation. (Nous ne parlons pas évidemment ici des dispositifs de réglage automatiques.)

On peut également réaliser très facilement une ***dynamo hypercompound*** destinée à maintenir constante la différence de potentiel non plus aux bornes de la machine, mais à une distance plus ou moins grande de celle-ci, ce qui est en particulier désirable dans le cas des réseaux de traction. Il suffit alors d'amplifier dans un rapport convenable le nombre d'ampères-tours série, afin de donner à l'excitation série une légère prédominance sur l'excitation shunt. La tension aux bornes croîtra ainsi de quelques volts lorsqu'on passera de la marche à vide à la marche en charge.

C'est ainsi que les dynamos hypercompound de traction Thomson-Houston donnent fréquemment 500 volts à vide et 550 volts en charge.

* * *

L'***induit*** est le second élément essentiel d'une dynamo. C'est le circuit qui, par suite de la variation du flux magnétique qui le traverse, sera le siège de la force électromotrice d'induction. Celle-ci, recueillie par les balais sur le collecteur, donnera aux bornes de la machine la force électromotrice qui alimentera le circuit extérieur.

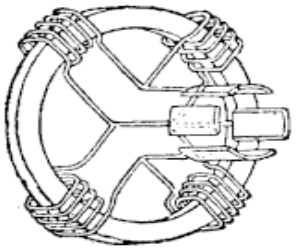


Fig. 236. — Enroulement en anneaux.

D'après l'étude théorique que nous avons faite de la dynamo au début de ce chapitre, il semble naturel de constituer l'induit par des séries de cadres enroulés sur un cylindre métallique afin de concentrer les lignes de force magnétiques qui les traversent.

Ce n'est cependant pas ainsi que furent construites les premières dynamos. Les machines primitives de Paccinotti et Gramme comportaient des ***enroulements en anneaux*** (fig. 236), tandis qu'actuellement on ne construit plus que des machines à ***enroulement en tambour*** (fig. 237).

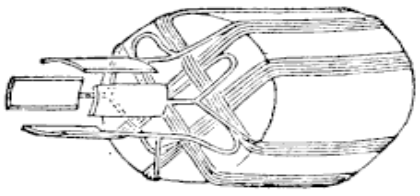


Fig. 237. — Enroulement en tambour.

En effet, on fait à l'enroulement en anneaux les graves reproches suivants : la partie inactive des conduc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs est plus grande que dans les enroulements en tambour ; à l'intérieur de l'induit, il passe un flux de force qui coupe les conducteurs intérieurs de l'anneau et y crée une force électromotrice qui est de signe opposé à la force électromotrice utile ; la commutation est plus délicate que pour les enroulements en tambour ; enfin, l'enroulement ne peut être fait qu'à la main, tandis que l'enroulement en tambour permet l'emploi de bobines faites d'avance sur gabarit. Aussi ne dirons-nous rien sur cet enroulement.

C'est Hefner Alteneck qui, en 1872, inventa l'induit en tambour. Nous ne donnerons pas ici une théorie complète des divers enroulements que

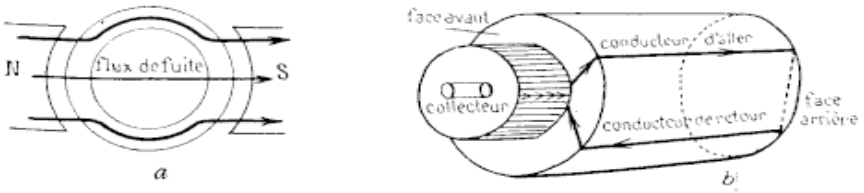


Fig. 238.

l'on peut réaliser ; nous nous contenterons d'indiquer le principe sur lequel ils reposent et leur mode de représentation.

Prenons d'abord le cas simple d'une machine bipolaire. Son induit est constitué par un certain nombre de cadres (ou de bobines) enroulées sur un cylindre métallique, chacune de ces bobines étant reliée à deux lames voisines du collecteur. Si on regarde la machine face à ce collecteur (fig. 238, *a*), on appelle face avant la face où se trouve le collecteur, face arrière la face opposée, conducteurs d'aller ceux que l'on suit pour aller de l'avant à l'arrière, conducteurs de retour ceux que l'on prend pour revenir à l'avant (fig. 238, *b*). On remarquera que le nombre de lames du collecteur doit être au plus égal à la moitié du nombre des conducteurs, puisqu'il faut au moins deux conducteurs pour constituer une spire.

Considérons donc une *machine bipolaire à six cadres ou bobines*. Nous pourrons la représenter comme l'indique la figure 239 : le collecteur comporte six touches, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, et les cadres sont constitués par des fils parallèles aux génératrices du cylindre de l'induit, qui donneront douze traces (numérotées 1 à 12 sur la figure), reliés deux par deux à la face arrière (les connexions sont indiquées en traits ponctués).

Comment ces cadres sont-ils reliés entre eux et reliés au collecteur ? C'est ce qu'indique très nettement la figure. Le côté 1 du premier cadre est relié à la touche *a* du collecteur et on voit que le circuit est constitué par les conducteurs 1, 1 — 6 (face arrière), 6 ; ce conducteur est relié à la touche *b* du collecteur, qui est aussi connectée au conducteur 3 du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

second cadre, relié au conducteur 8 par la face arrière, ce conducteur 8 étant relié à la touche *e* du collecteur, etc.

On peut traduire ce schéma par le tableau suivant. Dans la colonne P se trouvent les numéros des conducteurs reliés sur la face arrière ou postérieure ; dans la colonne A, les numéros des conducteurs reliés sur la face avant ; entre ces deux derniers numéros se trouve la lettre de la lame du collecteur correspondante.

Face arrière. P	*Face avant.* A
1 — 6 3 — 8 5 — 10 7 — 12 9 — 2 11 — 4	6 — *b* — 3 8 — *c* — 5 10 — *d* — 7 12 — *e* — 9 2 — *f* — 11 4 — *a* — 1

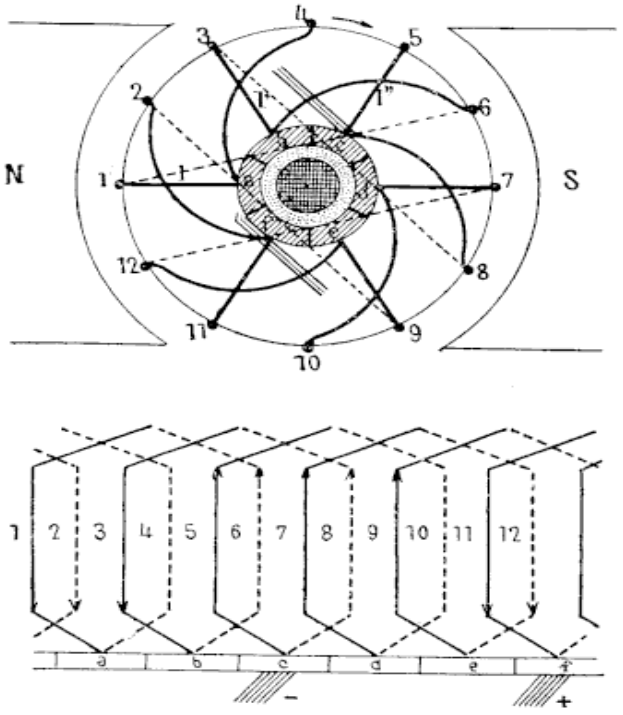


Fig. 239.

On peut également traduire graphiquement ce schéma de la façon suivante. Supposons que l'on coupe le cylindre de l'induit suivant une génératrice et qu'on déroule sa surface sur un plan. On obtiendra douze droites parallèles représentant les douze côtés des cadres. Remarquons d'ailleurs que les droites correspondent alternativement à un conducteur d'aller et un conducteur de retour. Aussi, pour les différencier, trace-t-on en pointillé les conducteurs de retour. La figure 239 donne le schéma du bobinage. Cette représentation est particulièrement commode, comme nous allons le voir, lorsque l'on a des dynamos à pôles multiples.

Prenons un exemple, et considérons une *dynamo à quatre pôles et seize*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conducteurs (fig. 240) formant quatre groupes de deux bobines. On voit facilement que 6 correspond à 2, 4 à 8, etc., et il faudra relier les conducteurs dans l'ordre suivant :

1 — 6 — 3 — 8 — 5 — 10 — 7 — 12 — 9 — 14 — 11 — 16 — 13 — 2 — 15 — 4 — 1.

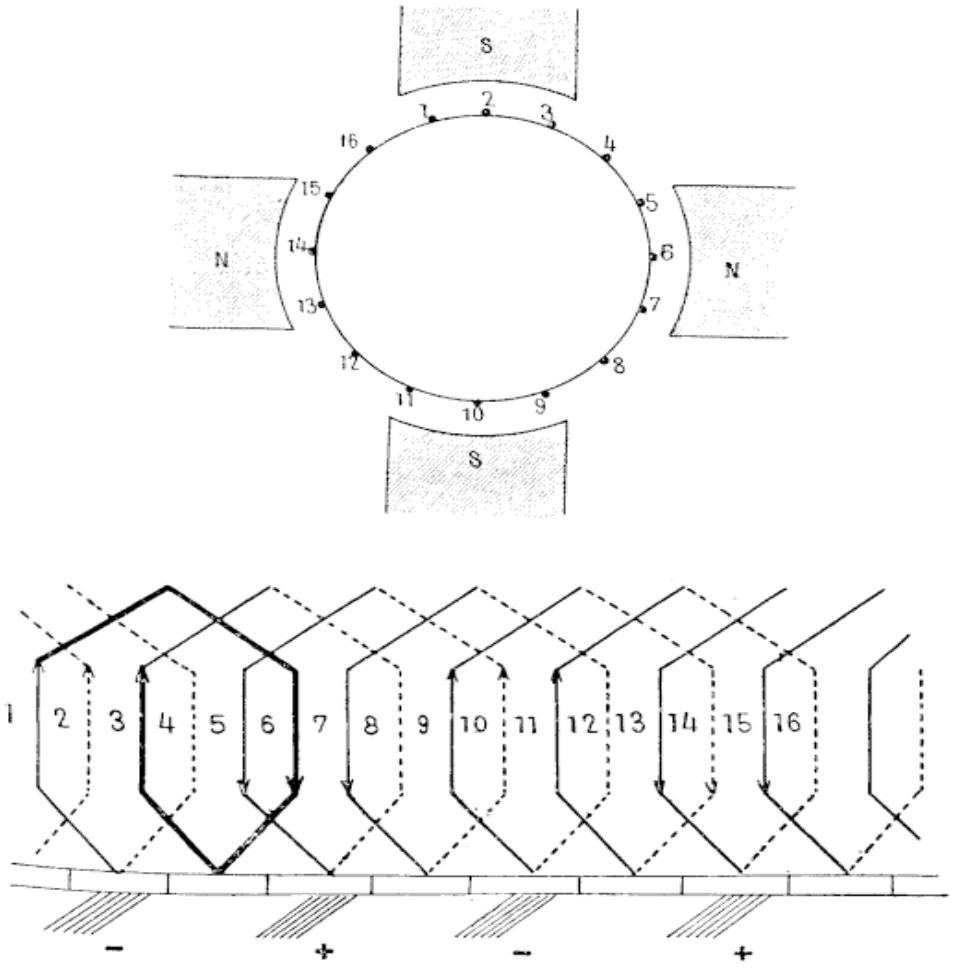


Fig. 240. — Enroulement imbriqué.

La figure 240 donne le schéma de bobinage dans ce cas. On remarquera que l'on revient en arrière pour faire une boucle ; on obtient ainsi l'***enroulement imbriqué, parallèle*** ou ***bouclé***.

Au contraire, du conducteur 6, par exemple, au lieu de revenir en arrière au conducteur 3, on peut aller en avant et prendre sous le pôle nord suivant le conducteur 11 qui est équivalent au conducteur 3. Les connexions doivent alors être établies dans l'ordre :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1 — 6 — 11 — 16 — 5 — 10 — 15 — 4 — 9 — 14 — 3 — 8 — 13 — 2 — 7 — 12 — 1.

La figure 241 montre le schéma de bobinage, et l'***enroulement*** est dit ***en série*** ou ***ondulé***.

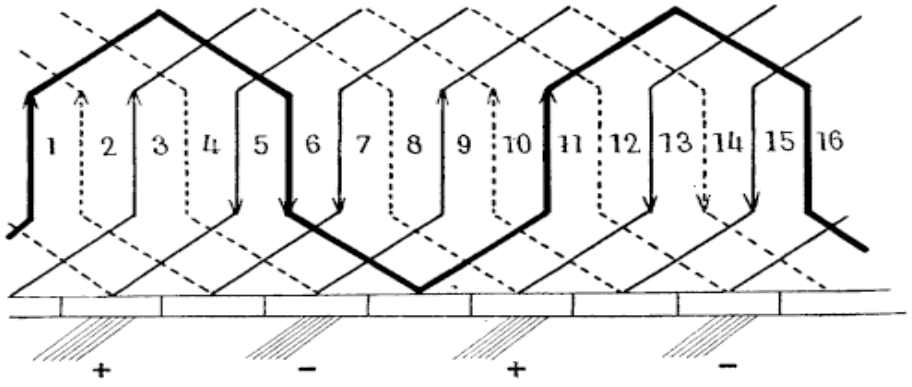


Fig. 241. — Enroulement ondulé.

De nombreux autres bobinages sont aussi réalisés, enroulements Perry, Arnold, série-parallèle, etc. ; leur étude sortirait du cadre de cet ouvrage.

* * *

Le ***collecteur*** et les ***balais*** constituent l'organe de connexion de la machine au circuit extérieur, et les problèmes qui se posent à ce sujet méritent de retenir tout particulièrement notre attention.

En effet, si l'on a disposé les balais suivant la ligne neutre, on constate qu'en circuit ouvert il existe aux bornes une force électromotrice E. Lorsqu'on ferme le circuit, et par suite lorsqu'un courant circule dans l'induit, ce courant donne naissance à un certain nombre de phénomènes accessoires qu'on ne peut négliger.

On constate qu'il se forme des étincelles aux balais. Ces étincelles détériorent les lames du collecteur et les balais ; on les évite en ***décalant les balais*** par rapport à la ligne neutre d'un certain angle dans le sens du mouvement de l'induit. On constate également une diminution de la tension aux bornes, qui a pour causes :

1° Le décalage des balais, qui diminue le nombre de spires ou de bobines de l'enroulement concourant efficacement à la production de la force électromotrice ;

2° Le courant qui traverse l'induit et y occasionne une chute de tension par suite de la résistance ohmique des enroulements ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Le courant circulant dans l'induit, qui y produit également un flux magnétique dont les effets, connus sous le nom de ***réaction d'induit***, affaiblissent le flux inducteur dans l'entrefer.

Examinons un peu plus en détail le mécanisme du fonctionnement de la dynamo et prenons un exemple concret simple : celui d'une dynamo bipolaire à anneau Gramme.

Remarquons tout d'abord que, dans une bobine déterminée de l'induit, le courant doit se renverser deux fois par tour. De plus, lorsque la bobine passe par la position neutre, qui correspond justement au renversement de sens du courant induit, elle se trouve court-circuitée, comme le montre la figure 242 *b*, par le balai B ou B′ qui appuie sur deux lames consécutives du collecteur.

Dans la position qui précède immédiatement le court-circuit (*a*), la bobine est traversée par le courant dans un certain sens ; elle est ensuite court-circuitée (*b*) au moment où elle traverse la zone neutre ; puis le courant circule dans le sens opposé (*c*).

Ce renversement du courant dans la bobine en court-circuit s'accompagne de manifestations électriques dont l'ensemble porte le nom de ***commutation***.

En effet, pendant la durée du court-circuit, les bobines, qui ont une self-induction qui n'est pas négligeable, sont le siège d'une force contre-électromotrice d'induction, appelée ***tension de réactance***, qui s'oppose au renversement du courant. Il en résulte que celui-ci ne peut atteindre son intensité normale avant que la bobine entre dans la seconde portion de l'inducteur et une étincelle jaillit au moment où la lame quitte le balai. Cette étincelle est d'autant plus forte que la force contre-électromotrice est plus grande, c'est-à-dire que la self-induction et la vitesse de rotation sont plus considérables.

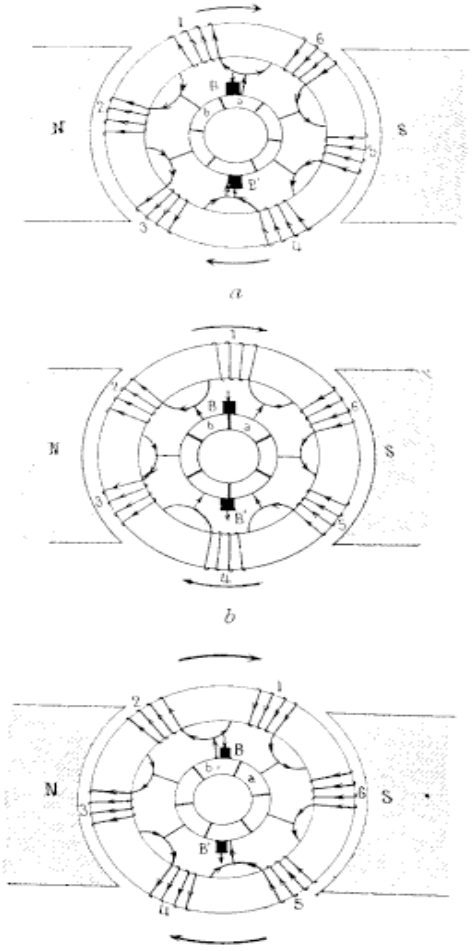


Fig. 242.

On décale alors les balais de façon à ce que la commutation s'effectue non plus dans la zone neutre des inducteurs, mais dans une région où la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bobine est soumise à l'action d'un flux qui y induit une force électromotrice inverse de la force contre-électromotrice de self-induction.

Remarquons que, puisque la force électromotrice de la machine varie suivant l'intensité débitée dans la ligne, le calage des balais est également fonction de ce débit.

Un autre phénomène d'origine magnétique oblige encore à opérer un nouveau décalage des balais en avant. Le courant circulant dans chacune

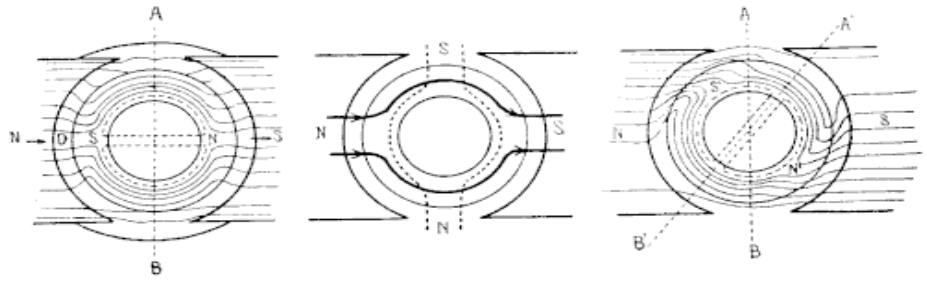


Fig. 243.

des moitiés de l'induit aimante l'armature, qui se comporte alors comme si elle était constituée par deux aimants demi-annulaires ayant leurs pôles de même nom en contact : un pôle nord double en *n* et un pôle sud double en *s*. Les lignes de force de ce champ secondaire, se composant avec celles du champ principal, donnent un champ résultant analogue à celui représenté figure 243, et dont la ligne neutre est décalée d'un certain angle dans le sens du mouvement. Il faut donc faire tourner les balais du même angle.

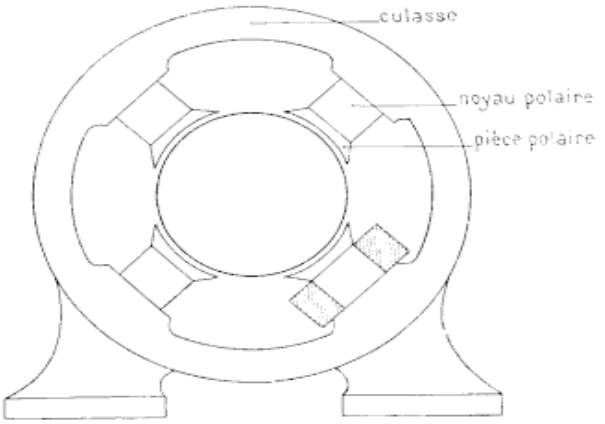


Fig. 244. — Inducteur multipolaire à pôles radiaux.

* * *

Dans la plupart des machines, ***on atténue les effets nuisibles*** que nous venons d'étudier en saturant les masses polaires, en donnant à l'entrefer des dimensions convenables, enfin en donnant aux ampères-tours d'excitation une valeur nettement supérieure (1,5 à 2 fois) à celle des ampères-tours de l'induit.

On emploie également d'autres artifices qui améliorent encore la commu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tation. Nous n'en citerons que deux : les *pôles auxiliaires de commutation* et les *enroulements compensateurs*.

Les ***pôles auxiliaires*** sont disposés entre chaque groupe de deux pôles principaux, c'est-à-dire en regard de la zone neutre de l'induit (fig. 244 et 245). L'enroulement qui porte un pôle est disposé de telle sorte que le nombre de ses ampères-tours crée un nombre de lignes de force convenable pour que, dans la bobine d'induit coupant ces lignes de force, il se produise une force électromotrice d'induction égale et opposée à la tension de réactance, qui se trouve ainsi supprimée. Comme la tension de réactance est fonction du courant dans l'induit, par suite du débit de la machine dans le circuit extérieur, la tension compensatrice créée par le pôle auxiliaire doit être proportionnelle à la charge. On réalise très simplement cette condition en ne donnant à l'enroulement du pôle auxiliaire qu'un très petit nombre de tours de gros fil dans lequel circule le courant principal. C'est dire que les pôles auxiliaires sont montés en série avec l'enroulement de l'induit.

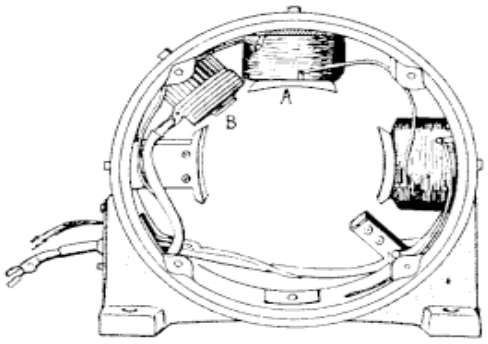


Fig. 245. — Pôles auxiliaires.

Nous avons vu que le courant débité par l'induit produit une force

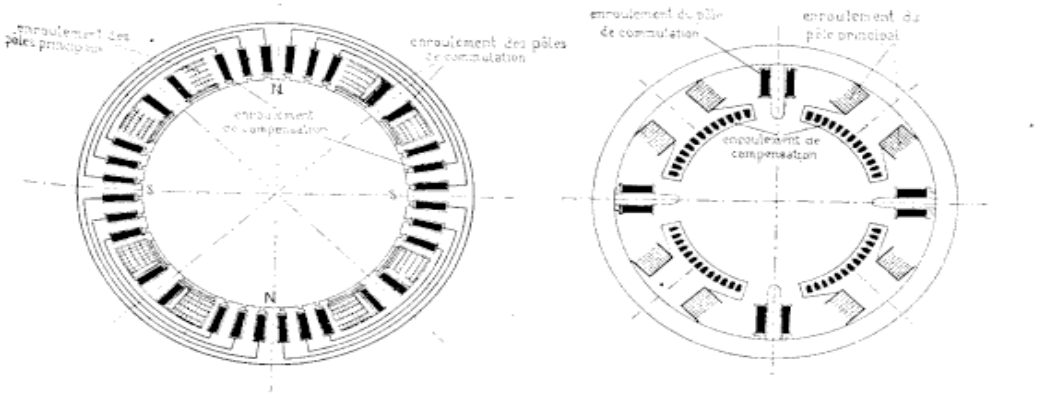


Fig. 246. — Schémas d'enroulements compensateurs.

magnétomotrice appelée réaction d'induit, qui a pour effet de tordre le flux inducteur. Pour combattre cette torsion qui détermine une chute de tension dans l'induit, on emploie des ***enroulements de compensation*** formés en principe de quelques tours de fil fixés après l'inducteur, en série

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec l'induit, et qui produisent à chaque instant une force magnétomotrice égale et opposée à celle de l'induit.

Ces enroulements sont très employés dans les dynamos de grande puissance et les machines à grande vitesse dans lesquelles la réaction d'induit est très forte. On utilise toujours, en même temps que ces enroulements, des pôles de commutation.

Les enroulements compensateurs sont constitués par des bobines logées dans des encoches percées à travers les masses polaires principales. La figure 246 montre le principe des connexions établies.

* * *

Comme les piles et les accumulateurs, ***les dynamos peuvent être couplées*** soit en tension, soit en parallèle ; mais alors les connexions à réaliser diffèrent suivant le mode d'excitation de la génératrice. Nous donnons dans la figure 247 les schémas de montage correspondant aux divers cas qui se présentent dans la pratique.

Pour le groupement en tension, il n'y a aucune remarque à faire, le couplage est intuitif.

Dans le montage en parallèle, les bornes positives de toutes les génératrices sont reliées au conducteur principal positif et les bornes négatives au conducteur négatif, de sorte qu'il faut que toutes les dynamos donnent une *tension identique*, leurs puissances et par conséquent l'intensité qu'elles fournissent pouvant être quelconques.

Dans le couplage en parallèle des dynamos série, il faut prévoir un conducteur (*ab* sur la figure), dit *fil d'équilibre*, qui relie tous les balais positifs et permet de conserver une différence de potentiel identique aux bornes des induits et d'égaliser l'intensité de l'excitation dans les différentes dynamos.

Lorsque les dynamos à coupler en parallèle sont des dynamos dérivation et doivent pouvoir être mises successivement en service, au fur et à mesure de la demande du réseau, les connexions sont un peu plus compliquées. Les bornes négatives sont reliées à l'un des conducteurs du circuit par des interrupteurs. Des rhéostats d'excitation R_1, R_2 sont intercalés sur les circuits inducteurs, ainsi que des interrupteurs C_1, C_2, C_3, C_4 qui permettent de les réunir aux conducteurs aboutissant aux bornes négatives aux points *a*, *b*, *c*, *d*. Les interrupteurs C_2, C_4, grâce auxquels on peut envoyer dans les inducteurs d'une des machines qui n'est pas en service le courant produit par celles qui sont en marche, servent à éviter le renversement des pôles de cette dynamo. Enfin, des résistances variables R_3, R_4 peuvent être insérées sur le circuit des dynamos

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

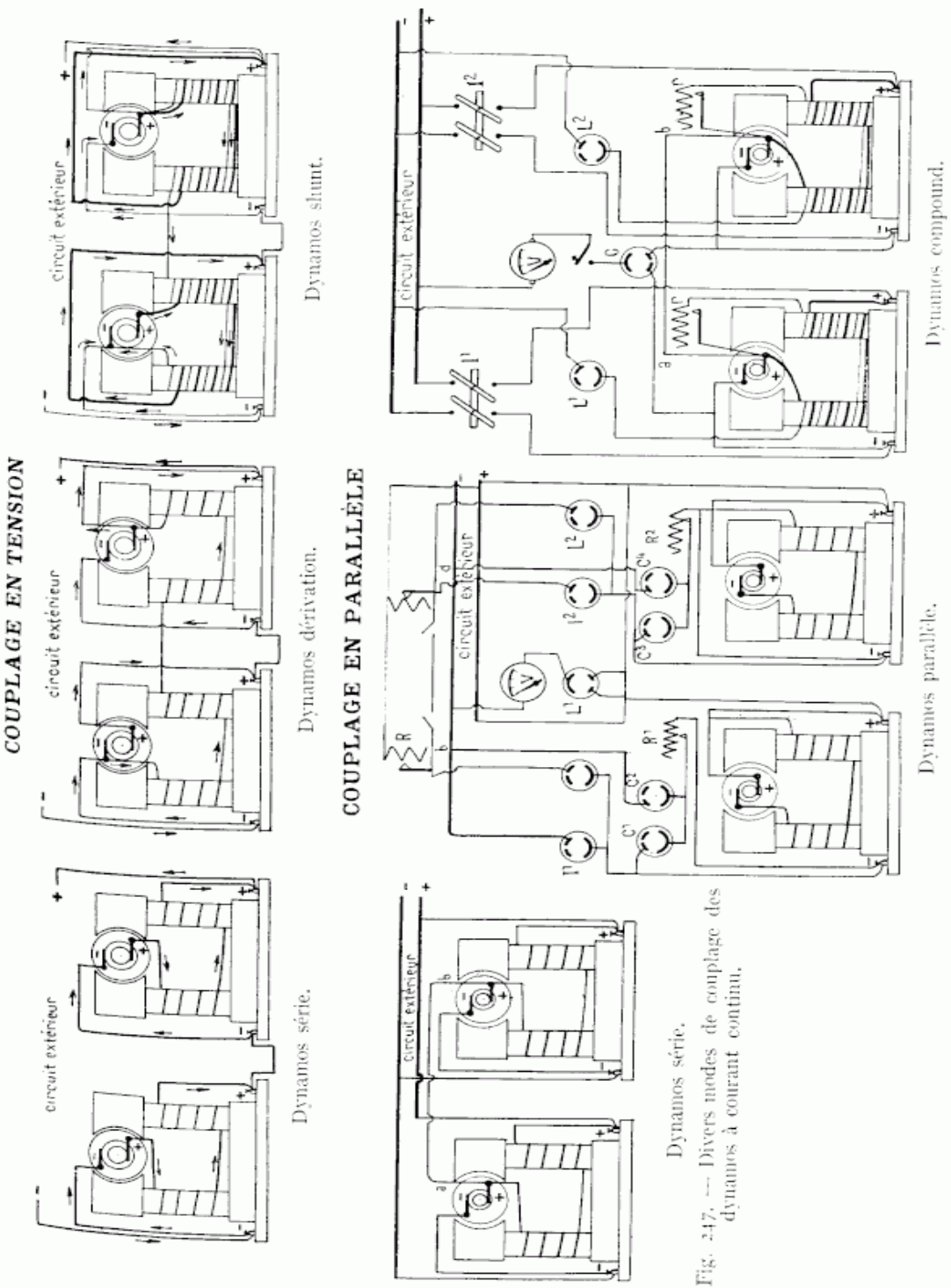


Fig. 247. — Divers modes de couplage des dynamos à courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons que, la première machine étant en fonctionnement, on veuille mettre la dynamo 2 en service. On ouvre les interrupteurs et on fait tourner la dynamo. Quand elle a atteint sa vitesse normale, on ferme C_3, puis L_2, et on intercale les résistances variables R_4 jusqu'à ce que les conditions de charge soient les mêmes que la dynamo déjà en service. On agit ensuite sur le rhéostat d'excitation, on règle la tension d'après les indications du voltmètre V, on ferme I_2 on élimine les résistances R_4 en ouvrant L_2 et finalement on ferme C_4 et on ouvre C_3.

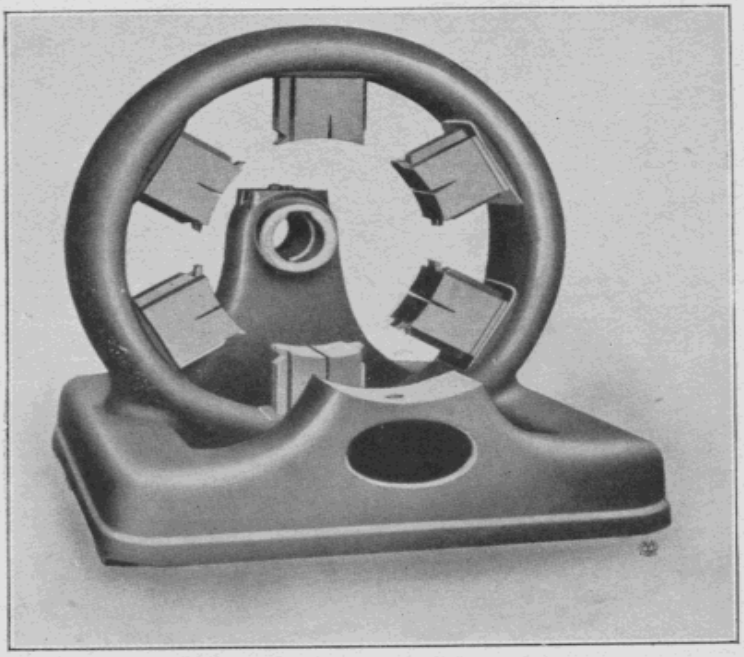


Fig. 248. — Armature en une seule pièce.

Dans le cas des dynamos compound, on réunit les balais positifs par un fil de compensation (*ab*, fig. 247) et la mise en circuit ou le retrait s'effectuent par simple manœuvre d'un interrupteur bipolaire.

Réalisations pratiques.

Après l'étude théorique des génératrices à courant continu, il nous faut donner quelques indications sur leur réalisation pratique et leur construction. Nous allons suivre le même ordre

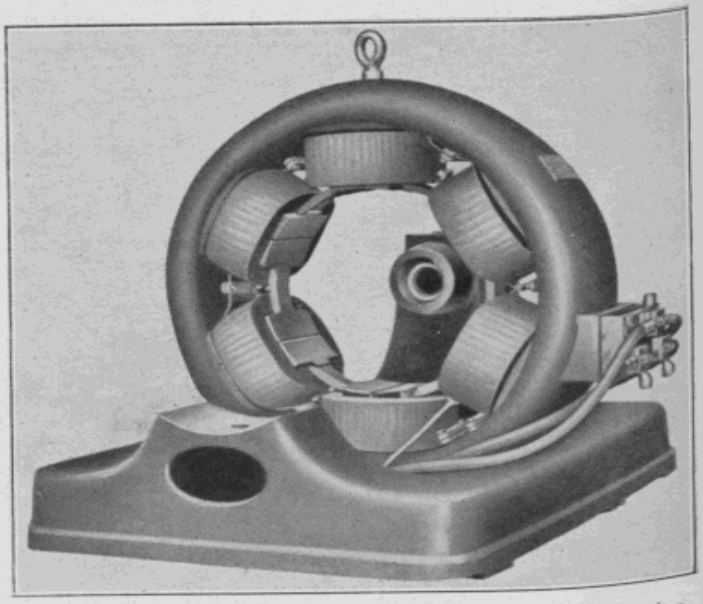


Fig. 249.—Le générateur avec ses bobines de champ placées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que dans l'exposé précédent : inducteur, induit, collecteur et balais.

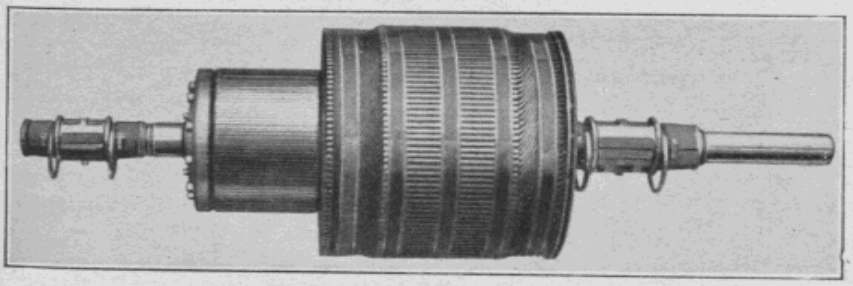


Fig. 250. — Le rotor du générateur.

L'***inducteur*** a très sensiblement la même forme dans les machines des divers constructeurs. On y distingue la *culasse*, les *noyaux polaires* et les *pièces polaires* (fig. 248).

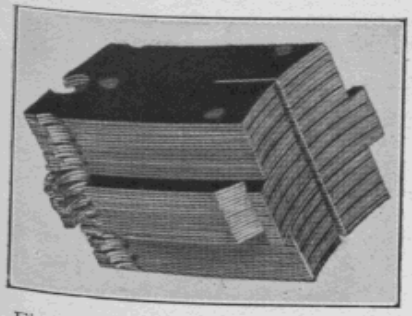


Fig. 251. — Pôle en tôles laminées encastré dans l'armature au momentde la fonte.

La CULASSE est généralement en fonte pour les dynamos shunt et en acier moulé pour les dynamos compound. Ce sont les conditions électriques qui déterminent ce choix : en effet, dans ces dernières, comme la fonte a une grande force coercitive, elle met beaucoup plus de temps que l'acier ou le fer doux pour s'aimanter, et par suite le flux inducteur ne pourrait pas suivre les variations rapides de la force magnétomotrice due à l'enroulement série.

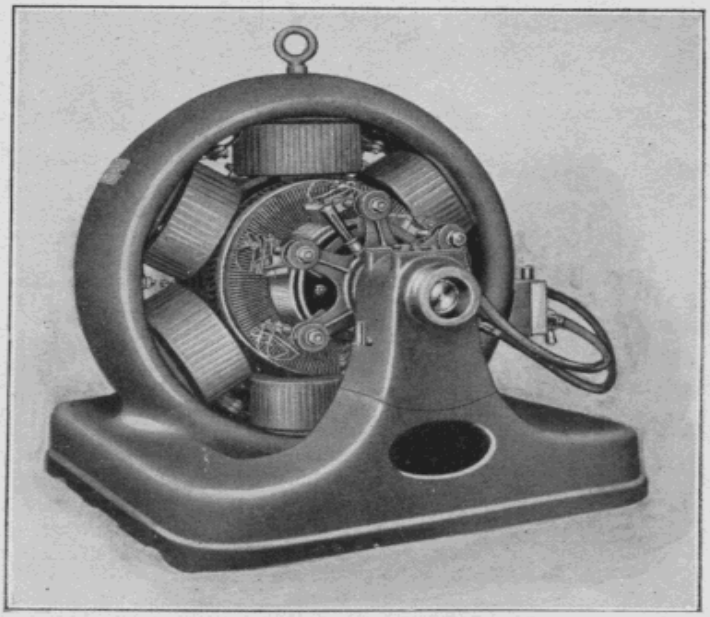


Fig. 252. — Le générateur terminé.

Les NOYAUX POLAIRES sont presque toujours en matières magnétiquement très perméables (acier coulé ou fer fondu, tôle) et on leur donne autant que possible la forme circulaire pour réduire au minimum le cuivre des bobines d'excitation. Malheureusement, lorsque les machines sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puissantes, on doit les constituer par des tôles, afin d'éviter les courants de Foucault trop intenses, et la forme circulaire, difficile à réaliser dans ces conditions, est alors abandonnée ; les noyaux polaires sont dans ce cas de section rectangulaire.

Quant aux PIÈCES POLAIRES, elles sont en général venues de fonte avec les noyaux ou, dans le cas des noyaux feuilletés, elles sont simplement constituées par un élargissement, suivant un profil convenable, des tôles formant le noyau.

La réunion de ces divers éléments est réalisée soit par des boulons, soit par des emmanchements à queue d'aronde, soit en plaçant les pièces polaires dans le moule dans lequel on coule la carcasse.

Les enroulements des bobines sont effectués sur des gabarits et au tour, la régularité de disposition des spires en couches parallèles n'étant pas indispensable. Les enroulements compensateurs peuvent être montés de deux façons différentes. Dans une disposition, l'inducteur, qui est tout entier en tôle, ne porte pas de pôles saillants et est percé de rainures étroites dans lesquelles sont logées des bandes de cuivre isolées formant l'enroulement compensateur. Dans d'autres machines, les pièces polaires sont plus importantes et percées de trous dans lesquels passent les barres de cuivre de l'enroulement compensateur, l'inducteur étant établi d'autre part comme celui d'une dynamo ordinaire.

* * *

L'***induit*** des dynamos est, dans les machines modernes, du type *denté*. Les conducteurs sont logés dans des cavités, des *dents*, ce qui présente de multiples avantages sur les anciens induits lisses ; la fixation des bobines est plus solide, donnant une rigidité mécanique et une puissance d'entraînement considérable ; l'entrefer (distance entre les surfaces en regard de l'induit et de l'inducteur) peut être réduit à quelques millimètres seulement, ce qui diminue la dépense d'énergie pour l'excitation ; enfin, les courants de Foucault sont presque entièrement supprimés dans les conducteurs, que l'on peut alors prendre de diamètre assez gros (fig. 253).

On sait en effet que les diverses parties d'un conducteur de dimensions non négligeables se déplaçant dans un champ non uniforme ne coupent pas au même instant le même nombre de lignes de force (fig. 255) et par suite ce conducteur est le siège de courants de Foucault d'autant plus intenses que ses dimensions sont plus considérables.

On peut distinguer trois catégories d'induits dentés :

1° LES INDUITS A TROUS (fig. 256, 1, 2), dans lesquels les conducteurs sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entièrement protégés contre les courants de Foucault. Ces induits ne sont pas employés dans les machines à courant continu, car le flux produit par le courant circulant dans les conducteurs peut se fermer entièrement dans

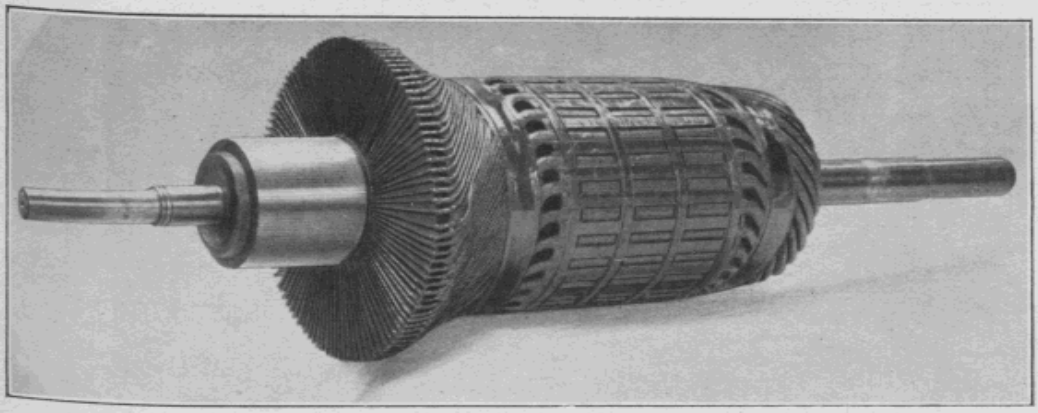


Fig. 253. — Induit à ailettes.

le fer, ce qui augmente la self-induction de l'induit et nuit par conséquent à la commutation, comme nous l'avons vu précédemment.

2° Les INDUITS A DENTS DROITES (fig. 256, 3), seuls employés pour les machines à courant continu, dans lesquels il est très facile de loger les conducteurs, mais l'induction n'y est pas nulle et, si les dents ne sont pas très profondes, on ne peut employer de conducteurs trop massifs, par crainte des courants de Foucault.

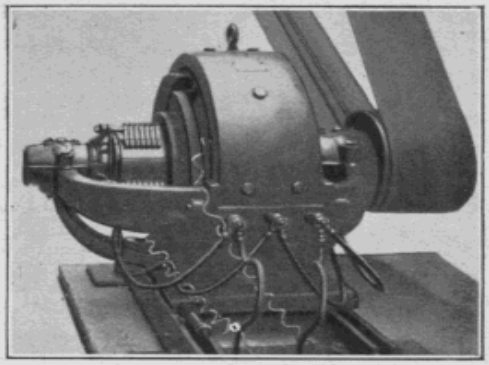


Fig. 254. — Générateur T. H. 70 chevaux.

3° Les INDUITS A ENCOCHES REPERCÉES (fig. 256, 4), qui participent des deux types précédents. Les courants de Foucault y sont faibles, mais la self-induction des conducteurs y est trop forte pour qu'on les utilise dans les machines à courant continu.

Les induits, afin d'éviter leur échauffement sous l'action des courants de Foucault, sont toujours feuilletés, constitués par des tôles découpées au profil convenable, isolées et empilées sur l'arbre et maintenues solidement soit par clavetage direct sur l'arbre, soit par fixation sur un croisillon ou lanterne, lui-même claveté sur l'arbre. Nous ne nous étendrons pas sur les problèmes purement mécaniques que les constructeurs ont eu à résoudre pour assurer la fixation des tôles sur le croisillon, leur serrage et leur entraînement par l'arbre actionné par le moteur mécanique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* *

L'***enroulement*** des conducteurs et leur disposition dans les rainures constituent l'étape suivante de la construction de l'induit. Les conducteurs sont soit des fils de section circulaire, soit des barres de section rectangulaire dans le cas des dynamos de grande puissance.

L'isolement est obtenu en garnissant les parois des encoches de papier,

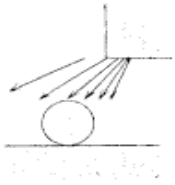


Fig. 255.

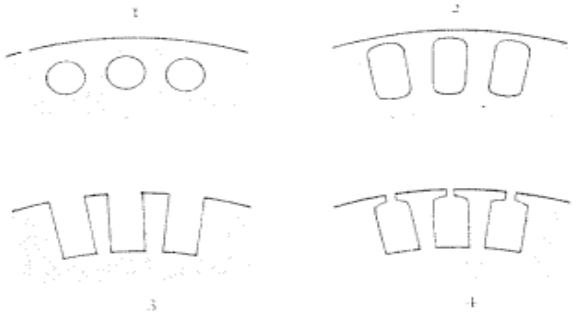


Fig. 256.

de toile huilée ou de vernis, les conducteurs étant simplement entourés d'un ruban de toile et d'une couche de coton.

Le bobinage est fait sur des gabarits et les bobines, une fois terminées, sont placées dans leurs logements respectifs et y sont maintenues soit par des frettes, soit plutôt par des clavettes en fibre ou en bois.

* * *

Le ***collecteur*** est un organe très délicat, et sa construction doit être l'objet de soins particuliers. Il a la forme d'un cylindre dont la surface est constituée par des lames sur lesquelles viennent frotter les balais.

Sous l'influence de ce frottement, les lames s'usent lentement ; on les construit en cuivre rouge, à cause de la grande homogénéité que l'on peut donner à ce métal, ce qui assure une usure régulière de toutes les lames. Leur épaisseur ne doit pas tomber en dessous de $3^{mm},5$ à 4 millimètres, sans quoi on pourrait craindre les déformations mécaniques, ni supérieure à 15 à 20 millimètres, car les courants de Foucault qui s'y produiraient seraient trop intenses. Enfin, il est bon de ne pas dépasser un débit de 300 ampères environ par lame. Quand la machine est plus puissante, on augmente le nombre des pôles ou en emploie un enroulement en parallèle multiple.

Les lames du collecteur doivent être isolées avec soin les unes des autres ; le mica et parfois la micanite sont seuls employés ; l'épaisseur des lamelles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

isolantes varie de $0^{mm},5$ (dynamos ordinaires à 220 volts) à 1 millimètre (dynamos à haute tension, 2 000 volts).

Pour monter le collecteur, on assemble les lames métalliques, dont la section est trapézoïdale, en les séparant par les lamelles isolantes, puis on les fixe définitivement par serrage, par exemple en enfonçant à la presse un fort collier d'acier dans le cas des petits collecteurs, ou à l'aide de colliers à vis en plusieurs pièces. On porte plusieurs fois le collecteur à une température de 200° à 500° et, après chaque chauffe, une fois le collecteur refroidi, on le resserre à bloc. Avec un tel mode de serrage, le collecteur devient absolument indéformable. On tourne alors sa surface extérieure avec soin et on le monte ensuite sur sa *douille* ou *lanterne*, qui est la partie de l'induit (en fonte ou en acier) sur laquelle sont fixées les lames du collecteur. Cette lanterne est en général constituée par deux plateaux dont l'un est claveté sur l'arbre de l'induit et dont l'autre peut être relié au premier, en serrant énergiquement le collecteur, au moyen de boulons et d'écrous.

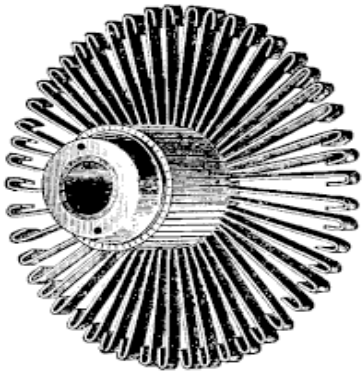


Fig. 257. — Collecteur.

Naturellement, on isole le collecteur de sa lanterne par des couronnes en micanite. Ceci fait, on peut enlever le collier de serrage qui avait servi au montage, et on passe une dernière fois au tour la surface du collecteur.

Les connexions qui relient l'enroulement de l'induit aux lames du collecteur sont soudées ou brasées et rivées à ces lames. La figure 257 représente un collecteur en perspective.

* * *

Le courant est recueilli sur le collecteur par des ***balais***, généralement en charbon, montés dans des supports spéciaux qui assurent une pression suffisante des surfaces de contact et permettent en même temps de régler le calage de l'ensemble.

Les ***porte-balais*** sont de modèles différents avec chaque constructeur et chaque type de machine. Nous en reproduisons divers types dans la figure 258.

Nous allons donner quelques indications sur la fabrication des balais de charbon qui, nous le verrons, sont également utilisés dans les génératrices et moteurs à courant alternatif.

Les premières machines à collecteur étaient munies de balais en toile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métallique, généralement toile de cuivre. L'expérience a montré qu'en général les résultats étaient mauvais, par suite de la formation d'étincelles entre le collecteur et ces balais. Il en résultait une usure très rapide des collecteurs et par conséquent des dépenses importantes pour le changement des collecteurs ainsi que l'immobilisation temporaire des machines en cours de réfection. Une étude théorique et expérimentale de la question a montré que les étincelles se produisent surtout au moment où le balai appuie simultanément sur deux lames voisines du collecteur (phénomène

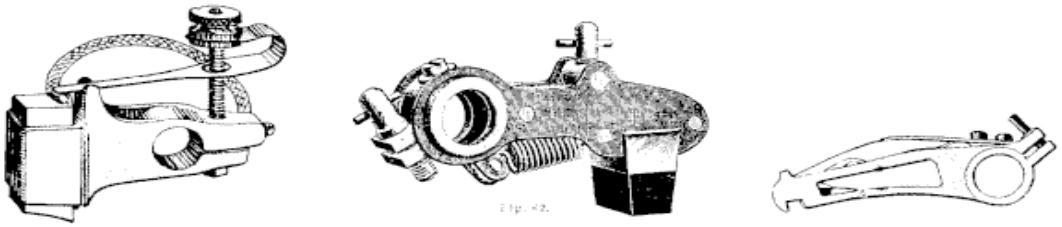


Fig. 258. — Divers types de balais.

de commutation). On a pu remédier à cet inconvénient en utilisant des balais qui présentent une résistance apparente au contact entre balai et collecteur supérieure à une certaine limite. L'emploi de balais en charbon s'est montré particulièrement intéressant à ce point de vue.

Les balais en charbon, fabriqués au début avec des moyens plus ou moins grossiers et des matières premières incomplètement connues et fréquemment variables, se sont montrés dans certains cas un peu abrasifs.

Un nouveau progrès a été accompli lorsque le balai en charbon a été transformé partiellement ou complètement en *graphite* artificiel au moyen de cuisson (graphitation) à température très élevée dans des conditions bien définies de température et de durée.

L'emploi de machines avec des vitesses périphériques de plus en plus élevées a conduit aussi à rendre les *balais auto-lubrifiants*. A cet effet, le carbone amorphe très dur a été remplacé par des variétés onctueuses et molles de graphite naturel de meilleure qualité.

L'emploi du courant alternatif et surtout des moteurs asynchrones a fait étudier de nouvelles qualités de balais pour lesquelles la chute de potentiel au contact entre balai et bague devait être la plus réduite possible. Ainsi ont apparu des conglomérats de graphite naturel et de métaux, en général du cuivre, alliés avec des quantités plus ou moins importantes de plomb, d'étain et de zinc.

Des balais métallisés du même genre sont employés enfin sur des collecteurs de dynamos à bas voltage, par exemple pour les applications électrolytiques et pour les dynamos d'éclairage et démarreurs des automobiles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il résulte de ce qui précède que les balais se classent d'après leur composition suivant les diverses catégories ci-après :

1° Les *balais durs*, constitués en majeure partie par du carbone amorphe. On peut y introduire des quantités plus ou moins importantes de graphite naturel ou artificiel pour abaisser le coefficient de frottement.

2° Les *balais électro-graphitiques*, obtenus par la graphitation artificielle des balais de la catégorie précédente.

3° Les *balais graphitiques tendres*, préparés par agglomération de graphite naturel avec des ingrédients spéciaux. Ces ingrédients peuvent être, suivant les cas, carbonisés à haute température ou bien subsistés sous leur forme originelle, sans aucune cuisson.

4° Les *balais cupro-graphitiques* ou carbo-métalliques, renfermant un taux de métal en général élevé, avec des quantités plus ou moins importantes de graphite naturel et même de carbone amorphe.

Les principales qualités exigées d'un bon balai sont d'abord l'absence d'inconvénients pour le bon fonctionnement de la machine. Il en résulte que, pour une machine donnée, on doit mettre le balai qui résiste le mieux aux étincelles en produisant le minimum d'usure du collecteur et le minimum d'échauffement.

On peut avoir *a priori* une idée des qualités d'un balai en déterminant comment varie la chute de tension au contact entre balai et collecteur quand varie la densité de courant du balai. Cette détermination doit d'ailleurs être entreprise sous des pressions variées et à des températures différentes. On se rend compte également des limites admissibles pour la vitesse périphérique du collecteur en déterminant les variations du coefficient de frottement en fonction de la vitesse périphérique du collecteur sous une série de pressions et de températures déterminées.

Dans le cas de moteurs soumis à des chocs ou à des trépidations très importantes (par exemple moteurs de ponts roulants, d'automobiles et surtout de tramways et de locomotives électriques), aux qualités ci-dessus s'ajoute la nécessité d'avoir des balais extrêmement solides.

La vérification de cette qualité se fait en soumettant les blocs fabriqués à des épreuves de rupture statiques et dynamiques absolument semblables à celles utilisées pour le contrôle des métaux.

Une dernière qualité exigée en général des balais est leur durée, car de deux balais donnant les mêmes résultats au point de vue commutation et de solidité mécanique égale, le meilleur est celui qui s'use le moins.

Entre la surface du collecteur et le balai existe une différence de potentiel que l'on peut mesurer. Dans les mêmes conditions de fonctionnement, cette différence de potentiel est plus grande pour le balai négatif (le courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

passe du balai au collecteur) que pour le balai positif (le courant passe du collecteur au balai).

La somme de ces deux différences de potentiel est ce que nous appelons la chute de tension au contact.

Cette caractéristique varie dans de grandes proportions avec la composition et le procédé de fabrication du balai ; elle est aussi sous la dépendance de certaines conditions de fonctionnement (telles que densité de courant, pression d'utilisation, état du collecteur, etc.).

Dans les conditions normales de fonctionnement, une chute de tension au contact :

très grande correspond à une perte supérieure à 2,2 volts ;
grande — — de 1,8 à 2,2 volts ;
moyenne — — de 1,6 à 1,8 volt ;
faible — — de 1,2 à 1,6 volt ;
très faible — — inférieure à 1,2 volt.

Il pourrait sembler plus intéressant d'utiliser des balais à chute de tension très réduite pour diminuer les pertes de la machine et l'échauffement du collecteur. En pratique, il est nécessaire de conserver à la chute de tension une valeur suffisante si l'on veut assurer une bonne commutation à la machine.

Les balais à chute de tension élevée conviennent donc aux machines dont la commutation est difficile (machines d'ancienne construction, machines à tension élevée sans pôles de commutation) ; les balais à chute de tension moyenne, aux machines normales de puissance limitée, dont la commutation est bonne.

Sur les machines modernes, où des pôles supplémentaires assurent à toutes les charges une commutation parfaite, on utilise des balais admettant des densités de courant élevées et présentant une faible chute de tension au contact.

Pour des machines à courant continu basse tension et surtout pour les bagues de moteurs asynchrones et de commutatrices, la chute de tension doit être très faible.

Suivant la qualité du balai, la densité de courant qu'il peut supporter et la pression avec laquelle il appuie sur le collecteur ont des valeurs différentes. Afin de fixer les idées, nous dirons que pour les machines fixes on ne doit pas dépasser les pressions de :

200 grammes par centimètre carré pour les qualités dures.
175 — — pour les qualités moyennes.
150 — — pour les qualités tendres.

Pour les qualités dures destinées aux moteurs de traction et d'engins

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de levage, cette pression peut être fortement augmentée. Néanmoins, dans ces cas, il convient de s'en tenir à la pression minimum trouvée par expérience et pour laquelle la commutation est bonne.

La chute de tension au contact diminue quand la pression du balai augmente. Il faut donc que la pression soit rigoureusement la même pour chacun des balais d'une même machine, afin de répartir uniformément le courant dans les balais.

Il est donc prudent de mesurer la pression sur les balais à l'aide d'un petit dynamomètre.

Quant aux intensités, elles varient de :

5 à 7	ampères par	centimètre carré	pour les qualités dures.
6 à 10	—	—	pour les qualités moyennes.
10 à 15	—	—	pour les qualités tendres.
15 à 30	—	—	pour les qualités carbo-métalliques.

* * *

ALTERNATEURS

Nous avons passé rapidement en revue les machines génératrices de courant continu ; il nous faut maintenant étudier les génératrices de courant alternatif, auxquelles on donne le nom d'*alternateurs* pour les distinguer des *dynamos* produisant le courant continu.

Au début de ce chapitre, nous avons montré comment le courant alternatif se présentait d'une façon presque intuitive lorsque l'on reliait à deux bagues circulaires sur lesquelles frottent les balais, un circuit électrique fermé tournant dans un champ magnétique. *Il suffit donc, pour obtenir un courant alternatif, de remplacer le collecteur à lames d'une machine Gramme par exemple par un collecteur formé de deux bagues reliées à deux spires diamétralement opposées.*

Explicitons ce point avec quelques détails : pour plus de simplicité dans les figures, nous considérerons le cas d'un anneau Gramme tel que celui représenté figure 259 ; il comprend, par exemple, douze bobines A, B... L, et deux points opposés a et b de l'enroulement (supposés sur la ligne neutre dans la figure) sont reliés aux deux bagues du collecteur.

Dans cette position, la force électromotrice est maximum, et les tensions des six bobines de droite s'ajoutent. Quand l'anneau a tourné d'un douzième de tour, les connexions sont venues en a_1 et b_1 ; dans cette position, les cinq bobines occupant maintenant les positions B, C, D, E, F ont leurs forces électromotrices de même sens, mais la bobine qui au début était en F et qui est maintenant en G a passé à gauche de la ligne neutre et sa force

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électromotrice a changé de sens. La différence de potentiel entre les balais sera donc moindre que dans la première position.

Quand l'anneau aura tourné d'un quart de tour, c'est-à-dire quand les connexions seront venues en a_3, b_3, on constate facilement que l'action des trois bobines occupant les positions D, E, F est équilibrée par celle des bobines se trouvant en G, H, I ; la force électromotrice est nulle.

En continuant la rotation, on trouve de même que cette force électromotrice devient négative, passe par un maximum absolu lorsque a est

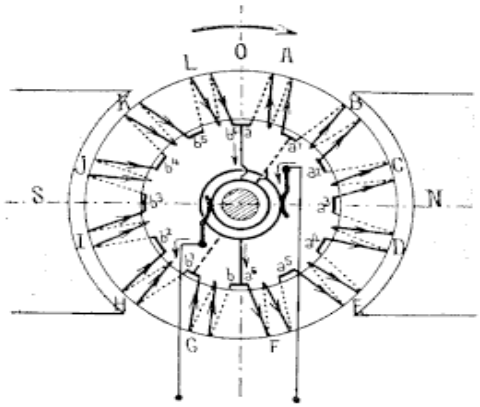


Fig. 259.

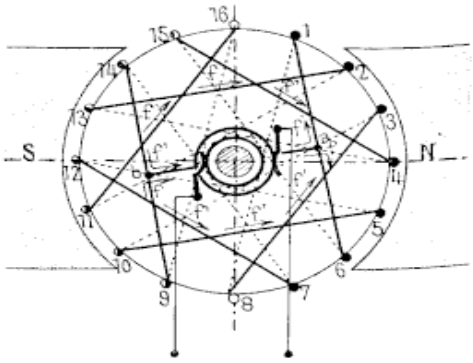


Fig. 260.

venu en a_6 (ou b) et b en b_6 (ou a), puis décroît, s'annule quand a est venue en b_3 (et b en a_3) et finalement croît jusqu'à la valeur initiale après une rotation complète.

Ainsi donc, dans l'alternateur bipolaire simple que nous venons d'envisager, la période n'est complète qu'après un tour entier de l'anneau ; en un mot, la fréquence est égale au nombre de tours n de l'induit par seconde.

Remarquons qu'on arrive au même résultat en raisonnant sur un enroulement en tambour tel que celui de la figure 260. Dans la position représentée qui correspond à celle de la figure 259, la force électromotrice est maximum.

Supposons maintenant que l'on considère une dynamo à quatre pôles. On réunit alors aux deux bagues non plus deux points opposés de l'enroulement, mais quatre points situés aux deux extrémités de deux diamètres rectangulaires. Autrement dit, on peut considérer qu'à l'alternateur simple précédent, on en juxtapose un second à 90° du premier.

Cet alternateur à quatre pôles aura, par exemple, vingt-quatre bobines réparties régulièrement sur la périphérie de l'anneau, A, B... X, Y (fig. 261). Les points opposés a, b, et c, d sont reliées aux deux bagues du collecteur. En raisonnant sur les six bobines A, B, C, D, E, F, on voit que lorsque l'an-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

neau a tourné d'un vingt-quatrième de tour, la bobine F est venue en G, donc sa force électromotrice est opposée à celle des cinq autres ; après deux vingt-quatrièmes de tour, deux bobines sont venues se placer en G et H, diminuant ainsi la force électromotrice ; quand A sera venu dans la position D, c'est-à-dire après trois vingt-quatrièmes ou un huitième de tour, la force électromotrice sera nulle. On verra facilement de même qu'elle sera maxima et de signe opposé après un quart de tour, s'annulera après trois huitièmes de tour, redeviendra maxima de même signe qu'initialement après un demi-tour. C'est dire que la période sera complète en un demi-tour.

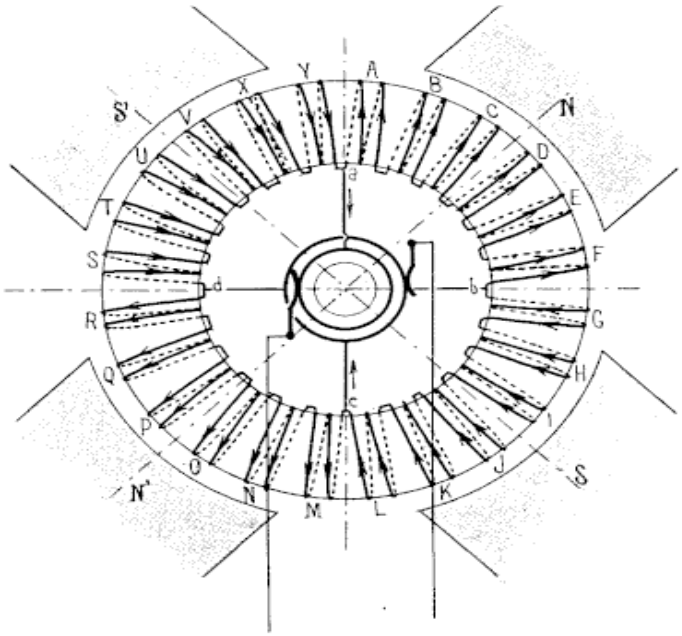


Fig. 261.

Le résultat est général ; si on a 6, 8... $2p$ pôles, le nombre des périodes par tour sera de 3, 4... p, égal à la moitié du nombre des pôles. Si la machine fait n tours par minute, la fréquence du courant sera np.

Remarquons que nous n'avons rien modifié à l'enroulement de l'anneau Gramme ordinaire ; en particulier, la force électromotrice dans chaque spire reste la même (en négligeant la réaction d'induit). Donc, si on conserve le collecteur à lames en même temps que l'on installe les bagues, on pourra même recueillir sur les lames du courant continu. La machine sera donc génératrice à la fois de courant continu et de courant alternatif. Bien plus, si on lance du courant continu dans cette machine, l'induit tournera et donnera du courant alternatif dans le circuit extérieur relié aux bagues. Nous dirons plus loin quelques mots de ces machines, appelées *commutatrices*.

* * *

Dans les alternateurs précédents, les groupes de bobines sont reliés en parallèle ; si on les réunit en tension, on obtient une force électromotrice

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

double dans les induits bipolaires, quadruple dans les induits tétrapolaires, etc.

Il suffit, pour s'en rendre compte, de reprendre le cas simple de l'***alternateur bipolaire*** à douze bobines. On relie à une bague le commencement *a* de la première bobine ; le bout de la dixième bobine F est relié avec le bout finissant de la dernière bobine L, et le bout commençant de la septième bobine G est connecté à la seconde bague (fig. 262).

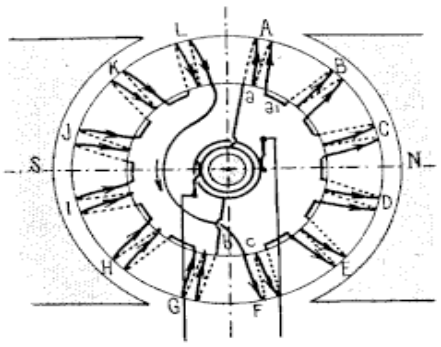


Fig. 262.

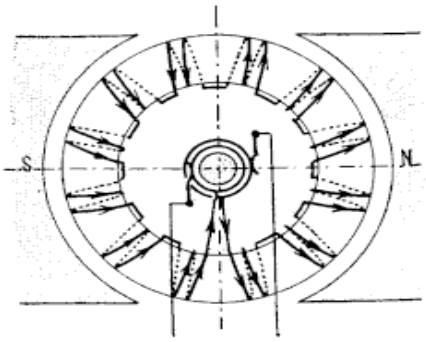


Fig. 263.

Dans les six bobines de droite, la force électromotrice est de même sens, et elle est de signe opposé dans les six bobines de gauche. En reliant ces deux groupes comme nous l'avons dit, les forces électromotrices s'ajoutent.

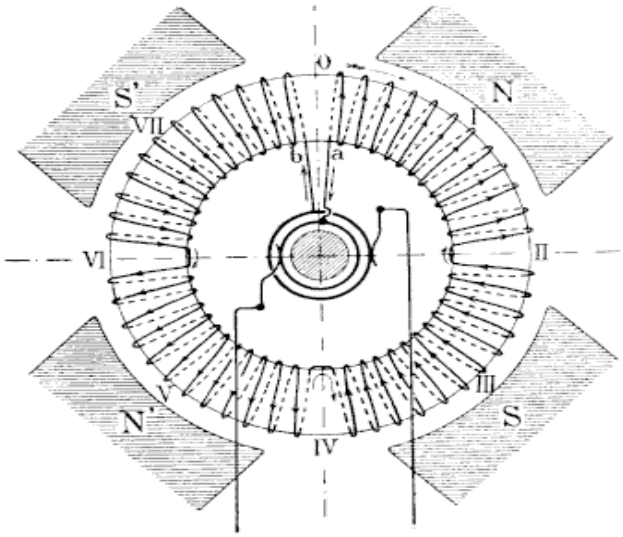


Fig. 264.

Il est facile de voir, en raisonnant comme précédemment, que l'on obtient bien encore un courant alternatif, ayant une période par tour, mais dont la force électromotrice maxima a une valeur double de celle de l'alternateur à bobines en parallèle.

On obtiendrait le même résultat en enroulant les deux moitiés de l'anneau en sens inverse, comme l'indique la figure 263. Dans ces conditions, les forces électromotrices s'ajoutent encore, ainsi que le montre le sens des flèches sur la figure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas d'un alternateur tétrapolaire, les quatre groupes de bobines I, III, V, VII (fig. 264) sont enroulés alternativement dans un sens et dans l'autre. Leurs forces électromotrices s'ajoutent et on obtient finalement une force électromotrice maxima quatre fois plus grande que celle de l'alternateur simple correspondant.

Remarquons à propos de cet enroulement que l'on ne peut plus recueillir de courant continu à l'aide d'un collecteur monté sur la machine. Pour l'excitation des électro-aimants, il faudra donc avoir recours à une source extérieure de courant continu, qui est en général une petite dynamo auxiliaire, dite *excitatrice*, calée sur l'arbre même de l'alternateur.

* * *

L'***enroulement en tambour*** est le plus fréquemment employé pour les alternateurs comme pour les dynamos. On le déduit très simplement

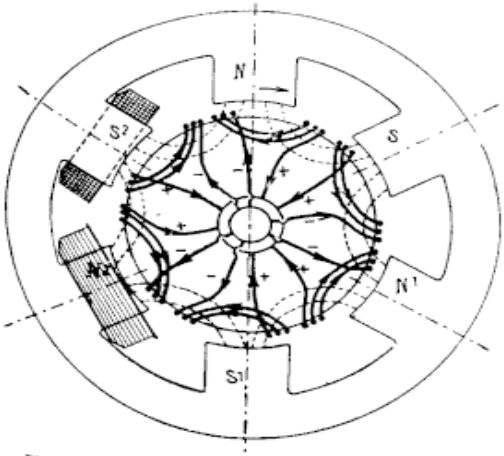


Fig. 265. — Montage en quantité.

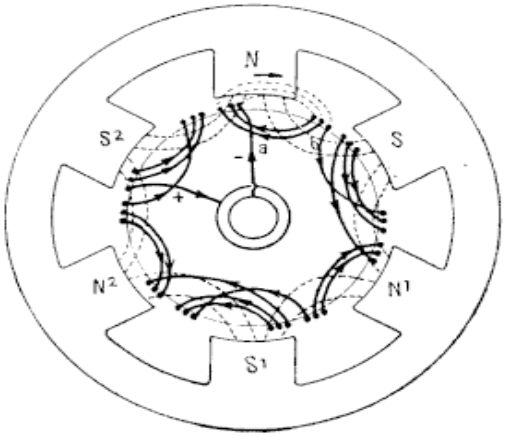


Fig. 266. — Montage en série.

de ce que nous venons de dire. Il comprend autant de bobines montées sur la surface extérieure des cylindres qu'il y a de pôles à la machine. On peut les associer soit en quantité (fig. 265), soit en tension (fig. 266). Dans le premier cas, la force électromotrice de l'alternateur est égale à celle d'une bobine ; dans le second, elle est n fois plus grande, n étant le nombre de bobines. Les figures permettent, en raisonnant comme précédemment, de voir comment varie la force électromotrice. Les flèches indiquent la direction du courant dans la position représentée.

* * *

Alternateurs à inducteurs tournants. — Dans les alternateurs dont nous venons de décrire sommairement le fonctionnement, ce sont les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nducteurs, c'est-à-dire les champs magnétiques, qui sont fixes, et les induits constitués par les bobines qui sont mobiles. Mais il est bien évident que rien ne s'oppose à ce que ce soit l'inverse qui ait lieu, et le résultat final sera le même.

Or, dans les alternateurs de grosse puissance, destinés à l'alimentation des réseaux, il est intéressant de produire le courant à un potentiel aussi élevé que possible, de l'ordre de quelques milliers de volts par exemple. Nous verrons, en effet, que le transport à distance de l'énergie électrique n'est économique et même réalisable pratiquement que lorsque la tension est élevée.

Comme, d'autre part, il est plus facile d'isoler des bobines fixes que des bobines en mouvement, que l'isolant s'y conserve mieux, que les collecteurs et les balais sont difficiles à établir et d'un fonctionnement incertain pour des forces électromotrices considérables, on adopte pour les alternateurs de grande puissance et de forte tension la disposition inverse de celle que nous avons rencontrée jusqu'ici ; l'induit bobiné en tambour est fixe, et c'est l'inducteur alimenté par du courant continu qui tourne.

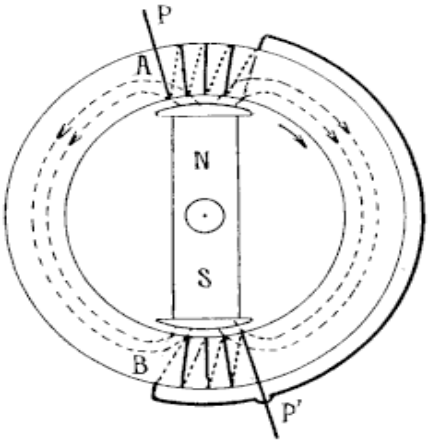


Fig. 267.

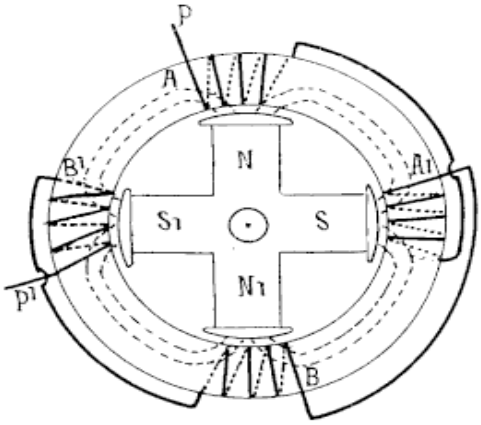


Fig. 268.

Vérifions rapidement que, dans ces conditions, le résultat final est bien encore le même.

Considérons, par exemple (fig. 267), un électro-aimant NS auquel le courant continu d'excitation est amené par deux bagues, qui tournent à l'intérieur d'un tore sur lequel se trouvent bobinés deux enroulements A et B disposés à 180° l'un de l'autre et reliés entre eux comme l'indique la figure. On voit immédiatement que, pour chaque rotation complète de l'électro-aimant, le courant induit recueilli aux bornes fixes P, P′ est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un courant alternatif dont la période est égale à la période de révolution de l'électro-aimant. Nous aurons donc l'équivalent de l'alternateur bipolaire précédemment étudié.

De même, si on emploie deux électro-aimants tournants calés à 90° l'un de l'autre se déplaçant devant quatre bobines couplées comme l'indique la figure 268, on aura réalisé un alternateur tétrapolaire et, pour une rotation complète de l'inducteur, on recueillera aux bornes P et P′ deux périodes complètes du courant alternatif. Le résultat est d'ailleurs général.

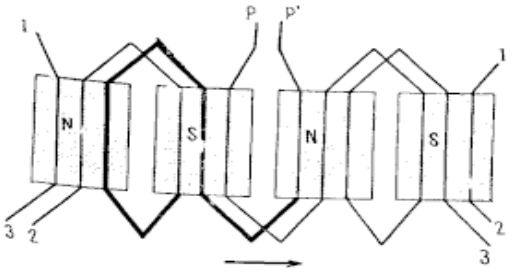


Fig. 269. — Enroulement imbriqué.

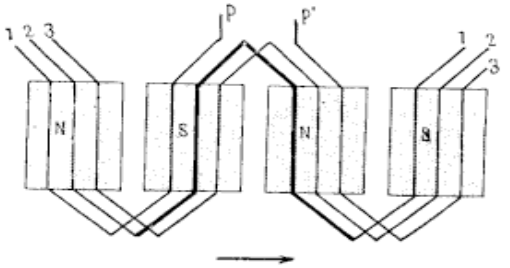


Fig. 270. — Enroulement ondulé.

On n'utilise pas l'enroulement en anneau et on le remplace par l'enroulement en tambour. Dans cet enroulement, chaque conducteur actif situé en face d'un pôle nord à un instant donné est relié à un conducteur qui, au même instant, est situé dans une position correspondante par rapport à un pôle sud, ou inversement.

Comme nous l'avons vu dans l'étude des enroulements des dynamos, on peut soit aller chercher le conducteur équivalent en revenant en arrière, en formant une boucle : on a alors l'*enroulement imbriqué*, ou au contraire en progressant toujours dans le même sens : on a dans ce cas l'*enroulement ondulé*.

Pour représenter les enroulements d'une façon schématique, on fait comme dans le cas des dynamos. On suppose que l'on fend l'induit extérieur suivant une génératrice et le déroule sur le plan du tableau en indiquant en même temps la position des pôles nord et sud des inducteurs. On obtient alors des schémas de bobinage analogues à ceux des figures 269 et 270 qui donnent pour un alternateur tétrapolaire les deux enroulements *imbriqué* et *ondulé*. Les conducteurs se raccordent aux extrémités de la figure, en 1, 2, 3.

D'une façon générale, on appelle la partie fixe *stator* et la partie mobile *rotor*. Ces noms sont préférables à ceux d'inducteur et d'induit, puisque, suivant les cas, l'inducteur peut être rotor ou stator.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les ***alternateurs polyphasés***, qui donnent non plus un seul courant alternatif dans un circuit extérieur à deux fils, mais deux, trois, etc., courants alternatifs de même période, mais décalés l'un par rapport à l'autre de $\frac{\pi}{2}$, $\frac{\pi}{3}$ dans deux, trois... circuits extérieurs, se déduisent très simplement de l'alternateur monophasé que nous venons d'étudier.

En effet, reprenons, pour plus de simplicité, l'alternateur monophasé à inducteur tournant de la figure 267, et supposons que nous enroulions

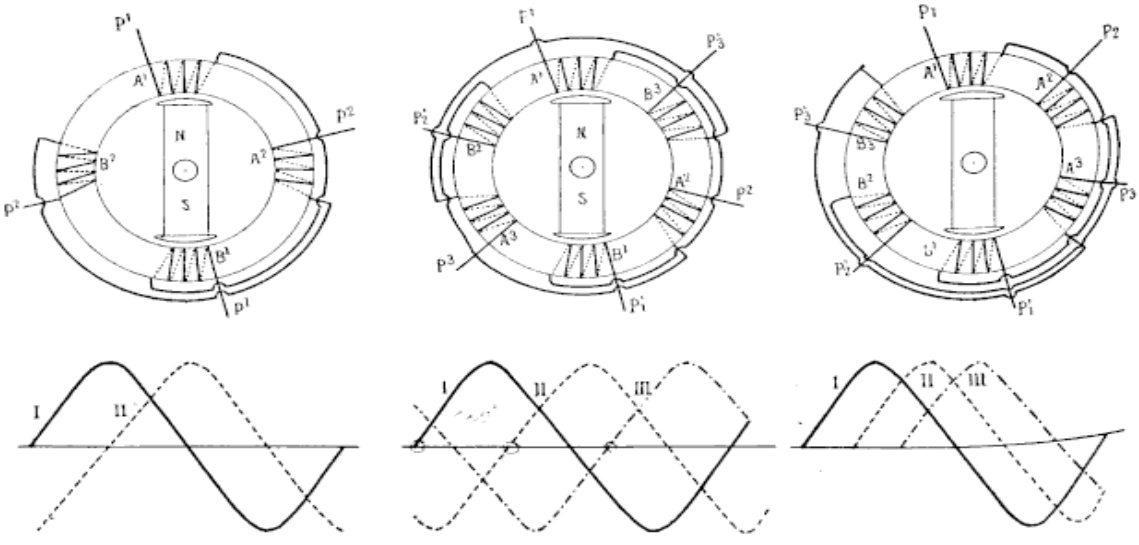


Fig. 271. — Alternateur diphasé.

Fig. 272. — Alternateur triphasé.

Fig. 273. — Alternateur triphasé.

deux bobines A_2, B_2 reliées entre elles comme le sont les bobines A_1 et B_1, mais disposées à angle droit par rapport à ces dernières. Nous aurons ainsi constitué un *alternateur diphasé* ou, si l'on veut, nous aurons, réunis en une seule machine, deux alternateurs monophasés qui auront alors même inducteur (rotor), même carcasse de stator, les bobinages seuls des deux machines conservant leur individualité.

Il est bien évident que nous recueillerons aux bornes P_2, P'_2 un courant alternatif de même puissance que le courant produit aux bornes P_1, P'_1, mais décalé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à ce dernier (fig. 271).

Si maintenant nous juxtaposons de la même manière trois alternateurs monophasés, il faudra alors décaler les trois groupes de bobines A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 de 120° l'un par rapport à l'autre. On obtiendra alors la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

disposition de la figure 272. On voit qu'entre deux bobines A, il y a une bobine B. Les courant recueilli dans chacune des trois lignes aux bornes P_1, P'_1, P_2, P'_2, P_3, P'_3 sera encore du courant alternatif de même période que celui des deux autres lignes, mais décalé d'un tiers de période en avant ou en arrière par rapport à lui.

Remarquons d'ailleurs que l'on pourrait encore grouper les circuits d'une autre manière. Au lieu d'avoir entre les trois bobines A_1, A_2, A_3 des bobines inverses B_3, B_2, B_1 intercalées, on pourrait les placer sur l'enduit dans l'ordre $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$, comme l'indique la figure 273. Dans ces conditions, le temps nécessaire pour que le flux issu d'un pôle balaie les conducteurs des trois bobines est égal à une demi-période ; les trois courants engendrés sont alors décalés d'un sixième de période, comme le montre la figure 273. Le décalage, au lieu d'être 120°, est 60°.

* * *

On peut répéter les mêmes raisonnements lorsque les machines sont multipolaires ; la complexité seule des graphiques est accrue. De même,

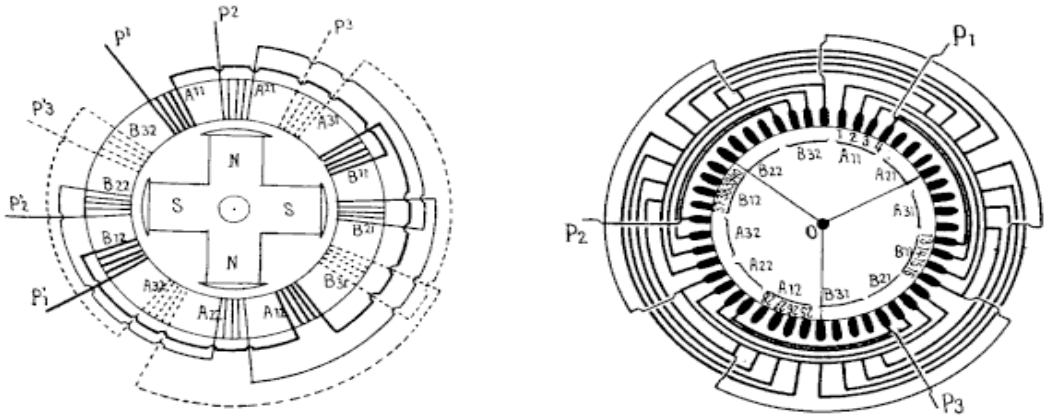


Fig. 274. — Schéma d'un alternateur triphasé tétrapolaire.

on aurait pu raisonner, non sur les enroulements en anneau, qui ne sont plus employés, mais sur les ***enroulements en tambour***.

Sans insister sur ce point, nous donnons simplement dans la figure 274 le schéma, à gauche, d'un alternateur triphasé tétrapolaire à induit en anneau et, à droite, la réalisation de la machine correspondante avec enroulement de l'induit en tambour en étoile comportant quatre encoches par bobine et par pôle, soit quarante-huit encoches au total.

Cet enroulement est réalisé de la façon suivante. Le fil P_1 est relié à l'extrémité 4 de l'une des bobines dont le conducteur sort par la face

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

arrière de l'armature, va de là dans l'encoche 13, ressort en avant, passe dans l'encoche 3, puis dans l'encoche 13, ensuite dans les encoches 2 et 15, et finalement 1 et 16. L'ensemble équivaut à la paire de bobines A_1B_1 de la figure de gauche. De l'encoche 16, le fil va à l'encoche 28 et passe successivement par les encoches 28-37, 27-38, 26-39, 25-40, équivalent à l'ensemble des bobines $A_{12}B_{12}$. Le fil sort en 40.

On suit de même les bobinages correspondant à la deuxième et à la troisième phase. Remarquons d'ailleurs que des encoches correspondantes, comme 4 et 13, peuvent contenir non pas un seul conducteur, comme nous l'avons supposé, mais une véritable bobine à un grand nombre de tours de fil.

* * *

Nous avons vu que la ***fréquence du courant alternatif*** produit est égale à la période de rotation dans une machine bipolaire, double dans un alternateur tétrapolaire, etc. Comme, pour les applications pratiques, en particulier pour l'éclairage, il faut que la fréquence soit comprise entre 40

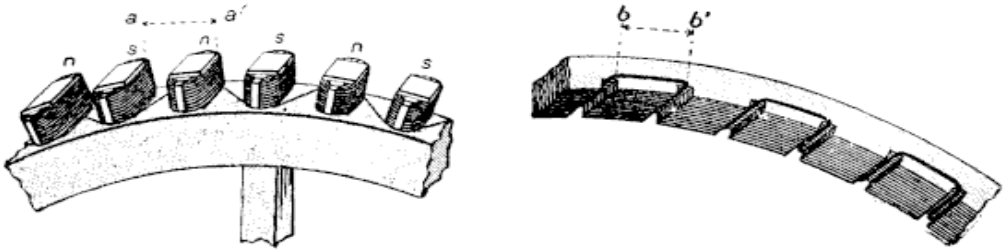


Fig. 275. — Disposition des pôles inducteurs et des induits dans les alternateurs de grande puissance.

et 50 par seconde, les vitesses de rotations des alternateurs devraient être de 3000 tours par minute pour les alternateurs bipolaires, 1 500 tours pour les tétrapolaires, etc. Bien que ces vitesses soient facilement obtenues avec les turbines à vapeur, lorsque la force motrice est fournie par des machines à vapeur à piston ou des turbines hydrauliques, on ne peut réaliser des vitesses de rotation aussi considérables. On est alors conduit à augmenter le nombre des pôles, par suite aussi le nombre des bobines induites et, pour pouvoir loger les enroulements, à donner à l'alternateur de grandes dimensions diamétrales.

Le rotor se présentera alors comme une grande roue portant les électro-aimants à sa partie périphérique, et le stator portera les bobines plates logées dans des encoches (fig. 275).

* * *

Il peut sembler que, pour recueillir le courant produit par un alternateur triphasé, il faille six conducteurs, soit trois lignes doubles. Mais, comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le montre l'étude théorique des courants alternatifs, on peut ramener ce nombre à trois par un groupement convenable des enroulements et des circuits, en s'appuyant sur la propriété des courants triphasés d'avoir une somme nulle à chaque instant, c'est-à-dire qu'à chaque instant un des courants fait équilibre aux deux autres et leur sert de circuit de retour.

On peut grouper les enroulements de deux façons différentes : soit en étoile, soit en triangle.

Dans le ***groupement en étoile*** (fig. 276), les trois enroulements ont

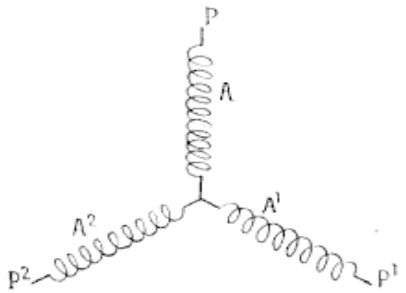


Fig. 276. — Groupement en étoile.

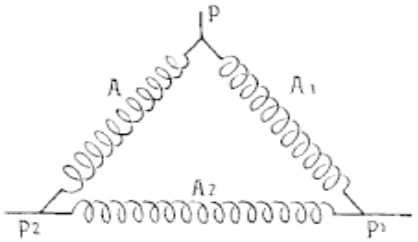


Fig. 277. — Groupement en triangle.

chacun une de leurs extrémités reliée à un point commun appelé *point neutre*.

Dans le ***groupement en triangle*** (fig. 277), le fil de sortie de chaque enroulement est relié au fil d'entrée de l'enroulement voisin et les fils de ligne partent des trois points de jonction.

* * *

Comme dans le cas des dynamos, il faut ***tenir compte, dans l'établissement des alternateurs, de certains phénomènes électriques et magnétiques***. Nous n'en dirons que quelques mots.

La ***réaction d'induit***, c'est-à-dire l'ensemble des causes qui font baisser la tension entre la marche à vide et la marche en charge, peut être divisée en deux parties. Lorsque l'induit est parcouru par un courant, un certain nombre de lignes de force qui en émanent se ferment dans l'air, tandis que les autres, passant par les inducteurs eux-mêmes, en modifient plus ou moins l'état d'aimantation. Les calculs sont assez pénibles, car on ignore la loi exacte de combinaison des forces magnétomo rices produites dans les inducteurs et dans les induits d'un alternateur donné.

La chute de tension aux bornes dépend également de la self-induction du circuit d'utilisation.

Quand celle-ci est faible, ce qui est le cas dans des réseaux d'éclairage,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la réaction d'induit détermine simplement une oscillation du flux inducteur alternativement augmenté et diminué. Quand la self-induction du circuit est notable, le courant est en retard sur la force électromotrice, les oscillations du flux inducteur autour de sa valeur moyenne ne se compensent plus et le champ résultant est affaibli, d'où baisse de tension qui, dans certains cas, peut atteindre et même dépasser 20 p. 100. Le plus souvent, on maintient la tension constante au moyen d'un rhéostat de champ ajouté à l'excitatrice : on augmente l'intensité d'excitation au fur et à mesure que la charge de l'alternateur augmente.

* * *

Comme dans le cas des dynamos, deux ***caractéristiques*** sont utiles à connaître dans les alternateurs. Ce sont :

La ***caractéristique à circuit ouvert*** qui donne la tension aux bornes en fonction du courant d'excitation. Sa forme est facile à fournir : ce sera, comme pour les dynamos, une courbe semblable à celle du magnétisme de la machine (fig. 278).

2° La ***caractéristique externe*** qui, pour une excitation déterminée, donne la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur en fonction

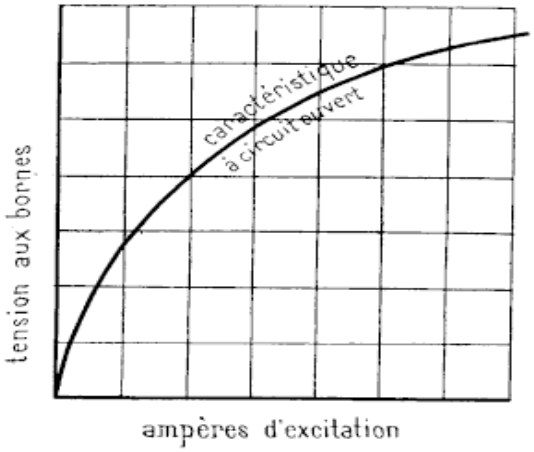


Fig. 278. — Caractéristique à circuit ouvert.

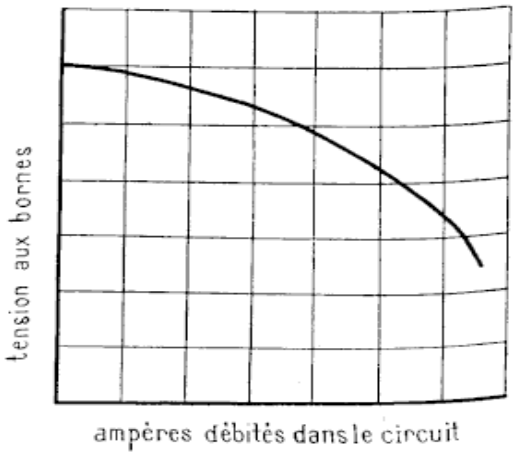


Fig. 279. — Caractéristique externe.

du courant débité dans une résistance extérieure sans self-induction. Cette courbe montre que la tension baisse assez rapidement quand l'intensité augmente (fig. 279), de sorte que, lorsqu'un alternateur est mis en court-circuit, l'intensité du courant qu'il débite ne dépasse souvent pas trois à quatre fois sa valeur normale. Il en résulte qu'une mise momentanée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en court-circuit d'un alternateur ne produit pas les désastres habituels que l'on observe dans les dynamos. Par contre, la mise brusque d'un alternateur hors du réseau peut produire, à cause de la self-induction importante de la machine, des tensions induites amenant la formation d'étincelles susceptibles de détruire les isolants.

3° Aux deux courbes précédentes, il est donc intéressant d'en ajouter une troisième : la ***caractéristique en court-circuit***, qui donne, en fonction de l'intensité d'excitation, la valeur du courant de court-circuit de l'alternateur.

* * *

La ***puissance*** des alternateurs, comme nous l'avons vu dans l'étude des courants alternatifs, dépend du circuit extérieur qui intervient pour produire un décalage entre la force électromotrice et l'intensité y circulant. Si φ est l'angle de décalage du courant sur la force électromotrice, E la force électromotrice efficace et I l'intensité efficace, la puissance débitée est :

$$W = EI \cos \varphi.$$

On voit donc que l'on ne peut parler de la puissance d'un alternateur, puisqu'elle dépend de la valeur du cos φ de l'installation. Aussi les constructeurs ont-ils adopté pour la *puissance nominale* ou *apparente* celle qui correspond à cos $\varphi = 1$ (facteur de puissance usité). On l'exprime en *kilovolts-ampères*, KVA. Au contraire, la *puissance vraie* ou *effective* pour une installation donnée s'exprime en *kilowatts*.

* * *

Couplages. — On a souvent besoin, dans les usines génératrices, de coupler plusieurs alternateurs. On ne les associe qu'en ***parallèle***, car on sait construire sans difficulté des alternateurs donnant des tensions aussi élevées qu'on le désire et, de plus, les transformateurs permettent d'élever le voltage à volonté. On démontre d'ailleurs que le couplage en série est pratiquement impossible : deux alternateurs ainsi groupés tendent à se mettre en opposition, c'est-à-dire en parallèle.

Le groupement des alternateurs en parallèle nécessite que plusieurs conditions soient réalisées. Il faut que les alternateurs au moment du couplage aient même force électromotrice, même fréquence et par suite même vitesse ; enfin, que leurs phases soient opposées l'une à l'autre, mais en concordance avec celle du circuit extérieur.

Quand le couplage est réalisé, il est stable. En effet, si l'un des alter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nateurs tourne plus vite que l'autre, par suite de la variation du couple moteur de la turbine ou de la machine à vapeur qui l'entraîne, sa tension s'élève et il fournit du courant et de l'énergie à l'autre alternateur qui fonctionne alors partiellement en moteur. La vitesse de ce second alternateur augmente donc, ce qui fait diminuer celle du premier, et l'égalité se rétablit automatiquement.

Pour coupler un alternateur B avec un autre A déjà en service, on

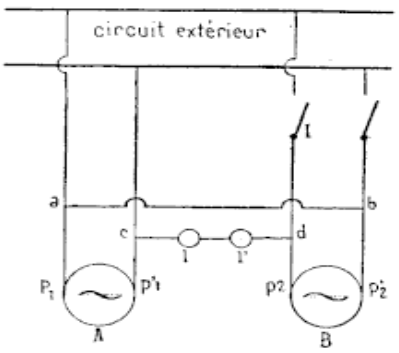


Fig. 280. — Couplage de deux alternateurs.

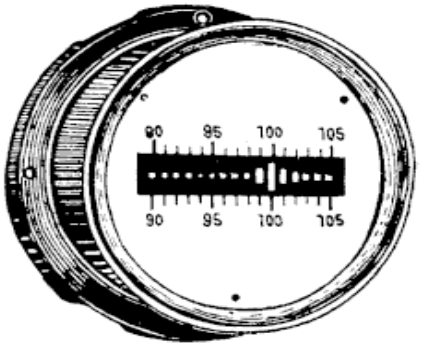


Fig. 281. — Indicateur de phase.

commencera donc par faire tourner à vide B jusqu'à ce que sa vitesse de rotation soit la même que celle de A ; on règle ensuite l'excitation de B de façon à lui faire produire la même force électromotrice. Ensuite, on attend que les deux alternateurs soient en concordance de phase et on ferme l'interrupteur I.

* * *

Pour saisir le moment où cette dernière condition est remplie, on se sert d'***indicateur de phase***.

L'indicateur de phase peut être constitué par deux lampes à incandescence ordinaires l, l', montées en série entre les bornes P'_1, P_2 des deux alternateurs dont les deux autres bornes P_1, P'_2 sont également réunies par un fil ab (fig. 280).

Si les deux alternateurs sont en synchronisme et en concordance de phase avec la ligne (en opposition entre eux), à chaque instant les pôles P_1 et P_2 sont de même signe, ainsi que les pôles P'_1 et P'_2. Dans le circuit $abP'_2P_2dcP'_1P_1a$, les machines sont donc à chaque instant montées en série et les forces électromotrices, ayant même phase, s'ajoutent, de sorte que les lampes l et l' brillent d'un vif éclat.

Si, au contraire, les fréquences sont légèrement différentes, on constate des oscillations dans la lumière émise par les lampes l et l' qui s'éteignent,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puis se rallument, le nombre des allumages par seconde étant égal à la différence des fréquences. Le phénomène est l'analogue de celui des battements en acoustique.

On règle le second alternateur jusqu'à ce que la lumière reste fixe pendant quelques secondes, et on couple à ce moment.

Au lieu d'employer cette méthode dite de ***couplage à l'allumage***, on peut ***coupler à l'extinction***, en reliant alors par le conducteur ab les pôles P_1 et P_2 et par le conducteur cd et les lampes l, l', les pôles P'_1 et P'_2.

On peut également se servir d'appareils spéciaux dits ***fréquencemètres de couplage***. Ils sont constitués par des électro-aimants parcourus par le courant alternatif en face desquels peuvent vibrer de petits équipages magnétiques dont la durée d'oscillation propre varie de 90 à 105 oscillations par seconde par exemple. Lorsque le courant alternatif passe dans les électro-aimants, l'équipage mobile dont le nombre de vibrations par seconde correspond au nombre des changements de pôles, c'est-à-dire au double de la fréquence du courant, se met à vibrer, tandis que les autres équipages restent immobiles. Un voyant monté sur les équipages et se déplaçant devant une graduation permet de reconnaître quelle est la fréquence du courant. Dans le cas de la figure 281, elle est de 50.

En associant deux séries de ces dispositifs, on suit la marche des deux alternateurs à coupler. Si, en plus, une troisième série de dispositifs oscillants est alimentée par les courants des deux machines, ils indiqueront la concordance des phases lorsque les équipages se mettront en vibration.

De nombreux autres dispositifs, à plusieurs lampes, par exemple, s'allumant dans un ordre qui dépend de la vitesse relative des alternateurs à coupler, sont également employés, mais leur étude ne présente d'intérêt que pour les techniciens.

* * *

Construction des alternateurs.

Il nous reste à donner quelques indications sur la construction des alternateurs. Ceux-ci, comme nous l'avons vu, sont composés de deux parties : le stator et le rotor. En général, le stator est l'induit et le rotor l'inducteur.

Le ***stator***, qui porte les bobines d'induit, est formé d'une couronne feuilletée, afin d'éviter les courants de Foucault. Les tôles découpées et poinçonnées forment après leur réunion des rainures ou des trous, analogues à ceux de la figure 256, dans lesquels passent les conducteurs des induits :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

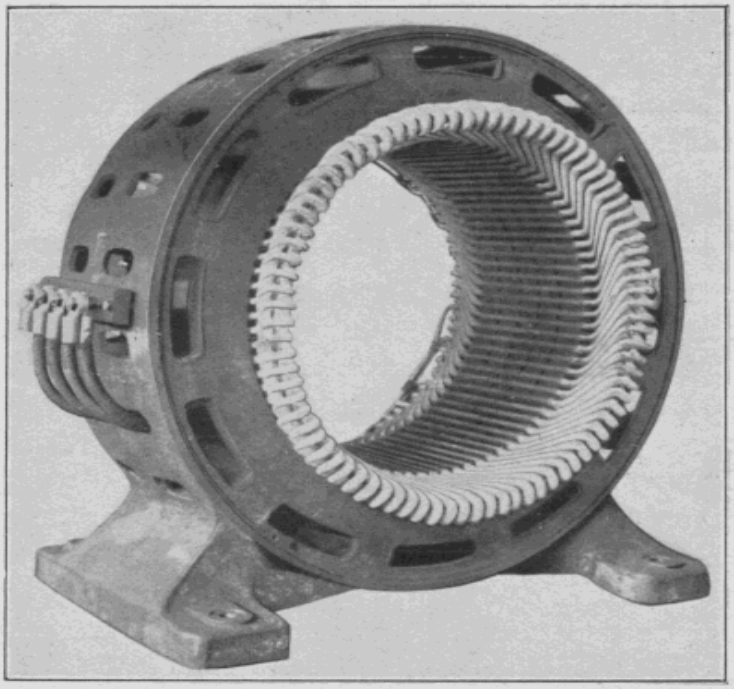


Fig. 282. — Alternateur T. H. de 420 KVA, 750 tours-minute, 520 volts. Vue du stator bobiné.

fils ou barres de cuivre. Ces encoches ont le même rôle électrique que celles que nous avons rencontrées dans les induits de dynamos. En général, d'ailleurs, on emploie les encoches ouvertes, qui permettent le façonnage des bobines sur gabarit et le montage rapide.

Le ***rotor*** est constitué par des tôles feuilletées montées sur un volant en

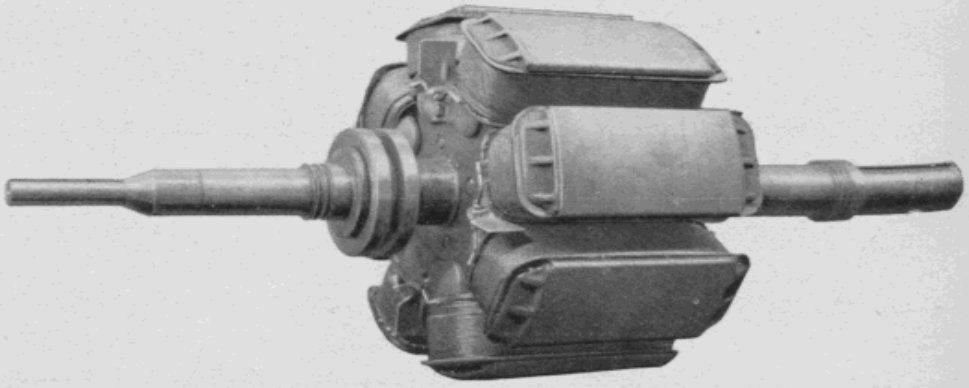


Fig. 283. — Vue du rotor de l'alternateur précédent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonte. Le bobinage est réalisé soit à l'aide de fil, soit à l'aide de barres de cuivre isolées et fortement serties dans des encoches.

* * *

Les alternateurs sont de forme très différente suivant la nature de la force motrice qui les actionne.

Dans le cas des turbines à vapeur, où la vitesse de rotation est de l'ordre de 1 500 tours par minute, il suffit d'avoir un induit tétrapolaire pour

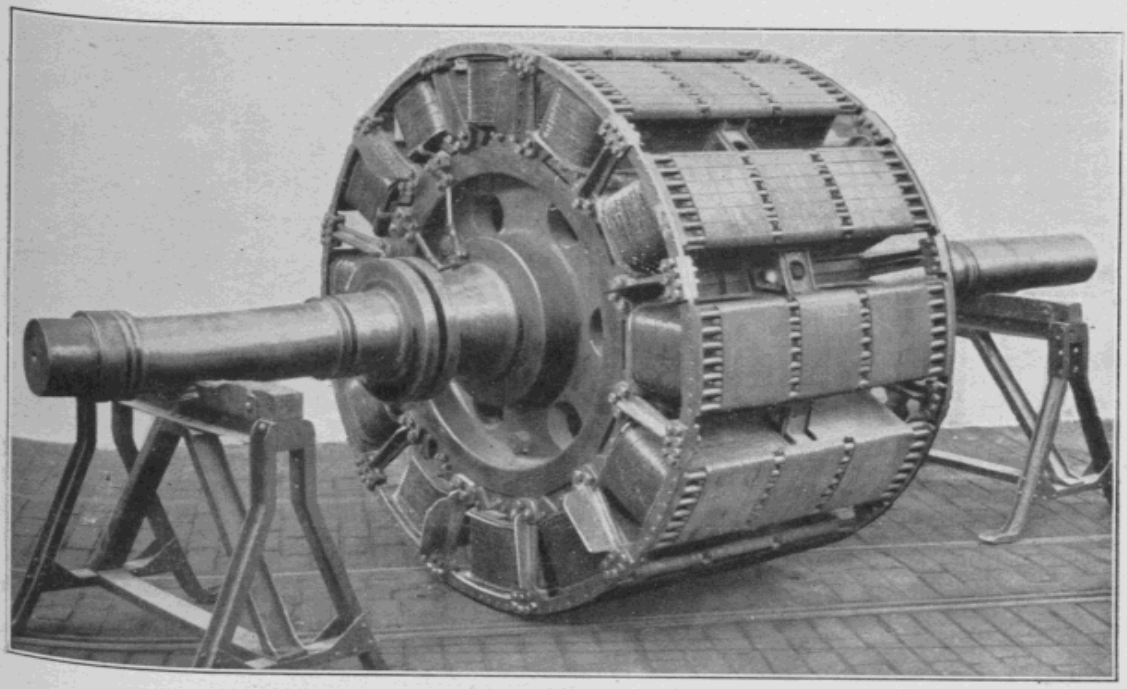


Fig. 284. — Alternateur 2700 KVA, 500 tours-minute, 50 périodes. Vue du rotor.

obtenir la fréquence demandée. Mais cette vitesse de rotation considérable impose de ne donner à l'induit que des dimensions diamétrales peu considérables, et par suite la machine se développe en profondeur. Inversement, lorsque l'entraînement est réalisé par des turbines hydrauliques à faible vitesse de rotation, ou des moteurs genre Diesel, il faut multiplier les pôles inducteurs, par suite les bobines induites, et l'alternateur atteint des dimensions diamétrales considérables, son épaisseur, par contre, ne dépassant guère celle d'un volant de machine ordinaire.

Enfin, suivant le type de turbine employé, l'***axe de rotation*** peut être vertical ou horizontal, ce qui conduit à des modifications importantes dans la construction de l'alternateur.

Aussi nous contenterons-nous de donner quelques indications sommaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur les divers types d'alternateurs que l'on rencontre couramment. Les figures 282 et 283 représentent un alternateur de puissance moyenne : 420 KVA, de vitesse de rotation faible : 750 tours-minute, le voltage étant de

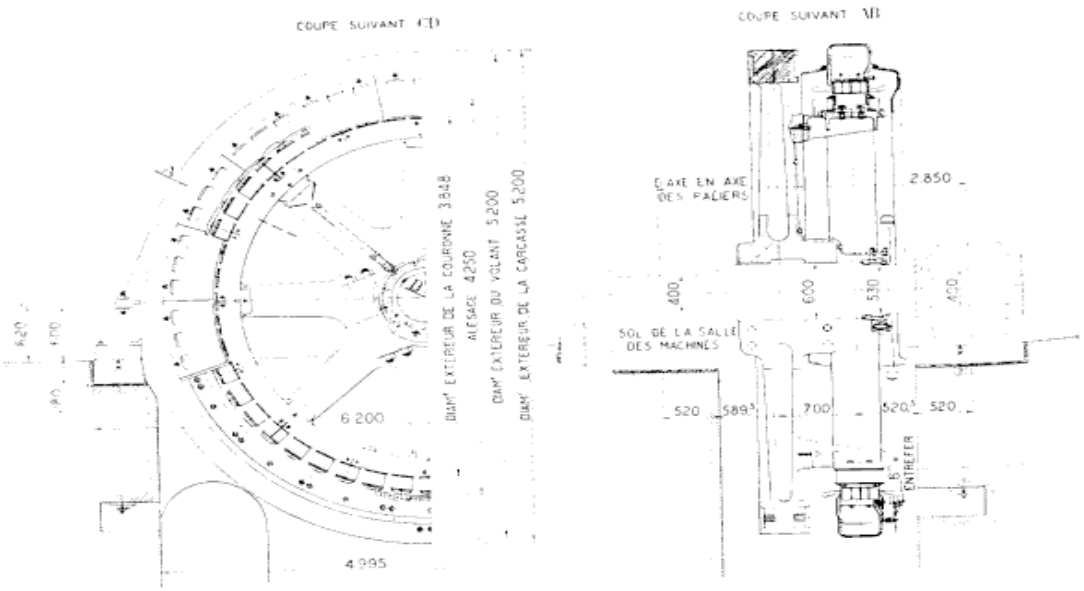


Fig. 285. — Alternateur 1 875 KVA, 125 tours-minute, 5 500 volts Thomson.

520 volts. L'inducteur a huit pôles, que l'on voit nettement ; sur la figure représentant l'induit, on distingue l'enroulement en encoches droites et les évents de ventilation.

Lorsque la puissance augmente, la construction devient plus massive et, comme exemple, nous reproduisons, figure 284, l'inducteur d'un alternateur de 2 700 KVA à 10 500 volts, 50 périodes, à 500 tours-minute, des chemins de fer du Midi. La construction est plus robuste et le refroidissement assuré par l'ajourage des pièces mécaniques supportant les enroulements électriques. Le stator est analogue à celui de la machine précédente, aux dimensions près.

Lorsque l'entraînement se fait par moteur Diesel ou par turbine à eau, le rotor constitue le volant de l'installation et on cherche à le réaliser de façon à avoir un grand moment d'inertie de la partie tournante. Les vitesses de rotation varient de 125 à 250 tours par minute. La figure 285 montre la coupe et les dimensions d'un alternateur T. H. de 1 875 KVA à 5 500 volts, tournant à 125 tours par minute. La figure 286 montre un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

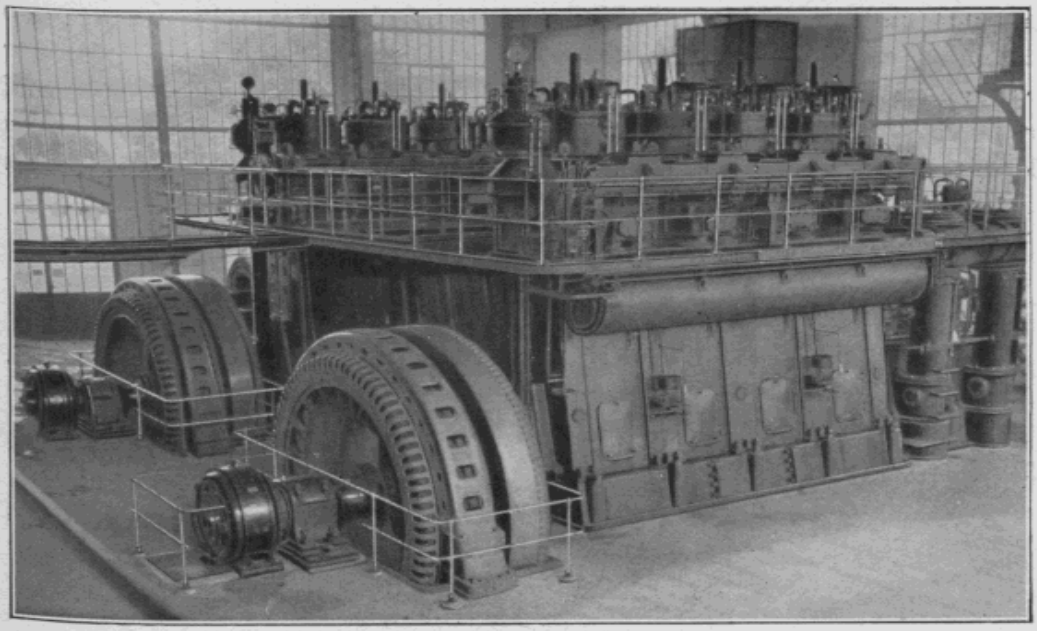


Fig. 286. — Vue d'un groupe moteur Diesel de 1 500 HP, 5 000 volts.

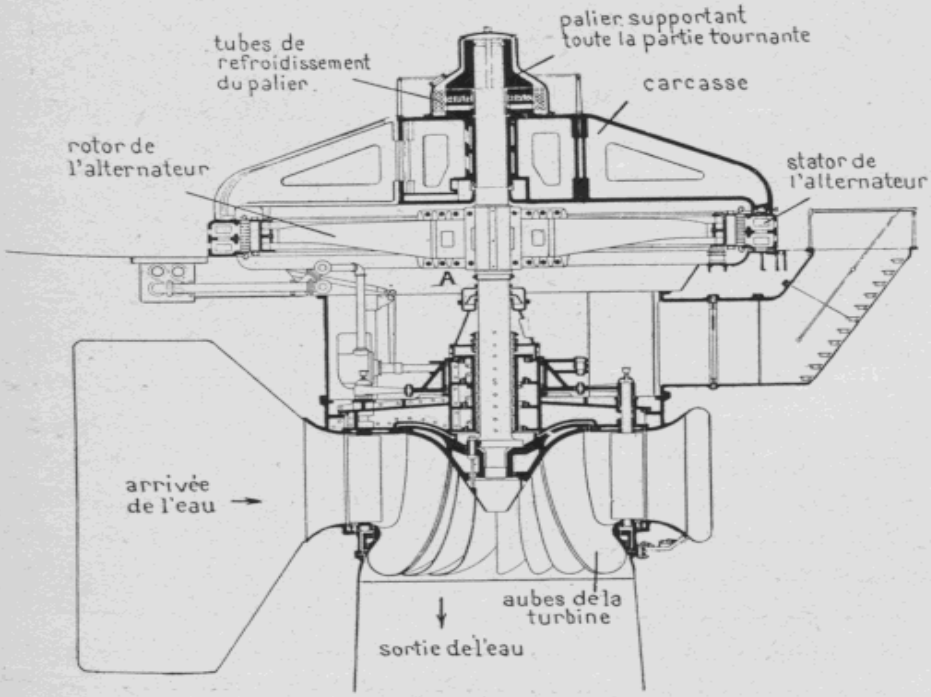


Fig. 287. — Turbine à eau de 10 000 KVA. Diamètre extérieur 12 mètres, poids de l'élément tournant 500 tonnes, vitesse de rotation 55,6 tours par minute, charge d'eau 10 mètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

groupe moteur Diesel T.-H. de 1 500 chevaux. On remarque la faible largeur de la machine proprement dite, la couronne perforée qui est montée sur le stator servant simplement à garantir les enroulements contre les accidents extérieurs. On aperçoit également, en bout de chaque alternateur, montée sur le même arbre, la dynamo génératrice du courant excitateur du rotor.

Lorsque l'on emploie les ***turbines à eau***, celles à axe vertical sont les plus avantageuses pour les grandes puissances. En effet, les grandes dimensions des organes tournants compliqueraient l'installation

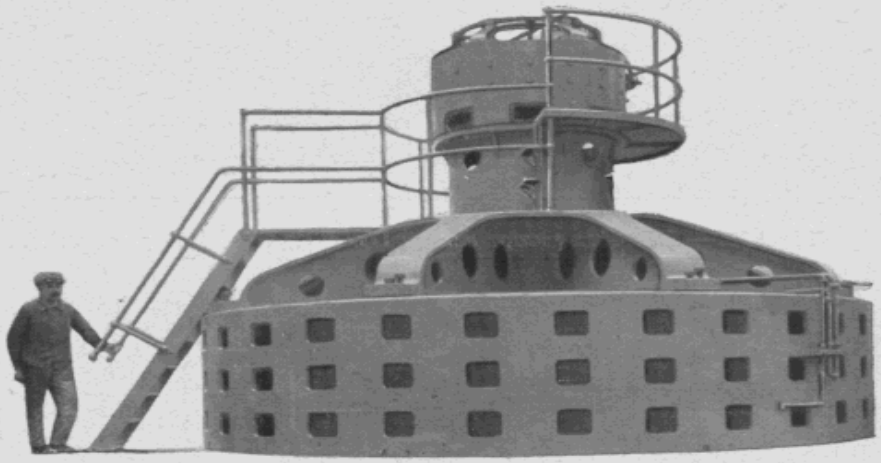


Fig. 288. — Vue d'un alternateur vertical 56 pôles, 5 720 KVA, 107 tours-minute, 6 200 volts (Thomson-Houston).

et, au point de vue mécanique, la dissymétrie des efforts de pesanteur sur les points d'appui a fait renoncer aux dispositifs à axe horizontal.

La figure 287 montre le schéma d'un générateur de 10 000 KVA. A la partie inférieure se trouve la turbine hydraulique avec ses dispositifs de réglage. A la partie supérieure, l'alternateur, dont l'axe vertical est solidaire en A de celui de la turbine, est constitué par une énorme roue (dont le diamètre atteint parfois 12 mètres), portant les inducteurs en grand nombre. Cette roue tourne en regard des bobines induites logées dans un énorme bâti en fonte. Tout l'ensemble tournant, rotor et partie mobile de la turbine, est suspendu par un palier situé à la partie supérieure de l'appareil. La figure 288 montre la carcasse du stator.

Malgré la faible vitesse de rotation réalisée (50 à 60 tours par minute

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans l'exemple considéré, qui est celui d'une unité de 10000 KVA), le poids considérable de la masse en mouvement (500 tonnes environ) nécessite des soins spéciaux pour la construction de ce palier. Pendant la marche normale, la réaction de la turbine peut, dans une certaine mesure, équilibrer le poids du groupe, mais le démarrage et l'arrêt restaient la source d'ennuis qu'un graissage d'huile, même sous pression, ne permettait pas toujours d'éviter.

L'emploi, pendant ces dernières années, de paliers de butée, genre Kingsbury ou Michell, a permis de résoudre toutes ces difficultés de la façon la plus parfaite et d'obtenir un fonctionnement continu offrant toute sécurité. Les coussinets sont partagés en segments qui peuvent pivoter chacun autour de leur point d'appui et prendre d'eux-mêmes, par rapport au disque mobile, une position oblique stable; cette disposition permet d'obtenir, par suite de la rotation, une mince couche d'huile entre les deux surfaces, uniquement par l'adhérence de l'huile aux surfaces, sans qu'il soit nécessaire de graissage sous pression. Ces paliers sont remarquables par les grandes charges qu'ils sont capables de supporter, par la petitesse du coefficient de frottement et par leur faible encombrement.

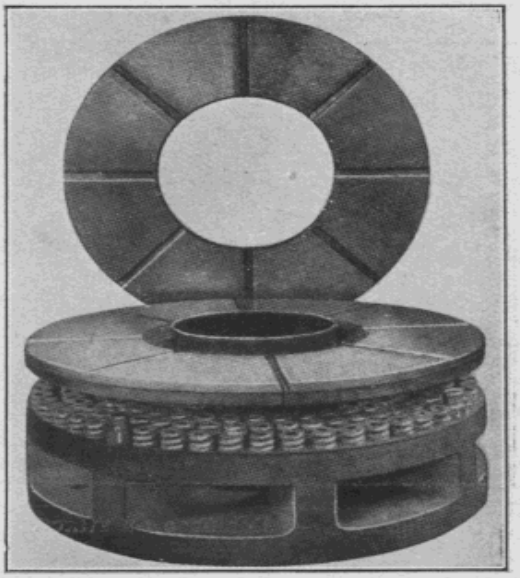


Fig. 289. — Palier à ressorts pour génératrice à axe vertical.

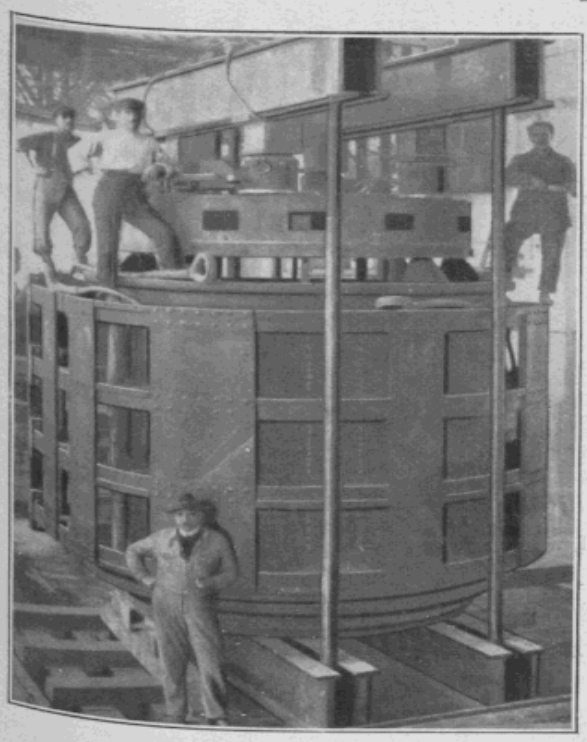


Fig. 290. — Montage des pôles du stator.

Dans d'autres cas, on utilise un palier à ressorts comme celui représenté

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la figure 289, qui permet de se rendre compte de son fonctionnement. Les surfaces de frottement sont noyées dans un bain d'huile et une circulation d'eau froide entoure le palier afin d'éviter son échauffement.

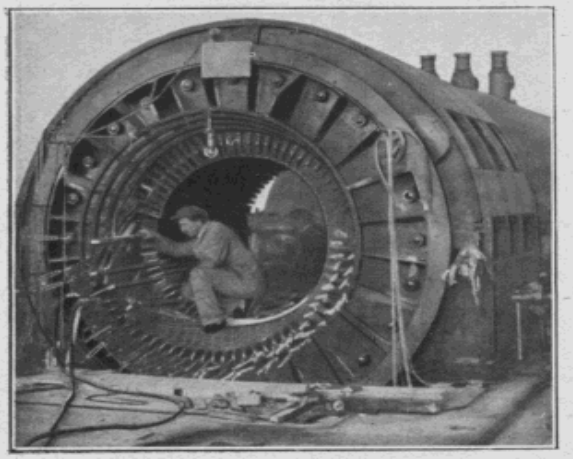


Fig. 291. — Bobinage du stator.

Enfin, pour des unités de puissance supérieure à 10 000 KVA, la turbine à vapeur est la seule source de force motrice utilisée. L'alternateur a donc son axe horizontal et, si son diamètre est relativement petit, ses dimensions transversales sont plus importantes.

Les figures 290 et 291 montrent la confection du stator d'un alternateur T.-H. de 15 000 KVA, 13 200 volts, triphasé, 25 périodes, tournant à 1 500 tours par minute. On voit comment on presse les tôles qui forment un stator, ainsi que la confection du bobinage. Quant au rotor, la figure 292 montre au premier plan l'opération du pressage des barres de cuivre dans les

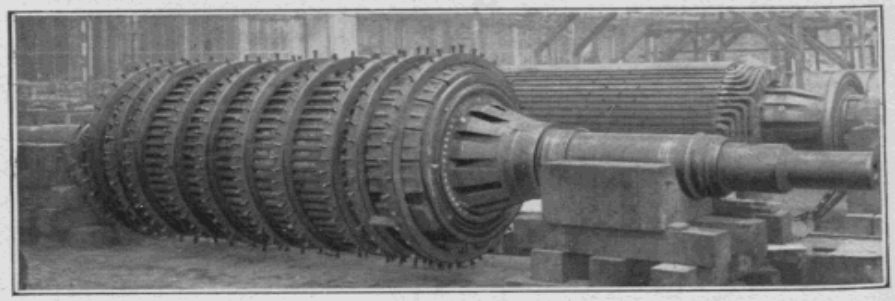


Fig. 292. — Montage du rotor. On voit les colliers servant à serrer les barres dans les encoches. Au fond, un rotor terminé.

encoches à l'aide de colliers de serrage, suivant une méthode dont nous avons déjà parlé précédemment. Au second plan, on aperçoit un rotor équipé.

Pour terminer la description des alternateurs, nous donnerons ***quelques renseignements sur les alternateurs tétrapolaires*** 50 périodes de 40 000 KVA installés par la Société alsacienne de constructions mécaniques à l'usine de Gennevilliers, que nous décrirons ultérieurement comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exemple d'installation de centrale moderne. La figure 293 donne une coupe transversale de l'alternateur dont la vue d'ensemble est représentée figure 294 ; la figure 295 montre l'enroulement du stator ainsi que le rotor en cours de montage.

Le rotor est constitué par des tôles en acier de 4 millimètres d'épaisseur, portant quarante-huit encoches servant à loger l'enroulement et deux

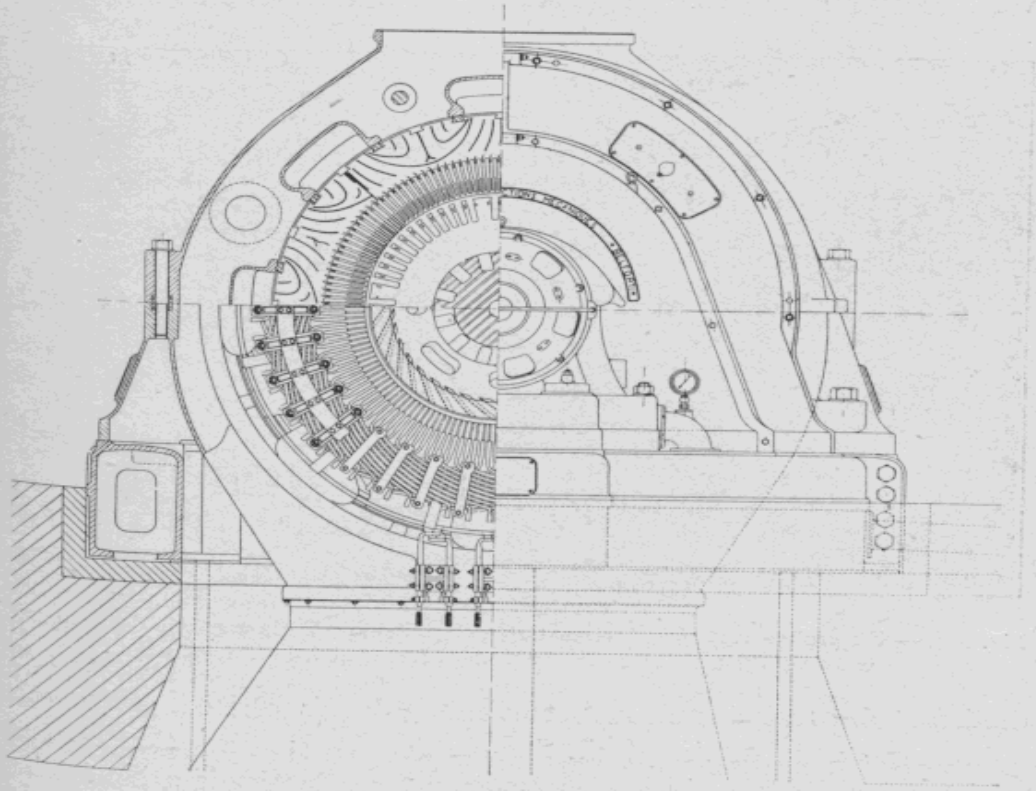


Fig. 293.

encoches vides au milieu de chaque pôle pour limiter le flux issu de cette partie et donner une forme convenable au champ.

L'enroulement comprend 138 spires par pôle (23 conducteurs par encoche). Le courant normal d'excitation prévu étant de 470 ampères en charge, la résistance à chaud de l'enroulement inducteur est de 0,48 ohm, ce qui correspond à une tension d'excitation de 225 volts.

Pour la réfrigération du rotor, à chaque extrémité un plateau en acier forgé fixé sur l'arbre supporte un ventilateur débitant 18 mètres cubes d'air à la seconde. On le voit très nettement sur la figure 294. L'air de ventilation suit deux chemins différents : une partie de l'air entre dans le rotor par des canaux fraisés dans l'arbre, d'où il est distribué aux évents ; l'autre partie entre par des trous ménagés dans les plateaux de support

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des ventilateurs, pénètre entre les parties frontales des bobines et s'échappe par des échancrures fraisées dans les plateaux de serrage.

L'air chaud, au sortir de l'alternateur, est chassé dans un réfrigérant situé dans l'alternateur. Les tubes de refroidissement sont parcourus par l'eau de condensation des turbines à vapeur. Elle s'y échauffe d'environ 6 degrés et la différence de température entre l'air chaud et l'air refroidi varie de 17 à 24 degrés. Entre l'air et l'eau à leur sortie du réfrigérant, la

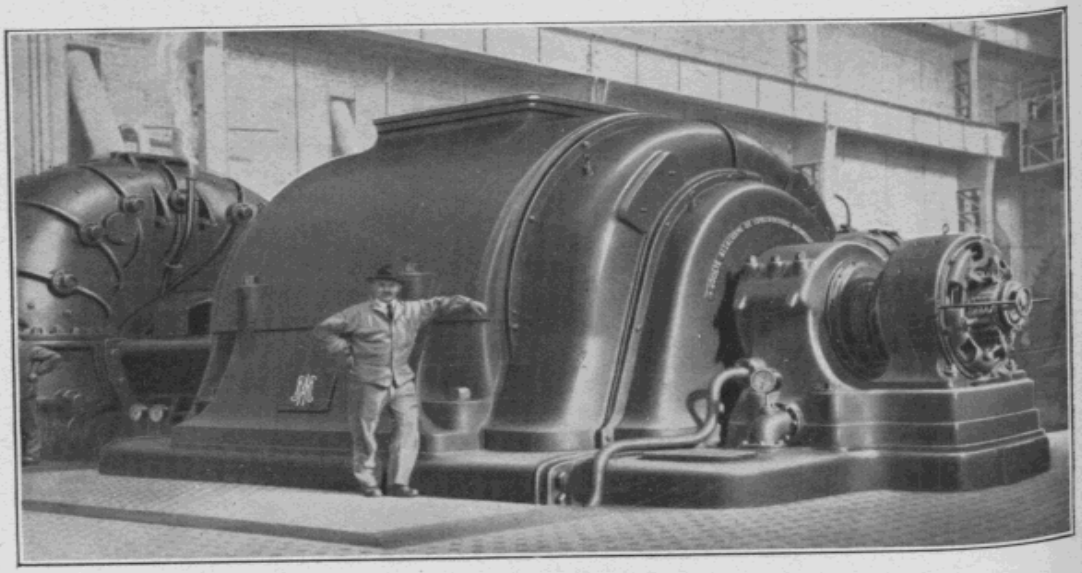


Fig. 294. — Un groupe turbo-générateur de 40 000 chevaux de la centrale de Gennevilliers. On aperçoit à l'arrière le ventilateur servant à la réfrigération.

différence des températures n'est que de 3 degrés environ, ce qui montre le bon rendement de l'appareil. Comme l'eau de condensation est ensuite utilisée pour alimenter à nouveau les chaudières, la récupération de chaleur ainsi obtenue est loin d'être négligeable.

Ajoutons que le poids total du rotor est de 50 tonnes.

Le stator est constitué par des tôles maintenues fixées sur la carcasse extérieure par des cales en queue d'aronde. La longueur totale du fer du stator, y compris les évents, est de $2^{m},78$. L'enroulement est logé dans 144 encoches et est constitué par des barres de cuivre entourées de mica. Comme le transport de la machine en une seule pièce n'était pas possible, et que d'autre part le bobinage ne permettait pas la séparation en deux de la carcasse, l'enroulement a dû être effectué sur place. Nous ne dirons rien des particularités qu'il présente. Nous ne signalerons que les encoches dites de fuite (fig. 296), qui ont un double but : réduire la valeur du courant de court-circuit en augmentant la réactance du stator et de plus servir de canal pour l'air de refroidissement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce refroidissement est assuré par les ventilateurs placés aux deux extrémités du rotor. L'air circule entre les bobines, dans les canaux de fuite et

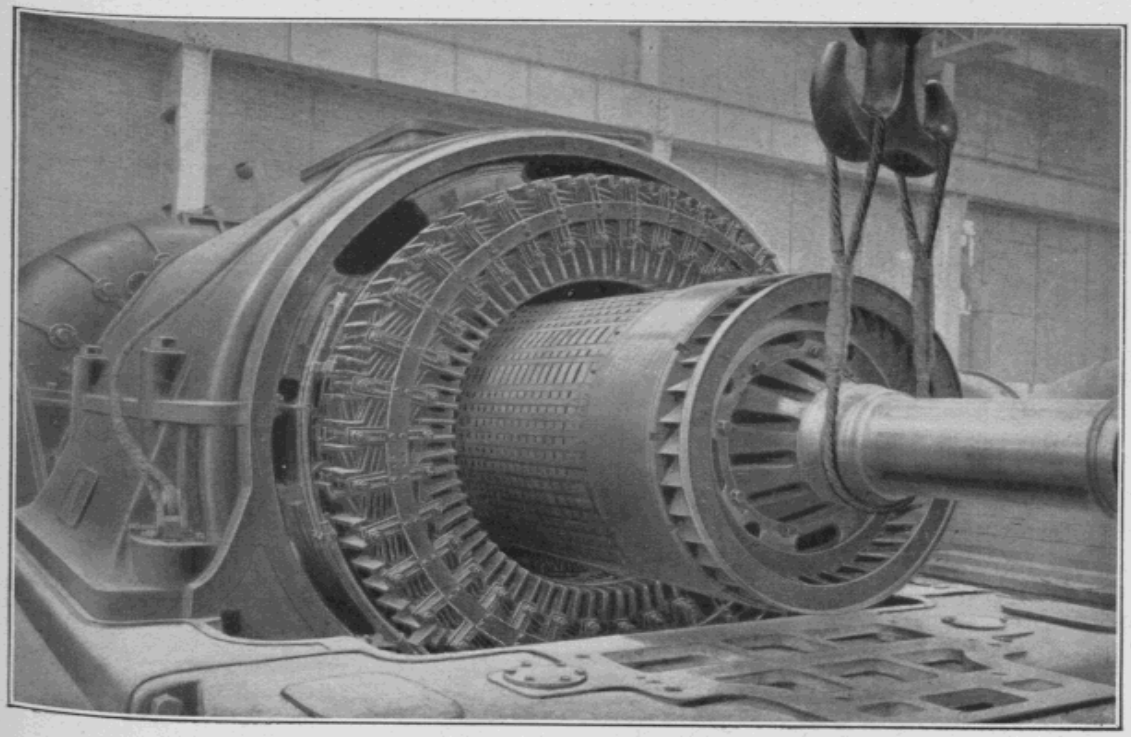


Fig. 295. — Introduction du rotor dans le stator de la génératrice.

dans la carcasse. En cas d'avarie du réfrigérant d'air, la ventilation peut être faite à circuit ouvert par de l'air extérieur filtré.

La ventilation est assurée normalement en circuit fermé, ce circuit étant constitué par l'alternateur et le réfrigérant. L'emploi d'une masse d'air limitée a pour avantages à la fois d'éviter d'une façon certaine tout dépôt de poussières ou d'humidité dans l'alternateur et de limiter les risques d'incendies intérieurs, le développement de ceux-ci étant rapidement arrêté par manque d'oxygène. On envisage même, à ce dernier point de vue, de remplacer la masse d'air de ventilation par de l'azote.

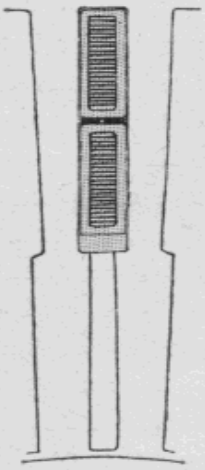


Fig. 296.

Pour terminer cette brève description, nous dirons que le poids total de l'alternateur, y compris son excitatrice, est de 155 tonnes, et que le rendement est d'environ 96,9 p. 100 à la charge de 40 000 kilowatts avec un facteur de puis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sance de 0,9 et pour la tension normale de 6 000 volts, ce qui correspond encore à une perte de plus de 1 200 kilowatts, dont la plus grande partie est dépensée sous forme calorifique dans les enroulements induits et inducteurs.

* * *

Ce dégagement considérable de chaleur dans les organes électriques des alternateurs de grande puissance a conduit à étudier avec un soin tout

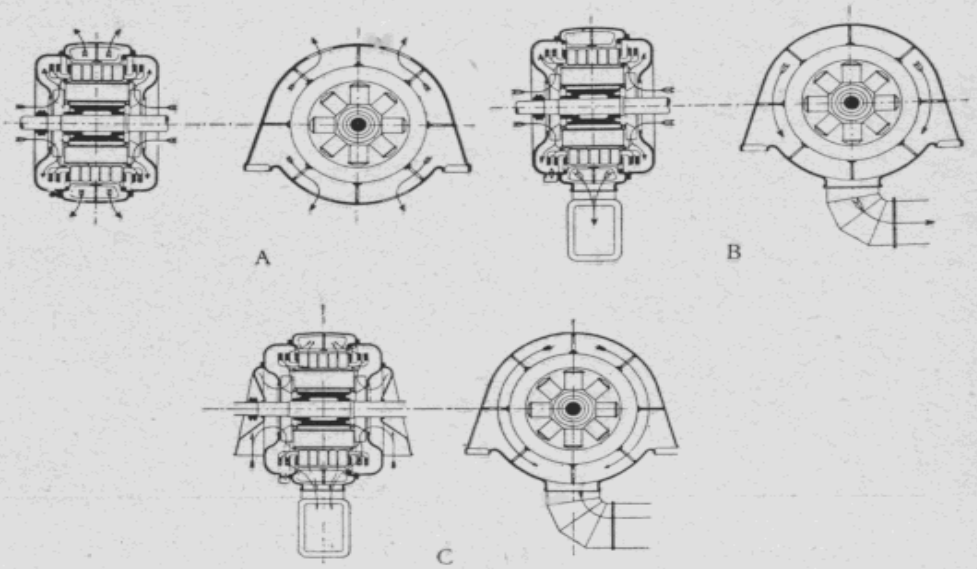


Fig. 297.

A, Ventilation naturelle. L'air est pris et rejeté dans la salle des machines ; B, l'air est pris dans la salle des machines et rejeté à l'extérieur ; C, ventilation méthodique. L'air est pris et rejeté à l'extérieur.

particulier leur ventilation. Nous allons dire quelques mots de cet important problème, que nous rencontrerons d'ailleurs aussi difficile à résoudre dans le cas des moteurs.

Il importe que la température en un point de la machine ne dépasse pas une certaine valeur compatible avec la bonne conservation des isolants ; d'autre part, la puissance d'une machine n'est souvent limitée que par son échauffement et peut être augmentée par un bon refroidissement.

L'air est à peu près l'unique réfrigérant employé actuellement. Quatre modes de ventilation peuvent être utilisés :

1° L'air pris dans la salle des machines est rejeté ensuite dans cette même salle. En dehors des dispositifs prévus sur l'alternateur lui-même, aucune canalisation supplémentaire n'est nécessaire ;

2° L'air est pris dans la salle des machines et rejeté à l'extérieur au moyen de canaux ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° La disposition inverse : l'air est pris à l'extérieur au moyen de canaux et rejeté dans la salle des machines ;

4° L'air est pris et rejeté à l'extérieur au moyen de canalisations ;

5° Comme cas particulier, la ventilation peut avoir lieu en circuit fermé, l'air pris et rejeté à l'extérieur parcourant toujours le même cycle.

Les deux dispositifs les plus couramment employés sont le premier et le quatrième : la *ventilation naturelle* pour toutes les machines de moyenne puissance, la *ventilation méthodique* lorsqu'il s'agit de grosses unités.

La figure 297 résume schématiquement les divers systèmes de ventila-

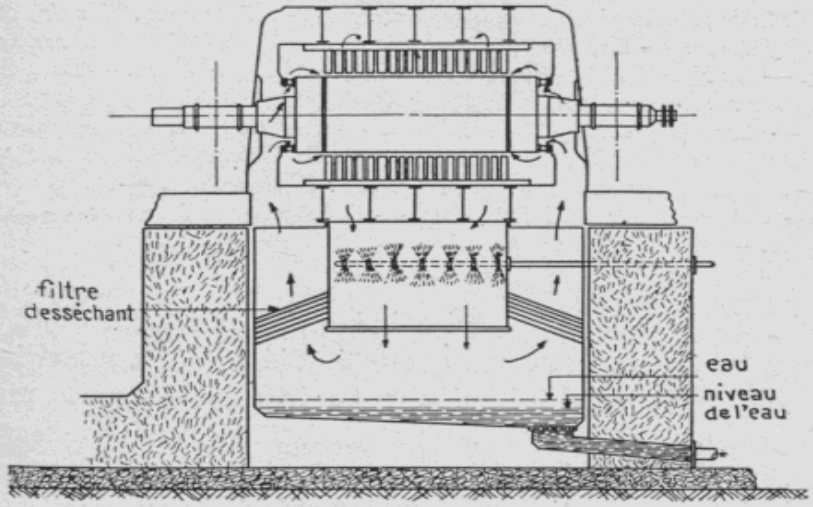


Fig. 298. — Ventilation par air refroidi par circulation d'eau.

tion. Nous avons vu précédemment un mode de réalisation de la ventilation en circuit fermé. La figure 298 représente une autre solution fréquemment appliquée en Amérique. L'air est refroidi par des jets d'eau, en sortant de l'alternateur. Cette eau tombe à la partie inférieure de l'installation et de là retourne à la bâche d'alimentation. Au-dessus de la nappe d'eau inférieure, on dispose un écran ou un fin tamis pour recueillir les poussières que pourrait contenir l'air et que les pulvérisations d'eau ont captées. Quant à l'air, une fois refroidi, il passe à travers des filtres desséchants avant de retourner, purifié et froid, à l'alternateur. Ce système est très efficace, la réfrigération très forte, et en même temps l'air, à chaque passage, se trouve débarrassé de toutes ses impuretés. Enfin, l'installation est très peu volumineuse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVIII

USINES GÉNÉRATRICES D'ÉLECTRICITÉ

Variations de la consommation des usines électriques. — Interconnexion des centrales. — Le load dispatcher. — Les centrales thermiques. — Description de la centrale de Gennevilliers. — La chaufferie. — Divers types de foyers mécaniques. — Disposition générale des divers services. — Les turbines à vapeur : turbines d'action ; turbines de réaction. — Les centrales hydroélectriques. — Les turbines hydrauliques : turbines radiales, turbines axiales, turbines mixtes. — Centrales chimiques ou centrales hydrauliques. — Appareillage électrique des centrales : sectionneurs. — Coupe-circuit haute tension. — Interrupteurs et disjoncteurs. — Interrupteurs à cornes. — Interrupteurs dans l'huile. — Conditions de fonctionnement et de commande.

L'énergie électrique est produite industriellement dans des centrales à vapeur ou hydrauliques. Nous avons étudié précédemment les générateurs mécaniques d'électricité qui y sont utilisés ; il nous faut maintenant dire quelques mots de l'organisation générale des usines électriques.

Une des difficultés les plus sérieuses que les ingénieurs aient eu à résoudre tient à l'*allure essentiellement variable de la consommation d'énergie électrique* non seulement au cours de l'année, mais aussi au cours d'une même journée. La figure 299 donne l'allure générale de la consommation d'une usine servant surtout à alimenter des réseaux d'éclairage. En hiver, le maximum a lieu de 4 à 6 heures du soir et le minimum vers 5 heures du matin. Le maximum absolu est atteint en novembre et le minimum en juillet et août. En général, dans le cours d'une journée, il y a deux maxima et deux minima, ne se présentant pas d'ailleurs aux mêmes heures de la journée en toute saison.

Si on représente par 100 la demande moyenne annuelle, la charge journalière varie de 40 à 160, avec des maxima qui peuvent atteindre 450 environ. Bien que ces nombres n'aient rien d'absolu, ils sont très expressifs et permettent de se rendre compte des conditions à remplir.

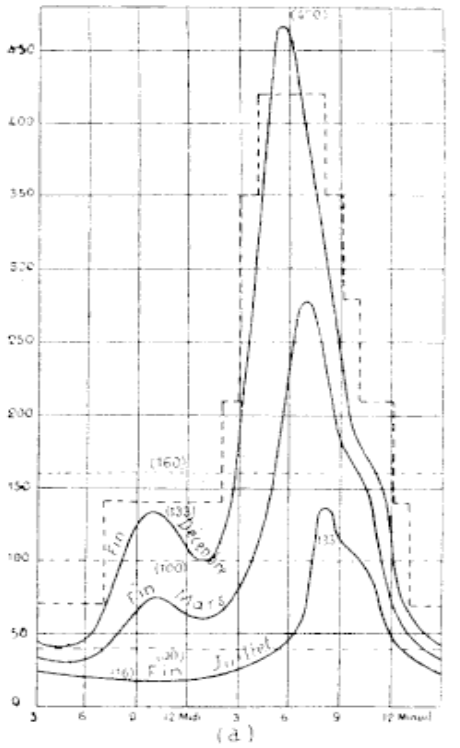
Au début de l'exploitation des centrales électriques, la solution adoptée a consisté à installer dans les usines des unités de petite puissance en nombre plus ou moins grand, que l'on met en service ou que l'on arrête suivant la demande du réseau. Il en résulte qu'en général, lorsque l'on pénètre dans une centrale un peu ancienne, on y voit rarement tous les groupes en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

action ; un certain nombre servent de groupes de réserve que l'on ne met en marche qu'aux heures de forte charge ; de plus, afin de faire face aux accidents ou aux arrêts nécessités par les réparations ou l'entretien, le nombre des groupes de réserve doit être prévu plus important.

Cette nécessité correspond à une immobilisation de capital, et à une abondance de personnel qui grèvent lourdement le budget de l'exploitation et les frais de premier établissement.

La nécessité de pouvoir mettre en circuit l'un ou l'autre des groupes générateurs et de réaliser l'interchangeabilité de toutes les machines complique encore l'organisation de l'usine. Il faut relier tous les alternateurs, par l'intermédiaire d'interrupteurs, à des barres omnibus basse tension auxquelles sont connectés les transformateurs, munis d'interrupteurs, du côté basse tension. On peut ainsi mettre en service les alternateurs et transformateurs que l'on désire. Du côté haute tension, une série d'interrupteurs permet de relier les transformateurs aux barres omnibus haute tension d'où partent les lignes de transport, également commandées par interrupteurs. On voit donc l'importance de l'équipement qu'il faut prévoir.



(à)

Fig. 299. — Allure de la consommation d'une usine électrique.

Dans les usines modernes, on tend de plus en plus, d'une part, à supprimer les groupes de réserve et, d'autre part, à donner aux unités la plus grande puissance possible afin de réduire les frais d'installation et d'améliorer le rendement mécanique. Ce résultat ne peut être atteint que par une modification profonde des principes mêmes de la distribution d'énergie qui est alors caractérisée par l'***intercommunication des diverses centrales***.

Dans cette nouvelle organisation, une centrale fonctionne à pleine charge ou pas du tout. Toutes les centrales desservant une vaste étendue de territoire sont réunies les unes aux autres et, grâce à cette mise en commun de leurs ressources, peuvent se prêter une aide mutuelle.

Un organisme central, le ***load dispatcher***, ou répartiteur du réseau, réuni par téléphone à toutes les centrales, est au courant des besoins

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

instantanés de toutes les lignes et leur donne satisfaction au mieux des disponibilités du moment en envoyant aux diverses usines les ordres nécessaires.

Cette méthode est particulièrement avantageuse lorsque le groupement englobe à la fois des usines hydrauliques et des centrales à vapeur. Celles-ci n'ont pas de souplesse de manœuvre, la mise en pression des générateurs de vapeur exige un temps assez long et leur arrêt ne peut être instantané. Au contraire, une simple manœuvre de vannes suffit pour mettre en fonctionnement les usines hydrauliques ; on peut même réaliser à distance leur mise en marche automatique. Dans ces conditions, les centrales à vapeur assureront la production du courant d'une façon permanente, les usines hydrauliques entrant en fonctionnement au fur et à mesure des besoins.

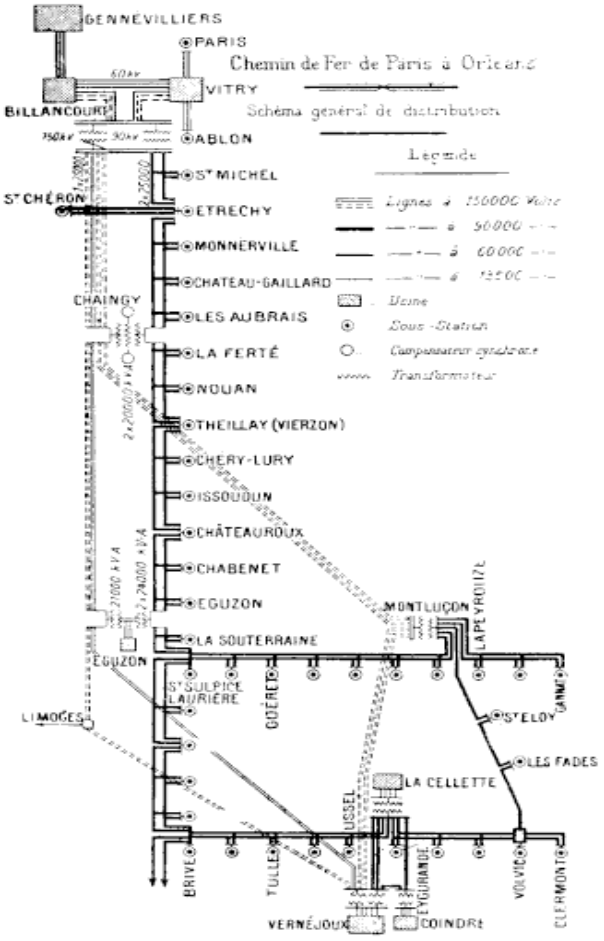


Fig. 300. — Schéma de l'électrification du chemin de fer d'Orléans.

Un exemple caractéristique de cette organisation est celui de la Southern California Edison Cº de Los Angeles, qui comprend un certain nombre d'usines à vapeur d'une puissance globale de 100 000 kilowatts et dix-sept usines hydro-électriques disséminées dans la Sierra Nevada et représentant une puissance totale de 120 000 kilowatts.

En France, on applique les mêmes principes dans les installations nouvelles. A titre d'exemple, nous reproduisons, figure 300, le schéma général de la distribution du courant pour l'électrification du chemin de fer d'Orléans (1 650 kilomètres de voies principales). Il montre les liaisons électriques établies entre les usines thermiques de la région parisienne (Gennevilliers, Vitry, Billancourt, etc.) et les usines hydrauliques construites sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la Creuse et dans le Massif central (Eguzon sur la Creuse, Coindre sur les deux Rhue, la Cellette sur le Chavanon, Vernéjoux sur la Dordogne).

Ces liaisons comprennent un double système de lignes à haute tension : l'une à très haute tension (154 000 volts) servant à transmettre de grandes quantités d'énergie à grande distance ; l'autre à tension moyenne (88 000 volts) répartissant l'énergie entre les diverses sous-stations de traction et les postes annexes de transformateurs statiques.

La jonction entre ces deux systèmes de lignes sera effectuée en cinq

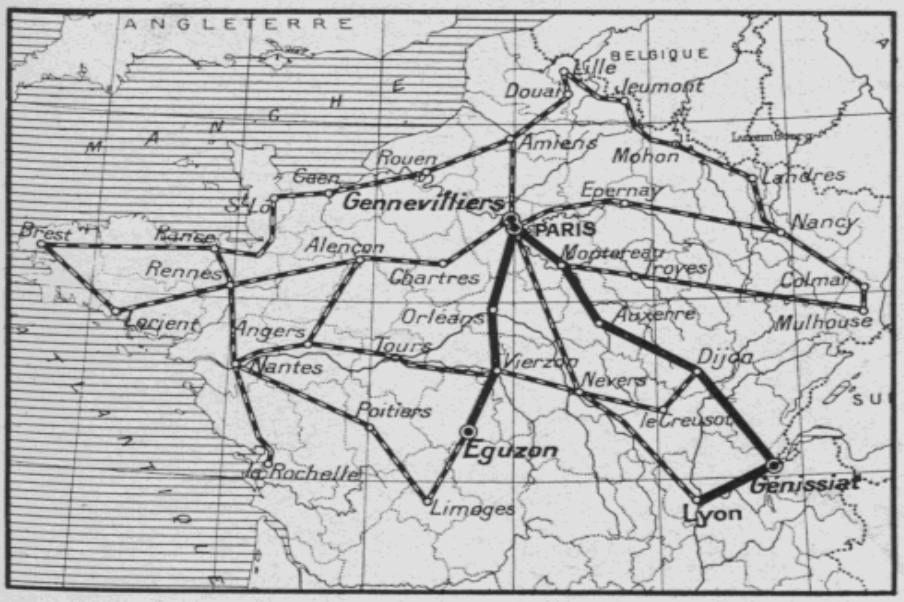


Fig. 301. — Carte montrant l'interconnexion entre l'usine de Gennevilliers et les grands réseaux français de transport d'énergie.

postes principaux : Chevilly, Chaingy, Eguzon, Montluçon et Vernéjoux.

La figure 301 montre l'interconnexion des grands réseaux français de transport d'énergie qui sera réalisée dans un avenir prochain.

* * *

A titre d'exemple de centrale thermique, nous décrirons sommairement la *centrale à vapeur de Gennevilliers*, qui constitue la plus puissante usine génératrice du monde, car sa puissance est de 200 000 kilowatts et sera portée ultérieurement à 320 000 kilowatts, en indiquant cependant pour chaque partie de l'installation les dispositifs réalisés dans les autres usines. Cette concentration de puissance en un seul lieu de génération de l'électricité est extrêmement avantageuse, puisque le prix d'installation par kilowatt est quatre fois plus petit pour une usine de 100 000 kilowatts

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que pour une petite usine de 10 000 kilowatts. De plus, la consommation de charbon est y deux fois plus faible et les dépenses d'exploitation six fois moindres (d'après M. Rauber).

L'usine de Gennevilliers produit du courant alternatif triphasé 50 pé-

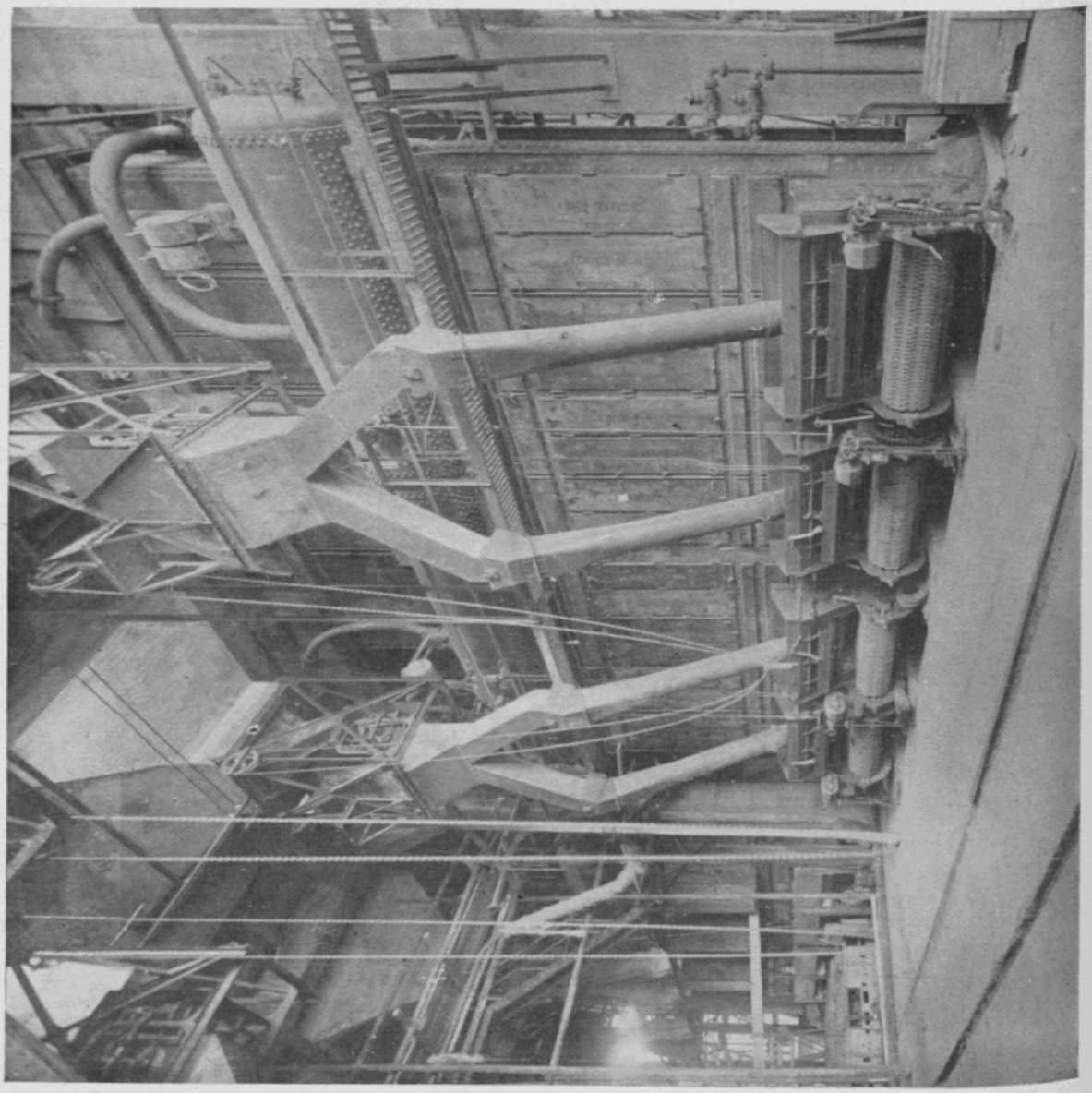


Fig. 302. — Chaudières Babcok et Wilcox dans la grande chaufferie de Gennevilliers.

riodes à 6 000 volts que des transformateurs élèvent à 60 000 volts pour le transport à distance. La consommation totale de charbon y est de 1 500 à 2 000 tonnes par jour, ce qui a imposé son emplacement sur les bords de la Seine et à proximité d'un réseau important de chemins de fer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une autre considération extrêmement importante militait également en faveur de cette solution : c'est celle de l'approvisionnement en eau.

En effet, pour que les turbines à vapeur aient un bon rendement, il faut que le vide au condenseur soit aussi élevé que possible, ce qui nécessite un refroidissement brusque de la vapeur à la sortie de la turbine, et par conséquent une consommation d'eau de refroidissement considérable. A Gennevilliers, 10 à 12 mètres cubes d'eau passent par seconde dans les condenseurs : c'est la moitié du débit de la Seine à l'étiage.

L'usine comprend trois bâtiments principaux accolés : la chaufferie, la salle des machines et la salle des tableaux de distribution.

La chaufferie comprend des chaudières capables de vaporiser 140 000 kilogrammes d'eau à l'heure et 180 000 kilogrammes en pointe, à une température de 223°, correspondant à une pression de 25 kilogrammes. Cette pression est de beaucoup supérieure à celles auxquelles travaillaient les chaudières il y a quelques années et qui n'étaient que de 15 à 16 kilo-

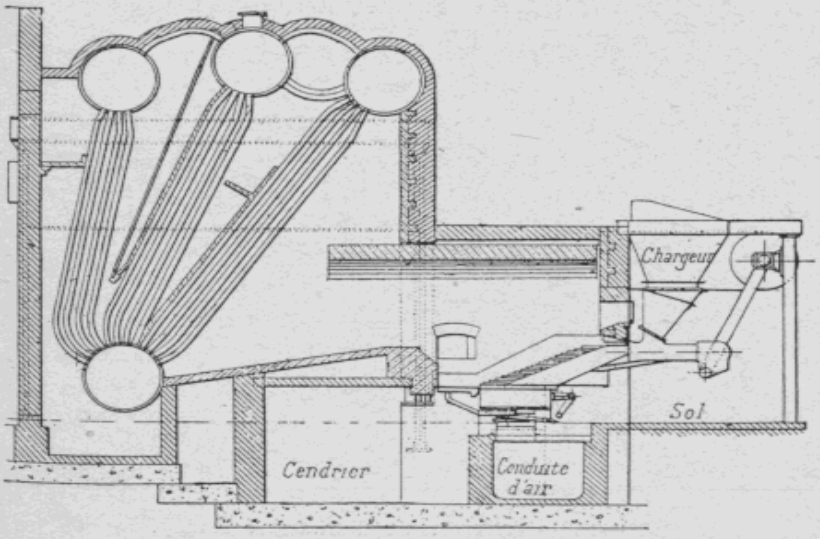


Fig. 303. — Dispositif d'ensemble d'un chargeur Taylor monté sur une chaudière Sterling.

grammes. D'ailleurs, il semble que l'on continuera dans cette voie et que, dans un avenir prochain, on réalisera des chaudières travaillant à 50 ou 60 kilogrammes de pression, ce qui aura pour conséquence de réduire notablement l'encombrement des installations, tout en augmentant leur rendement.

Un tel résultat n'est obtenu que grâce à l'emploi de foyers mécaniques à tirage forcé. La figure 302 montre un groupe de chaudières équipées avec des foyers mécaniques ; une trémie placée à la partie supérieure de l'installation est alimentée en charbon. Le charbon descend par un conduit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la grille constituée par une sorte de large chaîne sans fin qui tourne lentement et sur laquelle le combustible se répartit en une couche uniforme. La figure 303 permet de se rendre compte du fonctionnement de ces appareils, dont il existe de nombreux modèles. Ils ont le grand avantage de ne pas nécessiter un nombreux personnel de chauffeurs expérimentés et, d'autre part, en faisant varier la vitesse de rotation de la grille, l'arrivée du charbon et la ventilation, on peut brûler des qualités très diverses de charbon et régler l'allure de la chauffe.

Certains chargeurs dits à ***alimentation supérieure*** fonctionnent, différemment, bien que reposant sur le même principe. La figure 304 montre

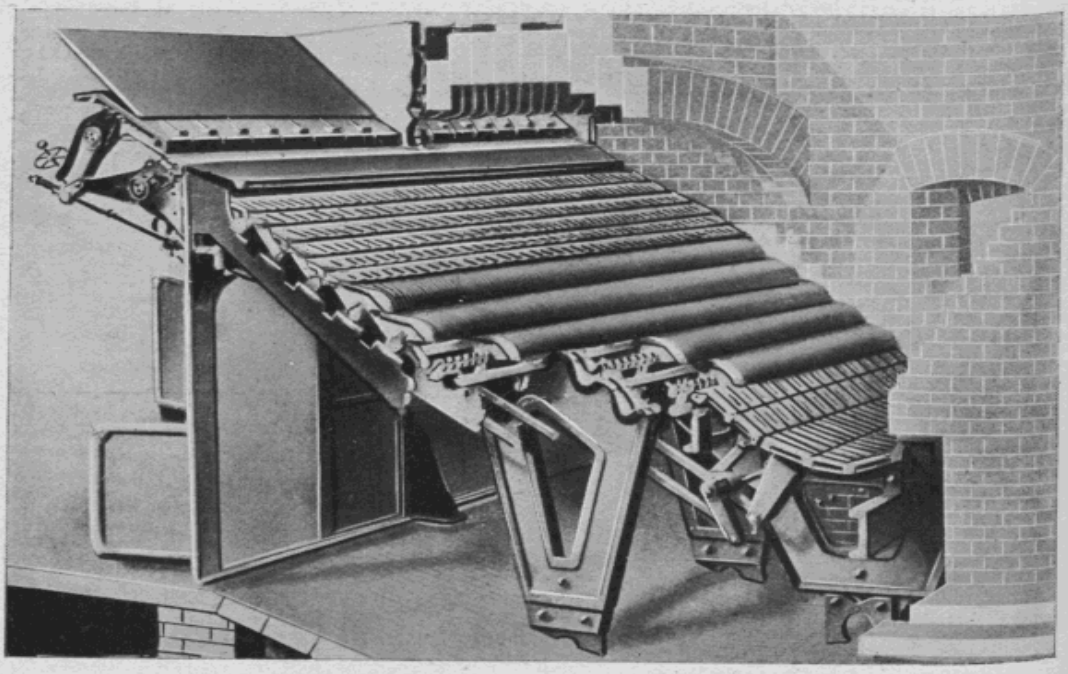


Fig. 304. — Vue transversale d'un foyer Roney.

une coupe du foyer Roney. Il est composé d'une série de barres horizontales, munies de dents, qui constituent la surface sur laquelle brûlera le charbon, et qui forment des étages successifs dont l'ensemble a une pente d'environ 30° vers la partie arrière du foyer. Le charbon est déversé à la partie avant de la grille par un mouvement de bascule. Les barres de la grille s'inclinent en même temps, ce qui facilite l'introduction du charbon et sa descente d'un étage à l'autre. Finalement, les cendres tombent dans la partie terminale du foyer. La distillation du charbon se produit sur les premiers gradins voisins de l'entrée et la voûte reste parallèle à la grille.

Dans d'autres systèmes dits à ***alimentation par en dessous***, les grilles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont fixes, disposées en escalier, et le charbon y est refoulé par des pistons entre les éléments de chacune des grilles.

C'est le cas pour les chargeurs Taylor, Kolemo, Jones, etc. Dans le char-

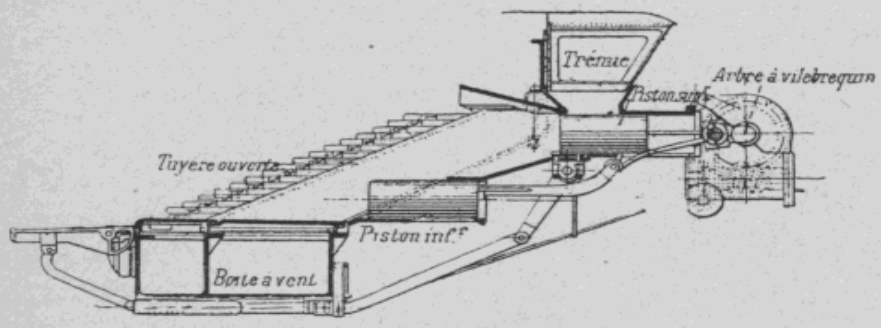


Fig. 305. — Dispositif d'un chargeur Taylor.

geur Taylor, le lit de combustion est composé par des tuyères rectangulaires en fonte disposées en escalier. Entre deux rangées de tuyères se trouvent deux pistons (fig. 305) qui agissent simultanément sous l'action d'un arbre à vilebrequin placé sur la façade de la chaudière. A la base de la boîte à vent se trouvent des plaques à bascule mues par levier et servant

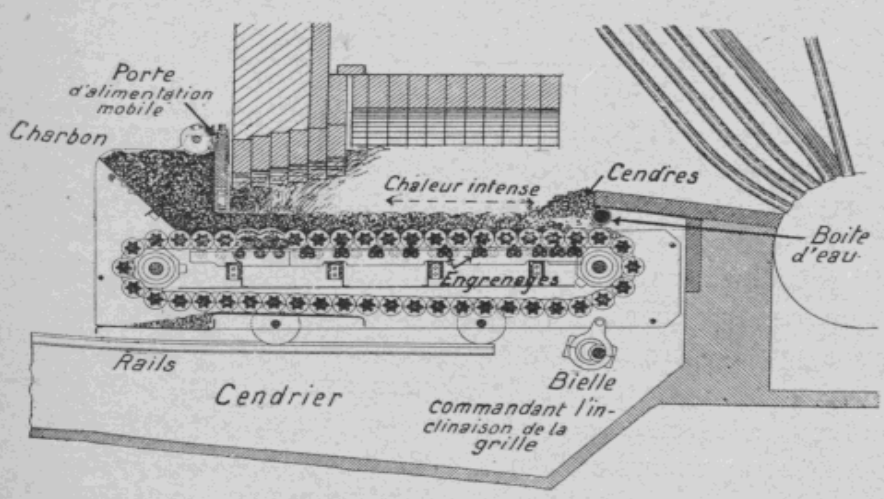


Fig. 306. — Coupe schématique d'un foyer mécanique Stoker.

à l'évacuation des cendres. Le lit de combustion est formé de trois couches : le charbon neuf, le charbon en voie de cokéification, enfin le charbon en ignition qui forme la couche supérieure au travers de laquelle passent les hydrocarbures qui se dégagent. Un autre genre de foyer mécanique est représenté figure 306.

Les chaudières sont de deux types, dans la description desquels nous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n'entrerons pas, car nous sortirions du cadre d'un volume d'électrotechnique; disons seulement, afin de fixer l'ordre de grandeur de l'installation, que cinq d'entre elles (Babcock et Wilcox grille à chaîne) peuvent vaporiser chacune 40 000 à 53 000 kilogrammes d'eau à l'heure; les autres (Sterling, à foyer incliné), également au nombre de cinq, vaporisent 60 000 à

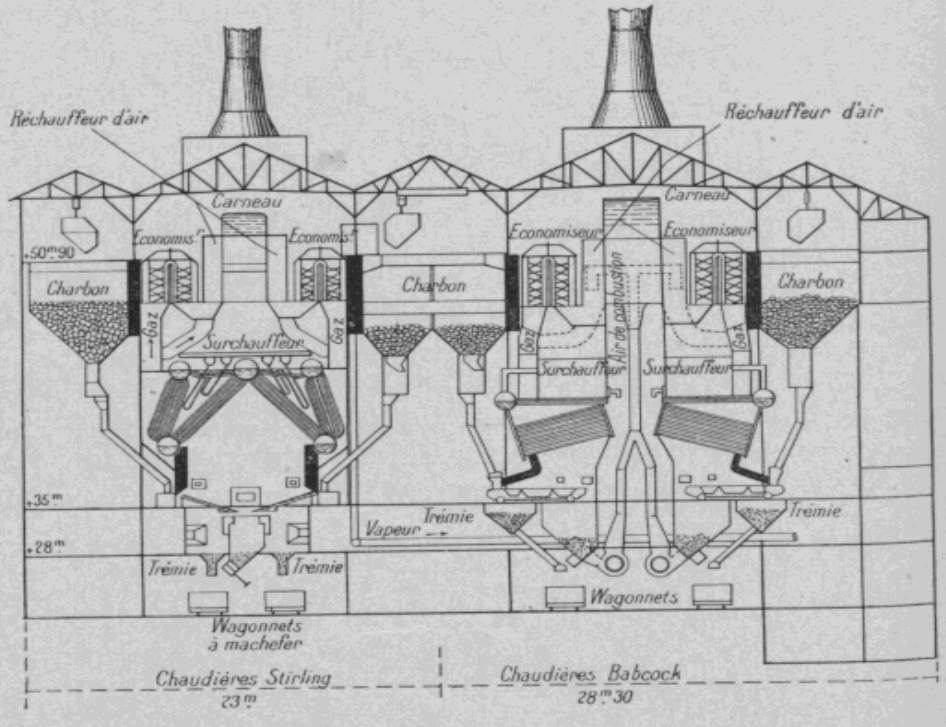


Fig. 307. — Coupe de la chaufferie de la centrale de Gennevilliers.

80 000 kilogrammes d'eau à l'heure, ce qui correspond à 30 à 40 kilogrammes de vapeur par mètre carré de chauffe.

La figure 307 montre une coupe générale de l'usine. Dans la salle des chaudières, on voit nettement les foyers avec les grilles mécaniques de types différents, les chaudières tubulaires surmontées de leurs surchauffeurs et des économiseurs utilisant la chaleur résiduelle des gaz du foyer pour élever la température de l'eau d'alimentation de la chaudière et également la température de l'air alimentant les foyers, afin d'obtenir la meilleure utilisation de l'énergie du combustible. A la partie inférieure, deux galeries parcourues par des wagonnets permettent l'évacuation des scories et mâchefers, dont le poids atteint 400 tonnes environ par jour.

Parallèlement à la chaufferie se trouve le grand hall des machines, renfermant les groupes électrogènes mus par turbines à vapeur (fig. 308 et 309).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les ***turbines***, à peu près exclusivement employées pour actionner

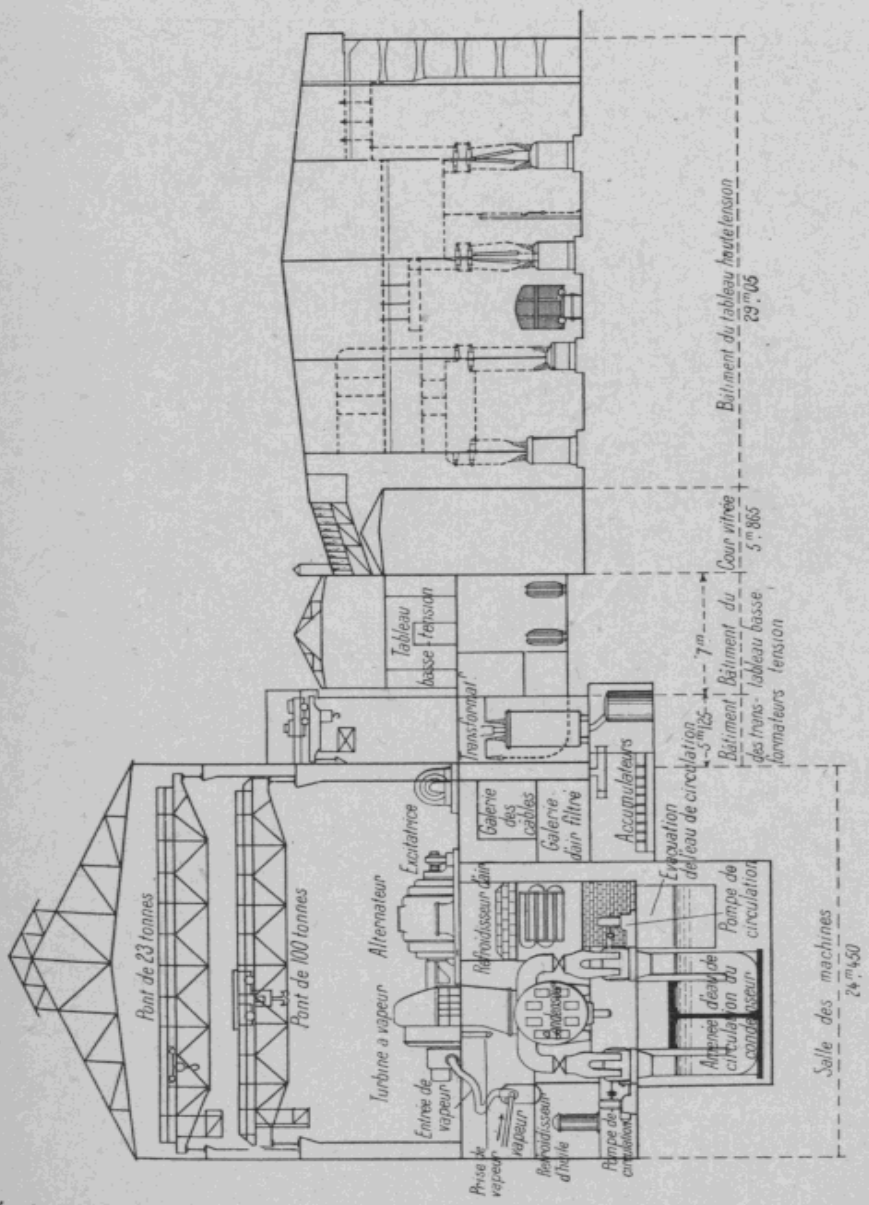


Fig. 308. — Coupe de la salle des machines et de la salle du tableau de la centrale de Gennevilliers.

les générateurs dans les usines électriques, sont de deux types différents

1° Les *turbines d'action* ou *d'impulsion*, dans lesquelles la vapeur se détend entièrement dans des aubages *fixes*.

2° Les *turbines à réaction*, dans lesquelles la vapeur se détend soit entièrement dans des aubages *mobiles*, soit en partie dans des aubages fixes et en partie dans des aubages mobiles.

CONSERVATOIRE DES ARTS ET METIERS BIBLIOTHEQUE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous allons donner rapidement les caractéristiques de ces deux systèmes et le principe des appareils qui ont été réalisés.

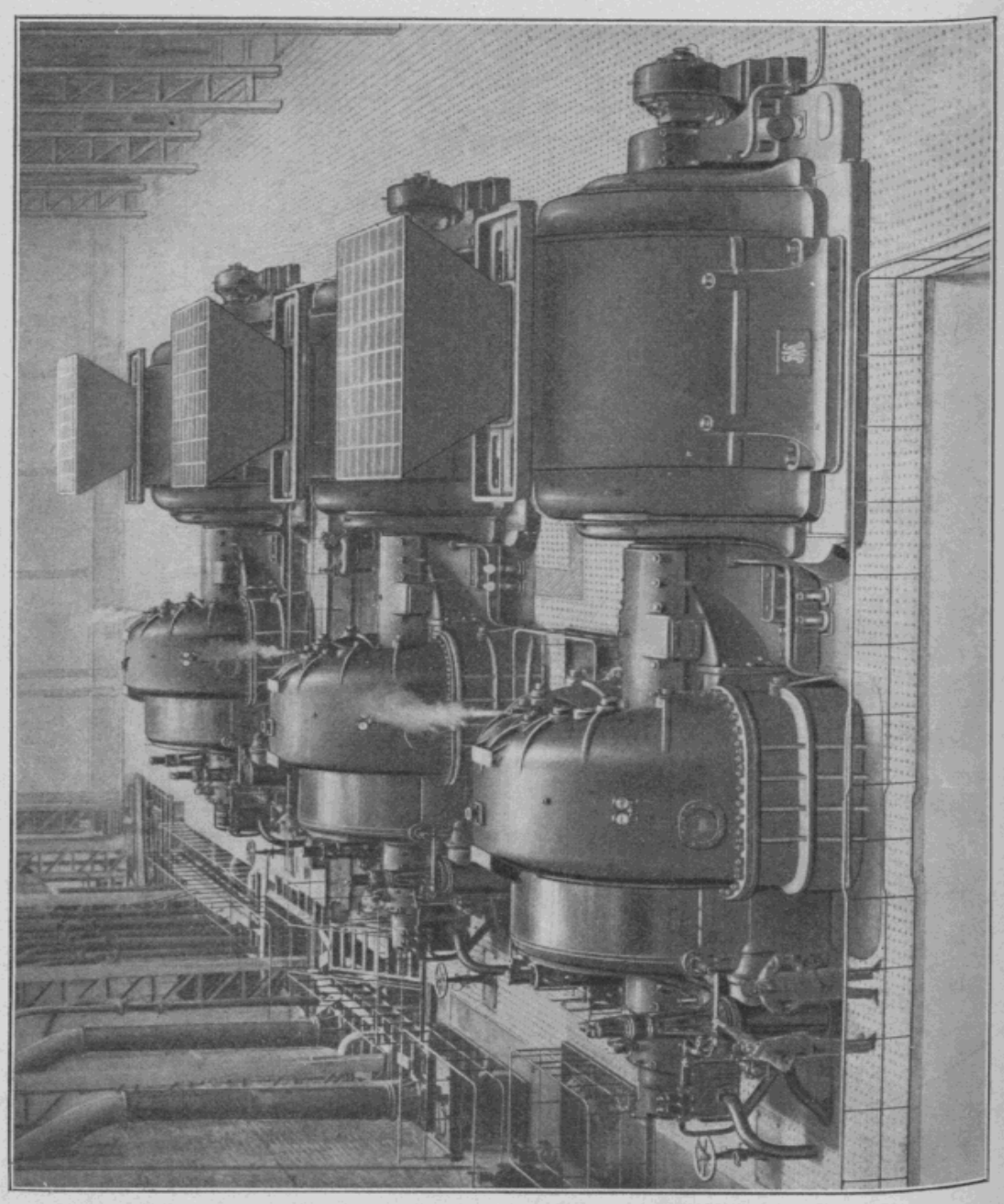


Fig. 309. — Vue d'ensemble de la salle des turbo générateurs de la centrale de Gennevilliers.

Turbines d'action. — La figure 310, *a*, donne une coupe schématique de la turbine de *Laval*. La vapeur, venant de la chaudière, se détend *entièrement* jusqu'à la pression du condenseur dans la tuyère T, acquérant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une vitesse de 1 200 mètres par seconde environ quand la pression dans la chaudière est de 10 à 12 kilogrammes. Le jet de vapeur, frappant les aubes de la roue mobile, est dévié, et il en résulte un couple qui fait tourner la roue dans le sens de la flèche.

On démontre que, pour qu'une roue à action travaille dans les conditions théoriques les plus favorables, sa vitesse périphérique doit être la moitié de la vitesse de la vapeur, c'est-à-dire atteindre, dans le cas actuel,

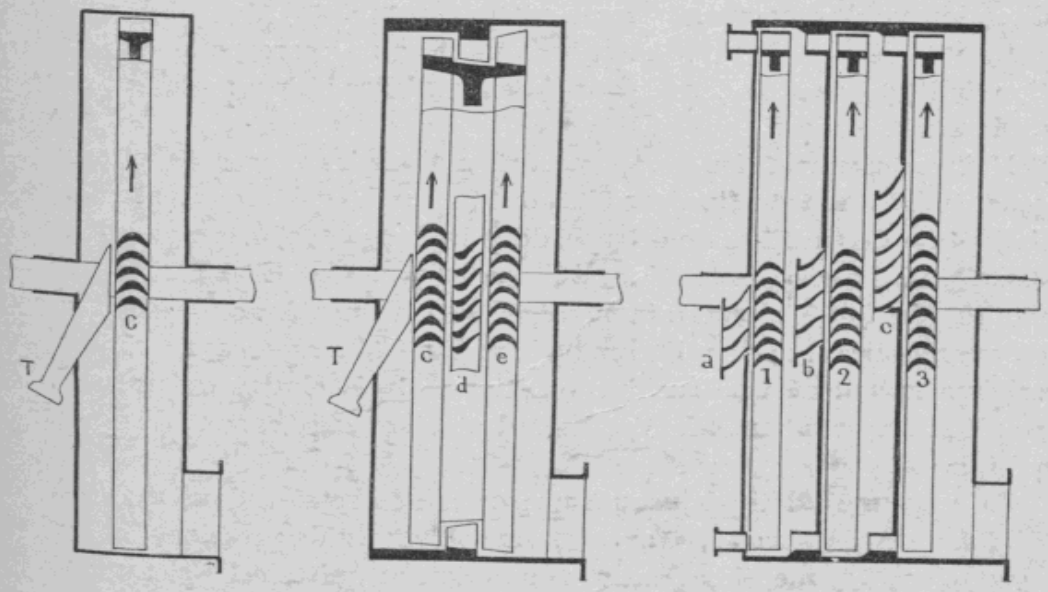


Fig. 310.

a. Turbine d'action à une seule roue.

b. Turbine d'action à deux étages de vitesse.

c. Turbine d'action à trois chutes de pression.

600 mètres par seconde ; en tenant compte des pertes par frottement, la vitesse périphérique peut s'abaisser à 400 mètres. Ce chiffre est encore considérable.

Malgré cela, de Laval construisit de petites turbines à une seule roue tournant à de très grandes vitesses (10 000 à 30 000 tours par minute) et qui donnaient de bons résultats économiques ; les turbines de ce genre ne peuvent cependant être facilement exécutées pour des puissances supérieures à 300 CV. Aussi a-t-on cherché à réduire la vitesse de rotation afin de permettre l'entraînement direct des appareils à actionner, et en même temps éviter les difficultés de construction considérables, malgré la simplicité théorique de la turbine d'action.

On y est arrivé de deux façons différentes, en fractionnant soit la *chute de vitesse*, soit la *chute de pression*.

Si l'on empêche de tourner à sa vitesse normale la partie mobile d'une turbine à action, la vapeur quittera les aubages mobiles avec une vitesse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résiduelle susceptible d'être utilisée sur une deuxième roue qui recueillera le reste de l'énergie motrice.

Une turbine du type *à étages de vitesse* comprendra donc une série d'ajutages *fixes* détendant *en une seule fois* la vapeur à la pression de l'échappement ; celle-ci passe ensuite dans une série de roues à aubes mobiles calées sur le même arbre et entre lesquelles sont intercalées des séries d'aubages directeurs fixes ne donnant uniquement à la vapeur que la direction voulue pour agir sur la roue suivante.

La vitesse périphérique des roues mobiles ne correspond qu'à la fraction de l'énergie abandonnée sur chacune d'elles et, par suite, est considérablement réduite.

Malheureusement, les pertes produites dans les étages de vitesse ainsi constitués sont très élevées ; elles ont fait rejeter presque complètement l'adoption de turbines de ce type, dont la figure 310, *b*, donne le principe.

On utilise alors des turbines *à étages de pression*. Elles sont constituées par la réunion d'un certain nombre de turbines à action dont chaque disque mobile est calé sur l'arbre de la machine. La figuure 310, *c*, représente schématiquement une turbine d'action à trois chutes de pression. Les roues 1, 2, 3 sont mobiles, et les aubes fixes, *a*, *b*, *c*, sont disposées à la périphérie.

La vapeur se détend jusqu'à une certaine pression dans une couronne d'aubes ou d'ajutages, traverse, sans changer de pression, les aubages mobiles d'une roue à action et quitte celle-ci avec une vitesse théoriquement nulle ; elle parcourt ensuite une autre série d'ajutages où elle se détend à une pression inférieure à la première, pour acquérir une certaine vitesse, et la nouvelle quantité d'énergie, transformée en énergie cinétique, est reçue par une deuxième roue à action, et ainsi de suite pour tous les nouveaux passages.

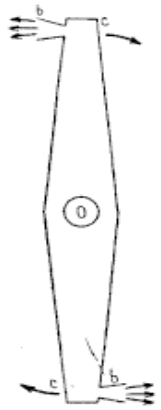


Fig. 311. Principe de la turbine à réaction.

Chaque roue à action dont il est question plus haut est donc enfermée dans une chambre où la pression reste constante. La pression décroît d'une chambre à l'autre (puisque entre chacune d'elles se trouvent les organes fixes détendeurs), mais sans diminuer régulièrement ; la différence de pression peut atteindre 2,5 atmosphères entre les premières, et seulement 0,1 à 0,6 entre les dernières, pour une pression initiale de 10 atmosphères et dix étages de pression. La vitesse de la vapeur ne diminue pas non plus en proportion du nombre d'échelons, et si, avec une roue, la vitesse périphérique est de 600 mètres, avec dix roues, elle sera encore de 130 mètres.

Les turbines Rateau, Zoelly sont des turbines de ce type. Enfin, on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut combiner étages de vitesse et étages de pression, comme dans les turbines Curtiss et A. E. G.

Les ***turbines à réaction***, dont la turbine Parsons est le type, fonctionnent sur le même principe que le tourniquet hydraulique (fig. 311).

La vapeur entre en O à travers l'axe de rotation et sort par des ajutages *b* en se détendant depuis la pression de la chaudière jusqu'à celle du condenseur. Il se produit une réaction sur la paroi *c* opposée à l'ajutage, et cette poussée tend à faire tourner la roue dans le sens de la flèche.

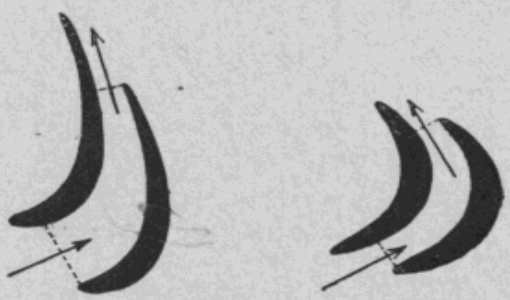


Fig. 312.

Aubage ayant une section d'écoulement allant en se rétrécissant.

Aubage présentant une section d'écoulement constante.

On ne réalise pas industriellement de turbines à une seule détente, et les turbines à réaction comportent toutes un grand nombre de chutes de pression. Elles sont analogues comme construction aux turbines à chutes de pression, mais les aubages des roues mobiles, au lieu d'avoir une section d'écoulement constante, ont la forme représentée figure 312, donnant une section allant en se rétrécissant.

Dans ces conditions, les jets de vapeur qui sortent des aubages fixes (tels que *a*, *b*, *c*, fig. 310), étant déviés par les aubes mobiles, exercent une poussée comme dans les turbines à action, mais, en plus, la section des aubes (1, 2, 3, fig. 310) allant en *décroissant*, il y a nécessairement *accroissement de vitesse*, et par conséquent *détente*.

Il en résulte, comme dans le cas théorique de la figure 311, une poussée non équilibrée qui ajoute son action à celle de la poussée précédente. La turbine se met donc à tourner par impulsion et par réaction.

On peut résumer comme suit les caractéristiques des deux types de turbines :

Turbine d'action.	*Turbine à réaction.*
Détente totale dans la partie *fixe*, entraînant :	Détente totale ou partielle dans la partie *mobile*, entraînant :
Égalité de pression sur les deux faces des roues mobiles.	Inégalité de pression sur les deux faces des roues mobiles.
Pas de poussée sur l'axe.	Poussée sur l'axe qu'il faut équilibrer.
Pas de fuite sur le pourtour de la roue.	Fuites sur le pourtour de la roue, qu'on réduit en diminuant le jeu entre la roue et l'enveloppe.
Section d'entrée de la roue mobile égale à la section de sortie.	Section d'entrée de la roue mobile plus grande que la section de sortie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 313 et 314 montrent comment varient les pressions et les volumes dans les deux types de turbines.

A l'usine de Gennevilliers, les turbines sont du type Zoelly, à dix chutes de pression. Les roues ont environ $2^m,80$ de diamètre, ce qui, à la vitesse de rotation de 1 500 tours par minute, correspond à une vitesse tangentielle d'environ 220 mètres par seconde. L'ensemble de la partie mobile pèse environ 18 tonnes et le corps de la turbine 14 tonnes. La vapeur arrive à la pression de 22 ki-

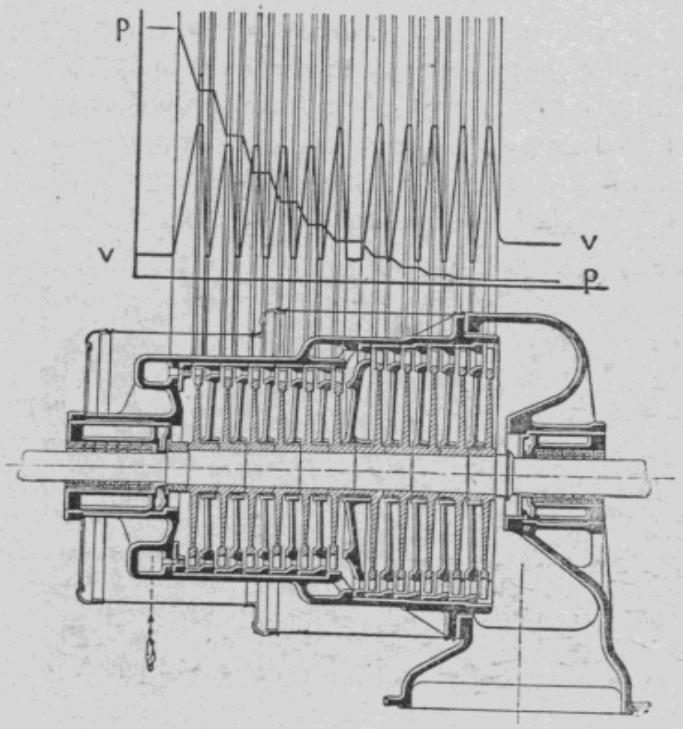


Fig. 313. — Turbine d'action Rateau.

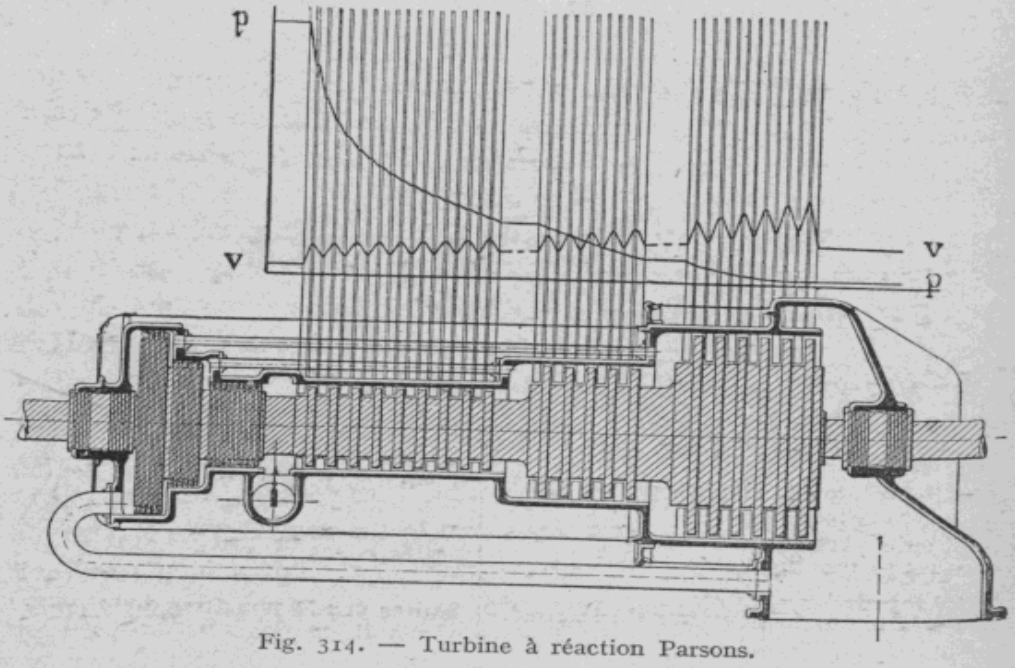


Fig. 314. — Turbine à réaction Parsons.

logrammes et sort par la culotte d'échappement qui la mène au condenseur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

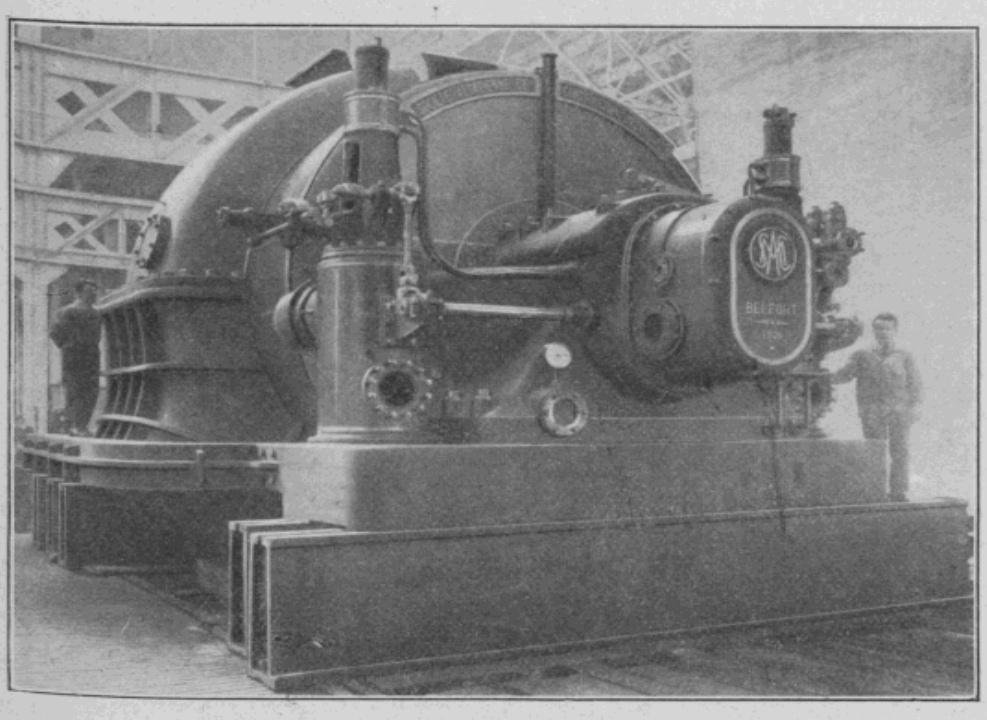


Fig. 315. — Une des turbines de l'usine de Gennevilliers.

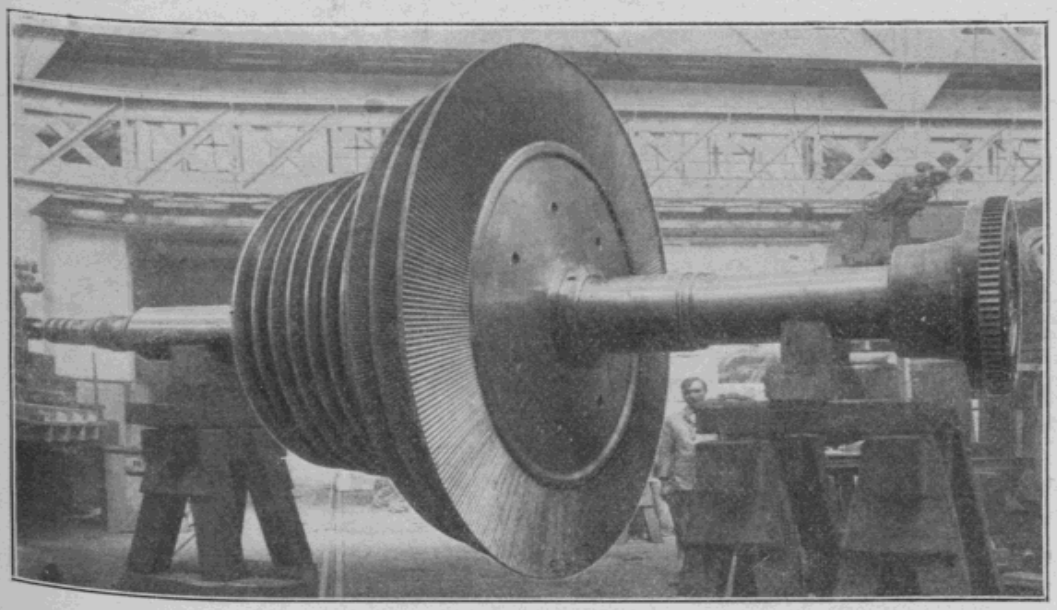


Fig. 316. — Vue du rotor d'une des turbines de Gennevilliers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette culotte d'échappement, en deux pièces de fonderie, pèse 70 tonnes.

La figure 315 montre la vue générale de la turbine ; la figure 316 permet d'apprécier l'importance du rotor.

Nous ne dirons rien du système de régulation, ni des installations de condensation de la vapeur d'échappement utilisées par la récupération de la chaleur ; elles sortent des limites d'un ouvrage d'électrotechnique.

L'accouplement de la turbine à l'alternateur qu'elle entraîne est assuré

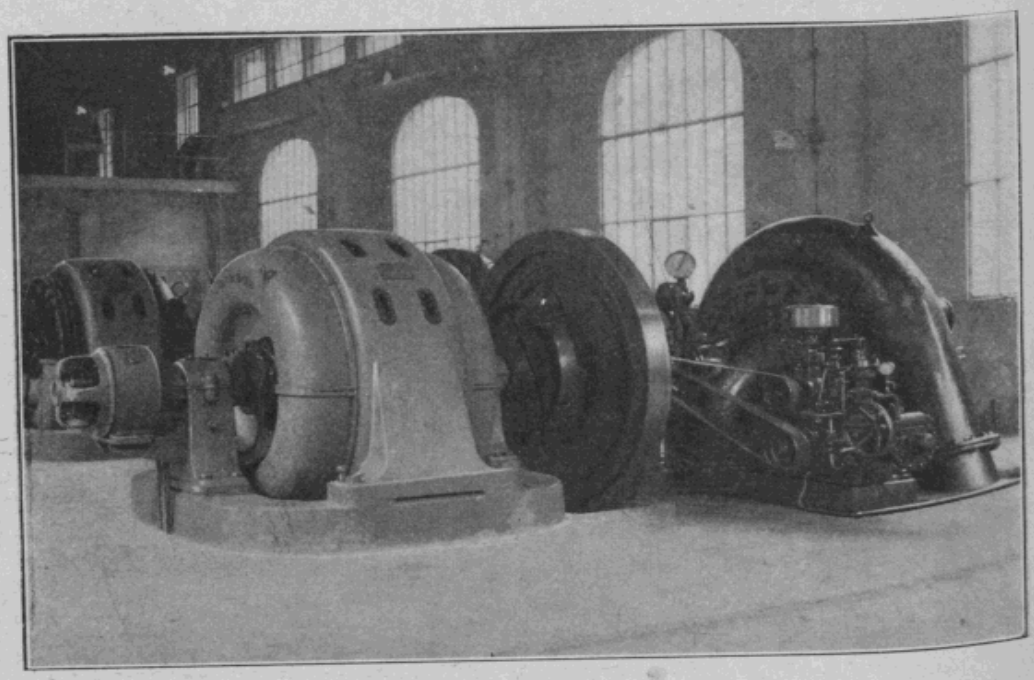


Fig. 317. — Vue d'une centrale de moyenne puissance.

par un manchon rigide dont le pourtour, garni de dents, permet, par l'adjonction d'un cliquet, de tourner d'une petite fraction de tour la turbine lors des visites de celle-ci.

Nous avons décrit au chapitre XVII les alternateurs qui produisent le courant à 6 000 volts à l'usine de Gennevilliers. Nous n'y reviendrons donc pas ici. Signalons cependant une disposition qui ne se rencontre pas en général dans les centrales de moindre importance.

Comme il n'aurait pas été possible d'établir des interrupteurs capables de couper 6 000 à 8 000 ampères sous 6 000 volts, ce qui est le courant normal produit par un des alternateurs de 40 000 kilowatts (qui peuvent même fournir jusqu'à 55 000 kilowatts), chaque alternateur est directement couplé, sans aucun organe interposé, à des transformateurs qui élèvent la tension à 60 000 volts, qui est la tension de transmission aux sous-stations. Toutes les coupures et manœuvres se font alors sur la haute tension et ne présen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tent plus alors aucune difficulté. Les transformateurs ont une puissance de 15 000 kilovolts-ampères. Nous verrons ultérieurement leur description (chapitre XIX). Les transformateurs sont groupés par trois et placés parallèlement à la salle des machines dans un sous-sol au-dessous

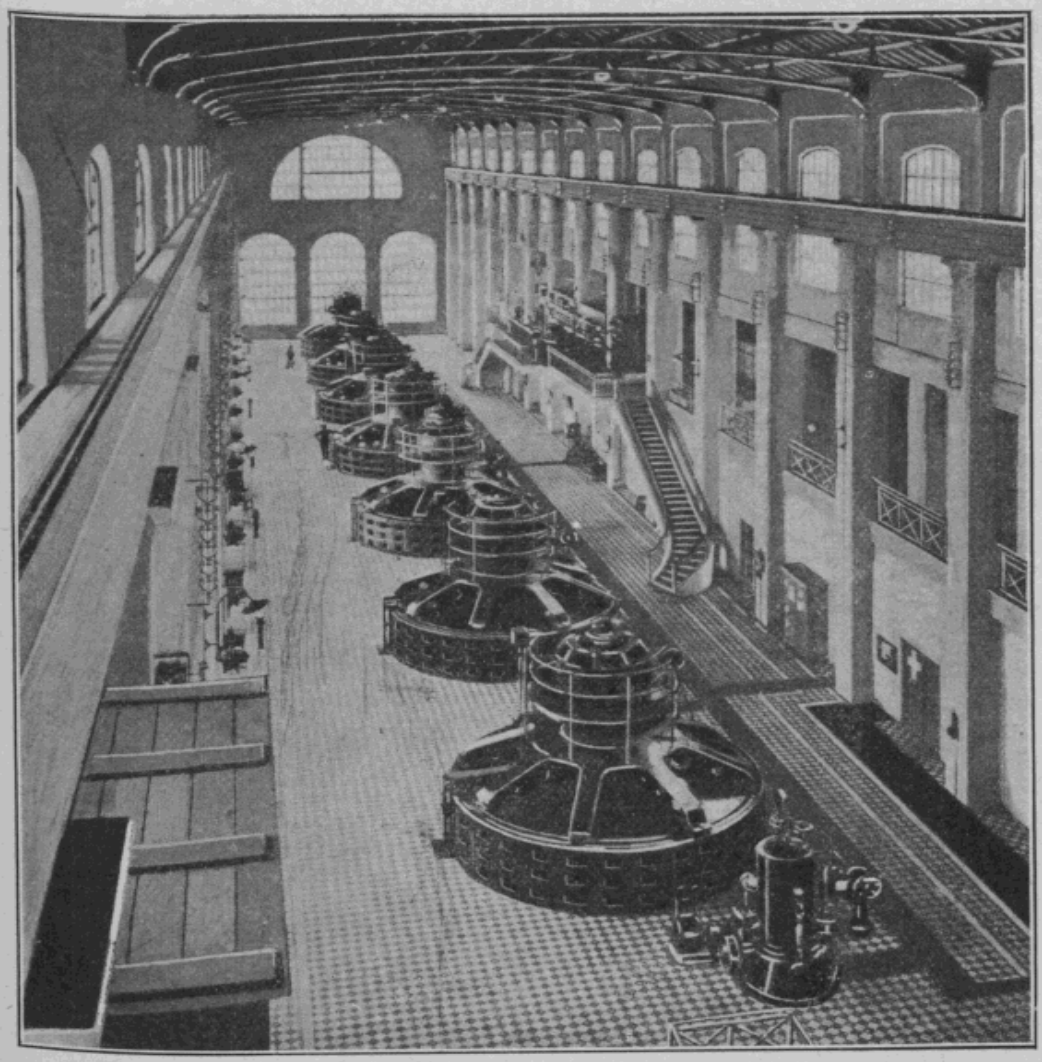


Fig. 318. — Usine de l'Énergie électrique de la Basse-Isère, à Beaumont-Monteux (Drôme). Salle des machines.

du plancher de la salle. Chacune des cellules de transformateur est munie d'une ouverture pour l'évacuation des fumées en cas d'incendie.

Le tableau de l'usine, appelé tableau ***basse tension***, est situé dans une galerie longeant la salle des machines, mais à un niveau plus élevé que cette dernière. Il comporte un certain nombre de transformateurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

abaisseurs de tension qui ramènent à 3 000 volts pour les services auxiliaires la tension du courant de 60 000 volts ; les appareils de mesure et de commande à distance de l'appareillage à 60 000 et à 3 000 volts, ainsi que les tableaux de distribution du courant continu à 500 volts et des

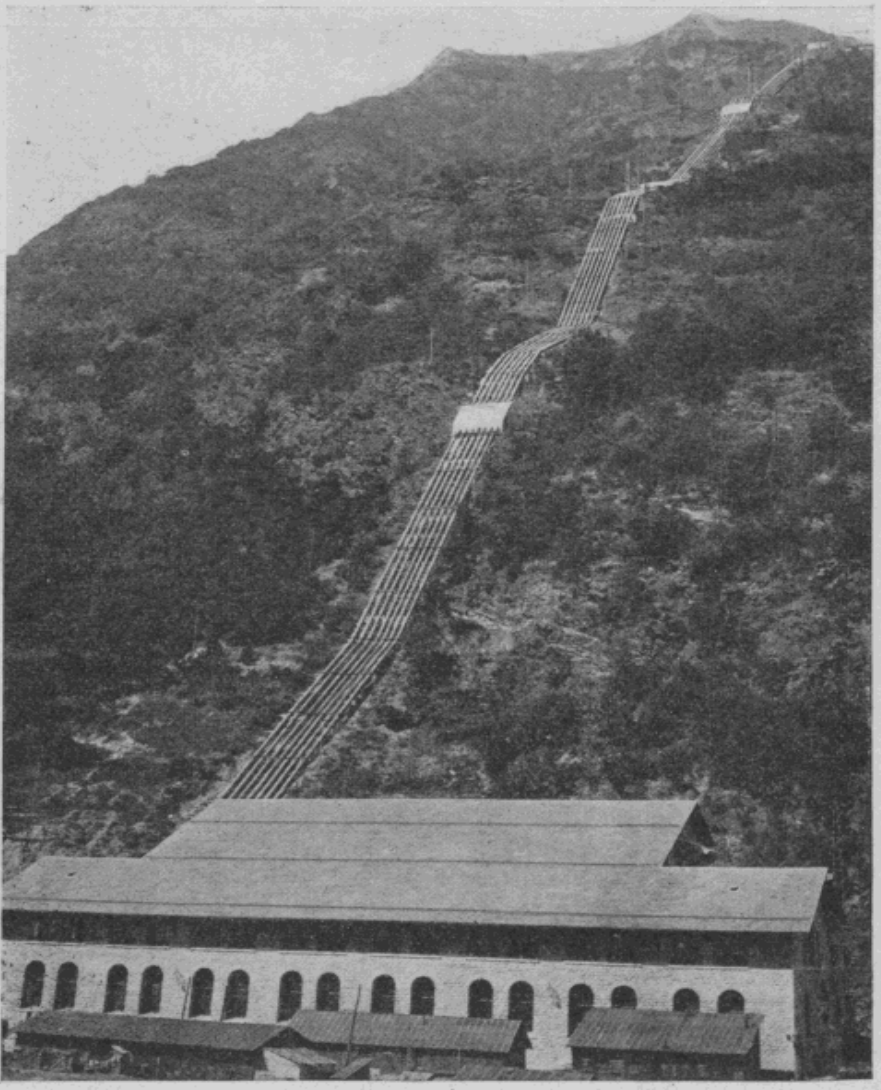


Fig. 319. — Une centrale hydro-électrique à grande chute de pression.

circuits à courant alternatif à 220 volts pour les moteurs auxliiaires et l'éclairage.

Enfin, un dernier bâtiment abrite les appareils haute tension. Bien que ceux-ci soient du type « extérieur », ils sont placés dans ce vaste hall. Ils comprennent des interrupteurs, sectionneurs, disjoncteurs haute tension, sur lesquels nous reviendrons en détail à la fin de ce chapitre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

L'installation d'une *centrale hydro-électrique* nécessite l'établissement préalable d'ouvrages d'art souvent fort considérables, et la partie génie civil est au moins aussi importante que la partie génération de l'énergie proprement dite.

Le principe général des usines hydrauliques est très simple : on convertit en énergie électrique l'énergie potentielle d'une masse d'eau passant d'un certain niveau à un niveau inférieur. C'est la pesanteur qui joue donc le rôle principal, mais, si l'on se rappelle qu'il existe des usines fonctionnant avec toutes les différences de niveau, depuis 3 à 4 mètres jusqu'à

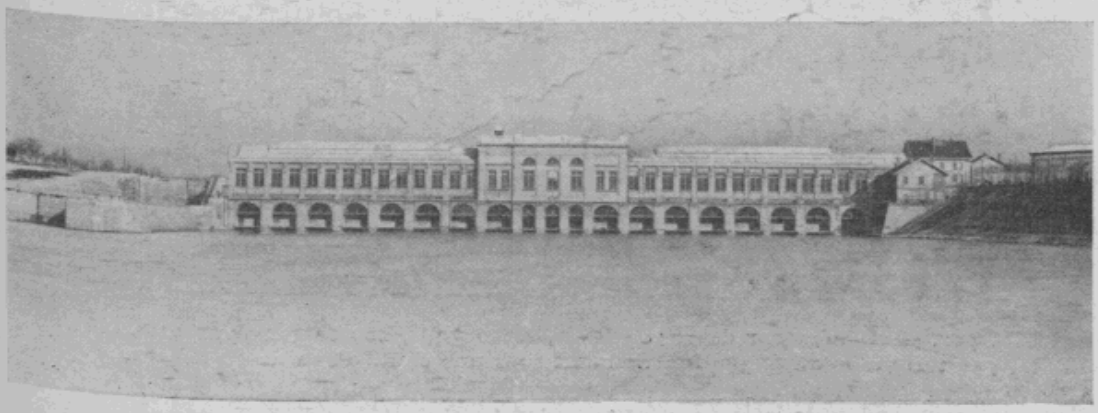


Fig. 320. — Une centrale hydro-électrique à faible chute de pression.

1 000 mètres et plus, on conçoit que les réalisations pratiques soulèvent des problèmes très différents. Quand la dénivellation est faible, le débit doit être considérable, tandis que, si elle est très grande, la consommation en eau est plus faible, à puissance égale.

En tous les cas, il faut assurer à l'usine une alimentation en eau suffisante en toute saison pour son fonctionnement normal, ce qui nécessite tout d'abord l'étude hydrologique complète de la rivière ou du torrent que l'on veut utiliser, puis ensuite l'établissement de barrages, de lacs artificiels constituant des réserves destinées à compenser l'insuffisance du débit naturel pendant les périodes de sécheresse, enfin la construction des conduites ou des canaux d'amenée de l'eau à l'usine proprement dite. Quand la dénivellation utilisée est peu importante et le débit considérable, l'amenée d'eau se fait souvent à l'air libre. Quand la dénivellation est plus grande, on utilise alors des conduites métalliques. Les figures 319 et 320 montrent ces deux types d'installation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les ***turbines hydrauliques*** sont de plusieurs types. On peut les classer de deux façons différentes.

Par analogie avec les turbines à vapeur, on peut les diviser en *turbines à action pure* dans lesquelles l'eau passe sans variation de pression dans le

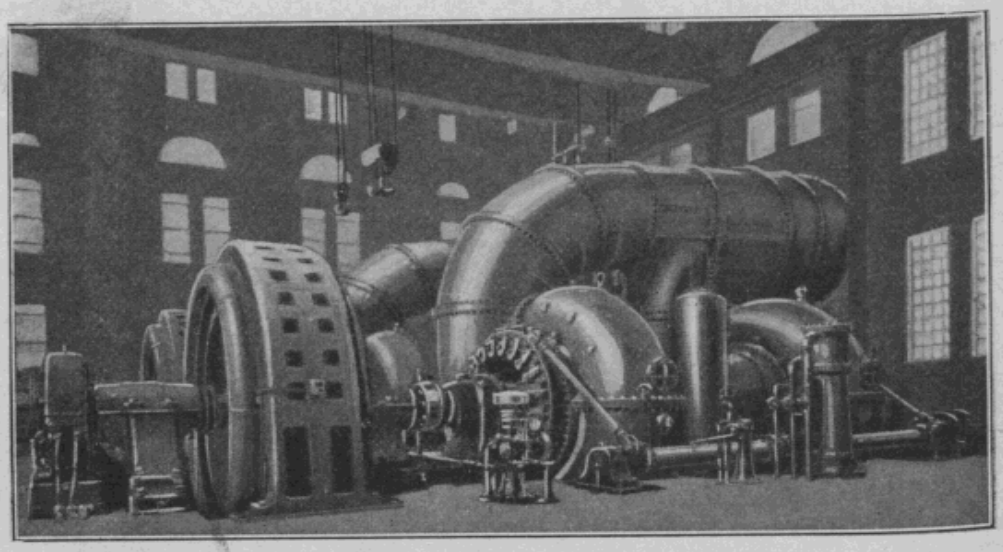


Fig. 321. — Générateur de 19 500 KVA, 4 000 volts, 200 tours par minute, mû par turbine hydraulique fonctionnant sous une chute d'eau de 50 mètres.

canal de la roue mobile, en *turbines à réaction pure* dans lesquelles l'eau passe à travers le canal avec une pression variable (très rarement réalisé), et en *turbines mixtes* où la pression et la vitesse varient simultanément.

On préfère les ranger en ***turbines radiales***, centrifuges ou centripètes, et en ***turbines axiales*** ou ***parallèles***.

* * *

La figure 322 représente schématiquement une turbine *Fourneyron* ***radiale centrifuge***. Au fond d'une chambre d'eau se trouve fixée une cuvette en fonte dont le bas est occupé par la turbine proprement dite AB. L'eau sort ensuite de l'appareil et se rend dans le canal de fuite.

La couronne fixe B est intérieure à la couronne mobile A, dont l'axe vertical repose sur un pivot P sur le fond du bief inférieur. Une vanne circulaire VV, que l'on peut abaisser entre les parties A et B, permet d'arrêter ou de mettre en marche la turbine. Les aubes fixes ou *directives* sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en fonte et en général plus nombreuses que celles de la couronne mobile. Les aubes mobiles ont une hauteur qui augmente à mesure que l'on s'éloigne de l'axe, afin de conserver un débouché constant à l'eau, car les aubes sont un peu plus rapprochées près de la sortie que près de l'entrée.

Dans les ***turbines centrifuges à axe horizontal***, turbine Canson par exemple, la couronne mobile enveloppe encore le distributeur ; l'eau

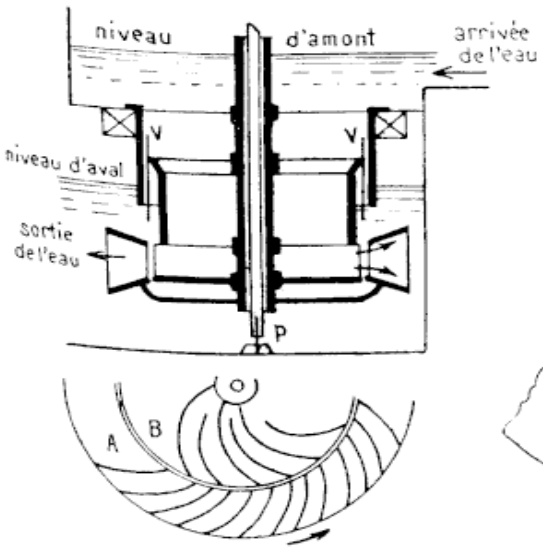


Fig. 322. — Turbine Fourneyron.

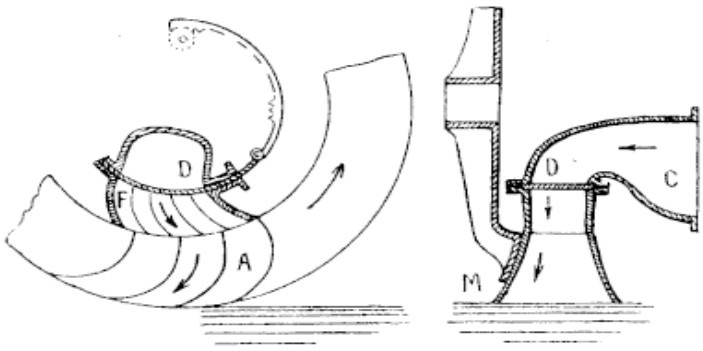


Fig. 323. — Turbine Canson.

Turbines centrifuges.

se meut dans un plan vertical et entre dans la couronne fixe sur un secteur seulement de 45° ou 72°. La turbine est presque toujours dénoyée et à injection partielle. La figure 323 montre schématiquement la disposition des organes : l'eau arrive par un tuyau C, passe dans le distributeur D et les aubages fixes F et fait tourner la couronne mobile M.

Dans les ***turbines centripètes***, le distributeur enveloppe la couronne mobile, et le mouvement de l'eau se fait de la périphérie vers le centre. Ces turbines fonctionnent toujours par réaction. La figure 324 montre schématiquement la réalisation d'une turbine Francis centripète à axe vertical. Le distributeur A est solidaire du bâti, B est la roue mobile ; entre les deux, un tiroir cylindrique C permet le réglage du régime. La hauteur de la roue mobile est un peu inférieure à celle à la sortie.

Le dispositif ***à axe horizontal*** est très répandu en Amérique ; la figure 324 *bis* montre le principe de ces machines.

Les turbines centripètes ont une marche plus régulière que les turbines

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

centrifuges, car la force centrifuge, qui agit en sens inverse du mouvement de l'eau, a une action régulatrice qui empêche les brusques variations de

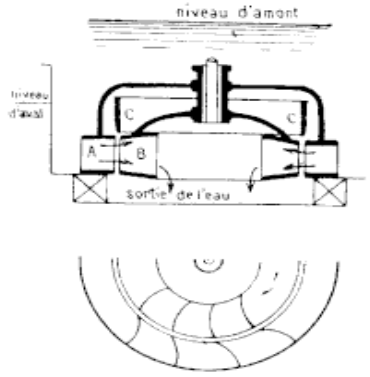


Fig. 324. — Turbine Francis.

Turbines centripètes.

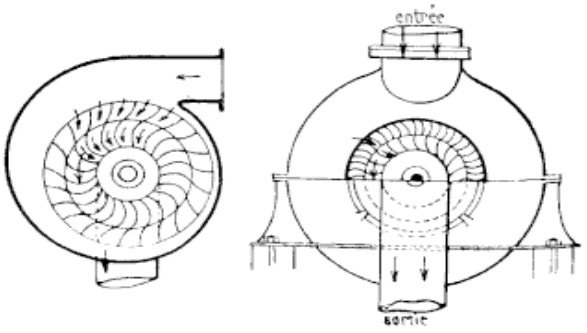


Fig. 324 *bis*. — Turbine à axe horizontal.

vitesse. De plus, ces turbines suppriment l'inconvénient de l'alimentation partielle.

* * *

On appelle ***axiales*** ou ***parallèles*** les turbines dans lesquelles les filets liquides se meuvent en restant toujours à la même distance de l'axe de rotation.

La ***turbine Fontaine*** est le type de ces appareils. La figure 325 en donne le principe. Elle se compose de deux couronnes superposées. La

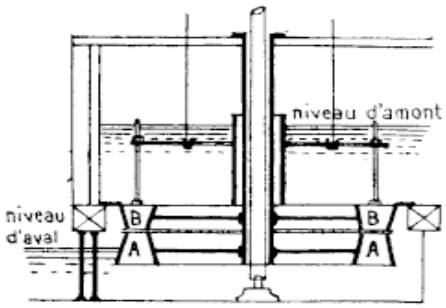


Fig. 325. — Turbine Fontaine.

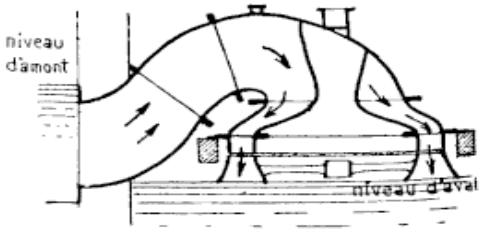


Fig. 326. — Cas d'une faible chute.

couronne A, mobile, est située à la partie inférieure et reliée à l'arbre de la turbine. La couronne B est fixe, sert de directrice et est placée sur le fond de la chambre d'eau. Pour régler la marche de la machine, on obture plus ou moins complètement, à l'aide de papillons horizontaux, les ouvertures de la couronne fixe B.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque la hauteur de chute est faible, on a recours à un siphon disposé comme l'indique la figure 326. Il est nécessaire, après un arrêt prolongé, d'amorcer le siphon à l'aide d'une pompe auxiliaire.

* * *

Il nous reste à dire quelques mots des ***turbines mixtes*** qui dérivent des types parallèles et centripètes. Elles présentent les dispositions les plus variées et leurs aubes affectent des formes compliquées. Ces turbines, dites *turbines américaines*, sont très répandues, car elles permettent d'utiliser

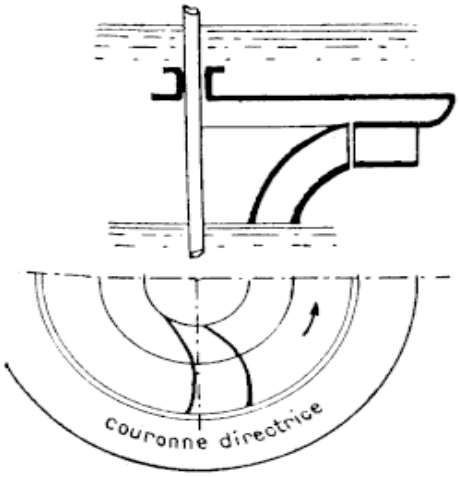


Fig. 327. — Turbine mixte.

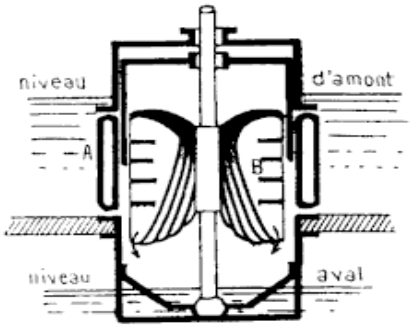


Fig. 328. — Turbine Hercule.

un grand débit avec de petits diamètres, elles se prêtent facilement à l'accouplement direct aux machines électriques même lorsqu'elles travaillent sous faible charge et leur rendement est supérieur à celui des autres systèmes.

La figure 327 montre schématiquement le principe du fonctionnement des turbines mixtes et la figure 328 celui d'une turbine Hercule à axe vertical. La couronne fixe A a la forme d'un cylindre muni d'aubes directrices ; la couronne mobile B, située à l'intérieur, comprend une partie cylindrique de même hauteur que les aubes fixes, se prolongeant vers le bas par des surfaces en forme de cuiller. La courbure des aubes est telle que les filets liquides, d'abord horizontaux, se recourbent verticalement en agissant par réaction. Une vanne cylindrique peut être abaissée entre les deux couronnes A et B et sert à la régulation. Des nervures horizontales portées par B correspondent aux divers vannages prévus.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Une autre classe de moteurs hydrauliques très en faveur aux États-Unis est celle des ***roues tangentielles*** ou ***roues Pelton***, que l'on peut considérer comme des turbines horizontales à injection partielle, avec admission et décharge de l'eau tangentielles.

Les aubes sont remplacées par des godets dont le fond présente une

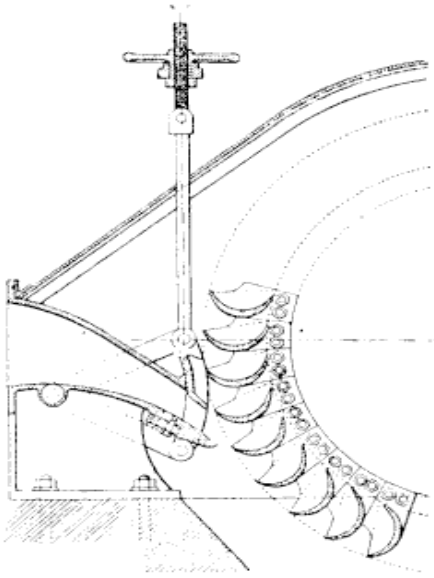


Fig. 329. — Roue Pelton.

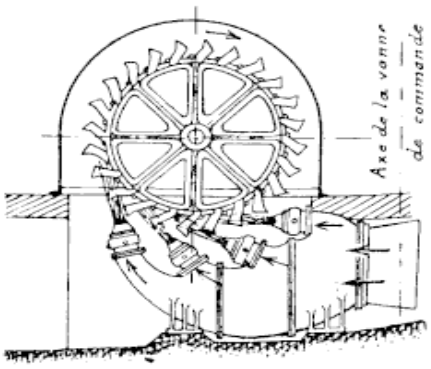


Fig. 330.

double courbure, de sorte que chaque godet offre deux aubes de sens inverse. L'eau est dirigée par un ou plusieurs ajutages coniques et agit par sa force vive, tangentiellement à la roue (fig. 329). La régulation est obtenue en faisant varier plus ou moins la section de l'ajutage d'où sort l'eau. La figure 330 montre un des nombreux dispositifs employés.

* * *

L'aspect des salles de machines est donc très différent, suivant le genre des turbines employées. Le reste de l'installation est d'ailleurs identique à celui d'une centrale à vapeur.

Les usines hydrauliques se prêtent particulièrement bien à la commande à distance. En effet, il n'est plus nécessaire ici de produire de la vapeur, c'est-à-dire de faire intervenir la main-d'œuvre humaine.

Une simple vanne que l'on manœuvre à distance, en commandant un servo-moteur, suffit à mettre en marche une usine hydro-électrique. Aussi tend-on, surtout en Amérique, à construire de petites usines automatiques desservant chacune un périmètre donné, ne nécessitant que peu de frais de première installation, presque pas d'entretien, et qui ont encore comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avantage de pouvoir distribuer le courant sous la tension d'utilisation, c'est-à-dire en supprimant les transformateurs, les postes secondaires, les lignes principales de transport du courant haute tension. Ces usines, réparties en divers points, sont sous le contrôle d'un bureau central d'où on les manœuvre quand besoin est.

* * *

Il peut sembler anormal que les plus récentes et les plus puissantes centrales électriques soient des centrales thermiques. Avant la guerre, un vaste mouvement d'opinion avait dirigé les techniciens vers l'utilisation de la houille blanche, c'est-à-dire des ressources hydrauliques dont la France est abondamment pourvue. On faisait ressortir l'économie d'opération, la sécurité de marche, les puissances considérables disponibles. Pourquoi maintenant abandonne-t-on cette solution ?

C'est que la guerre a modifié profondément les conditions économiques de toutes les industries. S'il est bien vrai qu'une centrale hydraulique ne consomme pas de charbon, ce qui économise une dépense d'exploitation très importante, elle nécessite pour son installation l'exécution de travaux d'art, barrages, conduites forcées, canaux de dérivation, etc., dont, actuellement, le prix est supérieur à celui de l'équipement de chaudières, magasins à charbon, etc., d'une centrale thermique.

De plus, les usines hydrauliques sont loin des centres de consommation de l'énergie électrique, et il faut, aux dépenses de première installation de l'usine même, ajouter celles de la construction d'une ligne haute tension sur plusieurs centaines de kilomètres parfois, et le coût du transport de l'électricité grève de frais énormes son prix de revient.

Aussi, sauf dans quelques cas particuliers : réseaux de chemins de fer dans les régions montagneuses, centres industriels voisins des sources de houille blanche, il faut renoncer au rêve de l'utilisation sur une grande échelle des forces hydrauliques naturelles. Les projets d'aménagement du Rhône en particulier, viables avant la guerre, sont maintenant abandonnés, et c'est la centrale de Gennevilliers qui remplace l'usine gigantesque projetée à Genissiat.

* * *

Dans les pages qui précèdent, nous avons étudié la production industrielle de l'énergie électrique. Nous avons vu que la puissance des centrales tend à devenir de plus en plus grande, la conception moderne étant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de concentrer en un seul point la source d'énergie électrique nécessaire à toute une région, afin de la produire le plus économiquement possible.

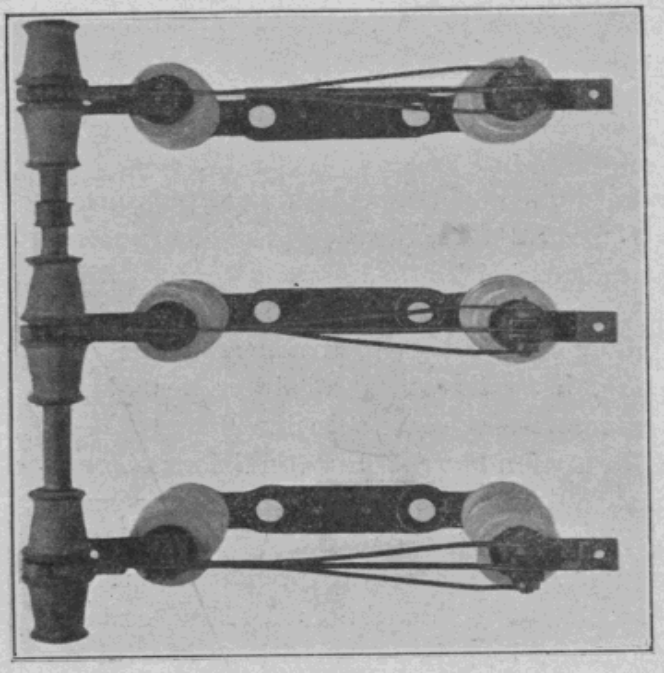


Fig. 332. — Sectionneurs multiples 15 000 volts, 150 ampères.

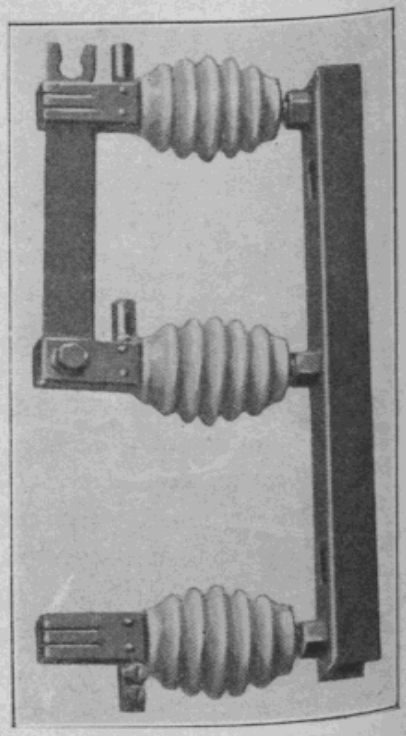


Fig. 334. — Sectionneur renverseur pour intérieur.

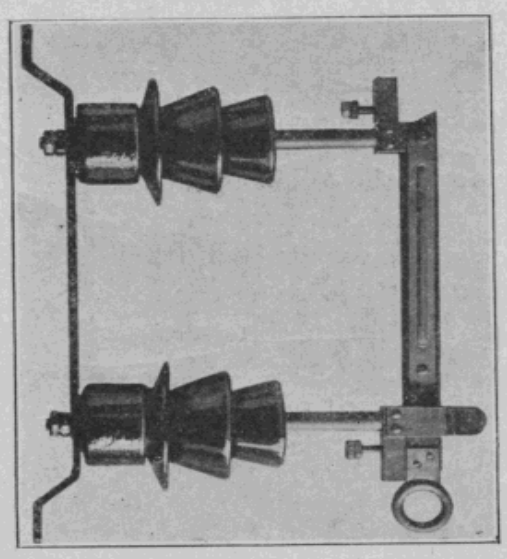


Fig. 331. — Sectionneur unipolaire pour extérieur.

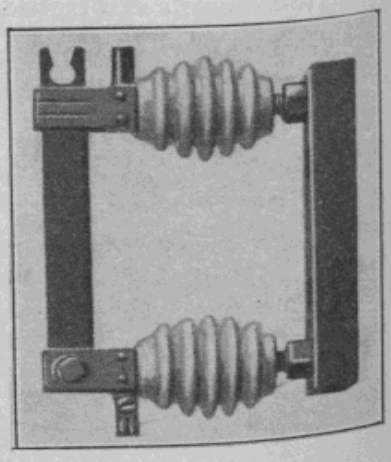


Fig. 333. — Sectionneur unipolaire pour intérieur. Type S. I. 125 ampères, 16 000 volts.

Le problème qui se pose alors, et que nous examinons dans les chapitres qui suivent, est de ***transporter au loin le courant électrique*** et de le répartir de façon à couvrir toute une région d'un réseau serré de distribution électrique. Nous verrons que ce résultat ne peut être atteint qu'en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

transformant à l'usine le courant produit en courant alternatif de haute tension que l'on ramène ensuite, en des sous-stations, à un voltage moins élevé pour finalement, au lieu d'utilisation, l'abaisser à 110, 220 ou 600 volts, suivant les cas.

Mais le maniement de quantités d'énergie aussi considérables, puisqu'elles atteignent parfois plus de 100 000 kilowatts, est un problème extrêmement difficile. Aussi bien à l'usine génératrice qu'aux sous-stations qu'elle dessert, il est indispensable de pouvoir couper à volonté soit le courant primaire à basse tension, soit le courant transformé à haut voltage, afin d'isoler un tronçon déterminé du réseau. Les appareils qui permettent cette manœuvre, disjoncteurs, coupe-circuits, sectionneurs, etc., existent aussi bien à la centrale qu'aux sous-stations; aussi allons-nous les décrire maintenant, en nous limitant au cas du circuit haute tension. Les appareils utilisés pour la basse tension seront traités au chapitre XXII.

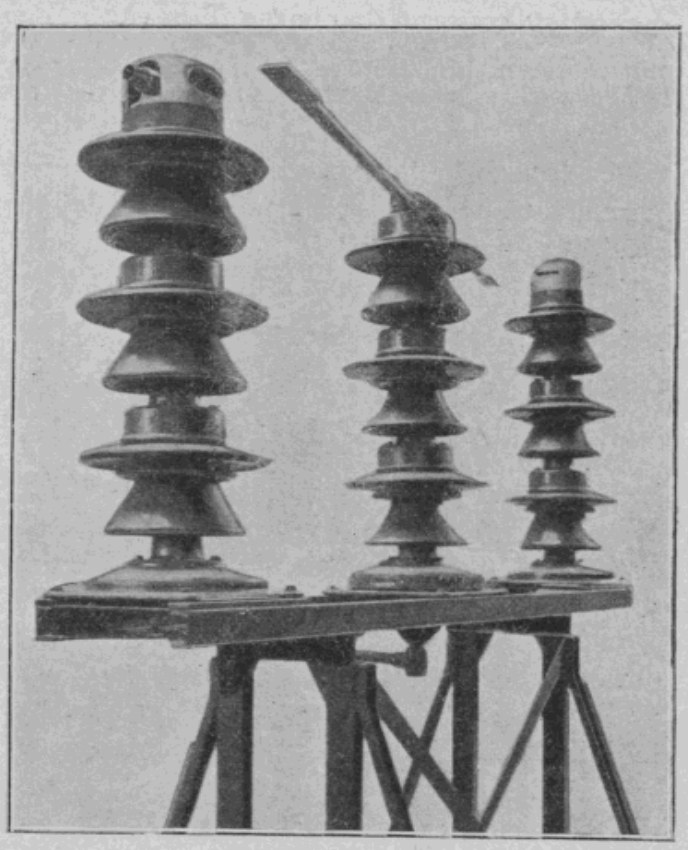


Fig. 335. — Sectionneur tournant haute tension.

* * *

Les ***sectionneurs*** sont d'un usage courant dans les installations haute tension, quelle qu'en soit l'importance.

Ces appareils permettent de se rendre facilement compte si une partie d'un circuit est sous tension et donnent toute sécurité en cas de contrôle ou de réparation. Leur emploi s'impose donc à toute arrivée ou départ d'alternateurs, transformateurs, lignes ou postes de transformation.

Les sectionneurs ne doivent servir qu'à ouvrir ou fermer un circuit dépourvu d'intensité; *on peut donc les manœuvrer sous tension au moyen*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de perches isolantes, ***mais on ne doit jamais les manœuvrer sous charge***. Leur rôle est donc nettement différent de celui des interrupteurs ou disjoncteurs, qu'ils ne peuvent remplacer.

Toutefois, s'il est prescrit de ne pas manœuvrer un sectionneur sous charge, il est permis à la rigueur de s'en servir pour couper de faibles courants : courant de charge d'un câble, courant à vide de petits transformateurs.

Les sectionneurs sont prévus pour fonctionnement soit à l'intérieur, soit à l'extérieur.

On construit également des ***sectionneurs inverseurs unipolaires*** permettant de connecter à volonté une ligne sur deux directions différentes, et des appareils ***multipolaires*** sectionnant simultanément toutes les phases d'une même ligne.

Les figures 331 à 335 montrent divers modèles de ces appareils.

* * *

Les ***coupe-circuits haute tension*** étaient autrefois les appareils généralement employés pour la protection contre les surintensités pouvant provenir des courts-circuits ou surcharges accidentelles.

Leur usage s'est pourtant restreint ces dernières années, et l'on emploie de nos jours des interrupteurs automatiques chaque fois que des courts-circuits violents de forte intensité peuvent se produire, comme c'est le cas le plus souvent dans les centrales et sous-stations.

Toutefois, l'emploi des coupe-circuits, qui constitue une protection à la fois économique et peu encombrante, peut avoir pleine justification technique lorsqu'il s'agit d'appareils bien construits et dont l'utilisation est limitée au cas de petites installations.

Ces appareils sont de divers types.

1° ***Coupe-circuits à résistance***. — A l'intérieur d'un tube de porcelaine se trouve monté un fil d'argent ou d'un autre métal qui fond lorsque l'intensité qui y circule dépasse une certaine valeur. Les dimensions du tube protecteur sont calculées de façon à ce qu'il ne soit pas brisé au moment de la fusion du fil métallique. Suivant que le coupe-circuit est placé à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, sa disposition change, en particulier la forme des isolants le supportant. On peut également l'associer à un sectionneur. Les figures 336 à 338 montrent quelques formes usuelles de ces appareils.

2° ***Coupe-circuits à cornes mobiles.*** — Dans les coupe-circuits pour lignes aériennes, un gros inconvénient réside dans la difficulté que l'on éprouve à discerner depuis la chaussée le fusible qui a fondu. Pour remédier

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

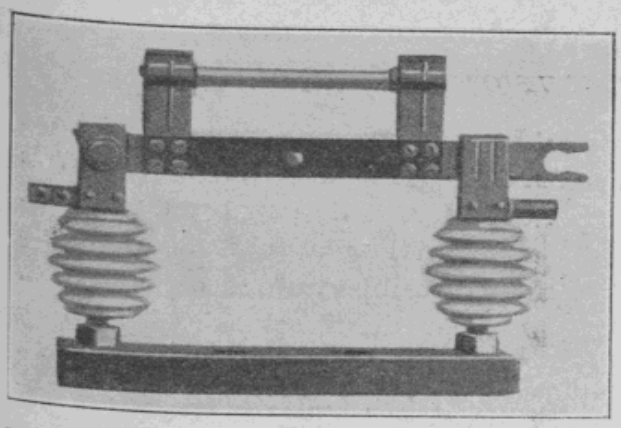


Fig. 336. — Sectionneurs coupe-circuits pour intérieur. Type S.S.I.

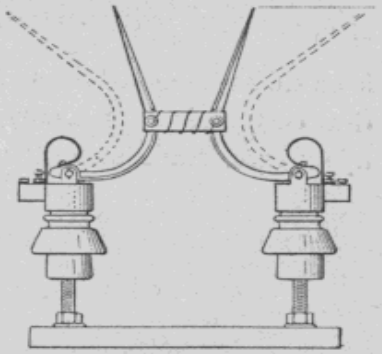


Fig. 339. — Coupe-circuit à cornes.

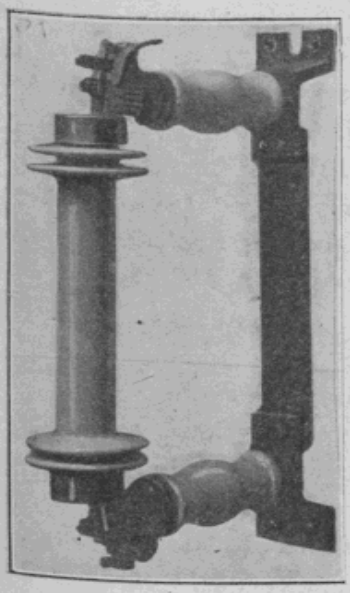


Fig. 337. — Coupe-circuit à résistance pour intérieur.

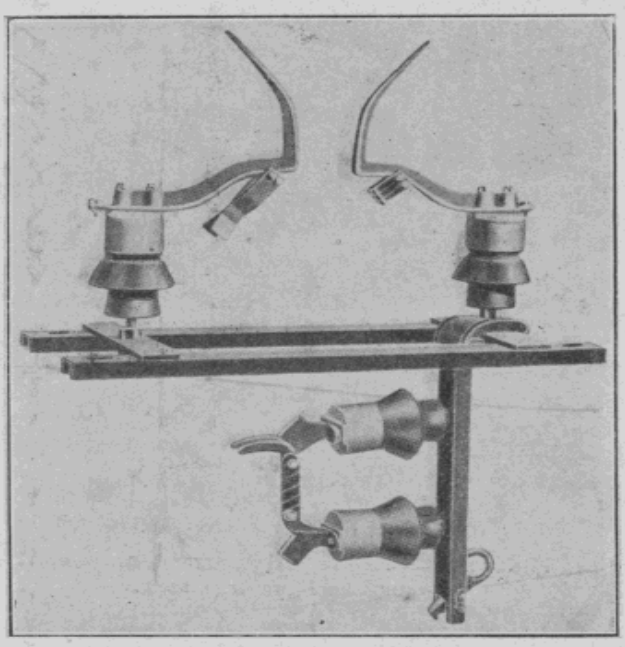


Fig. 340. — Coupe-circuit sectionneur ouvert.

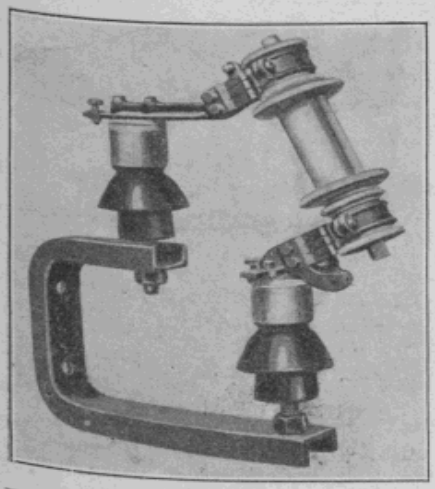


Fig. 338. — Coupe-circuit à résistance pour extérieur.

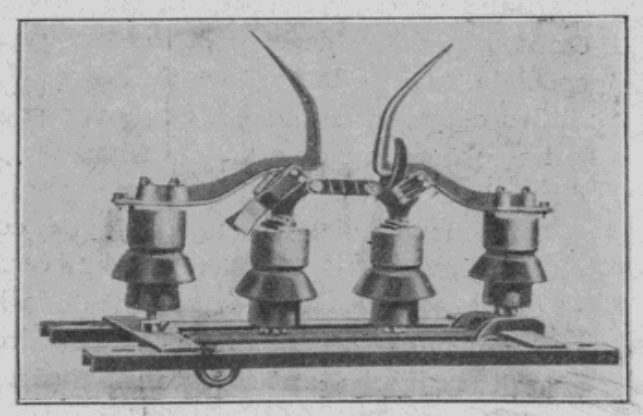


Fig. 341. — Coupe-circuit sectionneur fermé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à ce défaut, les ateliers électriques de Lyon et du Dauphiné construisent des coupe-circuits à cornes munis d'une *plaquette de celluloïd rouge très apparente*, fixée sur les mêmes tiges qui servent de support au fusible. Si l'on a soin d'enrouler le fusible autour du celluloïd, ce dernier prendra feu au moment de la fusion et signalera ainsi, par son absence, le fusible qui aura sauté.

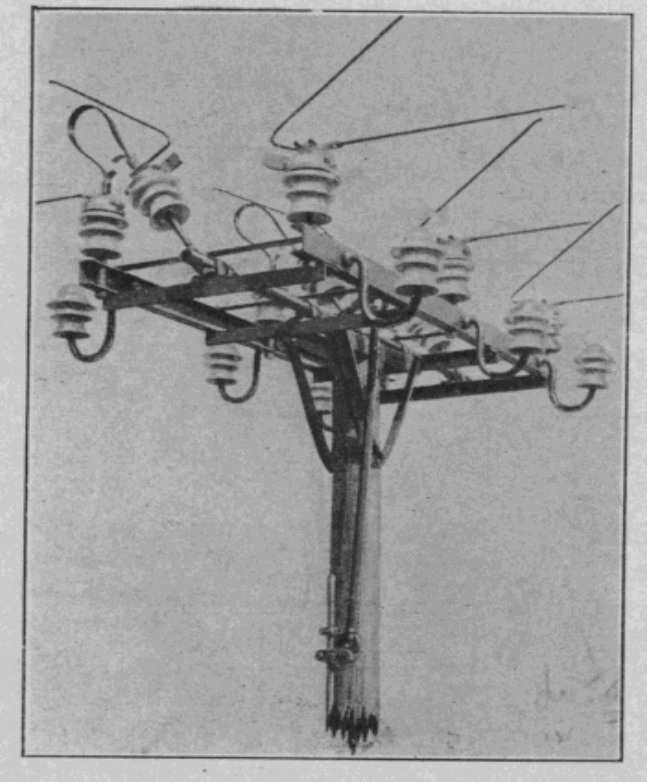


Fig. 342. — Montage d'interrupteurs à cornes sur une ligne triphasée.

L'arc produit à la fusion est d'autant plus haut que les puissances mises en jeu sont plus fortes et que cet arc peut atteindre *plusieurs mètres*. Il est donc indispensable de ***ne rien placer*** au-dessus des cornes des coupe-circuits (ferrures, lignes, etc.), car cela pourrait causer des accidents graves.

Dans les coupe-circuits à cornes, les deux cornes pivotent autour de leur axe et sont soumises à l'influence de deux ressorts qui tendent à les écarter l'une de l'autre. En marche normale, les deux cornes sont rapprochées et maintenues par la plaquette de celluloïd qui seule supporte la traction et soulage ainsi le fusible.

Quand ce dernier fond, brûlant avec lui le celluloïd, les deux cornes, étant libérées, s'écartent, et ce mouvement, combiné avec leur forme spéciale, facilite la rupture de l'arc.

Ces coupe-circuits sont employés pour tensions jusqu'à 16 000 volts ; leurs cornes sont en alliage anti-arc (fig. 339). Dans d'autres modèles, les cornes sont fixes.

On peut associer le coupe-circuit à cornes à un sectionneur ; le but des cornes est alors de souffler l'arc qui s'amorce lors de la fusion du fusible et de permettre le sectionnement de la ligne. Quand l'appareil est ouvert, les deux pôles du fusible sont hors circuit, ce qui permet de changer le fusible, la ligne étant sous tension (fig. 340 et 341).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les ***interrupteurs*** et ***disjoncteurs*** sont les appareils les plus importants de l'installation haute tension, car ils doivent pouvoir couper la ligne en charge. Ils sont de deux types: interrupteur à cornes pour

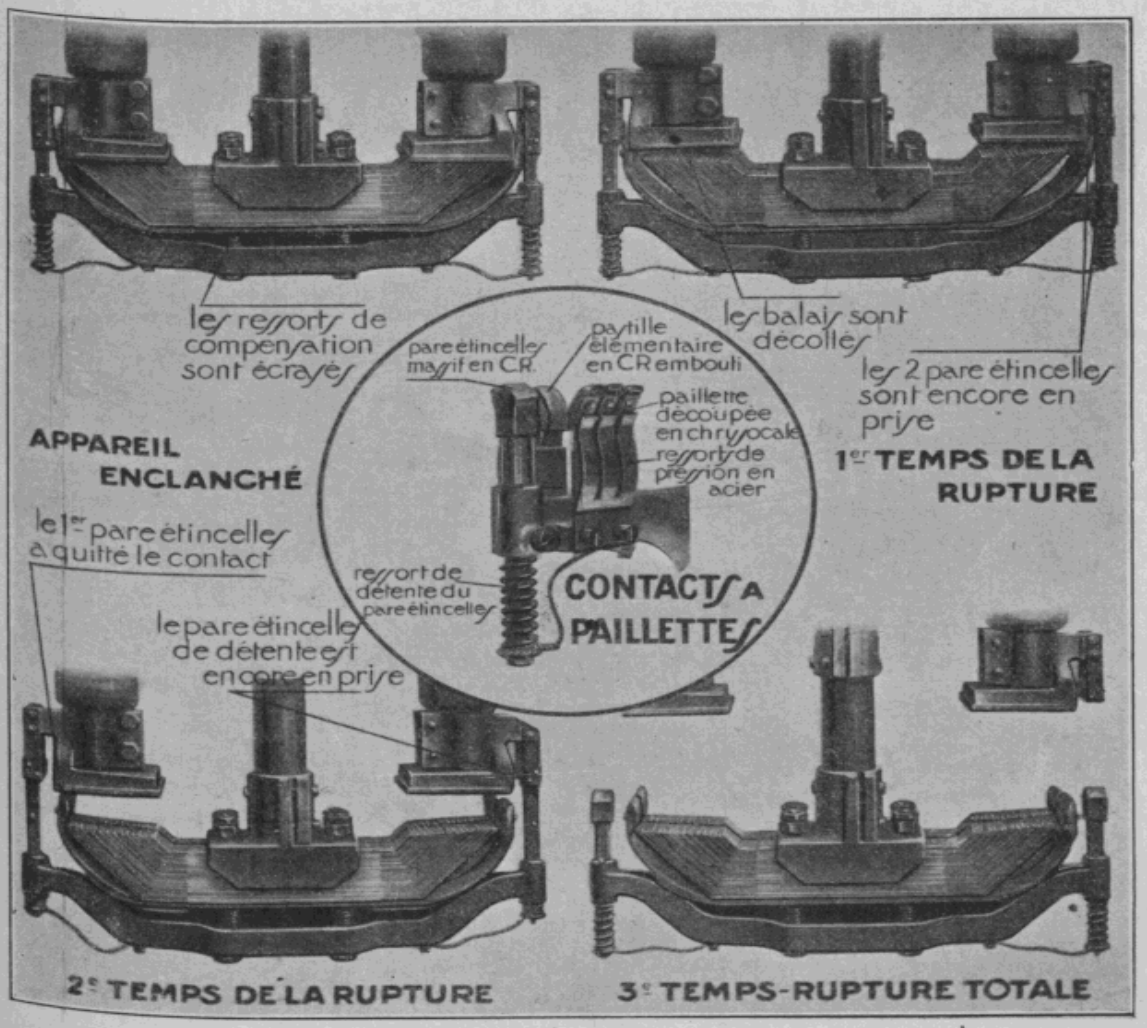


Fig. 343. — Fonctionnement d'un disjoncteur.

extérieur, interrupteurs dans l'huile pour intérieur et extérieur.

Interrupteurs aériens à cornes. — Placés de distance en distance sur les lignes, les interrupteurs aériens permettent d'isoler une section pendant une réparation ou une inspection.

Leur emploi est particulièrement indiqué aux passages d'aérien en souterrain, aux traversées de voies ferrées ou routes de grande

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

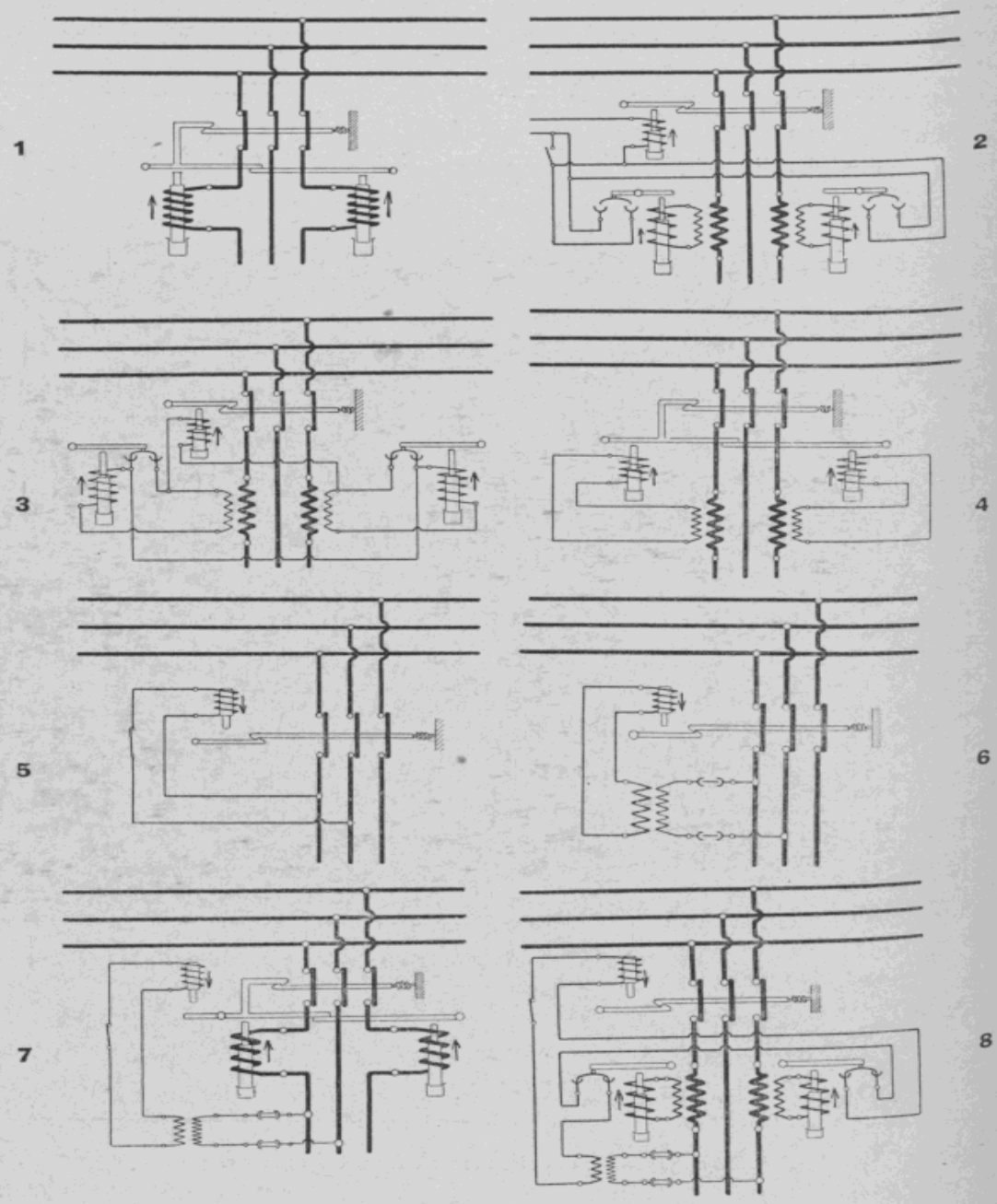


Fig. 344.

1. Déclenchement à maxima d'intensité par relais directs à haute tension.
2. Déclenchement à maxima d'intensité par relais à basse tension avec emploi du courant auxiliaire permettant le déclenchement à distance par manœuvre d'un bouton-poussoir.
3. Déclenchement bipolaire à maxima d'intensité par relais basse tension sans courant auxiliaire.
4. Déclenchement bipolaire à maxima d'intensité par électro-aimants réglables agissant directement sur le mécanisme (montage des disjoncteurs d'abonnés de la Compagnie parisienne de distribution d'électricité).
5. Déclenchement à minima de tension direct.
6. Déclenchement à minima de tension avec transformateur de tension.
7. Déclenchement à maxima d'intensité direct et minima de tension.
8. Déclenchement à maxima d'intensité avec relais basse tension et à minima de tension.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

communication, aux abords des postes et des stations centrales.

Ils sont imposés à l'entrée et à la sortie de chaque agglomération et à l'origine de toute dérivation.

Les interrupteurs aériens ne sont appelés à rompre en charge qu'*exceptionnellement*, mais ils doivent néanmoins être toujours prêts à effectuer cette rupture en *pleine sécurité*.

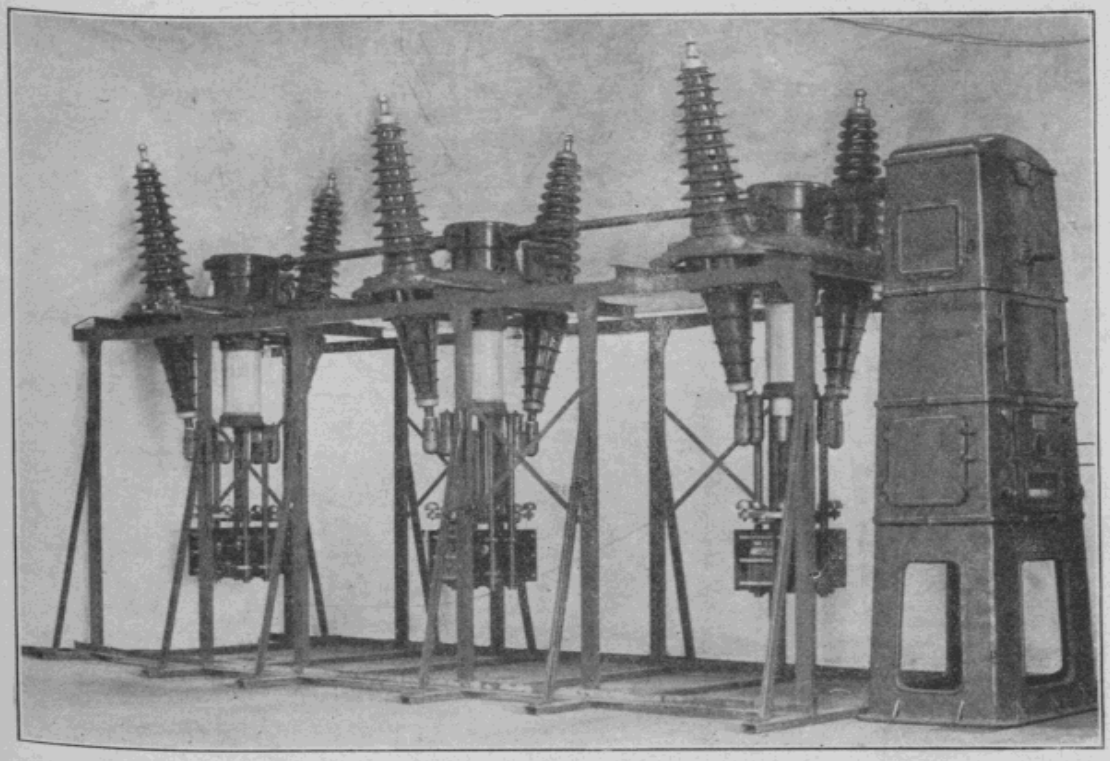


Fig. 345. — Disjoncteurs haute tension accouplés avec leur moteur d'enclenchement.

Ils sont exposés à toutes les intempéries ; ils doivent donc être particulièrement robustes, afin de ne jamais se refuser aux services qu'on est en droit de leur demander.

On ne les emploie guère pour des voltages supérieurs à 15 000 volts. Ils sont constitués en principe par un mécanisme formé de deux tubes horizontaux parallèles qui, en pivotant autour de leurs axes, entraînent les contacts isolés qu'ils supportent et provoquent ainsi l'ouverture ou la fermeture de la ligne. La rupture de l'axe s'effectue sur les cornes qui surmontent les interrupteurs. La figure 342 montre un appareil de ce type ouvert ; on remarque que, dans ce modèle, l'une des cornes est fixe, l'autre est mobile autour d'un axe que l'on peut actionner à l'aide d'un mécanisme de renvoi. Cette borne mobile est reliée à une seconde borne fixe à laquelle aboutit la ligne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Bien que l'on construise depuis de nombreuses années des ***interrup-***

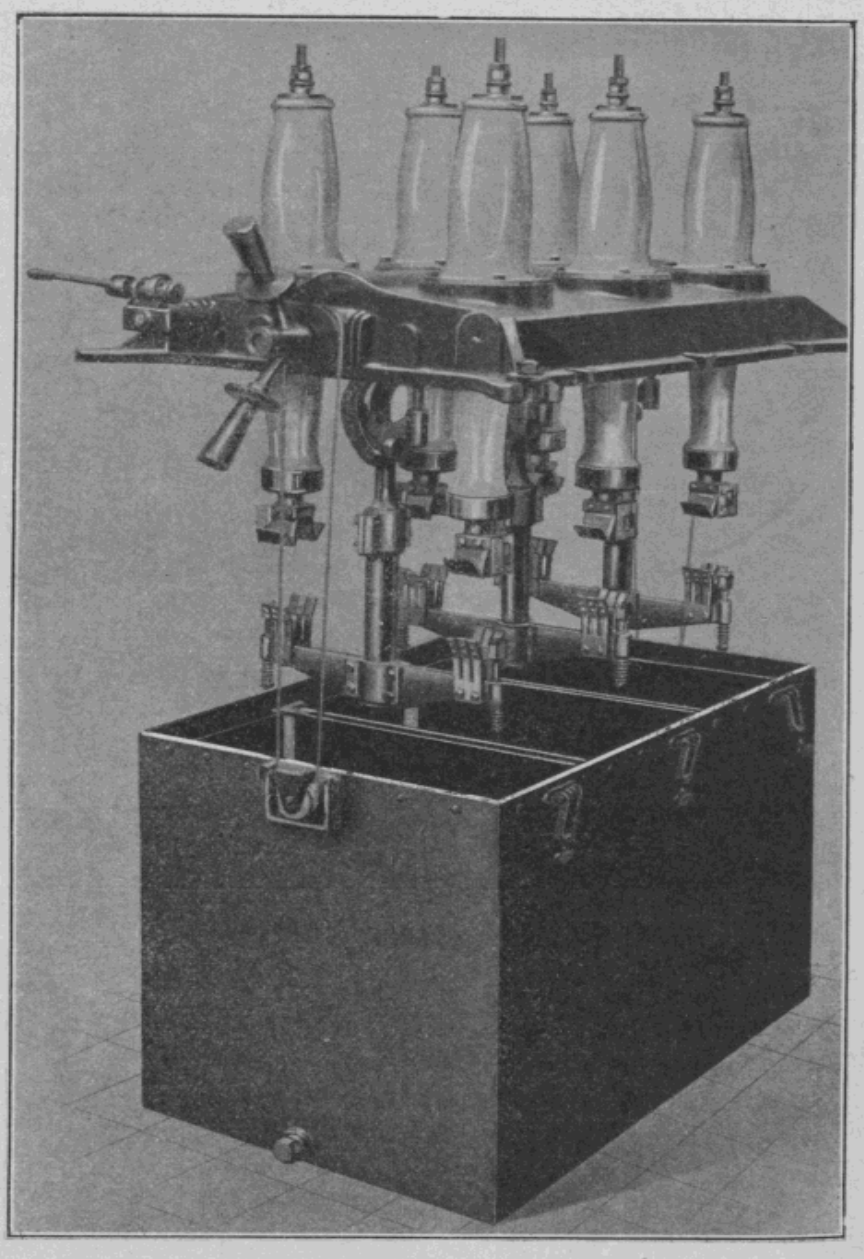


Fig. 346. — Interrupteur tripolaire, 150 ampères, 15 000 volts.

teurs et des ***disjoncteurs dans l'huile***, on n'a pas encore déterminé exactement, et d'une façon scientifiquement précise, les principes essentiels sur lesquels ils doivent être construits. Ceci ne doit pas nous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

étonner : dans beaucoup de cas, la technique est en avance sur la science, et les machines électriques, en particulier, étaient utilisées industriellement avant que leur théorie complète n'ait été établie.

Pour montrer le point où en est la construction des interrupteurs et disjoncteurs dans l'huile, nous citerons l'exemple de la ligne à 220 000 volts de Big Creek, en Amérique. Les premiers interrupteurs étaient prévus avec un réservoir de 6000 litres d'huile par phase, et les appareils actuels en comportent près de 20 000. L'erreur initiale était donc supérieure à 300 p. 100.

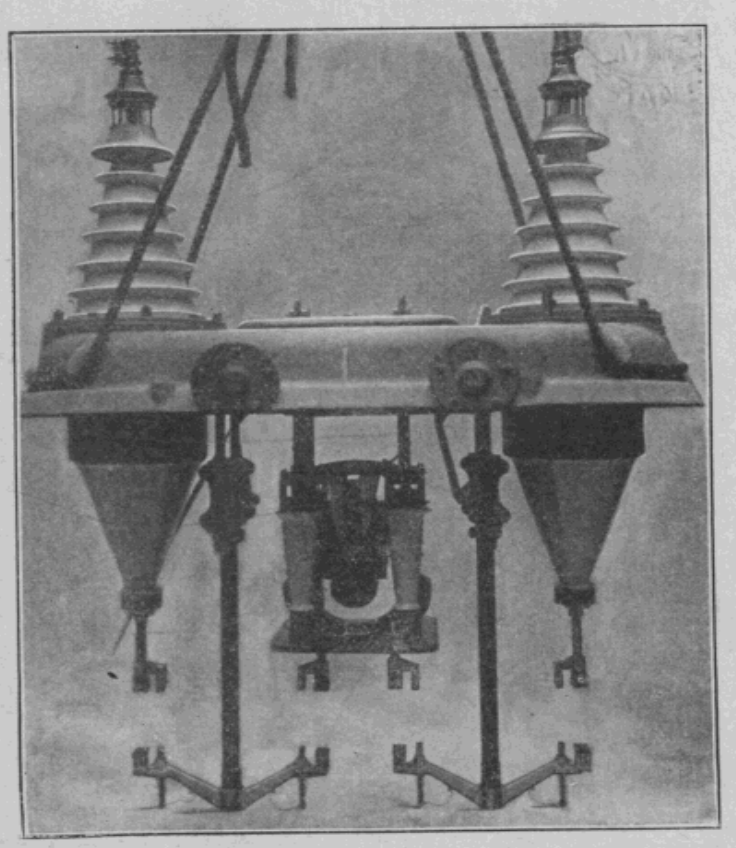


Fig. 347. — Vue d'un disjoncteur dans l'huile retiré de sa boîte.

Il est cependant un certain nombre de règles qui paraissent universellement admises à l'heure actuelle. Il faut, autant que possible, que la coupure s'effectue en une demi-période. La rupture doit s'effectuer verticalement, afin d'assurer une direction certaine à l'arc et une orientation régulière de la gaine gazeuse qui en est la conséquence. Les dimensions de la cuve à huile doivent être telles que les actions chimiques, les coups de bélier de l'huile sur les parois, les projections et ce que l'on appelle, d'un mot qui fait image, les « effets de cheminée » soient réduits au minimum.

Ces actions peuvent être considérées comme dues à la transformation brusque en chaleur de l'énergie électrique développée pendant la rupture entre les contacts que l'on écarte violemment l'un de l'autre, avec une vitesse qui actuellement ne dépasse guère 3 à 4 mètres par seconde.

Enfin, les interrupteurs sont munis de contacts auxiliaires qui évitent l'échauffement exagéré des contacts principaux des disjoncteurs au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moment de la surintensité, et qui pourrait amener leur fusion partielle, d'où résulterait un mauvais contact lorsque l'appareil serait réenclenché.

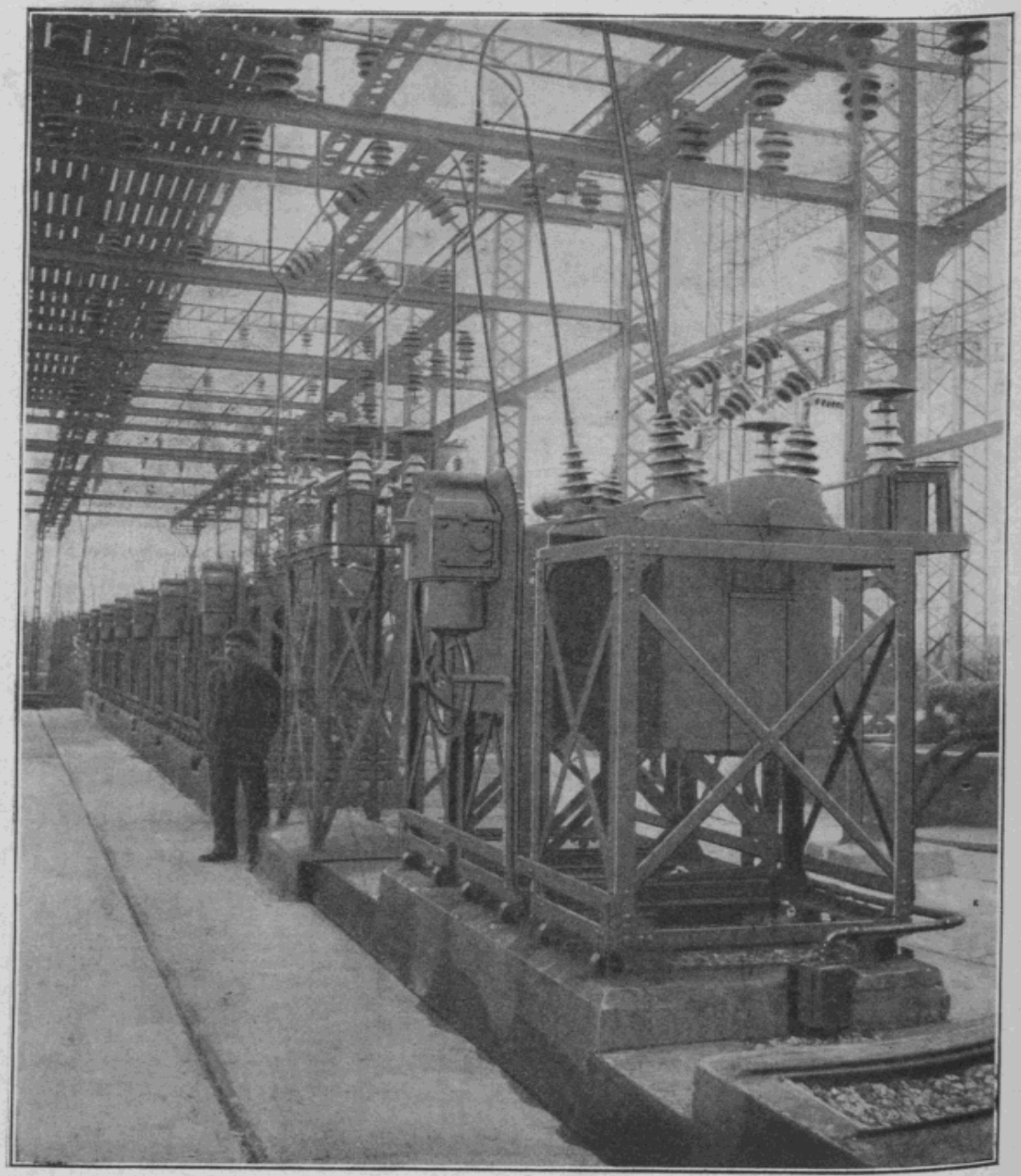


Fig. 348. — Vue de l'allée des interrupteurs dans une sous-station en plein air.

A titre d'exemple, nous donnons dans la figure 343 les diverses positions correspondant à l'ouverture d'un disjoncteur de la Compagnie générale électrique de Nancy. L'un des avantages de ces contacts auxiliaires est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'avoir une rupture plus rapide que celle des contacts principaux, grâce à l'action des ressorts de détente dont ils sont munis. Dans l'appareil représenté par la figure, il existe deux systèmes de pare-étincelles.

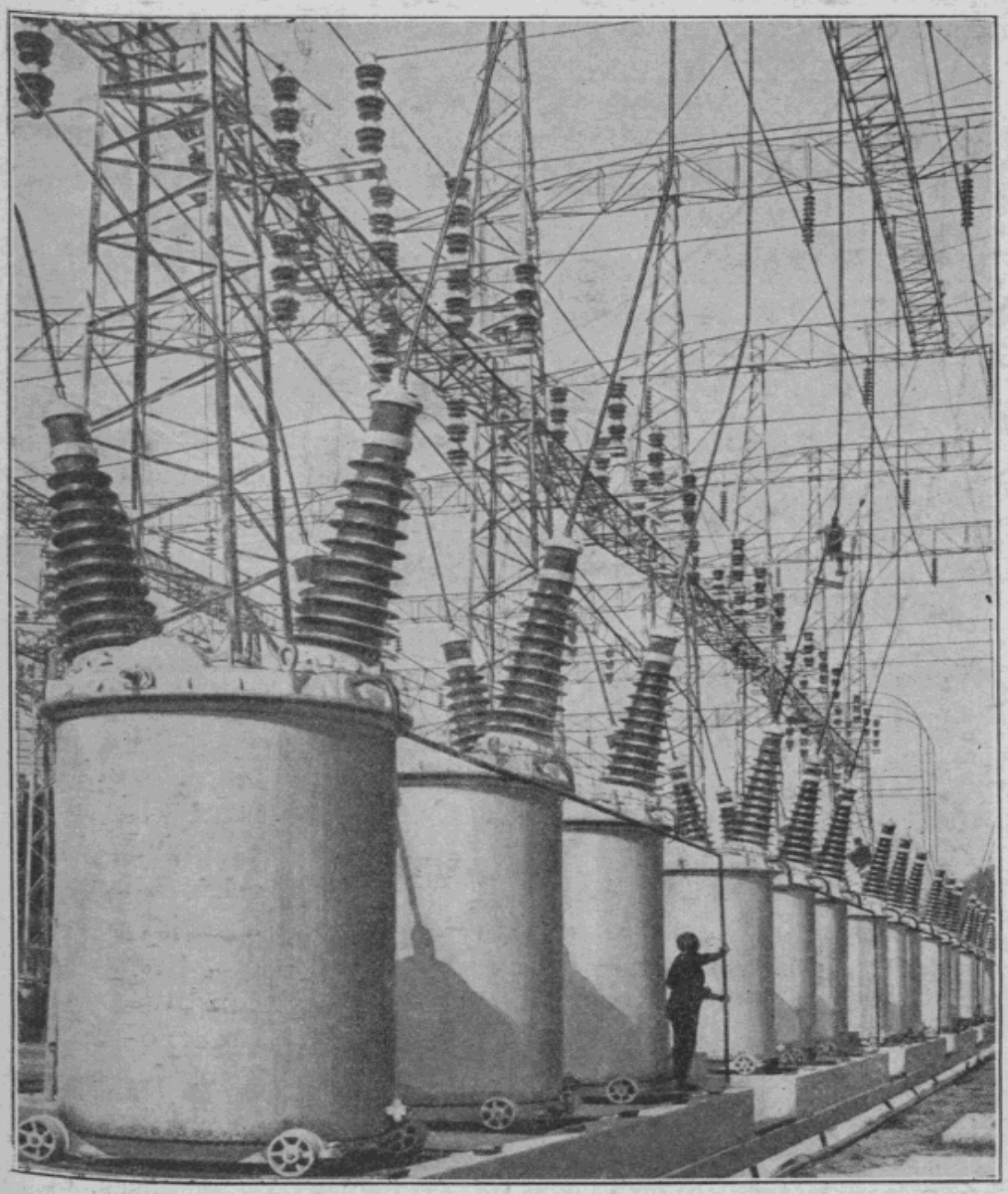


Fig. 349. — Disjoncteurs à 150 000 volts.

L'emploi du courant à très haute tension pose un autre problème très difficile : c'est celui de l' ***entrée du courant dans le disjoncteur.*** Cette entrée s'effectue par des bornes en porcelaine dont les dimensions sont parfois très considérables, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'après les figures 347, 348 et 349 ci-contre. Enfin, il faut également que la course de l'équipage mobile soit relativement longue pour empêcher la formation d'arcs permanents. Ces équipages mobiles sont d'ailleurs de sections relativement faibles, par suite de l'intensité peu élevée (quelques centaines d'ampères) qui y circule ; nous verrons au contraire que, pour les interrupteurs et disjoncteurs basse tension, si la course de la partie mobile est beaucoup moindre, par contre sa section est plus considérable.

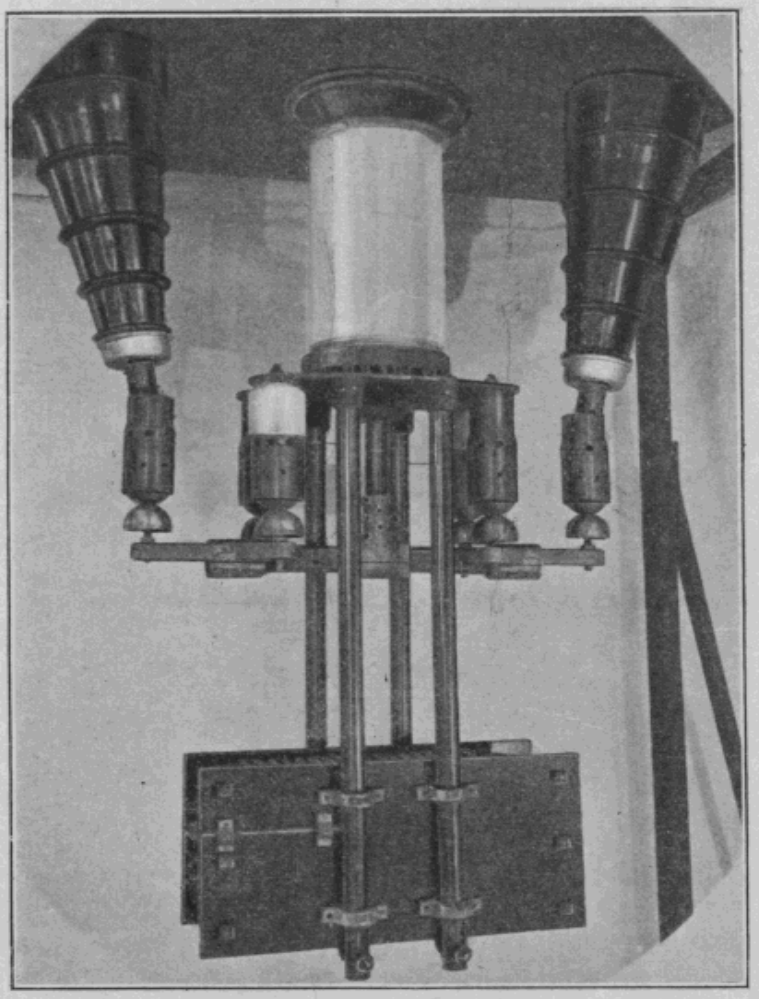


Fig. 350. — Disjoncteur haute tension 150 000 volts avec résistances de choc.

Quoi qu'il en soit, pour les interrupteurs d'usines, la manœuvre d'enclenchement ne peut s'effectuer à la main, et il faut prévoir un moteur auxiliaire pour bander les ressorts qui les actionnent.

Pour les disjoncteurs, le déclenchement automatique est provoqué par des relais à maxima ou à minima suivant les cas. Ces relais sont constitués par des électro-aimants. Dans le déclenchement à maxima, un noyau mobile est attiré quand la tension ou l'intensité deviennent dangereuses, et provoque par sa force vive le déclenchement du disjoncteur. Dans les systèmes à minima, le noyau mobile est soulevé tant que la bobine est sous tension et, par sa chute au moment d'un manque de tension, actionne le déclenchement.

L'alimentation de ces bobines peut avoir lieu soit directement par le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant haute tension, soit par des transformateurs, soit par des sources de courant auxiliaires. Ils peuvent être actionnés à volonté en agissant

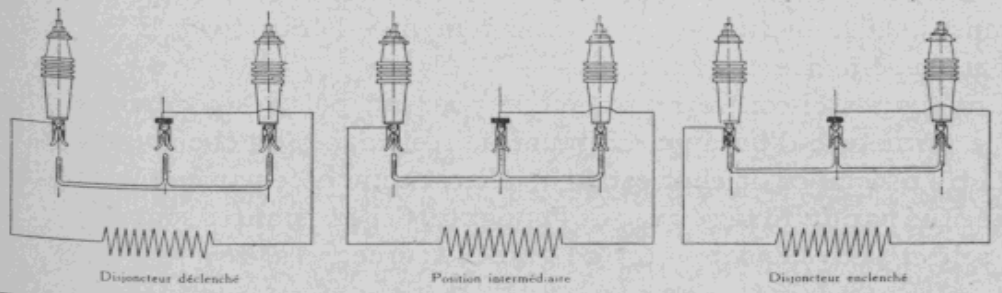


Fig. 351. — Principe du fonctionnement d'un disjoncteur avec résistance de choc.

directement sur le courant qui les alimente. La figure 344 donne quelques montages usuels.

Nous ne décrirons pas en détail les types très nombreux de disjoncteurs et d'interrupteurs haute tension construits par les divers fabricants. Ils sont tous constitués par une énorme cuve en fonte remplie d'huile. Sur la partie supérieure sont fixées les deux bornes d'entrée, de grandes dimensions, en porcelaine électrotechnique (fig. 345 à 349). A l'intérieur se trouve disposé le mécanisme de coupure, analogue à celui représenté figure 347. On distingue nettement les pare-étincelles latéraux et leurs ressorts de commande, le transformateur d'intensité actionnant le mécanisme, et on peut apprécier la course de l'équipage mobile. Pour réduire les surintensités transitoires qui accompagnent la mise en circuit des transformateurs (phénomène du double flux) ou de lignes présentant

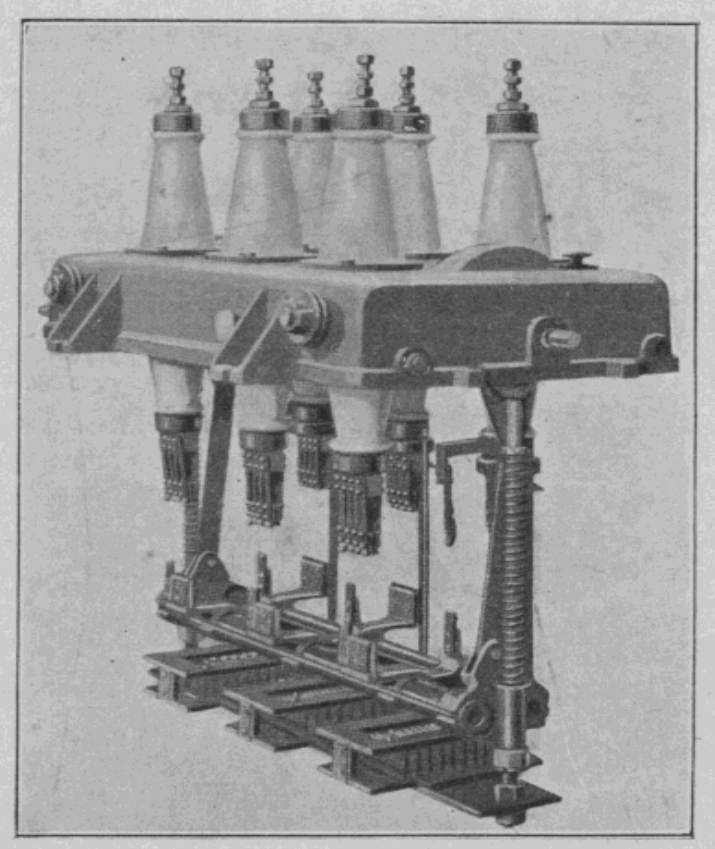


Fig. 352. — Interrupteur avec résistance de choc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une grande capacité, on emploie souvent des interrupteurs ou disjoncteurs munis de ***résistances de choc***.

Ces résistances de protection sont insérées momentanément au premier temps de la fermeture et au dernier temps de l'ouverture. Elles se branchent en série avec la ligne.

Les figures ci-contre représentent pour un pôle les différentes phases de la fermeture d'un appareil muni de résistances de choc.

Cette résistance de choc est fixe ; elle est composée par un tissu résistant constitué par du fil tissé avec de l'amiante. Ces résistances sont dépourvues de self et peuvent supporter de grandes surcharges.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIX

TRANSFORMATION ET CONVERSION DU COURANT ÉLECTRIQUE

Transformateurs. — Principe. — Propriétés fondamentales. — Réalisation des transformateurs. — Transformateurs à noyau, transformateurs cuirassés. — Vieillissement des tôles. — Constitution du circuit magnétique. — Constitution des bobines. — Transformateurs dans l'huile. — Refroidissement naturel, par circulation d'eau. — Transformateurs triphasés. — Couplage des transformateurs. — Auto-tranformateur. — Installation des transformateurs. — Dispositifs de protection. — La bobine de Ruhmkorff. — Principe du fonctionnement. — Divers modes de rupture du courant : rupteur Carpentier, rupteur Foucault, turbine à mercure. — Interrupteurs électrolytiques : Wehnelt, Simon. — Commutatrices à deux ou un enroulement. — Dynamo omnibus. — Redresseurs de faible puissance. — Soupape Soulier. — Redresseur Rosengart. — Soupapes électrolytiques : Nodon, Graetz. — Redresseur à pointe. — Soupape de Villard. — Redresseur à contact tournant. — Redresseurs à vapeur de mercure. — Principe. — Forme du courant redressé. — Réalisation pratique. — Convertisseurs de faible puissance en verre ou en quartz. — Convertisseurs métalliques de grande puissance. — Difficultés à vaincre : étanchéité, réalisation du vide. — Constitution de l'anode. — Amorçage. — Mesure du vide. — Le redresseur kénotron de Dusham. — Le redresseur Tungar.

Nous verrons que les courants alternatifs permettent le transport à grande distance de l'énergie électrique avec le minimum de pertes et de dépenses d'installation de ligne. Ces transports de force s'effectuent à très haut voltage, jusqu'à 100 000 volts et plus. On comprend qu'il n'est pas possible de distribuer et d'utiliser directement dans les appareils un courant à un tel voltage, et la première question que nous aurons à envisager sera la transformation de ces courants alternatifs en courants plus maniables, à bas voltage. Ce sera l'étude des transformateurs.

D'autre part, pour un grand nombre d'applications, le courant continu est soit indispensable, soit plus commode que le courant alternatif. C'est, par exemple, le cas pour l'électrolyse, la charge des accumulateurs, la commande d'engins spéciaux dans lesquels intervient un électro-aimant (triage magnétique des métaux, perforatrices, riveuses, etc.) et la traction des tramways et des chemins de fer. Nous aurons à examiner les diverses solutions permettant de transformer le courant alternatif en courant continu, ou tout au moins en courant de polarité constante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TRANSFORMATEURS

C'est au transformateur que le courant alternatif doit le développement de ses applications industrielles. Comme son nom l'indique, cet appareil permet de changer les courants de haute tension et de faible intensité en courants de faible tension et de grande intensité, ou encore d'effectuer l'opération inverse.

Nous avons vu en particulier que, pour le transport de l'énergie à grande distance, il permet d'élever considérablement la tension à l'usine génératrice, afin de réaliser un transport économique et, au lieu de consommation, de ramener la tension du courant aux valeurs moyennes auxquelles travaillent les différents appareils d'utilisation.

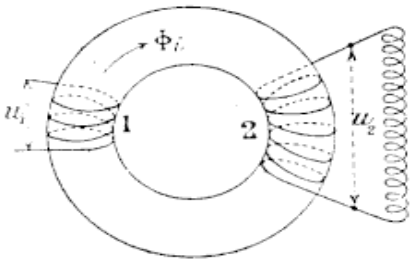


Fig. 353.

Un transformateur se compose essentiellement d'un circuit magnétique fermé sur lequel se trouvent bobinés deux enroulements, l'un dit enroulement ***primaire*** (1, fig. 353), est parcouru par le courant alternatif à transformer, l'autre ou enroulement ***secondaire*** (2, fig. 353) est le siège d'un courant alternatif induit de tension et d'intensité différentes et qui est le courant secondaire transformé.

Le flux Φ dans le circuit magnétique produit par le courant primaire est fonction, comme on le sait, du nombre de fils de ce primaire et de l'intensité qui le traverse, c'est-à-dire de la tension U_1 qui lui est appliquée. La force électromotrice induite U_2 dans le secondaire dépend du nombre de ses spires et du flux qui les traverse.

Par conséquent, pour une tension donnée appliquée aux bornes du primaire, on peut obtenir aux bornes du secondaire une force électromotrice quelconque par une simple combinaison du nombre des tours de spire des enroulements.

Sans entrer dans la théorie complète du transformateur, nous donnerons simplement les résultats les plus importants au point de vue pratique.

1° *La différence de potentiel* U_2 *aux bornes du secondaire est de même forme et de même phase que la différence de potentiel* U_1 *aux bornes du primaire.* Le rapport des valeurs efficaces de ces deux différences de potentiel est égal au rapport des nombres totaux des spires des deux enroulements.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si n_1 et n_2 sont les nombres de tours de spires du primaire et du secondaire, on a :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1} = k,$$

k est ce que l'on appelle le *rapport de transformation* ; c'est une constante de l'appareil.

2° *Lorsque le circuit secondaire est ouvert, l'impédance des bobines primaires est très grande,* et par suite le courant qui y passe est insignifiant. C'est pourquoi on peut laisser les transformateurs constamment branchés sur le circuit primaire. On dit, dans ce cas, que le transformateur fonctionne comme ***bobine de réaction***.

Au fur et à mesure que l'on demande au secondaire de débiter un courant plus intense, l'impédance des bobines primaires diminue et l'intensité du courant qui les parcourt se règle automatiquement.

3° Dans le transformateur à *pleine charge*, c'est-à-dire lorsque le secondaire est fermé sur une très faible résistance, *les courants primaire et secondaire sont en opposition de phase* (nul dans le primaire lorsqu'il a son intensité maxima dans le secondaire, et inversement) et le rapport de leurs intensités efficaces est égal au rapport de transformation.

4° *La puissance* W_2 *disponible aux bornes du secondaire est inférieure à la puissance* W_1 *consommée dans le primaire,* par suite des pertes par effet Joule dans les conducteurs de cuivre des enroulements, par courants de Foucault à l'intérieur de la carcasse métallique et par hystérésis du fer de l'armature. Le rendement du transformateur est :

$$R = \frac{W_2}{W_1},$$

Il varie suivant le régime de marche et, à pleine charge, peut atteindre 98 p. 100.

5° On indique généralement comme ***puissance***, la puissance apparente en kilovolts-ampères, KVA, aux bornes du secondaire lorsque le transformateur débite à pleine charge.

6° *Le transformateur est un appareil* ***réversible***, de sorte que l'on peut connecter au circuit l'un ou l'autre des enroulements. Si le circuit à petit nombre de tours de fil est alimenté en courant alternatif, on recueille sur le circuit à grand nombre de tours de fil un courant alternatif à haut voltage ; l'appareil fonctionne alors comme *survolteur*. Dans le cas contraire, le voltage sur le circuit d'utilisation est plus faible que sur le circuit primaire ; l'appareil fonctionne comme *abaisseur* de voltage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Réalisation pratique des transformateurs.

Nous allons maintenant donner quelques indications sur la réalisation pratique des transformateurs.

Les transformateurs se divisent, au point de vue de leur circuit magnétique, en deux grandes classes : les transformateurs à noyaux et les transformateurs cuirassés.

Les transformateurs à noyaux. — Ce premier type (fig. 354) se compose d'un cadre rectangulaire C constitué par des plaques feuilletées (pour éviter les pertes par courants de Foucault) en acier spécial donnant lieu à des pertes très faibles par hystérésis. Les grands côtés du cadre constituent les *noyaux*, et les petits côtés les *culasses*.

Les bobines B primaire et secondaire sont placées l'une sur l'autre ou l'une dans l'autre.

Transformateurs cuirassés. — Ce deuxième type comporte un bloc de fer feuilleté C portant deux caniveaux pour l'emplacement des bobines B (fig. 354). La partie placée entre les deux caniveaux constitue le noyau, et le cadre extérieur la culasse. Les bobines primaires et secondaires sont placées soit à côté l'une de l'autre, soit l'une dans l'autre.

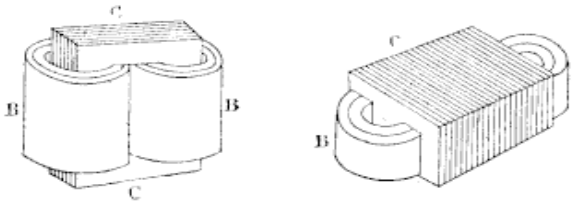


Fig. 354.

Transformateur à noyau. Transformateur cuirassé.

Presque tous les transformateurs sont du *type à noyaux*, qui présente, en effet, de grands avantages au point de vue de la commodité des démontages, de la réduction des pertes dans le fer et de l'isolement ; enfin, le modèle cuirassé se prête mal à l'exécution des transformateurs triphasés dont l'emploi se généralise de plus en plus. Pour les très petits modèles à bas voltage, qui, d'ailleurs, ne se font qu'en monophasé, ces inconvénients sont compensés, dans le type cuirassé, par l'avantage d'avoir une protection complète des enroulements, qui sont entièrement noyés dans le fer et, par suite, soustraits à tous les chocs extérieurs.

Le circuit magnétique (fig. 355) est formé par des tôles d'acier au silicium renfermant en outre des traces d'aluminium et d'autres métaux, afin de limiter les pertes par hystérésis, et en outre de conserver leurs qualités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indéfiniment c'est-à-dire ne pas être sujettes au phénomène du ***vieillissement***. On a constaté, en effet, que, si l'on n'emploie pas des aciers spéciaux, au bout d'un certain temps de fonctionnement, sous l'influence des innombrables changements de sens du champ magnétique qui les traverse, les tôles subissent des modifications de structure interne qui augmentent leur hystérésis. Les pertes d'énergie qui en résultent deviennent de plus en plus importantes, en même temps que la température de l'appareil s'élève, et finalement une fraction notable de l'énergie qui lui est fournie est dissipée en pure perte, abaissant ainsi son rendement.

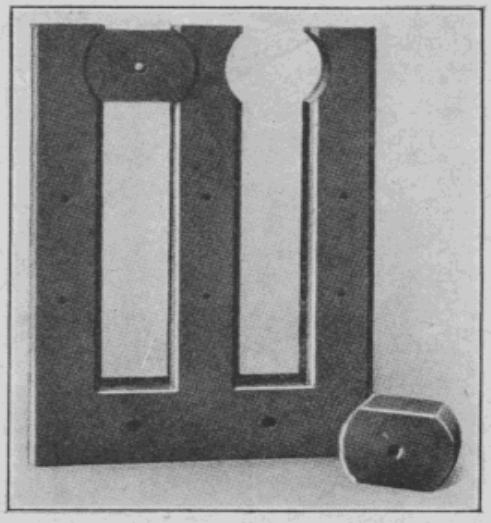


Fig. 355. — Circuit magnétique.

Les tôles ont en général 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur, sont recouvertes de papier mince, puis, après poinçonnage, collées ensemble à la gomme laque et serrées fortement entre elles à chaud. De la sorte, elles forment un seul bloc très solide, et qui ne risque pas de se desserrer pendant le fonctionnement, ce qui évite le ronflement en service, ronflement qui est provoqué par la vibration des parties métalliques mobiles sous l'influence du champ magnétique alternatif qui les traverse.

Les tôles sont découpées en forme d'U, le circuit magnétique étant fermé par un tampon mobile cylindrique qui entre ou sort à frottement dur ; ce joint, de grande surface, a la qualité précieuse de ne jamais se modifier avec le temps, puisque le serrage est dû à l'élasticité même de la tôle.

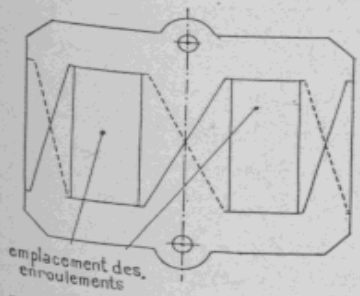


Fig. 356. — Tôles de transformateur de lampes.

Pour les petits transformateurs cuirassés du type lampes, les tôles sont découpées à la forme indiquée figure 356, et sont empilées ensuite une à une en croisant les joints.

Comme la réunion des enroulements sur un même noyau permet d'avoir les branches perpendiculaires à celui-ci plus courtes que dans un transformateur à noyaux, la réluctance du circuit magnétique devient très faible. Ce point est d'importance capitale pour des appareils de puissance très réduite, dont le courant à vide pourrait très facilement devenir gênant si le circuit magnétique était mal étudié.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aussi les transformateurs de lampes, de sonnerie (genre Ferrix et autres) sont-ils tous de ce modèle, mais, par suite de la difficulté du refroidissement, on ne peut utiliser la même construction pour des puissances notables.

Sur la carcasse magnétique, sont disposés les enroulements primaires et secondaires du transformateur.

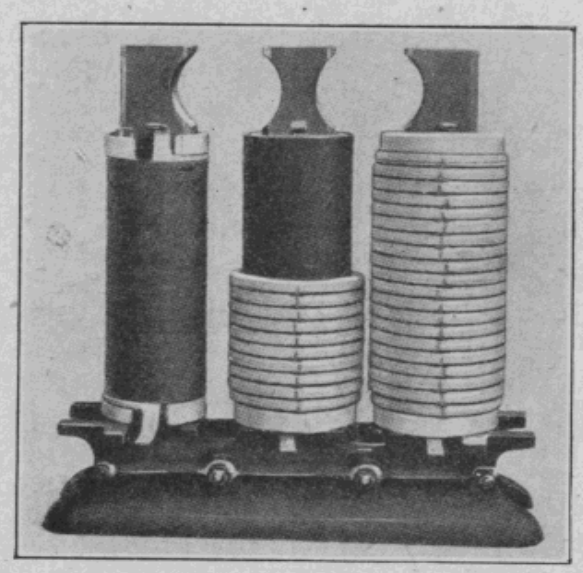


Fig. 357. — Transformateur à galettes concentriques en cours de montage.

D'une façon générale, les bobinages des transformateurs se divisent en deux grandes catégories : les ***bobinages concentriques*** et les ***bobinages à galettes alternées*** ; ce dernier mode de bobinage, très séduisant en principe, présente, en pratique, de grandes difficultés pour obtenir un bon isolement entre primaire et secondaire ; aussi, en général, adopte-t-on le type à bobinage concentrique, dont la figure 357 montre la réalisation.

Le bobinage basse tension, en cuivre profilé, est logé à l'intérieur d'un manchon isolant qui le sépare du bobinage haute tension placé à l'extérieur. Celui-ci est subdivisé en un grand nombre de bobines élémentaires afin de réduire la tension par bobines et entre couches d'une même bobine. Enfin, pour assurer un bon isolement de l'ensemble, celui-ci est en général enfermé dans un bac en tôle rempli d'huile (fig. 358).

* * *

Les transformateurs bien construits ont un rendement de 97 à 98 p. 100, c'est-à-dire que 2 à 3 p. 100 seulement de l'énergie fournie à l'appareil est absorbée par celui-ci sous forme de ***chaleur***. Si l'on se rappelle que l'on construit couramment des transformateurs de 10 000 kilowatts, c'est donc une énergie de 200 à 300 kilowatts qui se trouve convertie en chaleur dans l'appareil. On conçoit qu'il soit indispensable d'assurer une réfrigération énergique pour empêcher un échauffement dangereux.

A cet effet, les parois extérieures du transformateur sont munies d'ailettes, comme les radiateurs, de façon à assurer une grande surface de ***refroidissement***. Lorsque les puissances sont supérieures à 1 000 kilovolts-ampères, on est forcé d'assurer le refroidissement de l'huile à l'aide de radiateurs auxiliaires extérieurs (fig. 358 et 359) constitués par des tubes aplatis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en acier étiré, réunis à deux collecteurs à leurs extrémités, les mettant en communication avec la partie inférieure et la partie supérieure de la cuve. La circulation d'huile s'établit automatiquement de bas en haut à l'intérieur du transformateur où des canaux de circulation ont été ménagés, et de haut en bas dans les radiateurs où l'huile se refroidit. Au-dessus du transformateur, on dispose

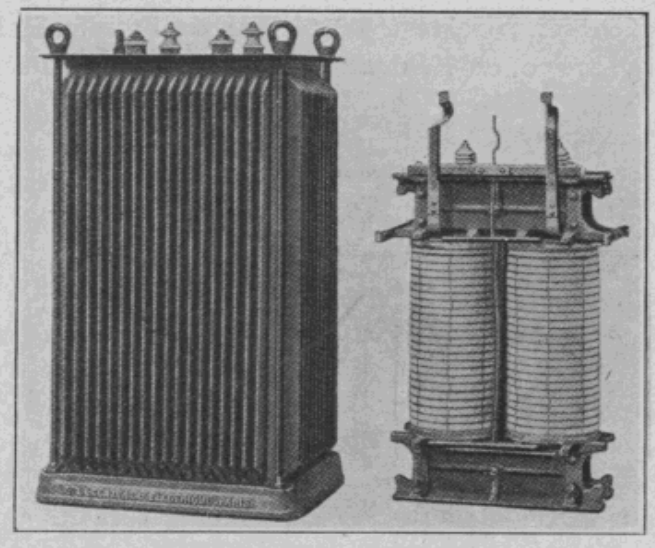
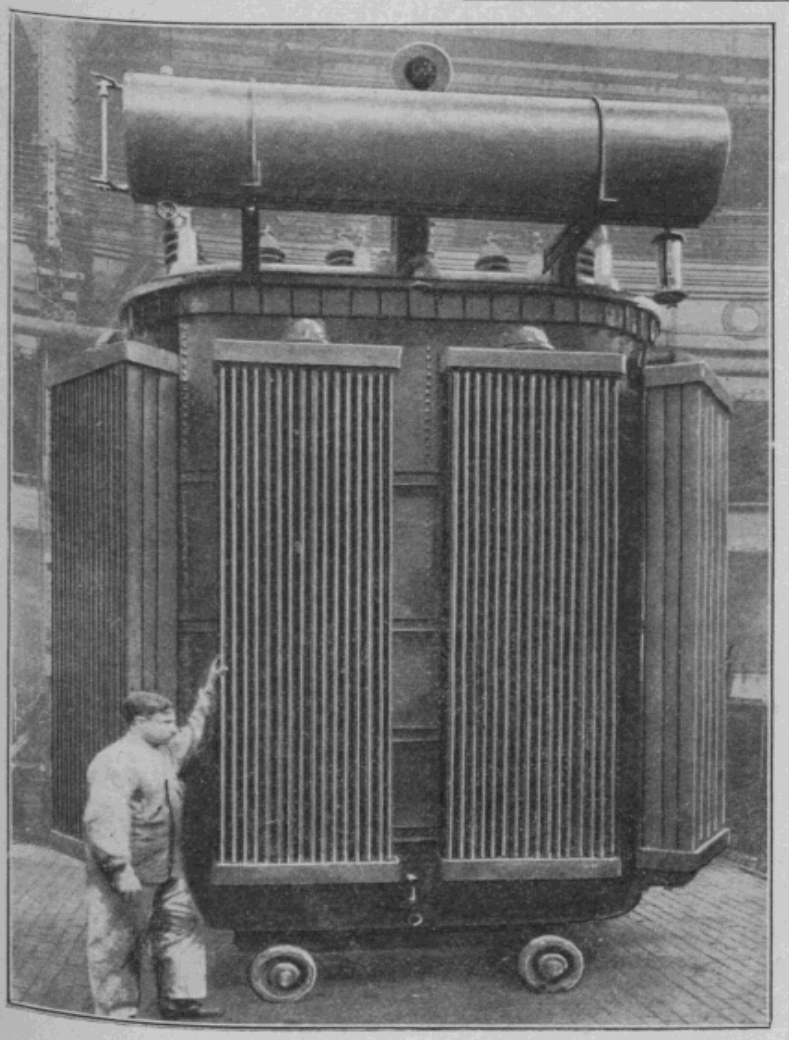


Fig. 358. — Transformateur dans son bain d'huile, et sorti.



un bac auxiliaire destiné à éviter la formation de boues dans la cuve et à réduire l'oxydation de l'huile au minimum. Comme ce bac n'est pas complètement rempli, l'air qui s'y trouve est séché par passage sur du chlorure de calcium. Enfin, une soupape de sûreté fonctionne au cas où, par suite de circonstances imprévues, la pression de-

Fig. 359. — Transformateur triphasé à refroidissement naturel immergé dans l'huile, 3 000 kilovolts-ampères, 70 000, 20 760 volts, 50 périodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vient trop forte à l'intérieur de l'appareil. La figure 360 montre le plan, la coupe et l'élévation d'un transformateur triphasé de ce système.

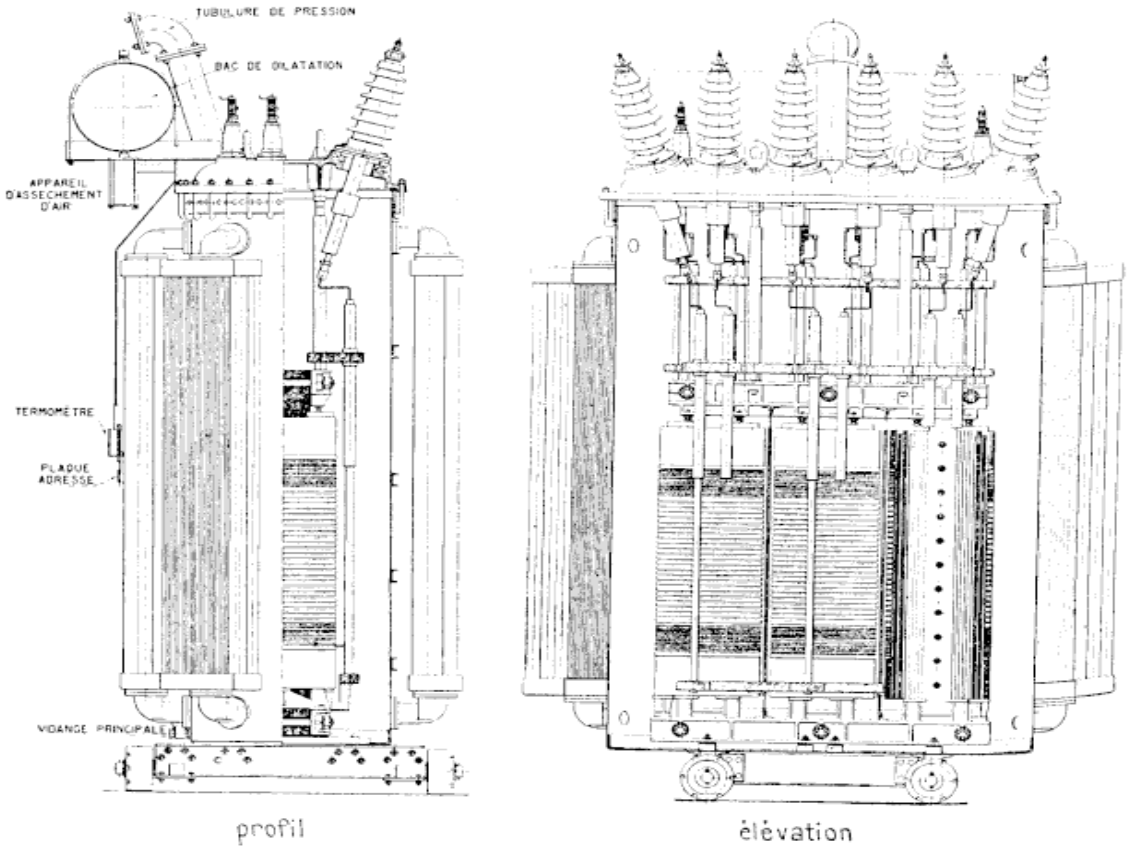


Fig. 360. — Transformateur triphasé à bain d'huile, refroidissement naturel, 7 500 kilovolts-ampères, 70 000 20760 volts, 50 périodes.

Dans d'autres types, on refroidit l'huile à l'aide d'une circulation d'eau dans un serpentin renfermé dans la cuve (fig. 360 et 361).

Lorsque les transformateurs ne doivent servir que d'une façon intermittente (T. S. F. par exemple), ou dans certains cas particuliers, on utilise des transformateurs *à sec*, c'est-à-dire sans bain d'huile, qui sont moins encombrants, moins lourds et d'un rendement généralement supérieur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au-dessus de puissances de 75 à 100 kilovolts-ampères, si l'on ne veut pas se servir de transformateurs *immergés*, il faut avoir recours à la ventilation forcée, ce qui nécessite des installations auxiliaires qui retirent au

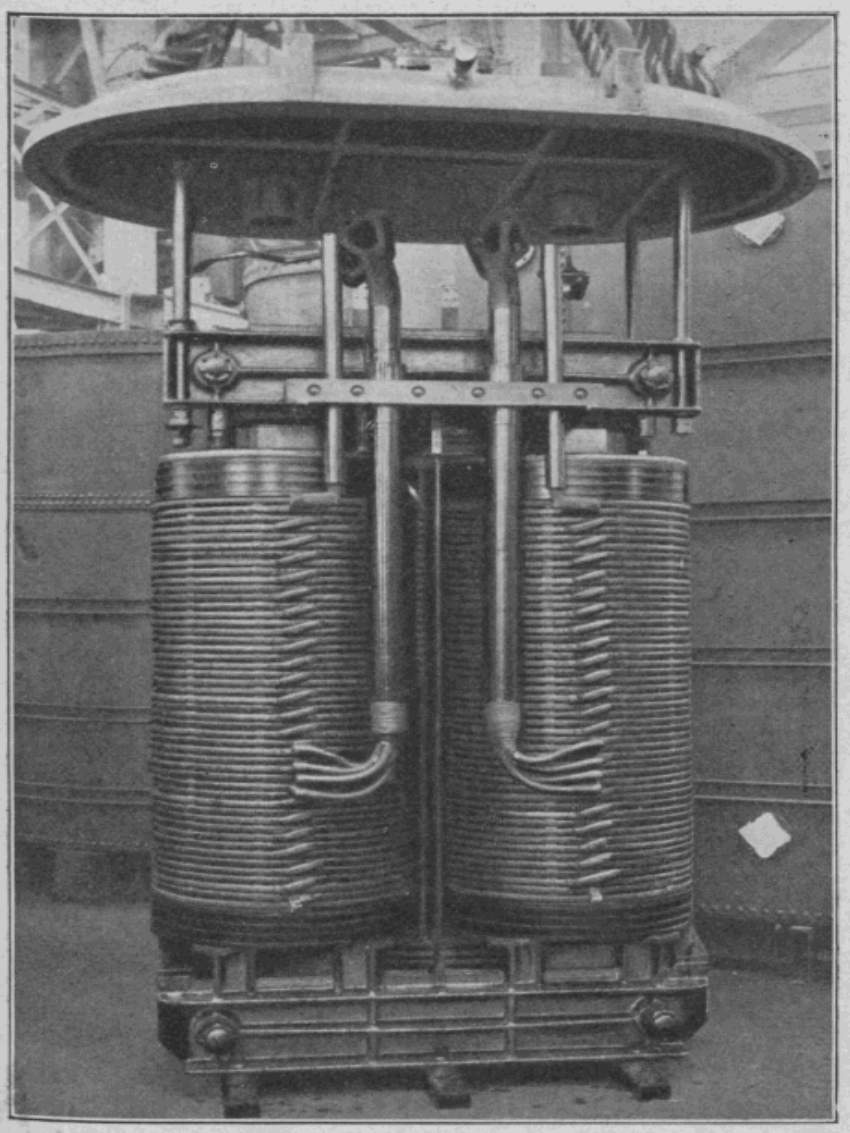


Fig. 361. — Transformateur monophasé à circulation d'eau, 10 500 kilovolts-ampères 45 000/10 500 volts, 50 périodes.

transformateur l'un de ses plus grands avantages, celui de ne réclamer que peu de surveillance.

* * *

Ce que nous venons de dire s'applique d'une façon générale à tous les courants alternatifs, quelle que soit leur nature. En particulier, comme c'est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le cas le plus général, lorsque le réseau est alimenté par du courant triphasé, il est nécessaire de disposer un transformateur sur chacune des phases.

On peut opérer en disposant les transformateurs monophasés dans le même plan ou, au contraire, les grouper symétriquement (fig. 362). Chacun des noyaux N_1, N_2, N_3 porte les deux enroulements et les culasses C, C_1 ferment le circuit magnétique.

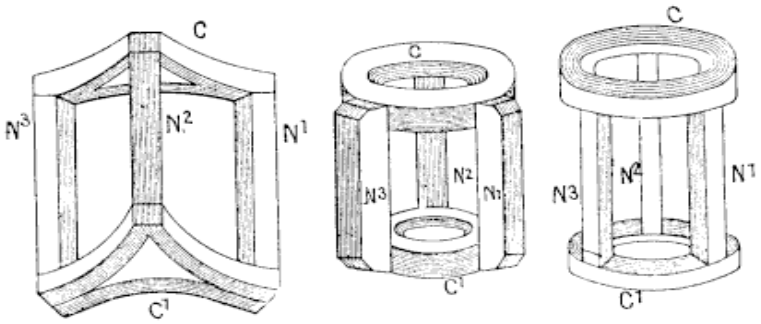


Fig. 362. — Divers modes de constitution des transformateurs triphasés.

* * *

Divers modes de connexion des phases peuvent être réalisés, aussi bien sur le réseau haute tension que sur le réseau basse tension. Ces montages sont au nombre de trois et appelés montage en ***étoile***, montage en ***triangle*** et montage en ***zigzag***. La figure 363 montre comment les fils sont connectés entre eux dans les diverses combinaisons que l'on rencontre dans la pratique. Chacune d'elles convient mieux que les autres suivant les conditions de fonctionnement, en particulier si plusieurs transformateurs sont couplés en parallèle, mais l'exposé de cette question, qui est du domaine purement technique, sortirait du cadre de cet ouvrage.

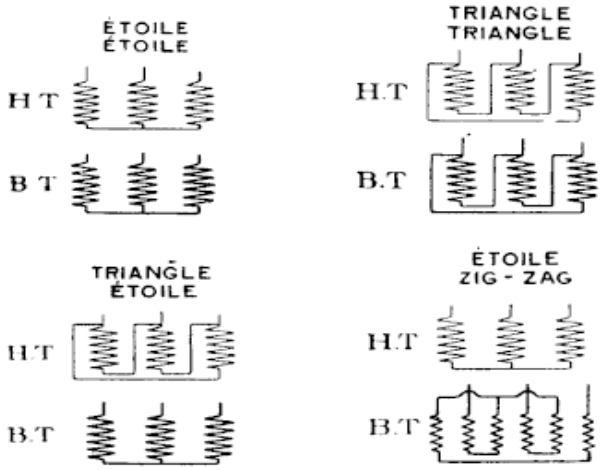


Fig. 363. — Couplage des transformateurs.

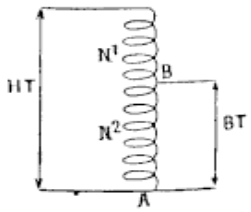


Fig. 364. — Principe de l'auto-transformateur.

* * *

Nous signalerons simplement également les ***auto-transformateurs*** que l'on emploie dans certains cas. Dans ces appareils, on ne place qu'un seul enroulement sur un circuit magnétique, et on le fait parcourir par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exemple par le courant haute tension (fig. 364). Les bornes du secondaire sont l'une des extrémités A de l'enroulement et un point B de cet enroulement. On montre facilement que le rapport de transformation est égal au rapport des nombres de spires compris entre les bornes des enroulements, c'est-à-dire que :

$$k = \frac{n_2}{n_1 + n_2}.$$

De plus, les intensités et les différences de potentiel sont en phase dans les deux circuits. Ces appareils, bien que théoriquement supérieurs aux transformateurs ordinaires que nous avons étudiés plus haut, ont l'inconvénient, si un court-circuit se produit, d'appliquer directement la haute tension au circuit d'utilisation. Aussi ne les emploie-t-on que dans les cas où on ne cherche que de petites variations de tension, par exemple lorsque l'on veut, sur un circuit 110 volts, alimenter un appareil ne supportant que 90 ou 100 volts.

* * *

L'***installation des transformateurs*** doit être entourée de ***précautions spéciales*** puisque, en général, la tension de l'un des enroulements est toujours très élevée. En particulier, on les dispose dans des locaux spéciaux où ne peut avoir accès qu'un personnel spécial; lorsqu'ils sont de petite puissance, on les établit quelquefois sur les poteaux des réseaux aériens. Ces règles s'appliquent également aux transformateurs dits d'abonnés, qui desservent directement chaque consommateur. Leur appareillage est très simple et comprend un coupe-circuit bipolaire et un interrupteur bipolaire pour chaque enroulement. De plus, afin d'éviter qu'en aucun cas le circuit basse tension ne puisse se trouver accidentellement porté au potentiel de la haute tension, on munit le transformateur d'appareils de sécurité qui l'isolent du réseau lorsque la tension devient trop grande sur le circuit d'utilisation.

Les dispositifs employés sont très nombreux ; nous n'en décrirons schématiquement qu'un seul (fig. 365). Un plateau métallique C est relié à l'une des bornes du circuit de basse tension par l'intermédiaire d'un fusible F. En face de lui se trouve disposé un plateau D, très léger et relié à la terre. Le fusible F soutient également une plaque métallique P qui peut venir fermer un circuit MAN en dérivation sur le réseau haute tension. Dans ces conditions, si la tension s'élève anormalement dans le circuit secondaire, le plateau C attire D qui vient à son contact et détermine une mise franche à la terre. L'inten-

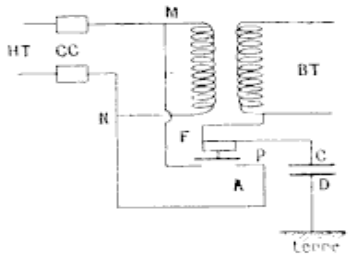


Fig. 365. — Protection des transformateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sité du courant qui circule alors dans FCD fond le fusible F ; la plaque P est libérée et vient fermer le circuit MAN. Le transformateur est alors isolé du réseau haute tension et celui-ci, qui est court-circuité par MAN, provoque la fusion des plombs CC qui protègent le transformateur.

* * *

Un transformateur d'un genre un peu particulier est la ***bobine de Ruhmkorff***, dont les multiples applications ont fait, surtout dans le passé, un des appareils essentiels de tous les cabinets de physique. C'est un transformateur à circuit magnétique *ouvert* (fig. 366), et on s'en sert surtout comme *survolteur* pour transformer du courant continu en courant *haché* à haut voltage.

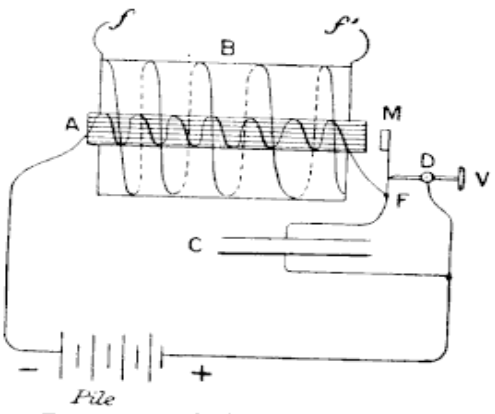


Fig. 366.— Schéma d'une bobine de Ruhmkorff.

Le principe de son fonctionnement repose sur les propriétés des extra-courants de rupture. Quand on ferme le primaire d'une bobine de Ruhmkorff sur une source de courant continu, une pile par exemple, un courant s'établit qui provoque l'aimantation du noyau de fer. Il en résulte une force électromotrice induite de fermeture dans le secondaire, qui est relativement faible, étant donné le temps que met le courant primaire pour atteindre sa valeur de régime. Nous avons vu, en effet, en étudiant les lois d'induction, que la force électromotrice induite est d'autant plus intense que la variation du flux qui la provoque est plus rapide.

Quand on rompt le circuit primaire, il se produit encore dans le secondaire une force électromotrice dite de rupture, qui est inverse de la précédente, mais *beaucoup plus grande*, car la rupture est plus rapide que la fermeture.

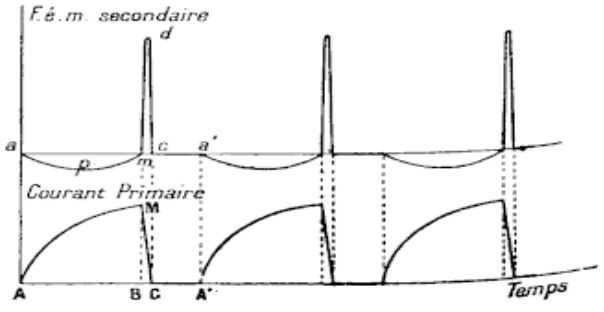


Fig. 367. — Allure des courants dans la bobine de Ruhmkorff.

La figure 367 montre schématiquement comment varie le courant dans le primaire et le secondaire en fonction du temps.

En général, la bobine de Ruhmkorff a son circuit secondaire ouvert,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de sorte que, si la force électromotrice de rupture est suffisante, il se produit une étincelle entre les deux bornes du circuit secondaire. C'est à peu près exclusivement à la production de cette étincelle que servent les bobines. Nous verrons, dans les chapitres relatifs à la télégraphie sans fil et à l'électricité médicale, les applications que l'on a faites des propriétés de cette étincelle.

Remarquons que, dans ces conditions, si la distance séparant les deux pôles est suffisante, l'étincelle ne se produira qu'au moment de la rupture du primaire (puisque la force électromotrice de fermeture est beaucoup plus faible). Par suite, la bobine possédera pratiquement un pôle positif et un pôle négatif.

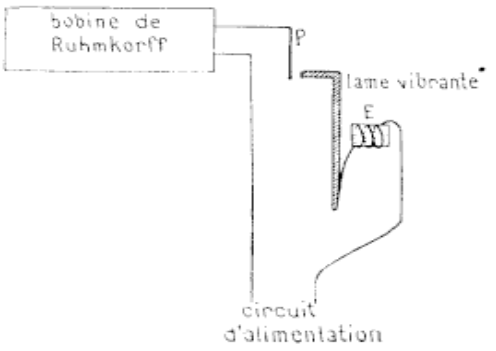


Fig. 368. — Rupteur simple.

* * *

Puisque la force électromotrice d'induction est d'autant plus grande que la rupture est plus brusque, on a proposé de nombreux dispositifs remplissant cette condition ; nous allons en passer quelques-uns en revue.

Le dispositif le plus simple utilise une lame vibrant sous l'action d'un électro-aimant qui l'attire (fig. 368). Cette lame porte une pointe P formant contact et assurant la liaison électrique avec le primaire de la bobine. Le courant passe alors dans celle-ci et dans le petit électro-aimant E qui attire la lame vibrante, rompant ainsi le courant. Le courant primaire étant interrompu, l'électro-aimant cesse d'attirer la lame, qui revient par élasticité fermer le contact, et les mêmes effets se reproduisent.

On comprend facilement qu'en réglant la course de la lame, son poids, son élasticité, sa longueur, la force de l'électro-aimant, on agisse sur la période de vibration de façon à réaliser celle qui donne les meilleurs résultats. Remarquons d'ailleurs que l'électro-aimant peut être soit parcouru par le courant total, soit monté sur une dérivation, etc. ; le nombre des combinaisons est extrêmement varié. On peut également utiliser les vibrations forcées d'une lame fixée en ses deux extrémités et sollicitée en son milieu par un électro-aimant (voir *Soupape Soulier*).

Nous décrirons à titre d'exemple le ***rupteur Carpentier*** (fig. 369). Lorsque le courant passe dans la bobine, les différentes pièces ont la disposition relative représentée sur la figure. Le noyau de fer de la bobine s'aimante et attire la palette P qui prend de la vitesse et vient rencontrer brusquement l'extrémité du ressort R qui s'éloigne alors de la pointe p,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rompant le circuit. L'aimantation du noyau de fer cesse, et le ressort R, agissant sur la palette P, la ramène à sa position initiale, rétablissant le courant dans la bobine. En agissant sur la vis r, on modifie la course du ressort R ; la vis r' règle la course de la palette P, et la tension du ressort R, que l'on peut faire varier, la vitesse de déplacement de P.

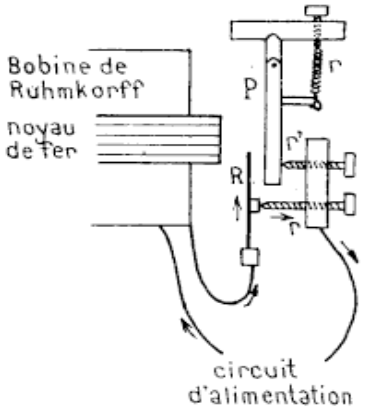


Fig. 369. — Rupteur Carpentier.

Dans d'autres systèmes, la rupture du circuit, au lieu de se produire entre deux parties métalliques, a lieu entre une pointe et un liquide, du mercure recouvert d'une couche d'alcool, de façon à en empêcher la vaporisation et l'oxydation et à assurer en même temps une meilleure coupure. La figure 370 donne le principe de ces ***rupteurs genre Foucault***, que l'on utilise dans les bobines de grande puissance afin d'éviter la détérioration des pointes métalliques. Une tige verticale de platine TI est solidaire d'un levier TF porté en E par une lame élastique verticale L. A l'autre extrémité du levier, une armature de fer doux F peut être attirée par le noyau de fer de la bobine. Le courant primaire suit le chemin PMITEKP. A ce moment, le noyau de fer aimanté attire F, le levier bascule, I sort de la couche de mercure M, le courant est rompu. L'élasticité de la tige L ramène ensuite I en contact avec M. Dans certains appareils, c'est un petit moteur qui, à l'aide d'un système bielle-manivelle, actionne la tige TI.

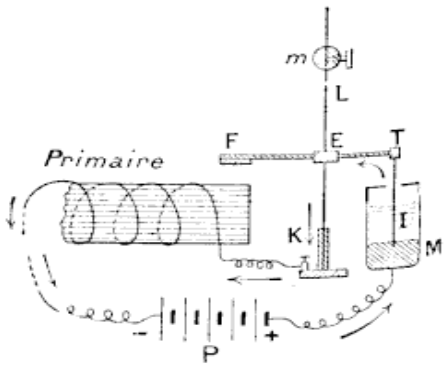


Fig. 370. — Rupteur genre Foucault.

Dans un grand nombre d'installations radiographiques, la rupture du courant primaire est obtenue à l'aide d'une ***turbine à mercure***. Voici le principe de cet appareil (fig. 371). Une pièce conique en fer ou en buis, dont l'axe est vertical, plonge dans un bain de mercure. Elle est percée d'un conduit oblique par rapport à l'axe. Quand cette pièce est mise en rotation rapide, par un moteur par exemple, la force centrifuge agit sur le mercure qui jaillit par l'orifice du conduit. Concentriquement se trouve placée une couronne métallique isolée qui est séparée en secteurs reliés à l'un des pôles de la bobine. Le jet de mercure balaye successivement ces différents secteurs et, comme le mercure est relié au secteur par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'autre pôle de la bobine, le circuit se trouve alternativement ouvert et fermé.

Lorsque le secteur d'alimentation est alternatif, la commande de la pièce tournante est réalisée à l'aide d'un moteur synchrone qui, une fois son régime de rotation atteint, détermine la coupure du courant toujours au même moment de la phase. La rupture du circuit se fait non plus dans l'alcool ou l'huile, comme dans les interrupteurs précédents, mais dans le gaz d'éclairage. La figure 372 montre une vue d'ensemble de l'appareil pour courant continu, et la figure 373 une vue de l'interrupteur fonctionnant sur courant alternatif. On voit que, dans ce dernier cas, le moteur est du type à attraction magnétique dont l'enroulement est fixe et l'armature mobile.

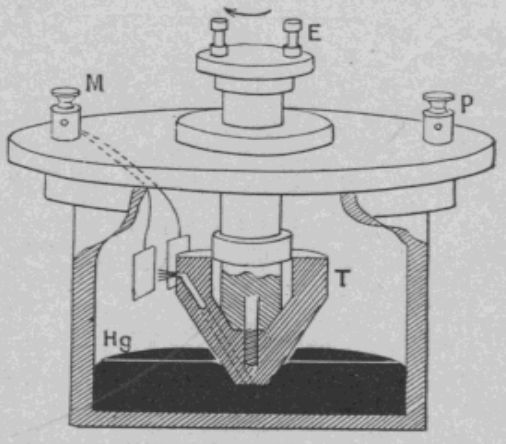


Fig. 371. — Interrupteur turbine.
T, turbine ; E, entraînement ; M, masse de contact ; P, pôle.

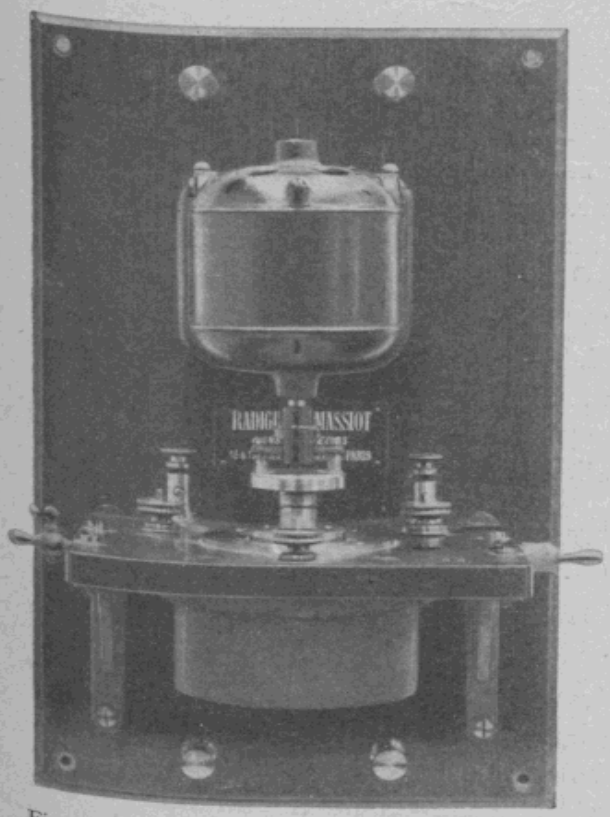


Fig. 372.— Interrupteur turbine courant continu.

Le rendement de ces appareils est excellent et a fait délaisser l'emploi des interrupteurs électrolytiques, dont nous dirons cependant un mot, par suite de l'intérêt théorique qu'ils présentent et du rôle qu'ils ont joué en télégraphie sans fil. Ces interrupteurs sont de deux types : Wehnelt et Simon.

L'***interrupteur Wehnelt*** est constitué par un voltamètre dont les électrodes ont des surfaces très différentes, généralement un fil de platine très fin enfermé dans un tube de verre dont la section seule affleure et qui sert d'anode, une lame de plomb constituant la cathode. Le tout baigne dans une solution d'acide sulfurique au dixième. Quand un courant assez intense et d'une force

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électromotrice d'au moins 60 volts circule dans cet appareil, le fil de platine devient incandescent et son extrémité s'entoure d'un manchon d'eau vaporisée et même dissociée qui forme isolant et coupe le courant. Immédiatement, le fil se refroidit, les gaz se détachent de son extrémité, et le courant passe de nouveau. On peut ainsi arriver à réaliser 700 à 800 interruptions par seconde, c'est-à-dire infiniment plus que par aucun dispositif mécanique (fig. 374).

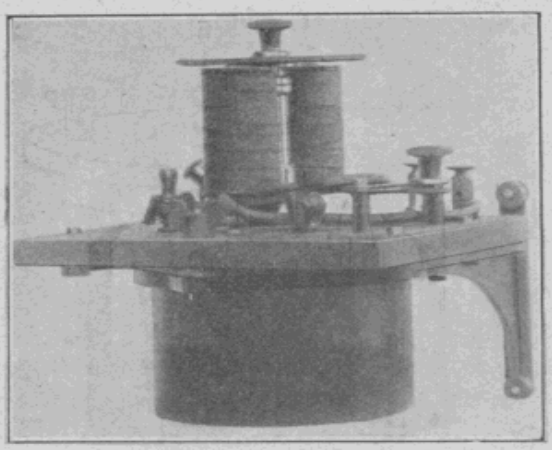


Fig. 373. — Interrupteur turbine courant alternatif.

Dans les ***interrupteurs électrolytiques Simon***, Caldwell, etc., les deux électrodes sont larges, constituées en général par des lames de plomb plongeant dans l'eau acidulée et séparées par une lame de verre percée de trous dont le diamètre doit être inférieur à 2 millimètres (*o*, fig. 375) ou par deux lames de verre laissant entre elles une fente de largeur variable. Quand le courant passe, il se forme un mélange tonnant au voisinage des trous qui deviennent lumineux, mélange qui empêche le passage du courant. Le fonctionnement est le même que celui du Wehnelt, mais il faut cependant remarquer qu'ici, l'appareil étant symétrique, lorsqu'on l'alimente par du courant alternatif, il interrompt les deux périodes de courant, tandis que le Wehnelt, par suite de sa construction même, n'interrompt que la demi-période pour laquelle la pointe de platine est anode. Nous verrons plus loin que cette propriété a reçu une application intéressante dans les redresseurs à pointes et dans les parafoudres.

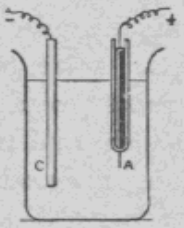


Fig. 374. — Interrupteur Wehnelt.
C, cathode de plomb; A, anode en platine.

* * *

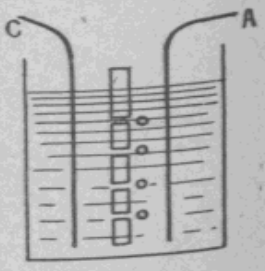


Fig. 375.
Interrupteur Simon.

Quel que soit le dispositif employé pour produire la rupture du courant primaire dans la bobine de Ruhmkorff, par suite de la self-induction du bobinage, il se produira toujours une étincelle ou même un arc qui non seulement occasionne la détérioration des pièces des rupteurs, mais aussi nuit à son rendement, puisque le courant tend à se prolonger par cet

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

arc. Nous avons rencontré un problème analogue dans le cas des interrupteurs de courant ordinaires. Les mêmes solutions sont valables ici (courant d'air, champ magnétique, emploi d'une dérivation, etc.) ; mais, dans la bobine de Ruhmkorff, le procédé ordinairement employé consiste dans l'emploi d'un condensateur C en dérivation sur le rupteur, de sorte que le schéma de la bobine est celui représenté sur la figure 376 (le condensateur est logé dans le socle de l'appareil). Le fonctionnement de cette capacité est le suivant : dès que commence la rupture, la résistance du primaire augmente très vite, d'où création d'une force électromotrice induite considérable provoquant un transport d'électricité qui s'accumule dans les condensateurs, de sorte que la résistance a le temps de devenir très grande avant que la force électromotrice ait atteint une valeur suffisante pour produire une étincelle ; par suite, celle-ci ne jaillira pas.

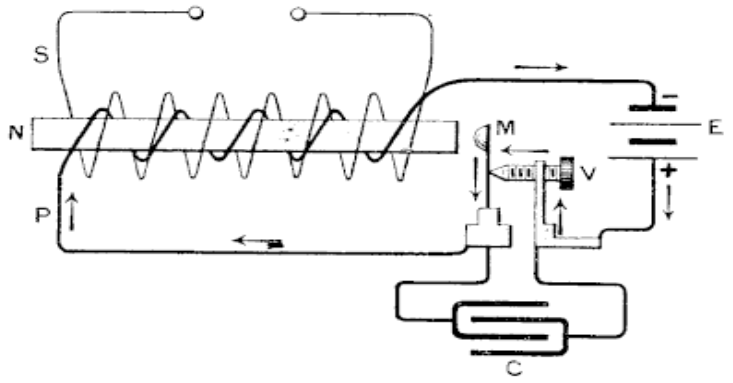


Fig. 376. — Bobine de Ruhmkorff avec condensateur.
E, pile ; N, noyau de fer doux ; P, enroulement primaire ; S, enroulement secondaire ; V, vis de réglage ; C, condensateur shunté sur l'interrupteur ; M, marteau de l'interrupteur.

Remarquons d'ailleurs que, si la rupture est extrêmement brusque (avec les interrupteurs électrolytiques, par exemple), il est inutile et même nuisible de disposer un condensateur aux bornes de la rupture.

AUTRES TRANSFORMATEURS ET CONVERTISSEURS DE COURANTS

Au lieu de réaliser la transformation des courants ***statiquement***, c'est-à-dire à l'aide d'appareils ne comprenant pas de pièces mobiles, comme les transformateurs, on peut utiliser des ***transformateurs dynamiques*** que nous allons passer rapidement en revue.

Leur principe est extrêmement simple : le courant à transformer actionne un moteur qui commande une dynamo ou un alternateur qui produit le courant désiré. Chacun de ces deux générateurs peut être établi d'après un type quelconque.

La *dynamo génératrice* peut être à courant continu ou à courants alter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

natifs de fréquence et de nombre de phases variables à volonté.

La *dynamo réceptrice* peut être un moteur continu, série ou shunt, ou un moteur alternatif synchrone ou asynchrone, etc.

Au lieu de se servir d'un groupe moteur-générateur, on peut condenser ces appareils en un seul auquel on donne le nom de ***commutatrice***.

Dans les commutatrices à ***deux enroulements***, la carcasse métallique seule est commune, les enroulements des deux induits étant distincts.

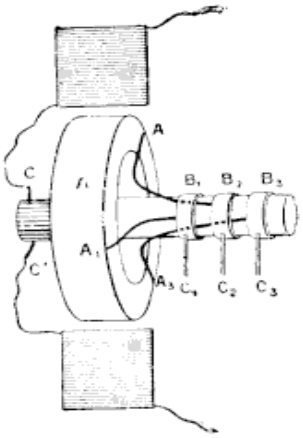


Fig. 377. — Principe de la dynamo omnibus.

C, C', balais amenant ou captant du courant continu ; B_1, B_2, B_3, bagues amenant ou captant des courants alternatifs triphasés : A_1, A_2, A_3, trois points équidistants de l'anneau de Gramme en relation avec les trois bagues.

Dans les commutatrices à un enroulement, la carcasse et les enroulements induits sont confondus.

A titre d'exemple, nous donnerons le principe de la « ***dynamo omnibus*** ». Elle est constituée par un anneau Gramme muni d'un côté d'un collecteur à lames avec deux balais C, C' et de l'autre, de trois bagues isolées frottant sur des balais et en relation avec trois points équidistants de l'enroulement (fig. 377).

Les inducteurs étant montés en série, si on fait tourner la machine à l'aide d'un moteur auxiliaire, on recueille d'un côté du courant continu (CC'), de l'autre du courant alternatif triphasé ($C_1C_2C_3$).

Si on excite séparément les inducteurs et qu'on envoie par CC' du courant continu, on a un moteur asynchrone et on recueille du courant triphasé par $C_1C_2C_3$.

Si, au contraire, on envoie du courant triphasé par $C_1C_2C_3$, la machine fonctionne comme moteur synchrone et débite du continu par CC'.

La figure 376 donne également le principe d'une commutatrice transformant le courant continu en courant alternatif monophasé que l'on recueille par deux bagues reliées à deux points diamétralement opposés de l'enroulement.

Ces appareils ne sont employés que dans certains cas particuliers, car leur rendement est inférieur à celui des groupes convertisseurs ordinaires.

L'emploi des commutatrices pour la transformation des courants alternatifs en courant continu s'est rapidement développé au cours des dernières années, notamment pour l'équipement des sous-stations de traction.

En effet, un des avantages très appréciables de la commutatrice est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

son aptitude, bien meilleure que celle du groupe moteur-générateur, à supporter momentanément de fortes surcharges relativement à la puissance de régime. Mais il existe une différence fondamentale entre la

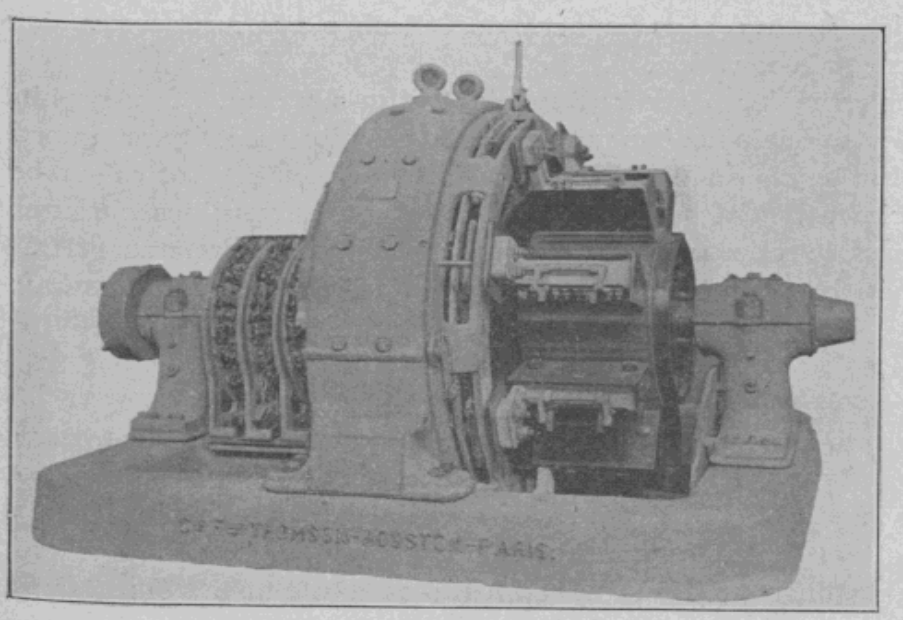


Fig. 378. — Commutatrice T.-H. de 1 000 kilowatts, 750 tours-minute, 600 volts.

commutatrice et le groupe moteur-générateur. Ce dernier se compose de deux machines distinctes n'ayant entre elles qu'une liaison mécanique, de sorte que les à-coups de service ne réagissent sur la génératrice que par des variations de vitesse se traduisant par des variations de la tension continue aux bornes.

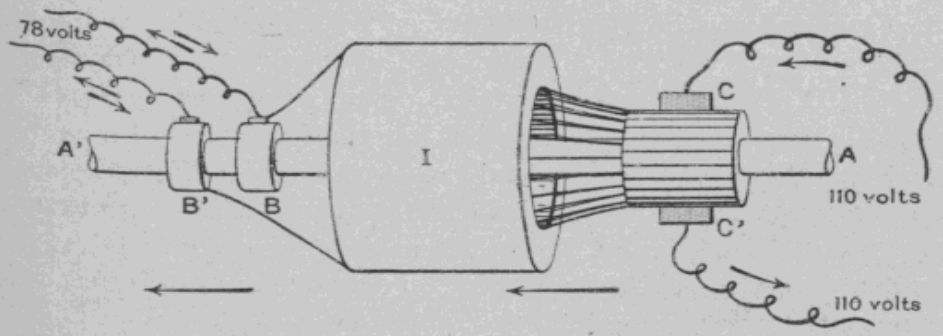


Fig. 379. — Schéma d'une commutatrice.

Au contraire, dans la commutatrice, un seul et même enroulement est connecté d'une part aux circuits alternatifs, d'autre part au circuit continu. Il en résulte que le fonctionnement des collecteurs et des balais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

continus peut être sérieusement affecté lorsque le régime est troublé. Il se produit des crachements aux balais qui peuvent, dans certaines circonstances, donner naissance à des arcs qui s'amorcent soit entre les lignes de balais successifs, soit entre les balais et la masse. C'est l'accident connu sous le nom de « flash » et qui peut endommager gravement la machine.

Pour remédier à cet inconvénient, non seulement les machines sont étudiées spécialement et munies de circuits électriques amortisseurs, mais les balais sont eux-mêmes protégés par des sortes de boites en fibro-ciment, et des écrans isolants et incombustibles entourent complètement le collecteur (voir fig. 378). Enfin, des disjoncteurs ultra-rapides disposés du côté continu donnent une protection supplémentaire.

* * *

Lorsque l'on ne demande pas une très grande puissance, par exemple pour charger quelques batteries d'accumulateurs ou pour actionner de petits moteurs domestiques, il existe toute une série d'appareils qui permettent la transformation très commode des courants alternatifs en courants sinon continus, tout au moins d'une polarité constante. Telles sont la ***soupape de Soulier***, le ***redresseur Rosengart***, la ***soupape de Nodon***, etc.

Le *redresseur Soulier* est constitué par un transformateur qui abaisse la tension alternative du secteur à la tension d'utilisation. Les deux ondes du courant transformé sont triées par un vibreur qui est actionné par le courant alternatif lui-même et ferme le circuit au moment où le courant prend une direction convenable pour la charge de l'accumulateur.

Dans le *redresseur Rosengart*, c'est un petit moteur synchrone qui entraine un collecteur cylindrique divisé en secteurs isolés les uns des autres et sur lequel frottent deux balais. Ce moteur possède trois paires de pôles, donc il ne tourne que d'un tiers de tour pendant une période du courant. Le commutateur est divisé en six parties égales, alternativement conductrices et isolantes. En réglant le calage des balais, on arrive à réaliser la prise en phase exacte. Enfin, la forme particulière des secteurs conducteurs permet, en déplaçant les balais suivant une génératrice, de faire varier le voltage, ce qui est important, au cours de la charge d'une batterie d'accumulateurs par exemple.

Les *soupapes électrolytiques* sont analogues, au point de vue du fonctionnement, aux interrupteurs électrolytiques dont nous avons parlé précédemment. Ce sont des voltamètres ne laissant passer que les courants d'un sens et arrêtant les courants de sens opposé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ils sont constitués par une lame d'aluminium et une lame de fer (soupape Nodon) ou par une lame d'aluminium et une lame de plomb (soupape de Graetz). L'électrolyte est une solution saturée de phosphate de potassium.

Quand la lame d'aluminium fonctionne comme anode, l'oxygène qui s'y dégage la recouvre d'une couche d'oxyde d'aluminium qui constitue une lame isolante empêchant le passage du courant. Pendant l'alternance suivante, l'oxygène se dégage sur le plomb ou le fer et l'hydrogène sur l'aluminium, il y a réduction de l'oxyde et l'appareil est de nouveau rendu conducteur. C'est ici la couche d'alumine qui remplace la pellicule gazeuse des interrupteurs électrolytiques, mais, tandis que dans ceux-ci cet isolant momentané se détruit spontanément, dans le cas présent ce n'est que par l'action de l'onde du courant alternatif de sens opposé à celui qui a provoqué la formation. Ces appareils donnent donc des ruptures qui ont la même fréquence que celle du courant, et non plus une fréquence qui dépend de leur construction.

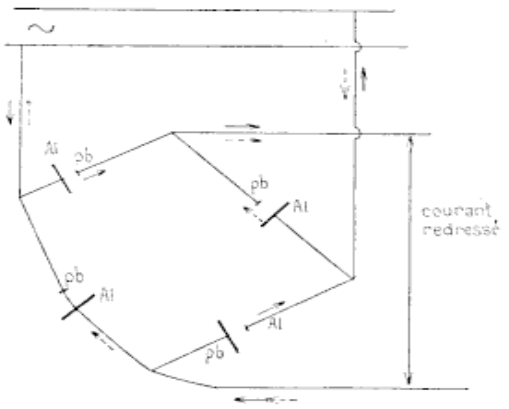


Fig. 380. — Montage de quatre soupapes électrolytiques pour utiliser les deux ondes d'un courant alternatif.

Ces appareils ont un mauvais rendement puisqu'ils détruisent leur demi-onde, et de plus ils s'échauffent rapidement lorsqu'on leur demande un travail prolongé, ce qui nuit au fonctionnement. On remédie à ce dernier inconvénient en prenant des appareils de grandes dimensions. Quant au premier, on y obvie en utilisant quatre soupapes montées en pont de Wheatstone, le courant redressé passant dans la diagonale du pont (fig. 380). Les flèches indiquent le sens de passage du courant.

Remarquons que, pour des courants de haute tension, ces soupapes ne fonctionnent plus et laissent passer les deux ondes directe et inverse.

* * *

Pour redresser un courant alternatif de haute tension, un dispositif original utilise les propriétés de la ***décharge entre pointe et plateau*** dont nous avons déjà parlé précédemment. On a vu que le courant ne passe que de la pointe vers le plateau, c'est-à-dire que la pointe est toujours anode.

Les difficultés se présentent lorsque l'intensité du courant est consi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dérable, car il s'établit un arc intense qui ne rectifie que médiocrement.

On obtient un redressement complet et un fonctionnement régulier en soufflant cet arc à l'aide d'un courant d'air allant de la pointe au plateau. Le dispositif pratique est représenté sur la figure 381. La pointe glisse à l'intérieur d'un tube p qui est soit isolant, si l'extrémité de la pointe est à l'intérieur du tube ou à l'orifice, soit métallique, si la pointe sort de quelques centimètres. Le plateau P est assez large pour que la décharge ne puisse se produire de la pointe vers ses bords. Le courant d'air entre en A et est projeté vers le plateau.

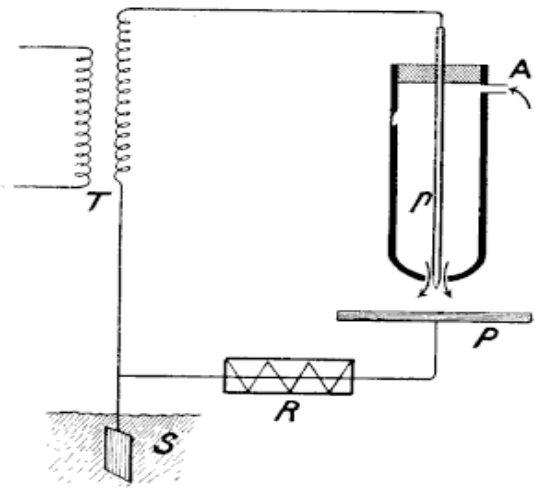


Fig. 381. — Schéma d'un redresseur à pointe.

L'une des extrémités du redresseur est reliée à l'un des pôles du secondaire d'un transformateur T de 4 000 volts dont l'autre pôle est au sol. Le courant positif va de la pointe au plateau et aucune décharge n'a lieu en sens opposé, pourvu que la distance entre la pointe et le plateau, la distance entre la pointe et l'orifice de sortie de l'air, la pression de l'air et la tension soient convenablement réglées.

La décharge du courant redressé est blanche, rythmée et saccadée, ce qui la différencie de l'arc coloré que l'on obtient quand il n'y a pas de courant d'air ; cet arc agit légèrement comme redresseur, mais en sens opposé.

Pour des tensions plus faibles, le fonctionnement est beaucoup moins régulier. Il faut une certaine différence de potentiel minima pour que l'intervalle d'air puisse être franchi.

Lorsque la pointe est à l'intérieur d'un tube de verre, la décharge est plus sèche, mais il y a tendance à la production d'ondes. Dans ce cas, il faut employer des électrodes en aluminium et un grand plateau P.

Quand la pression du gaz augmente progressivement, le redressement passe par un optimum qui dépend de la position des électrodes et du diamètre de l'ouverture destinée au passage du gaz. Au delà de la pression optimum, le fonctionnement devient irrégulier.

Un dispositif analogue est réalisé par la ***soupape de Villard*** (fig. 382). Ici encore, la différence de forme des électrodes amène la dissymétrie dans leur manière de se comporter. Si on place une grande électrode d'alu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

minium dans un tube de Geissler, en face d'une petite électrode placée au fond d'un tube étroit, on constate que le tube est beaucoup plus résistant au passage de la décharge électrique quand on utilise la petite électrode comme anode. Le tube joue donc le rôle de soupape et ne laisse passer que les courants du sens indiqué sur la figure.

Ces appareils n'ont d'ailleurs plus grand intérêt, comme nous le verrons, depuis la découverte des redresseurs dits kénotrons.

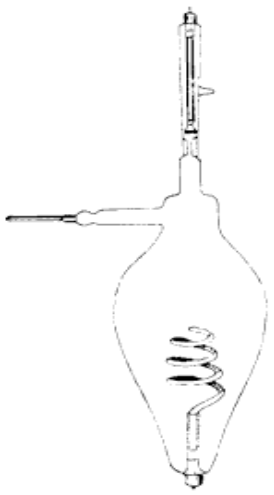


Fig. 382. — Soupape de Villard.

* * *

Un redresseur de courant souvent employé en radiologie est connu sous le nom de ***contact tournant***. Nous ne décrirons que le principe de l'appareil utilisant les deux phases (fig. 383).

Un axe vertical ou horizontal, en matière isolante, porte deux séries de conducteurs fixés à l'extrémité des bras isolants, dont une série est directe, et l'autre disposée en croix.

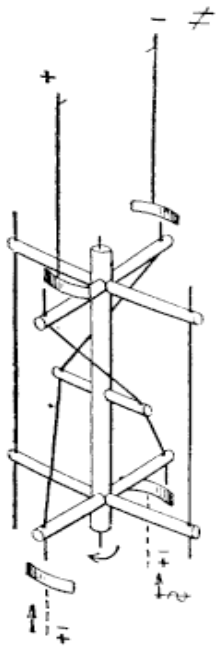


Fig. 383. — Axe et branches de connexion d'un commutateur tournant à deux phases.

Suivant la circonférence décrite par les extrémités de ce système tournant, et convenablement calés, se trouvent des secteurs métalliques de longueur déterminée. Les secteurs du bas reçoivent le courant alternatif à haute tension qui sort du transformateur. Les secteurs du haut forment collecteurs et distribuent le courant qu'on utilise.

Grâce à la disposition des conducteurs qui établissent la liaison entre les secteurs du haut et ceux du bas, on comprend qu'à chaque inversion de courant du transformateur correspond une position déterminée des bras du système tournant, telle que le courant traverse le tube dans un sens invariable.

Si donc un moteur synchrone entraîne ce système tournant, qui peut être très léger, on aura réalisé mécaniquement le redressement du courant. Mais les dimensions de l'appareil sont assez considérables et la puissance du moteur l'actionnant n'est pas négligeable.

* * *

La classe de convertisseurs dont nous allons parler maintenant, et qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comprend les convertisseurs à mercure, les redresseurs tungstène-argon (tungar), les soupapes genre kénotron, etc., repose sur des principes tout différents.

Le principe des ***redresseurs à vapeur de mercure*** est très simple. La rupture d'un circuit électrique produit, entre les deux pièces que l'on écarte, un *arc* qui a, entre autres propriétés, celle de ne laisser passer le courant que dans un sens. C'est-à-dire que, si le courant d'alimentation est alternatif, l'arc ne peut être traversé que par des impulsions de courant de même sens. Cet effet de *soupape électrique* est particulièrement bien réalisé par un arc lumineux au mercure jaillissant dans un espace vide. Si l'on produit un arc électrique à l'aide du courant continu, dans un espace vide d'air, non seulement, à tension égale, les électrodes peuvent être plus éloignées que dans l'air, mais encore l'arc présente un aspect particulier. A l'anode, il forme une auréole qui élève sa température ; à la cathode, on aperçoit une tache claire, blanche, incandescente, se déplaçant avec rapidité sur la surface de l'électrode. Si celle-ci est en mercure, sous cette tache, dite *tache de cathode*, il se forme un profond cratère d'où s'échappe un flot intense de vapeur du métal. On aperçoit même, si le vide est très poussé, une flamme négative s'élevant du cratère.

La colonne lumineuse positive part directement de l'anode, reste compacte jusqu'à la cathode réelle et laisse libre un espace obscur. C'est cette colonne qui, dans les lampes à vapeur de mercure, est la source lumineuse utilisée.

L'explication théorique du passage du courant est la suivante : le transport d'électricité a lieu grâce au déplacement des ions gazeux positifs ou négatifs. La charge des ions positifs est toujours liée à l'atome chimique, tandis que la charge élémentaire négative, l'électron, apparaît comme une masse impondérable. Dans l'atmosphère de l'arc de mercure existent, nous verrons pourquoi plus loin, des particules dissociées et des molécules neutres.

D'un point de la surface de la cathode, chauffé très fortement par les ions qui le heurtent, s'échappent des électrons qui se dirigent vers l'anode à grande vitesse. Dans leur parcours, ces électrons heurtent des molécules neutres de mercure et sous l'influence du choc celles-ci se séparent en charges électriques positives et négatives (ionisation par choc). Toutes les charges positives se précipitent sur la cathode qu'elles bombardent, élevant sa température, et par suite contribuent à l'émission d'électrons et au passage du courant, tandis que les ions positifs formés par ionisation augmentent la conductibilité de la vapeur.

On voit donc que, pour que le courant passe, il faut qu'il existe des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

molécules à l'état gazeux et des particules dissociées. Pour réaliser cet état, c'est-à-dire pour amorcer la lampe, il est nécessaire de procéder à un *allumage indirect*. Voici comment on y arrive.

La figure 384 représente une lampe à vapeur de mercure comportant une électrode auxiliaire de mercure *c*. On bascule la lampe de façon que *b* et *c* soient en contact. En ramenant la lampe dans sa position normale, au moment où la nappe de mercure se rompt, il y a production d'une étincelle, qui sera suffisante pour libérer des électrons et vaporiser une quantité de mercure telle que l'arc puisse s'établir entre les électrodes principales *a* et *b*. La figure indique les connexions : il faut que l'électrode principale de mercure soit une cathode aussi bien dans le circuit d'allumage que dans le circuit principal : elle doit donc être réunie aux pôles négatifs des deux circuits.

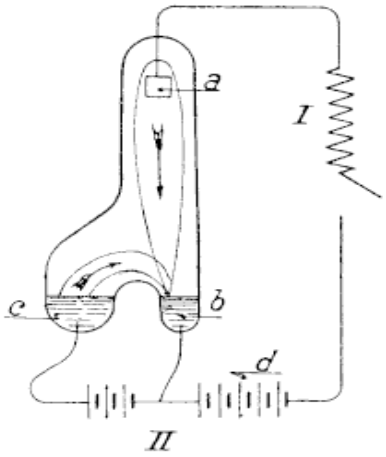


Fig. 384.

On verra, au chapitre sur l'éclairage, d'autres modes d'allumage que l'on peut utiliser.

Nous avons vu que les électrons, particules négatives, ne peuvent être émis que par une électrode fortement chauffée ; de plus, il faut évidemment que cette électrode soit une cathode. Donc, si, dans l'appareil que nous avons représenté schématiquement figure 384, la source de courant alimentant le circuit I est une source alternative, le circuit d'allumage II étant toujours branché sur un courant continu, un arc lumineux s'allumera de *a* à *b* chaque fois que *a* sera positif et *b* négatif. Dans tout autre cas, le courant ne passera pas. La figure 385 donne la forme du courant qui passera dans l'appareil, lorsque l'alimentation est faite en courant alternatif. Pratiquement, il ne passe aucun courant pendant les périodes *a*. Il ne faut d'ailleurs pas croire que l'énergie correspondante soit anéantie ; son arrivée dans le circuit correspondant et pour la période correspondante est simplement suspendue.

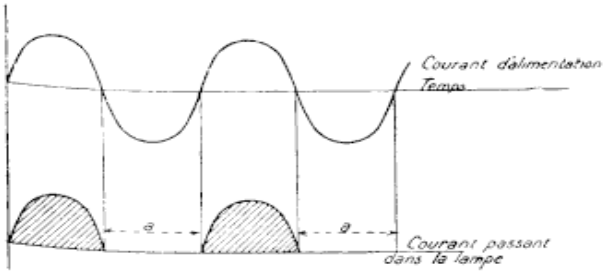


Fig. 385. — Forme du courant passant dans un redresseur à vapeur de mercure.

Le redresseur intermittent que nous venons de décrire ne serait pas

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un emploi pratique. Il faudrait en effet maintenir l'alimentation de l'arc auxiliaire d'allumage à l'aide d'une source contine, pour entretenir l'*excitation* de la cathode. Sans cette précaution, la soupape s'arrêterait de fonctionner au premier changement de sens du courant, car la rupture du courant, même pendant 1×10^{-5} seconde, suffit pour refroidir la base de l'arc lumineux à la surface du mercure et pour interrompre le courant d'électrons.

Pour avoir un appareil pratique, il suffit, dans le cas du courant monophasé considéré plus haut, de réaliser l'accouplement représenté schématiquement figure 386, et grâce auquel on utilise les deux ondes du courant sinusoïdal. Le courant du circuit alternatif alimente un transformateur dont l'enroulement secondaire est en deux parties, le point neutre de cet enroulement étant connecté à une borne du circuit d'utilisation de façon que seule la moitié d'enroulement ayant une force électromotrice dirigée du point neutre vers l'extérieur soit parcourue par le courant, puisque le convertisseur branché dans le circuit ne peut être traversé que par les ondes de cette polarité. Pendant ce temps, l'autre moitié d'enroulement reste sans courant. Si le courant d'alimentation est à 42 périodes par seconde, les deux moitiés d'enroulement seront parcourues par le courant 84 fois par seconde.

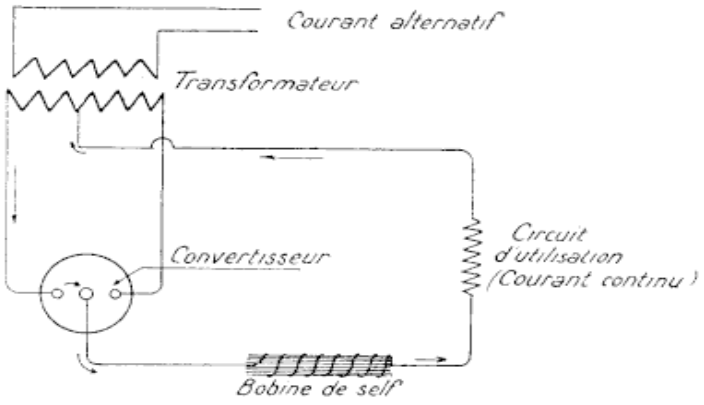


Fig. 386. — Montage d'un convertisseur de courant alternatif monophasé.

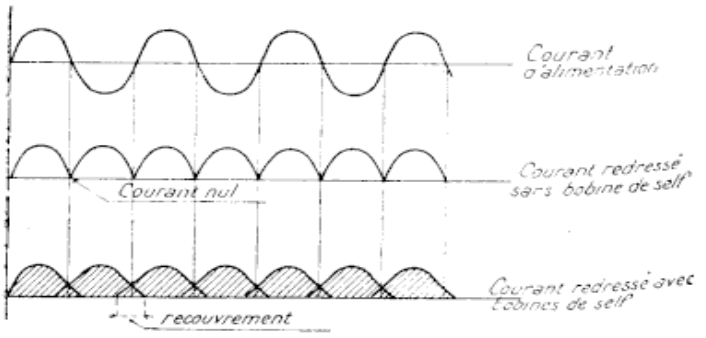


Fig. 387. — Forme du courant redressé par un convertisseur.

Il est facile de se rendre compte que le point neutre du transformateur forme le pôle négatif du circuit à courant continu et que la cathode du convertisseur est le pôle positif du circuit. On remarque que nous avons indiqué, dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le circuit d'utilisation, une bobine de self-induction. Voici son rôle : si, aux bornes du circuit d'utilisation, on intercale simplement une résistance ohmique, l'intensité et la force électromotrice passent par zéro, comme l'indique la figure 387, pendant un temps très court sans doute, mais suffisant pour que le redresseur s'arrête de fonctionner. Au contraire, en présence d'une bobine de self, qui fonctionne, ainsi qu'on le sait, comme un accumulateur d'énergie, le courant redressé a la forme indiquée par la courbe inférieure de la figure 387 ; on constate qu'il y a un recouvrement empêchant le courant de s'annuler et par suite prévenant l'arrêt de l'appareil redresseur.

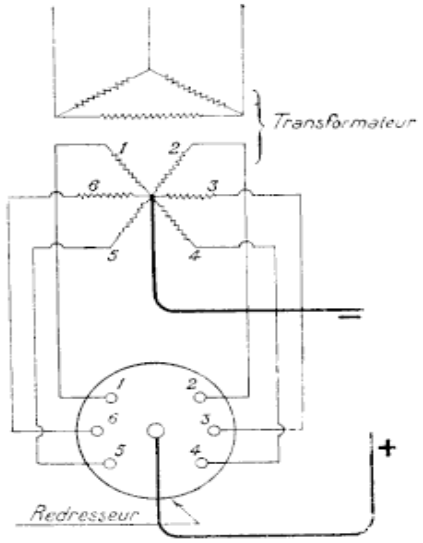


Fig. 388. — Redresseur hexaphasé.

On remarquera d'ailleurs que le courant ainsi obtenu est *ondulatoire*, les fluctuations du courant étant très considérables. Aussi y a-t-il avantage à opérer, non plus sur des circuits à courant monophasé, mais sur des courants alternatifs triphasés.

Le principe de l'appareil redresseur est toujours le même ; seul le nombre des anodes augmente, tandis que la cathode de mercure reste commune à toutes les phases. La figure 388 montre par exemple le schéma d'un redresseur hexaphasé branché au secondaire d'un transformateur alimenté par du courant alternatif triphasé. La figure 389 montre l'allure du courant ainsi redressé. La courbe tracée en trait fort au-dessus des points d'intersection représente la forme réelle de la tension dans le circuit d'utilisation. On remarque qu'elle a une allure beaucoup plus constante que celle d'un redresseur monophasé (fig. 387). Si l'on met en plus dans le circuit d'utilisation une résistance inductive, comme précédemment, l'effet ondulatoire est encore extrêmement atténué.

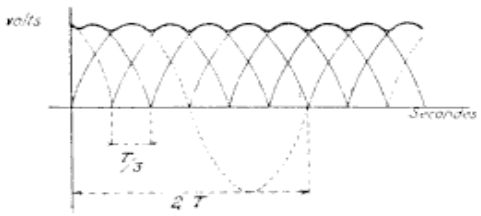


Fig. 389. — Forme du courant redressé par un convertisseur hexaphasé.

Tels sont les principes généraux sur lesquels sont établis les redresseurs à vapeur de mercure.

Pour les petites puissances, ne dépassant pas 100 ampères au secondaire, l'élément actif du convertisseur est une ampoule de verre ou de quartz

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 390) ayant deux électrodes en graphite jouant le rôle d'anodes (A, A', fig. 391) et une électrode de mercure (B) fonctionnant comme anode. Le vide est fait dans l'ampoule au moment de sa fermeture.

Chaque anode est reliée à un des pôles du circuit alternatif d'alimentation d'une part et, d'autre part, par l'intermédiaire de la bobine de self, au pôle négatif du circuit d'utilisation.

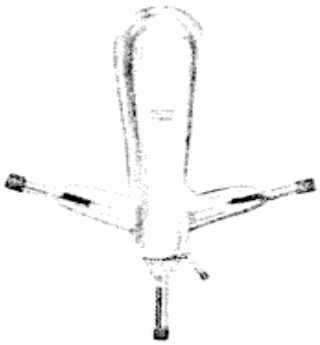


Fig. 390. — Ampoule d'un redresseur de petite puissance.

Une petite électrode auxiliaire C, reliée à une des bornes du circuit d'alimentation à travers une résistance, sert à l'amorçage de l'arc. Lorsqu'on bascule l'ampoule, le mercure réunit B et C, et, en revenant à sa position initiale, il se forme un arc de rupture qui allume la lampe. La bobine de self sert à empêcher la lampe de s'éteindre au moment où le courant alternatif s'annule au changement de signe (voir chapitre sur l'éclairage).

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant. Supposons qu'à un instant l'extrémité H du secondaire du transformateur soit positive, l'anode A est positive et le courant passe de A à B, puis à travers le circuit d'utilisation, à travers la bobine de self E, et retourne à l'extrémité G du transformateur. Quand la force électromotrice diminue, la bobine E se décharge et tend à prolonger le courant. A l'alternance suivante du courant, le trajet du courant est GA'B-circuit d'utilisation-D-bobine F-H (flèches entourées d'un cercle sur la figure 391).

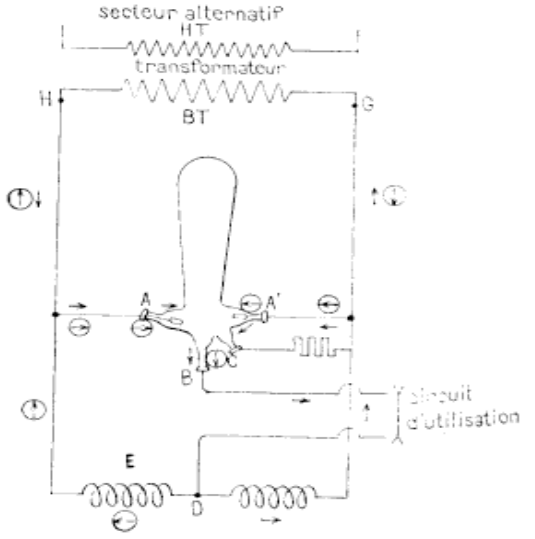


Fig. 391. — Schéma électrique d'un redresseur à vapeur de mercure.

Ces appareils sont extrêmement pratiques pour la charge des accumulateurs, l'alimentation des lampes de cinématographe, la charge des batteries de téléphone, etc.

Pour des puissances plus élevées, il fallut entreprendre la fabrication de ***redresseurs métalliques***, ce qui a pour premier avantage de se servir d'électrodes pouvant recevoir un très fort courant sans que des détériorations de l'isolant ou des joints d'étanchéité par élévation de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

température soient à craindre. Disons tout de suite, pour fixer les idées, que l'on construit couramment actuellement des groupes redresseurs débitant 1 350 ampères sous 600 volts, soit 810 kilowatts.

Les joints des électrodes amenant ces forts courants sont constitués très simplement par de l'amiante et une garniture de mercure. La figure 392 donne le principe du dispositif, sans lequel le développement du redresseur aurait été impossible, la question « joint » étant la question primordiale pour tout appareil fonctionnant dans le vide.

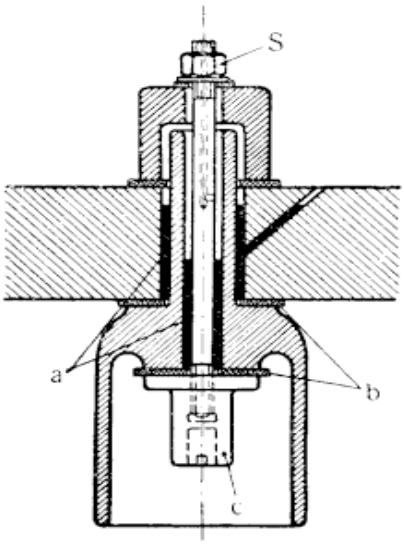


Fig. 392. — Joint étanche pour convertisseur métallique.
a, mercure ; *b*, amiante ; *c*, anode.

Des plaques d'amiante circulaires sont très fortement pressées les unes contre les autres à l'aide de l'écrou S, de façon que la garniture de mercure ne puisse pas être chassée, par les surpressions extérieures, vers l'intérieur du cylindre. Si les surfaces positives sont bien ajustées, le mercure est si fortement étranglé entre les parois environnantes qu'aucune introduction d'air extérieur ne peut se produire et que, dans des redresseurs de grand volume, en plusieurs pièces, on maintient sans difficulté des vides de l'ordre de $0^{mm},01$ de mercure (un dix-millième d'atmosphère environ). Mais la question des joints n'est pas la seule à résoudre : la condensation des gouttelettes de mercure à la surface de l'anode qui peut provoquer des courts-circuits, l'entrée en contact de celle-ci avec le mercure redescendant, l'irradiation par les rayons ultra-violets, le contact direct avec le flot de vapeur que nous avons signalé jaillissant de la cathode, enfin le vide insuffisant sont des problèmes qui ont été successivement résolus. Comme ce sont les solutions trouvées qui constituent la valeur des appareils, nous insisterons sur ces « détails » dont dépend le fonctionnement. Nous espérons ainsi montrer quelle distance sépare la conception théorique de la réalisation pratique, les difficultés successives auxquelles on se heurte, qu'il faut vaincre une à une, et le travail de recherches que représentent les appareils industriels modernes.

La figure 393 représente les éléments fondamentaux d'un redresseur métallique à vapeur de mercure.

La grande chambre principale inférieure porte, au milieu de sa plaque de base, la cathode de mercure isolée; elle est fermée à sa partie supérieure

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par une plaque annulaire massive portant les anodes. Grâce au joint de mercure, décrit plus haut, on peut l'enlever facilement et accéder directement aux six anodes principales et aux deux anodes d'excitation qui,

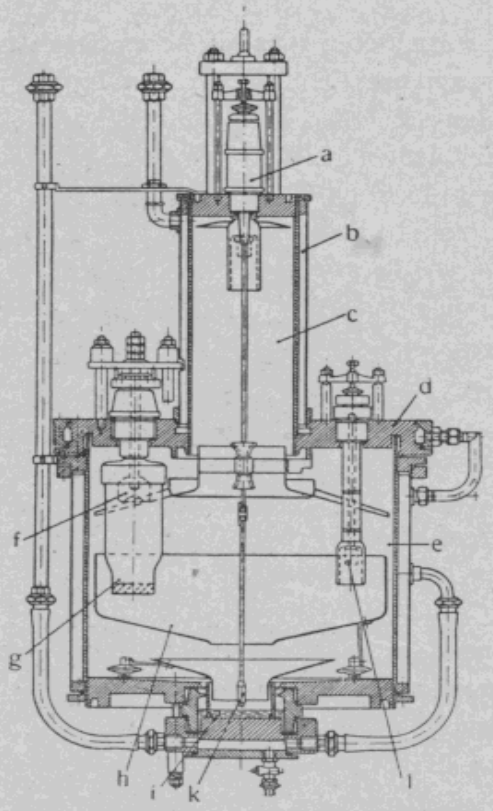


Fig. 393. — Convertisseur métallique Brown-Boveri.

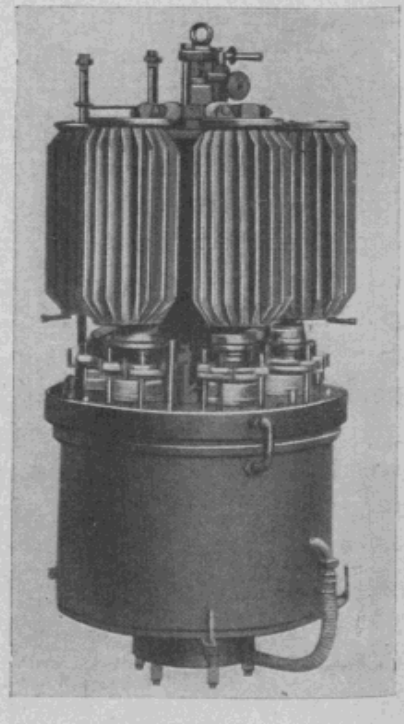


Fig. 394. — Vue extérieure du convertisseur.

a, solénoïde d'allumage ; *b*, enveloppe réfrigérante ; *c*, cylindre de condensation ; *d*, plaque d'anode ; *e*, chambre principale ; *f*, anode principale ; *g*, enveloppe d'anode ; *h*, collecteur de l'arc ; *i*, cathode ; *k*, anode d'allumage, *l*, anode d'excitation.

indépendamment du courant principal, maintiennent l'excitation de la cathode constante au moyen d'un courant alternatif monophasé.

Au-dessus de la plaque porte-anode, se trouve le cylindre de condensation dont le couvercle porte le solénoïde d'allumage. Cette partie de l'appareil est entourée d'une chemise en tôle dans laquelle circule un courant d'eau servant à réfrigérer les parois du redresseur dont la température (sauf à la tache de cathode, point d'arrivée de l'arc lumineux dont la température est d'environ 2 000°) ne dépasse pas 70°. Les anodes sont, par contre, portées par le courant à la température du rouge sombre ; aussi, dans les modèles puissants, les refroidit-on par un radiateur à ailettes. La figure 394 donne l'aspect extérieur de l'appareil.

Pour éviter tout court-circuit, les anodes principales sont garanties

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une part par l'isolateur d'entrée et, d'autre part, à l'intérieur du redresseur, par une enveloppe en tôle portant, à sa partie inférieure, une sorte de jalousie (fig. 395) brisant le trajet de l'arc électrique, et ne laissant que la partie ionisée atteindre l'anode sous l'influence du champ électrique. Afin d'éviter les courts-circuits, la face des anodes dirigée vers la cathode est arrondie et évidée en son milieu, ce qui a en outre l'avantage d'augmenter sa surface.

Pour provoquer l'allumage, un fil d'acier va du solénoïde supérieur, à travers tout le redresseur, jusqu'à l'anode d'allumage qui, au repos, se trouve à environ un centimètre de la surface du mercure. Lorsque le courant traverse le solénoïde, un noyau de fer attiré par le solénoïde amène l'anode d'allumage au contact du mercure en tendant un ressort. Les connexions sont

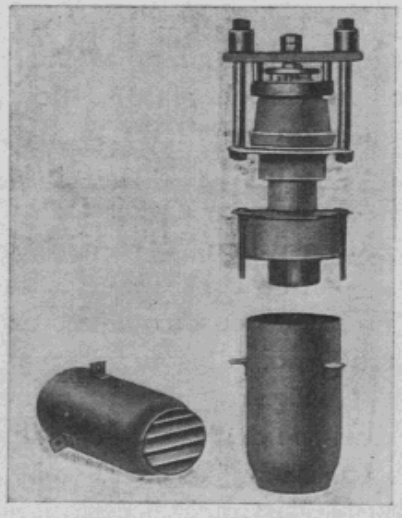


Fig. 395. — Anode du convertisseur.

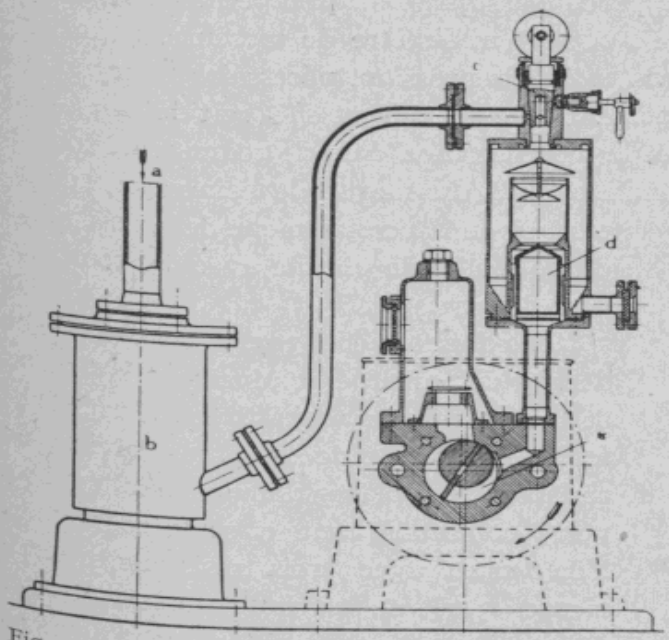


Fig. 396. — Dispositif de pompage servant à maintenir le vide dans les convertisseurs.

a, tuyau de communication ; *b*, pompe Langmuir ; *c*, robinet ; *d*, clapet de retenue ; *e*, pompe à vide préliminaire.

telles qu'immédiatement les deux électrodes se séparent, l'arc qui se produit alors est suffisant pour allumer les arcs principaux.

Cet allumage nécessite donc du courant continu qui est fourni par un petit groupe moteur-dynamo fournissant 5 ampères sous 110 volts.

A côté de ce dispositif accessoire, mais indispensable, il en est d'autres dont nous allons dire rapidement quelques mots.

Nous avons signalé déjà les deux électrodes auxiliaires qui ont pour but de maintenir le redresseur en état de service permanent, même lorsque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la demande d'énergie dans le circuit d'utilisation tombe à zéro, comme c'est parfois le cas dans les installations à service discontinu, par exemple les chemins de fer électriques.

Tout redresseur comporte une pompe à vide destinée à maintenir un vide de $0^{mm},01$ de mercure dans l'appareil. Si le redresseur est parfaitement étanche, la durée de fonctionnement de la pompe à vide n'est qu'une question de temps. La pompe fonctionnera jusqu'à ce que les résidus de gaz mis en liberté par l'élévation de température aient été éliminés. L'expérience a montré qu'après la mise en marche d'un appareil neuf, l'intensité croît pendant trois à quatre jours, puis se maintient constante, la pompe continuant à fonctionner, le plein rendement étant atteint au bout de deux semaines et la pompe pouvant être supprimée au bout de trois mois de fonctionnement.

La figure 396 représente en coupe la pompe à vide. Cette pompe est du type des pompes à vapeur de mercure de Langmuir : c'est-à-dire qu'à côté de la pompe à vide élevé dans laquelle le mercure est chauffé par une résistance électrique, existe une pompe préliminaire à huile, dont le fonctionnement est compréhensible d'après la figure même.

Pour mesurer le vide, on se sert d'une jauge de Mac Leod ; mais, quelque précis que soit cet appareil classique, puisqu'il permet de mesurer commodément des vides de 1×10^{-6} millimètre de mercure, il ne permet pas une observation *constante* de la pression, nécessaire pour un appareil industriel en fonctionnement. On se sert à cet effet soit de la relation qui existe entre la pression et la conductance dans le redresseur, soit de la grande variation de la conductibilité thermique de l'air raréfié d'une part et de l'accroissement de la résistance d'une feuille de platine avec la température d'autre part.

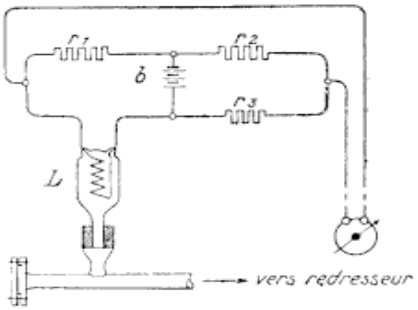


Fig. 397. — Méthode de mesure du vide.

Nous donnons (fig. 397) le schéma de ce dernier dispositif, excessivement ingénieux et tout à fait caractéristique. Une mince feuille de platine de 25 ohms environ de résistance est placée dans un récipient en verre communiquant avec le redresseur. Elle forme, avec trois résistances extérieures r_1, r_2, r_3, un milliampèremètre, et avec une batterie b, un pont de Wheatstone. Ce dispositif permet de déceler des variations de pression de l'ordre de $0^{mm},01$ de mercure et de les enregistrer à distance.

Enfin, dans le socle, sont placées les bobines de self, les coupe-circuits et l'ensemble des connexions. Nous n'insisterons pas sur les dispositifs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de réfrigération ni sur les diverses combinaisons électriques que l'on peut réaliser avec ces appareils.

Nous signalerons simplement que les redresseurs à vapeur de mercure, en plus de l'entretien et de la surveillance insignifiants qu'ils nécessitent, conservent un rendement élevé, jusqu'aux plus petites valeurs de la charge, ce qui n'est pas un avantage négligeable dans un grand nombre de cas.

* * *

Une deuxième catégorie d'appareils d'origine toute récente permet de redresser les courants alternatifs. Nous voulons parler des dispositifs utilisant le phénomène de l'émission d'électricité par les corps chauffés, que nous avons étudié précédemment.

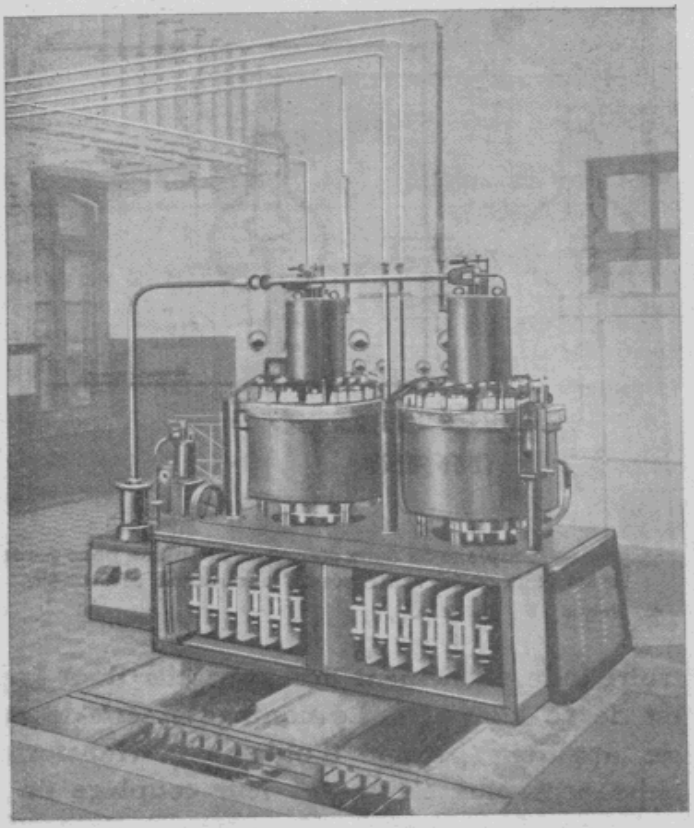


Fig. 398. — Vue d'une installation de convertisseur de 900 ampères, 600 volts

Le kénotron et le redresseur Tungar sont à l'heure actuelle les seuls appareils réalisés pour un emploi industriel.

La ***soupape Dushman*** ou ***kénotron*** fonctionne sur le même principe que le tube Coolidge: quand deux électrodes sont placées dans un vide extrêmement poussé et tel qu'à froid il ne puisse passer de courant d'une électrode à l'autre, un courant prend naissance dès que la cathode est à une température suffisamment élevée, et l'intensité de ce courant ne dépend que de la température de la cathode. L'explication, comme nous l'avons vu, est simple : un courant ne peut passer que si des ions positifs ou négatifs existent entre les électrodes. Dans les appareils ordinaires, ce sont les molécules gazeuses du milieu ambiant qui les fournissent ; dans le cas du *kénotron* de Dushman, ce sont les électrons émis par les cathodes chauffées qui jouent le rôle de véhicules du courant électrique. Si donc on a soin de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

laisser froide l'une des électrodes, le passage du courant ne pourra avoir lieu que de l'électrode froide à l'électrode chaude : on aura ainsi une soupape.

Avec un vide de l'ordre de 5×10^{-7} millimètres de mercure, Dushman a pu arriver à une densité de courant de 2 ampères par centimètre carré de cathode, la température de celle-ci étant alors de 2 600° absolus. Il semble pratiquement qu'il n'y ait pas avantage à aller plus loin, pour ne pas volatiliser la cathode d'une part, et, d'autre part, par suite de l'existence d'une intensité maxima de courant, atteinte pour une certaine température et que l'on ne dépasse plus quand on augmente celle-ci.

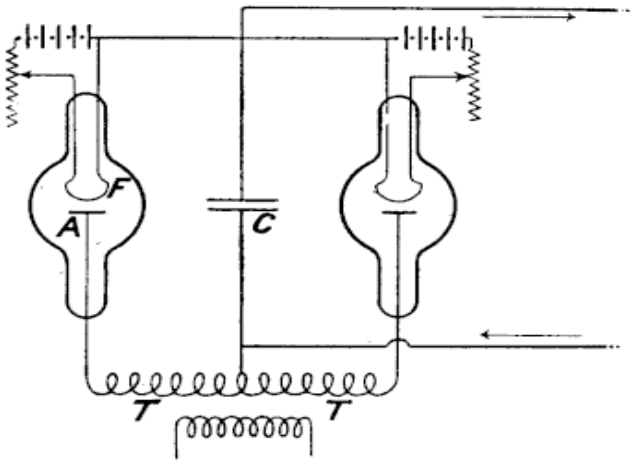


Fig. 399. — Couplage de deux soupapes kénotron pour recueillir les deux ondes redressées d'un courant alternatif.
A, plaque; F, filament.

On arrive à construire industriellement des appareils dont la puissance est de 10 kilowatts. Le montage en série de plusieurs de ces appareils permet d'obtenir la transformation de puissances plus élevées et leur couplage de recueillir les deux ondes redressées d'un courant alternatif (fig. 399).

La figure 400 montre un des nombreux dispositifs réalisés pour des tensions allant jusqu'à 50 000 volts. Le filament est monté entre deux plateaux parallèles dont l'ensemble constitue l'anode. Cette forme a pour but d'équilibrer les attractions électrostatiques s'exerçant entre le filament et l'anode et qui pourraient arriver à détériorer le filament.

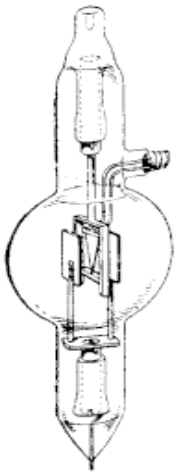


Fig. 400. — Forme de kénotron.

Le ***redresseur Tungar*** est un perfectionnement du dispositif précédent.

Il se compose essentiellement d'un tube rempli d'argon à une faible pression et de deux électrodes, l'une en une matière conductrice, en graphite par exemple, l'autre en tungstène (fig. 401).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cet appareil réalise un sérieux progrès par rapport aux redresseurs dans le vide, dont les plus connus sont le kénotron et le tube Coolidge.

Le fonctionnement de ceux-ci est fondé sur l'émission, par le filament incandescent, d'électrons qui servent de véhicule au courant. Ils ne peuvent transporter que des courants d'une intensité très faible, et moyennant une chute de tension relativement énorme. C'est ainsi que, dans le kénotron, cette chute varie de 100 à 500 volts.

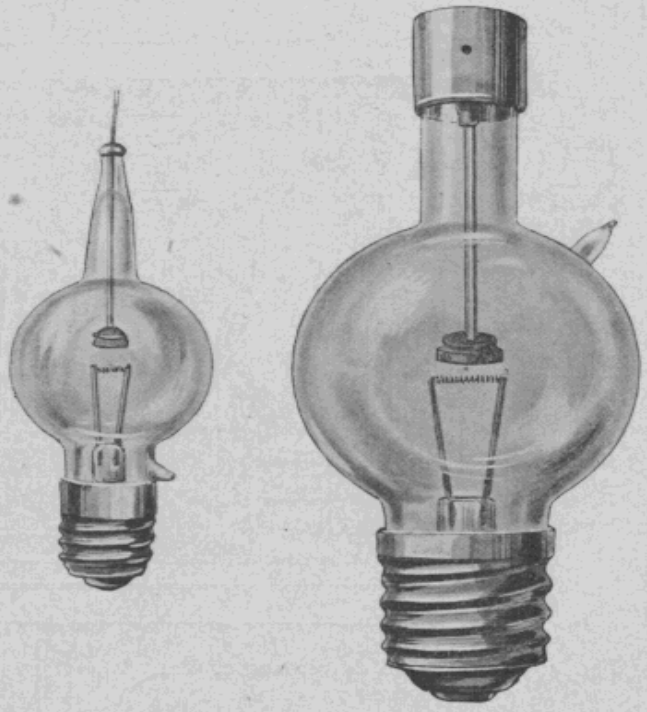


Fig. 401. — Formes des ampoules de redresseur Tungar.

Dans le redresseur Tungar, au contraire, le véhicule du courant est constitué par le gaz lui-même, que rendent conducteur les électrons émis par la cathode de tungstène. Il en résulte que le courant acceptable est relativement élevé (jusqu'à 30 ampères actuellement), et que la chute de tension est faible, 5 à 10 volts.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant : pendant une demi-période, l'électrode de tungstène, formée d'une spirale serrée de fil fin, est négative ; les électrons qu'elle émet se dirigent vers l'électrode de graphite ; sur leur chemin, ces électrons rencontrent des molécules du gaz qui sont ionisées et qui conduisent alors le courant du graphite vers le tungstène. A la demi-période suivante, le tungstène est positif, les électrons qu'il émet sont alors chassés en arrière, à l'opposé du graphite ; aucun courant ne passe. Par un groupement convenable analogue à celui de la figure 402, et des connexions judicieuses de deux appareils électriques, on assure le passage du courant et son redressement pendant toute la durée de la période.

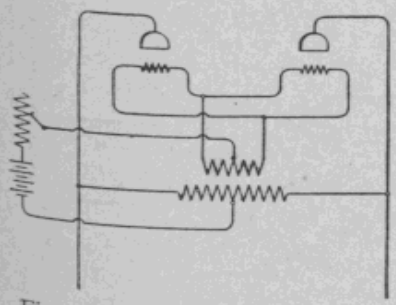


Fig. 402. — Couplage de deux redresseurs Tungar.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'ampoule a l'aspect extérieur d'une lampe à incandescence. Elle contient un filament en tungstène traversé et porté à l'incandescence par le courant à redresser ; en face de ce filament, qui forme l'une des électrodes, est disposée une deuxième électrode en graphite qui reçoit le courant redressé (fig. 401).

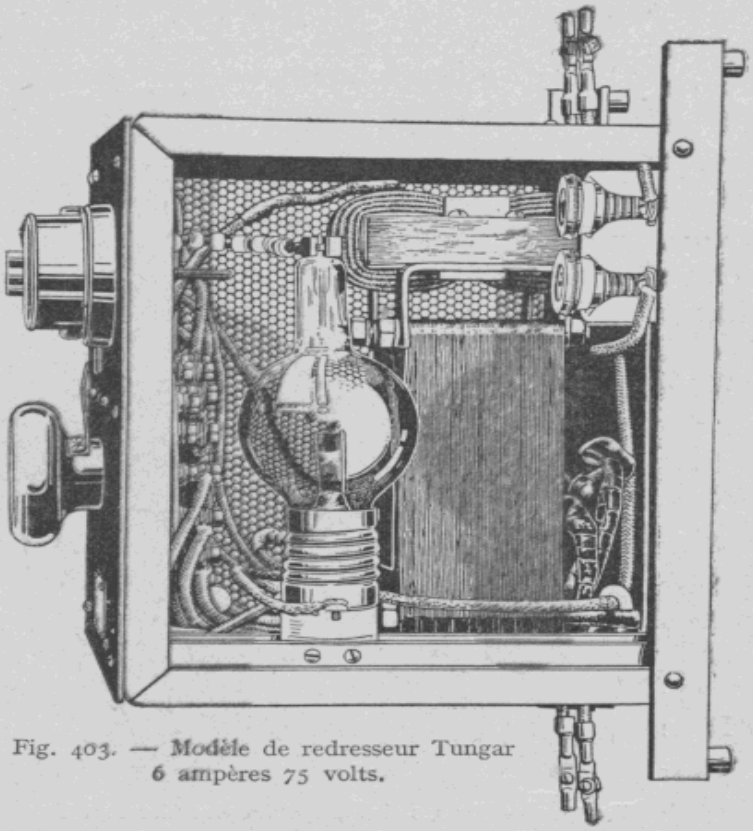


Fig. 403. — Modèle de redresseur Tungar 6 ampères 75 volts.

L'ampoule, d'abord soigneusement vidée, est ensuite remplie d'argon ; celui-ci, bien que très pur, renferme néanmoins des traces de gaz étrangers qui à la longue altéreraient les matières constituantes des différentes parties de l'appareil. Pour parer à cet inconvénient, on dispose, en arrière de l'électrode de graphite, sous la forme d'une petite couronne, un agent qui absorbe à chaud tous les gaz étrangers. Le calcium semble être le métal qui donne les meilleurs résultats.

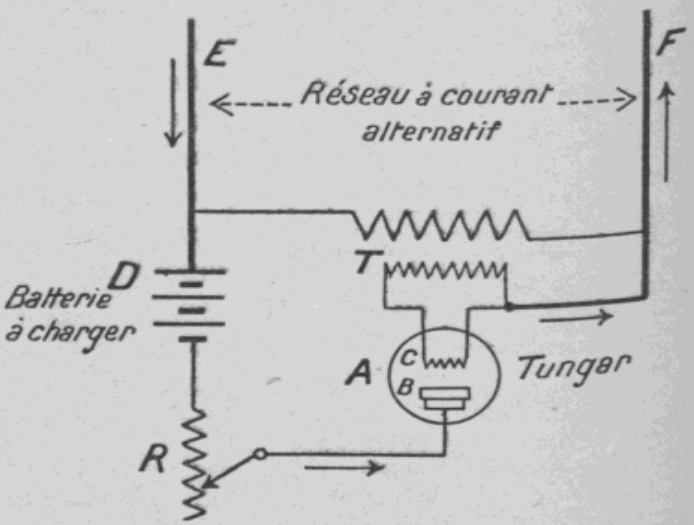


Fig. 404. — Schéma de montage du redresseur Tungar.

Le rendement est relativement élevé, surtout si on compare le Tungar à des appareils analogues. Ce rendement est d'environ 45 p. 100 pour les types les plus faibles et monte jusqu'à 72 p. 100 pour les types supérieurs actuels.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il peut marcher sous des intensités extrêmement faibles.

Si l'on se rappelle que notamment le convertisseur à vapeur de mercure ne peut pas fonctionner au-dessous de 2 ampères, on comprendra qu'un appareil qui peut rectifier quelques milliampères avec un rendement satisfaisant mérite d'être signalé, même si l'on fait abstraction de ses autres qualités.

La figure 403 représente le modèle à 6 ampères 75 volts, le schéma de montage étant indiqué par la figure 404.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XX

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A DISTANCE

Historique. — Avantages des courants à haute tension. — Lignes aériennes. — Pylônes. — Isolateurs. — Protection des lignes. — Origine des suitensions. — Bobines de Petersen. — Appareils de mise à la terre continue : parafoudres à jets d'eau. — Appareils de mise à la terre discontinue. — Montage. — Parafoudres à cornes ; parafoudres à rouleaux ; parafoudres électrolytiques à aluminium ou à plomb. — Bobines de self-induction. — Installation des postes de protection. — Lignes souterraines. — Isolement des conducteurs. — Câbles à 60 000 volts. — Refroidissement des conducteurs souterrains. — Installation des lignes souterraines.

Si l'on considère le développement considérable des transports de force dans tous les pays du monde, on se rend difficilement compte des obstacles qu'il a fallu vaincre pour arriver à la solution de ce problème.

En effet, au début des applications de l'électricité, vers 1878, on n'osait pas éloigner les appareils d'utilisation des machines productrices du courant. Par exemple, pendant l'exposition de 1878, l'installation d'éclairage (par lampes à arc) de la place et de l'avenue de l'Opéra, qui comprenait au total, soixante-deux foyers, dont huit doubles, n'était pas divisée en moins de quatre groupes, possédant chacun sa force motrice distincte. Une machine de 20 chevaux était installée dans les sous-sols de l'Opéra ; deux machines de même force fonctionnaient dans un local d'une maison au numéro 28 de l'avenue de l'Opéra ; enfin, la quatrième usine était située rue d'Argenteuil et correspondait à l'installation de la place du Théâtre-Français. Ce fait est curieux à retenir, car il montre le contraste entre la force réduite et la multiplicité des premières usines et les puissantes centrales, dans lesquelles la production tend de plus en plus à se concentrer aujourd'hui. Moins de quarante ans séparent ces deux époques.

Le transport de force au moyen de l'électricité n'avait pas encore reçu de solution à cette date, mais un savant de premier ordre, Marcel Desprez, étudia la question et, en 1885, fit paraître le compte rendu de ses célèbres expériences de la gare du Nord dans lesquelles il réalisa le transport d'une puissance de 40 chevaux à une distance de 58 kilomètres, jusqu'à Creil, par courant continu à 6 000 volts.

Jusque vers 1888, les applications du courant continu se développèrent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seules, et ce n'est qu'à cette époque qu'en Angleterre, à Deptford, le courant alternatif produit par une machine Ferranti fut utilisé pour la distribution de la force motrice. En France, en 1891 seulement, le secteur des Halles fut installé pour la production du courant alternatif. Actuellement, les transports par courants polyphasés à très haut voltage (150 000 à 200 000 volts) sont très répandus, montrant ainsi les progrès réalisés dans cet important domaine.

* * *

Quelle que soit la nature du courant adopté, courant continu ou courants alternatifs, monophasés ou polyphasés, on a tout intérêt à opérer le ***transport à un voltage aussi élevé que possible***, ainsi que l'on peut s'en rendre compte par un calcul très simple.

Supposons que l'on veuille transporter à 10 kilomètres une puissance de 100 kilowatts par courant continu en n'éprouvant qu'une perte de 10 p. 100 par effet Joule dans les conducteurs, la tension étant de 100 volts d'abord, puis de 10 000 volts.

Si I est l'intensité du courant et R la résistance de la ligne, la perte par seconde est donnée par la formule bien connue :

$$W = RI^2.$$

Comme le transport a lieu dans le premier cas sous 100 volts, l'intensité du courant est de 1 000 ampères d'après la formule :

$$W = EI \qquad 10\,000 = 100 \times I.$$

Par conséquent, la résistance R du conducteur doit être égale à :

$$\frac{W}{I^2} = \frac{10\,000}{1\,000^2} = 0{,}01 \text{ ohm.}$$

Comme la ligne a 20 kilomètres de long (10 aller, 10 retour) et doit n'avoir une résistance que de 0,01 ohm, on en tire facilement sa section d'après la formule

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

ρ étant la résistivité du cuivre, égale à $1{,}6.10^{-6}$ ohm. On trouve une section de 320 centimètres carrés, c'est-à-dire un diamètre de 20 centimètres environ ! On comprend que le problème est pratiquement impossible.

Mais, si la tension d'alimentation est de 10 000 volts, le même calcul

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

montre que le diamètre du fil n'a plus besoin d'être que de 2 centimètres environ, c'est-à-dire qu'il est très facile d'établir la ligne (1).

Lorsque l'on utilise des courants alternatifs, on trouve des résultats analogues, l'avantage, lorsque l'on utilise des courants triphasés, étant de 25 p. 100 sur les courants alternatifs simples.

* * *

On réalise donc les transports de force à haut potentiel, soit en courant continu, soit en courants alternatifs. Ces derniers présentent une telle souplesse que leur emploi est à peu près général ; cependant, M. Thury a réalisé avec succès quelques installations à courant continu.

A l'usine génératrice, le courant alternatif produit par les machines est transformé en courant de même nature, mais à haut potentiel, par les transformateurs. Il s'agit maintenant d'étudier comment il est transporté au loin.

Le cas le plus fréquent est celui où ***la ligne est aérienne***. Les problèmes à résoudre sont relatifs d'une part à sa construction, d'autre part à sa protection contre les surtensions et les accidents de toute nature auxquels elle se trouve ainsi exposée.

LIGNES AÉRIENNES

Les ***conducteurs*** sont presque toujours en cuivre électrolytique recuit de haute conductibilité ; jusqu'à une section de 50 millimètres carrés environ, ce sont de simples fils ; au delà, on fait usage de câbles à plusieurs torons. On peut aussi se servir de conducteurs en aluminium. Ces fils sont supportés par des ***pylônes*** en fer, en ciment armé ou en bois, de dimensions telles que le fil le plus bas se trouve au moins à 6 mètres du sol. La distance de ces pylônes varie et en moyenne est de 50 mètres.

(1) D'une façon plus générale, si W est la puissance à transmettre à la distance L sous la tension E, p la perte admise, on a :

$$p = RI^2$$

$$W = EI, \text{ d'où } I = \frac{W}{E},$$

$$p = \frac{RW^2}{E^2}, \text{ d'où } R = \frac{pE^2}{W^2}.$$

Comme :

$$R = \rho \frac{2L}{s},$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

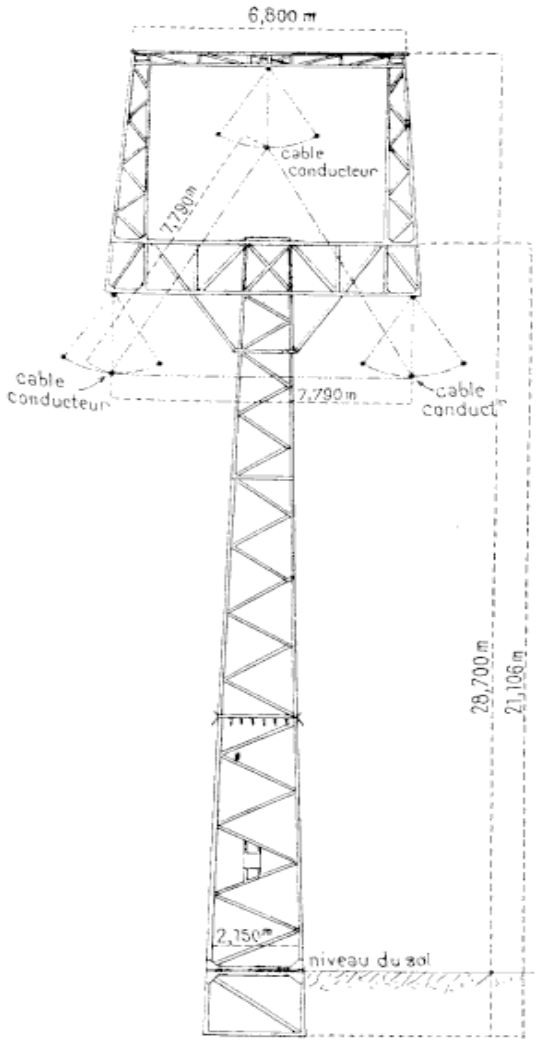


Fig. 405.

Pour les transports à très haute tension, 100 000 volts et plus, les pylônes sont en fer et constituent de véritables tourelles en fer profilé; les bras auxquels sont suspendus les câbles sont longs et disposés de telle façon qu'un intervalle de plusieurs mètres sépare les divers conducteurs, afin d'éviter les étincelles qui pourraient jaillir de l'un à l'autre, soit par suite de surtension, soit

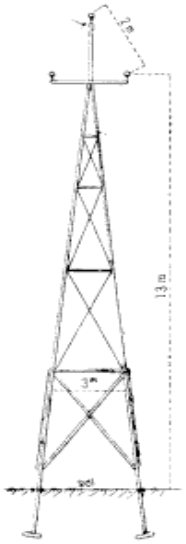


Fig. 406.

par suite du balancement des fils sous l'action du vent dans la partie aérienne entre pylônes.

on a finalement :

$$S = \frac{2\rho\ LW^2}{pE^2}.$$

Le volume de métal de la ligne est :

$$V = 2\ LS$$

et son poids M, d étant le poids spécifique, est :

$$M = \frac{4\ \rho\ L^2\ W^2\ d}{pE^2}.$$

Pour une même puissance transportée à une même distance, le poids de la ligne est en raison inverse du carré de la tension.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 405 donne la vue en élévation d'un pylône d'alignement de la ligne à 220 000 volts du réseau d'électrification du chemin de fer de Paris-Orléans. Les câbles, en aluminium, sont au nombre de trois ; leur section est de $293^{mmq},8$, la portée entre pylônes atteint 250 mètres. La

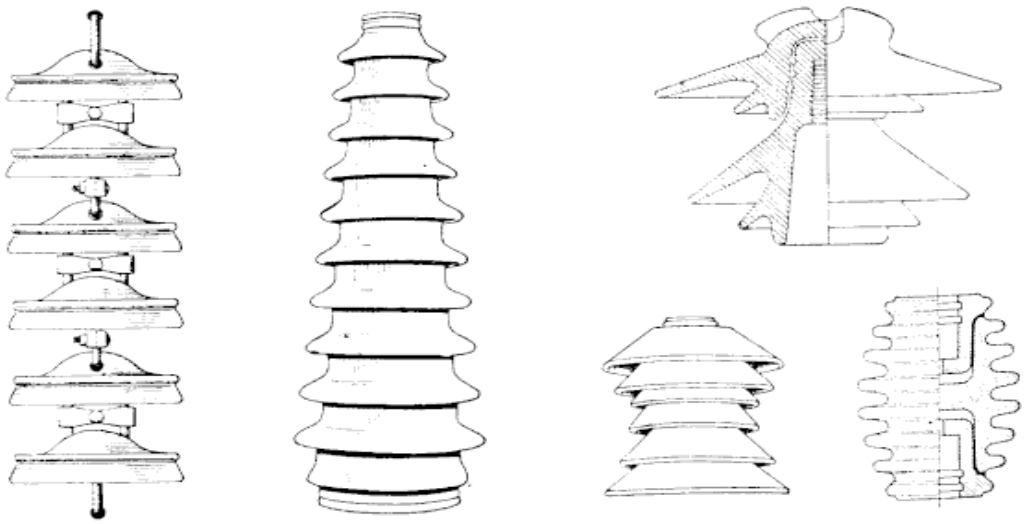


Fig. 407. — Quelques formes d'isolateurs pour lignes de transport de force.

distance entre les câbles est de $7^{m},8$ et la hauteur totale du pylône au-dessus du sol de $26^{m},7$.

Lorsqu'il s'agit de tensions moins élevées et de puissances moins considérables à transporter, les pylônes ont des dimensions plus modestes. La figure 406 représente par exemple un pylône destiné à supporter une ligne à 100 000 volts, la portée étant de 100 mètres.

Les supports en bois sont employés pour la construction des petites lignes de distribution de villages et les transports de force de moyenne importance (1 000 à 1 500 kilowatts). Quant aux supports en ciment armé, ils conviennent particulièrement aux lignes de transport de force suivant le tracé des routes.

* * *

Le ***mode de fixation du fil conducteur sur les traverses des pylônes*** se fait par l'intermédiaire d'isolateurs dont la forme et les compositions ont été l'objet de recherches très nombreuses. Ces isolateurs jouent deux rôles : le premier, mécanique ; supporter le conducteur ; le second, électrique : l'isoler.

Le problème est, de ce fait, très complexe, car les substances isolantes se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prêtent en général mal à supporter des efforts mécaniques. La porcelaine est actuellement la matière la plus employée, et on donne aux isolateurs des formes qui, tout en assurant la solidité mécanique de l'appareil, conservent ses propriétés électriques que la pluie et les poussières tendent à diminuer. C'est pourquoi les isolateurs sont tous en forme de cloche, afin de combattre la conductibilité que leur donnerait le ruissellement de l'eau. Dans la figure 407, nous avons reproduit quelques formes d'isolateurs ; elle suffira à montrer la complexité du problème et les efforts des constructeurs pour en chercher la solution.

* * *

Nous ne dirons rien des divers systèmes mécaniques destinés à protéger la ligne, au point de vue mécanique, lorsque l'un des fils se trouve rompu pour une cause accidentelle. Au contraire, nous allons examiner avec quelques détails la ***protection de la ligne*** au point de vue électrique contre les perturbations que peut éprouver le courant se propageant dans un conducteur de plusieurs centaines de kilomètres parfois, soumis sur son parcours aux influences atmosphériques, orages, nuages électrisés, coups de foudre, et auquel en plus on emprunte en divers points des quantités d'énergie plus ou moins grandes suivant les exigences des circuits alimentés.

On conçoit facilement que le problème est extrêmement important, car du bon fonctionnement de la ligne dépend la valeur de la distribution d'énergie. De plus, les accidents qui peuvent se produire si on n'a pas équipé la ligne avec des appareils nécessaires pour en limiter au minimum les effets, sont capables d'avoir des conséquences particulièrement graves, comme la mise hors service, par exemple, des génératrices de courant à l'usine productrice d'énergie.

Ces accidents d'origine très diverse se traduisent par la production de *surtensions* dans la ligne.

* * *

L'appellation de ***surtension*** s'applique à toute élévation de tension qui menace une installation électrique, soit par sa valeur élevée, soit par sa brusque variation. Ces surtensions peuvent se produire dans plusieurs cas.

Toute manœuvre de couplage influe sur la tension des installations. Par exemple, à la fermeture d'une ligne, la tension se propage sous forme d'une onde qui, par réflexion aux extrémités, peut donner lieu à une sur-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tension par rapport aux conducteurs voisins ou à la terre, de la même façon que la brusque arrivée d'eau dans une conduite fermée donne lieu à des chocs dits *coups de bélier*, extrêmement nuisibles. Il en est de même à la coupure des lignes à vide, principalement des câbles. Les surtensions qui se manifestent parfois sont dues au réamorçage. En effet, la coupure se produit au moment où l'intensité est nulle, alors que la tension est voisine de sa valeur maxima E ; il reste donc aux extrémités coupées une charge à cette tension et, une demi-période plus tard, la tension, à l'extrémité reliée à la source, suivant son développement sinusoïdal, aura la valeur — E ; il existera entre les deux extrémités de la coupure une tension 2 E double de la normale, d'où pourra résulter un réamorçage de l'arc, accompagné des phénomènes de fermeture correspondant à cette tension 2 E, c'est-à-dire que les ondes qui se propagent sur les lignes auront une importance doublée. Ce phénomène peut se reproduire plusieurs fois si l'interrupteur est mal construit.

Les surtensions peuvent encore se produire sans variation brusque de charge, par simple effet de résonance. On sait que les alternateurs donnent, outre une force électromotrice principale sinusoïdale, des forces électromotrices de période plus courte, provenant de la division des bobines induites en bobines partielles d'ouvertures différentes et du fait que le flux inducteur n'est pas lui-même rigoureusement sinusoïdal. Il en résulte que la force électromotrice totale a l'allure d'une somme de sinusoïdes de périodes différentes dont les rapports sont la suite des nombres impairs. Comme la période propre du circuit d'utilisation varie sans cesse, à un moment donné elle peut atteindre la valeur de celle d'une des harmoniques existantes ; à ce moment, il y a résonance, et la force électromotrice résultante peut présenter alors des maxima supérieurs à la valeur normale.

Enfin, on observe souvent la surélévation de tension à l'extrémité des longues lignes aériennes pendant la charge à vide. Ce phénomène, que l'on appelle effet Ferranti, résulte de la composition des forces électromotrices, de self-induction et de capacité de la ligne.

A ces surtensions, que l'on peut appeler surtensions *d'origine interne*, viennent en plus se juxtaposer des surtensions *d'origine externe*, indépendantes des réseaux et dues à des modifications de l'état électrique de l'atmosphère. Nous avons vu que les phénomènes d'électricité atmosphérique sont souvent très importants et d'autant plus dangereux qu'il est difficile d'évaluer exactement leur ordre de grandeur.

On peut subdiviser en plusieurs classes ces surtensions externes suivant le phénomène atmosphérique qui leur donne naissance. Tout d'abord, les surtensions dues aux variations lentes du potentiel de l'air par suite des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

différences de température, d'hygroscopicité et des variations diurnes de la valeur du gradient de potentiel. Les lignes aériennes qui franchissent des différences de niveau importantes, lignes de montagnes par exemple, sont parfois le siège de ces surtensions qui se traduisent par une décharge disruptive en un point faible du circuit, parafoudre en général.

Des surtensions peuvent être créées par le passage au-dessus de la ligne de nuages orageux chargés statiquement. Lorsque la ligne est longue par rapport au nuage, elle se charge par influence statique, sur une certaine longueur, de signe contraire à la charge du nuage. Une charge égale s'écoulera de chaque côté de la ligne, avec une vitesse que l'on peut calculer.

Les décharges directes ou foudroiements, bien que relativement rares, sont très dangereux en eux-mêmes et, de plus, ils peuvent produire des surtensions, s'ils éclatent dans le voisinage d'une installation, par un phénomène d'influence. En effet, la décharge brusque de la ligne permet à celle-ci de prendre subitement la tension qui règne en ce point du champ atmosphérique, et la charge qui passe sur la ligne va en s'éloignant de part et d'autre sous forme d'ondes de propagation. Les extrémités de la ligne et le point foudroyé qui est mis à la terre donnent lieu à la réflexion de ces ondes qui vont et viennent alors le long des conducteurs de la ligne jusqu'à ce qu'elles se dissipent par effet Joule. Elles donnent donc lieu à un phénomène oscillatoire, et, si sa période est voisine de la période de vibration de systèmes électriques branchés sur la ligne, la résonance intervient alors, des amorçages d'arcs peuvent se produire en différents points du secteur.

* * *

Étant donnée la diversité d'origine des surtensions, on comprend qu'il est difficile de pouvoir les supprimer totalement. On peut prendre un certain nombre de mesures pour les prévenir, complétées par d'autres mesures destinées à les combattre et à les limiter à des valeurs qui ne soient plus dangereuses.

Dans l'installation du réseau, les machines génératrices sont construites de façon telle que les courants de Foucault sont utilisés pour étouffer les surtensions qui pourraient se produire lors d'un court-circuit d'une des phases. Les grands transformateurs et les transformateurs survolteurs doivent toujours être montés en étoile-triangle. Une ligne aérienne ne doit jamais être reliée à un réseau de câbles plus important qu'elle ; la liaison se fait par interposition d'un transformateur de rapport égal à l'unité et à enroulements particulièrement bien isolés. Les réseaux doivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être construits de façon à éviter la réflexion totale des ondes de propagation et leur permettre de se dissiper progressivement.

Pour l'écoulement au sol des charges statiques, nous verrons que l'on utilise des dispositifs réalisant la mise à la terre du point neutre d'une façon continue, jets d'eau ou bobines de self-induction, en particulier les ***bobines*** dites ***de Petersen*** (fig. 408). On se sert également de fils de terre, particulièrement efficaces lorsque la ligne est montée sur pylônes métalliques. C'est ainsi que trois fils de terre, l'un surplombant la ligne, les deux autres placés latéralement, réduisent les surtensions d'origine atmosphérique pour une ligne de 100 000 volts à 60 ou 70 p. 100 de leur valeur. Le rôle de ces fils est multiple. D'une part, ils créent autour d'eux une région de potentiel nul et détournent ainsi les décharges directes. D'autre part, ils égalisent longitudinalement les potentiels des pylônes dont ils complètent la mise à la terre. Ils constituent, en un mot, le secondaire fermé d'un transformateur dont les fils de ligne constituent le primaire, et ils amortissent ainsi les oscillations de haute fréquence. Ces fils sont généralement en acier doux.

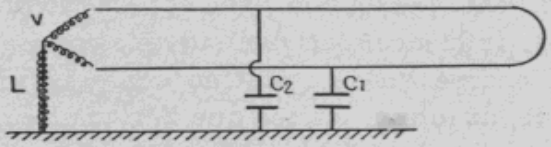


Fig. 408. — Montage d'une bobine de Petersen. L, bobine de Petersen.

* * *

Les ***appareils destinés à combattre les surtensions*** qui pourraient se produire malgré les mesures prises dans la construction même de la ligne, et dont nous venons de citer quelques-unes seulement, peuvent être classés en plusieurs catégories.

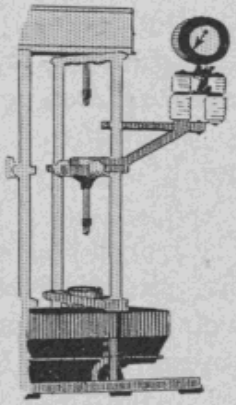


Fig. 409.— Parafoudre à jet d'eau Siemens-Schuckert.

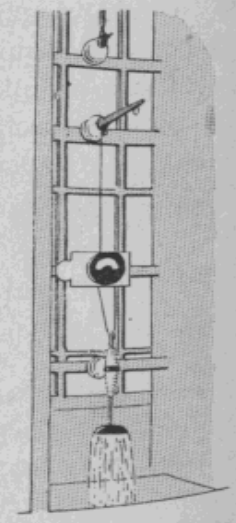


Fig. 410. — Parafoudre à cloche Alioth.

1° APPAREILS DE MISE A LA TERRE CONTINUE. — Ces appareils, dont nous avons dit un mot plus haut, jouent le rôle d'un trop-plein de réservoir et, s'ils sont suffisants pour protéger contre de faibles dénivellations du niveau électrique, ils sont impuissants à combattre les variations considérables. Naturellement, afin de limiter la perte d'énergie qu'ils entraînent, leur résistance est très forte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour réaliser économiquement une forte résistance, on a souvent recours à l'eau. Celle-ci est envoyée sous forme d'un jet sortant d'un orifice métallique relié à la terre par exemple et venant frapper une surface métallique connectée au réseau à protéger. Les figures 409 et 410 montrent deux types de résistances liquides ainsi constituées. On peut également, comme nous l'avons dit, réaliser la mise à la terre par l'intermédiaire d'une forte bobine de self-induction dans le cas des circuits alternatifs.

2° APPAREILS DE MISE A LA TERRE DISCONTINUE. — Ces appareils, que l'on désigne sous le nom général de *parafoudres*, sont extrêmement nombreux. Ils ont pour but d'écouler la charge accidentelle pendant la courte durée de la surtension sans troubler la marche générale du circuit. Ils agissent à la manière des soupapes de sûreté (fig. 412).

Les plus connus sont les ***parafoudres à cornes***, dont cependant l'emploi se trouve limité vers 35 000 volts, car, ainsi que tous les autres dispositifs dont nous allons parler, ils n'entrent en action que lorsque la surtension a

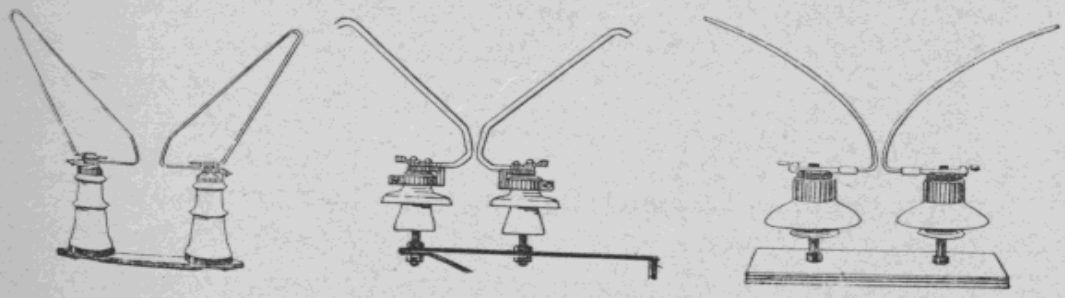


Fig. 411. — Diverses formes de parafoudre à cornes.

déjà acquis une certaine importance (50 p. 100 par exemple de la tension normale). Les cornes ont des formes différentes suivant les constructeurs (fig. 411) ; un système de soufflage magnétique de l'arc y est parfois adapté. Divers dispositifs et montages ont été réalisés pour régler la distance des deux cornes de façon à amorcer l'arc pour une tension déterminée, ainsi que pour augmenter la sensibilité de l'appareil. On emploie également des éclateurs à boules (fig. 413), dont le principe de fonctionnement est le même.

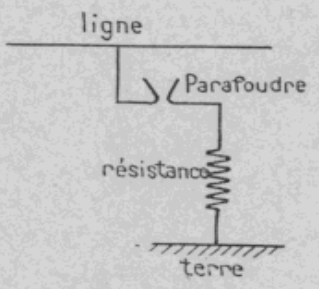


Fig. 412. — Montage d'un parafoudre à cornes.

Le ***parafoudre à intervalles multiples*** réalise un perfectionnement intéressant du parafoudre à cornes (fig. 414). En disposant en ligne droite ou en zigzag sur une plaque isolante une série de cylindres métalliques distants l'un de l'autre de 1 millimètre au maxi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mum, on obtient en effet un parafoudre très sensible qui laisse passer des étincelles dès que la tension devient critique, mais qui, en même temps, grâce à l'importance de sa masse métallique, retarde, par refroidissement, la transformation de l'étincelle en arc, qui se produit trop souvent dans les parafoudres à cornes. L'expérience a montré qu'il est utile de mettre en série avec ces parafoudres une résistance d'amortissement suffisante pour éviter leur destruction par la décharge. La figure 415 donne quelques types de parafoudres à rouleaux.

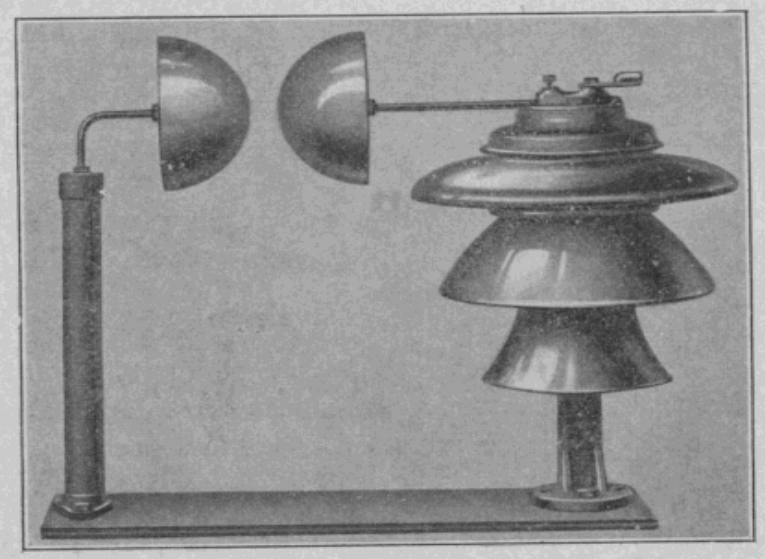


Fig. 413. — Éclateur à hémisphère de parafoudre à oxyde de plomb pour intérieur. Type 70 000 volts.

Les ***parafoudres électrolytiques*** reposent sur un principe différent. Ils ont, sous la tension normale, une résistance très élevée qui tombe subitement à une valeur très basse dès qu'une surtension déterminée se produit sur la ligne.

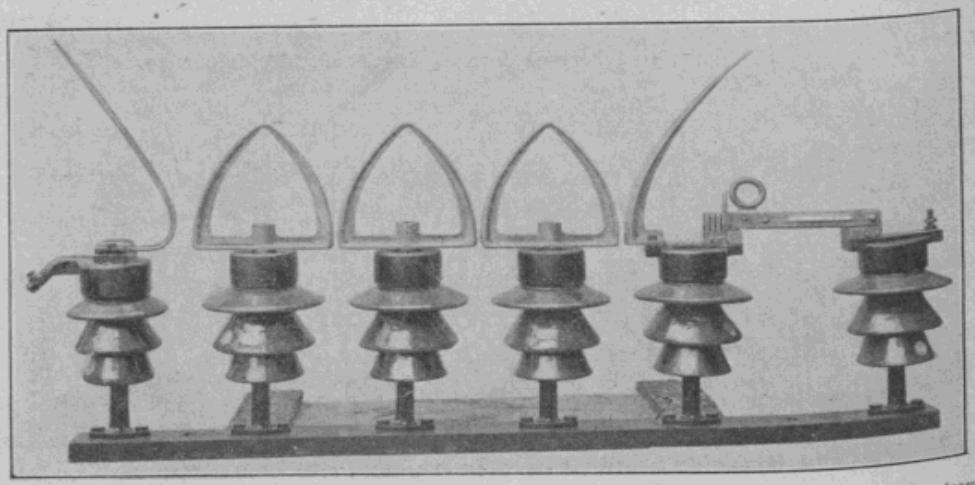
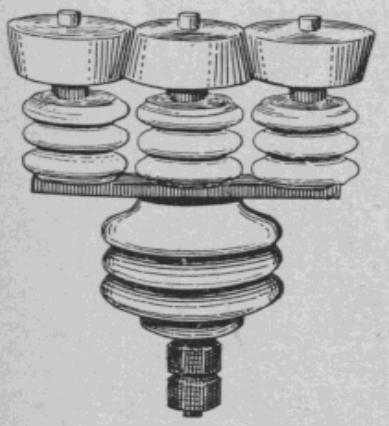


Fig. 414. — Parafoudres d'extérieur avec coupure type 20 000 volts, quatre ruptures.

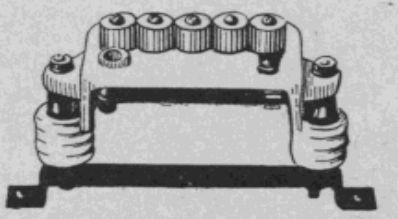
Le premier en date de ces appareils est le ***parafoudre à électrodes***

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

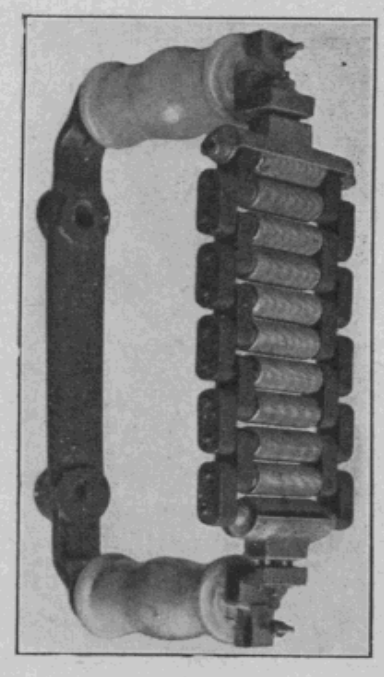
d'aluminium. Il est constitué par une série de cuvettes en aluminium enfilées sur une baguette isolante leur servant d'axe commun. Elles contiennent un électrolyte spécial et sont disposées de façon que chacune baigne dans le liquide de la cuvette placée au-dessous (fig. 416). Une



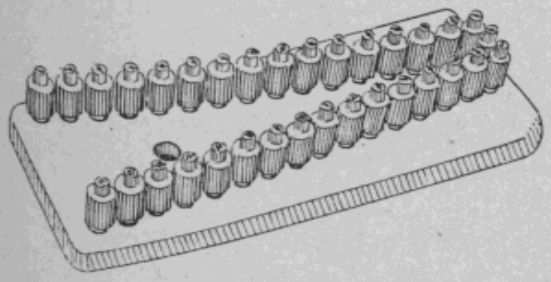
Parafoudre Oelirkon à rouleaux coniques.



Parafoudre Alioth à cinq rouleaux.



Limiteur de tension 15 000 volts.



Parafoudre à rouleaux Thomson-Houston à éléments multiples.

Fig. 415. — Divers types de parafoudres à rouleaux.

pellicule d'oxyde se forme à la surface des plaques qui ne laissent passer qu'un faible courant ; mais, si la tension prend des valeurs anormales, la résistance tombe à zéro et la décharge passe. Cet appareil demande à être entretenu tous les jours afin de renouveler la pellicule d'oxyde ; aussi tend-on à le remplacer par un autre dispositif, le ***parafoudre à oxyde de plomb***.

Un parafoudre à pellicule d'oxyde de plomb se compose d'un certain nombre d'éléments ou cellules et d'un intervalle d'éclatement montés en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

série entre la ligne et le sol. Chaque élément se compose de deux électrodes, en forme de disques métalliques.

Ces deux électrodes sont serties sur un anneau en porcelaine qui les sépare, et l'intervalle entre les deux électrodes est rempli de poudre de peroxyde de plomb dont la résistance électrique est très faible ; par contre, la face intérieure de chaque disque est recouverte d'une couche de vernis isolant.

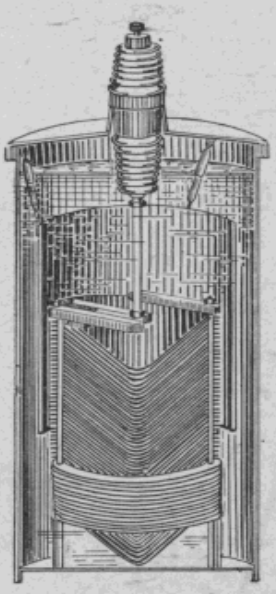


Fig. 416.— Coupe d'un parafoudre électrolytique.

Le nombre d'éléments à monter en série dépend de la tension de la ligne et doit être tel que la tension par élément ne dépasse pas 300 volts.

Les éléments sont empilés en nombre tel qu'une pression excessive ne s'exerce pas sur l'élément du bas de la pile et ne risque pas de casser les anneaux de porcelaine. Chaque pile repose sur une plaque d'acier, percée de quatre trous, dans lesquels passent des tiges filetées coudées ; l'extrémité non coudée est boulonnée sur l'un des quatre montants ou supports en bois dur et bien isolant faisant l'objet d'un traitement spécial.

Au-dessus de la cellule terminant la pile à la partie supérieure, une autre plaque d'acier est fixée de façon analogue et une pression modérée doit être exercée par elle sur la pile par le serrage à la clef d'écrous sur les tiges filetées.

Toutes les pièces métalliques employées sont protégées contre la rouille. Les colonnes de cellules sont boulonnées, au montage, sur des profilés assemblés et montés sur des isolateurs.

Lorsque le parafoudre est installé à l'extérieur des bâtiments, des capuchons métalliques protègent ses éléments contre les intempéries. La figure 417 montre un parafoudre de ce système pour des tensions de 75 000 volts. Une des colonnes est coupée pour montrer la disposition intérieure des éléments.

Quand une étincelle se produit dans l'intervalle d'éclatement, la pellicule de vernis isolant qui recouvre les disques métalliques est percée ; les disques eux-mêmes ne le sont pas. Un courant de décharge traverse les éléments en se rendant au sol. La tension de la ligne revient ensuite à sa valeur normale.

Mais le passage de la décharge provoque une transformation chimique à l'intérieur des éléments.

Au point de perforation, le peroxyde de plomb, couleur puce, se transforme en plomb rouge et en litharge, qui, tous deux, offrent une résistance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrique élevée. Cette haute résistance interrompt le courant dynamique qui suivrait le courant de décharge, et par suite l'arc formé entre les sphères de l'éclateur s'éteint.

Si la tension vient à prendre de nouveau une valeur exagérée et que

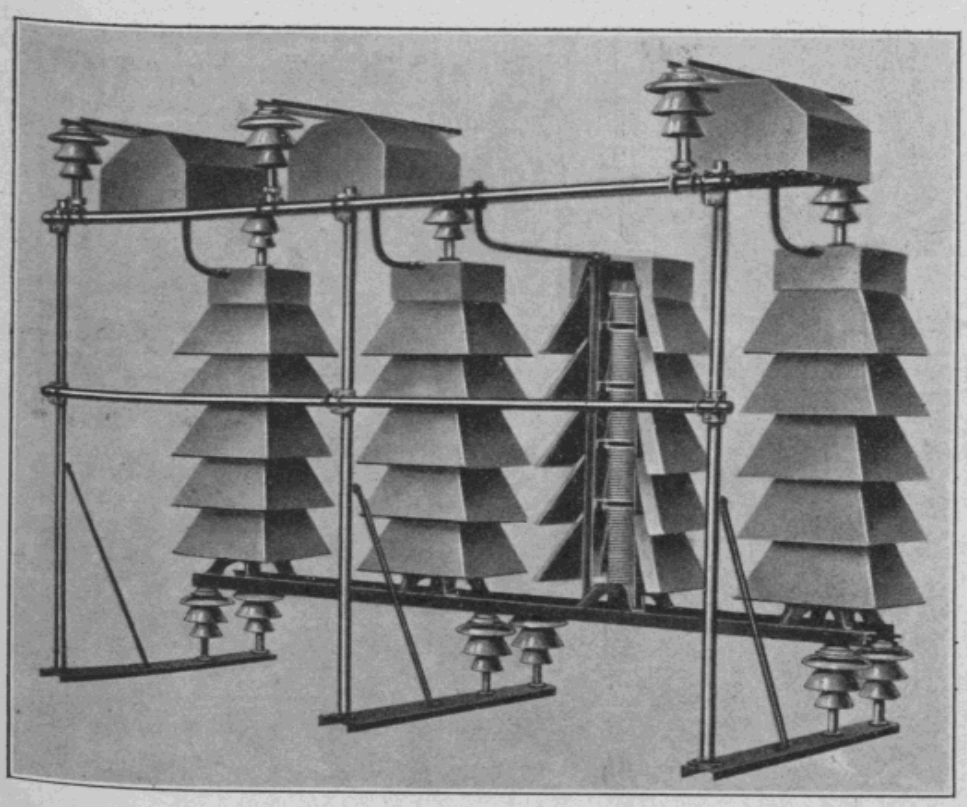


Fig. 417. — Parafoudre à pellicule d'oxyde de plomb, type 35 000 à 75 000 volts, pour extérieur.

l'éclateur fonctionne encore, la pellicule de vernis isolant est percée en un autre point.

A chaque décharge, une légère surface de pellicule isolante se trouve donc remplacée par une pellicule de litharge dont la valeur isolante est un peu plus forte. Tant que la pellicule isolante n'est pas entièrement remplacée par une pellicule de litharge, la valeur du parafoudre n'est nullement diminuée ; il a d'ailleurs été constaté que des appareils placés dans des endroits particulièrement orageux et soumis à des décharges nombreuses avaient conservé, au bout de cinq années, encore toute leur efficacité. Le fonctionnement des appareils n'est pas affecté par la température.

Pour tenir compte de l'altitude, au-dessus de 1 000 mètres seulement,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il y a lieu simplement de régler convenablement l'intervalle d'éclatement et de renforcer l'isolement de l'appareil.

* * *

Lorsque les surtensions sont dues à des ondes à front très raide ou à haute fréquence, les ***bobines de self-induction*** sont des auxiliaires

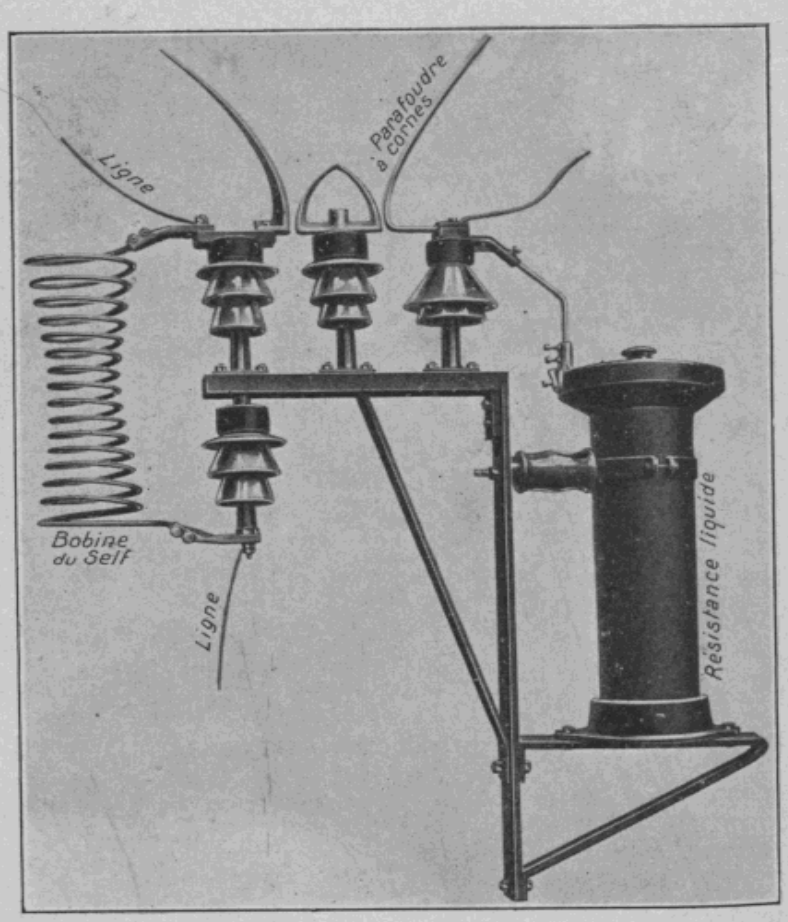


Fig. 418. — Protection d'une phase.

précieux des dispositifs précédents. Leur but est d'adoucir les ondes à front raide et de réduire l'amplitude des ondes de propagation de longueur limitée. Disposées en série sur la ligne, entre les machines et le parafoudre, elles ne font pas obstacle au passage du courant industriel par suite de leur faible réactance, mais s'opposent au passage des ondes parasites à haute fréquence. L'expérience a montré qu'il y avait intérêt à shunter la bobine de self par une résistance de façon à la protéger et à dissiper dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cette résistance la majeure partie de l'énergie des courants nuisibles. La figure 421 montre un type de bobines de protection pour 75 000 volts.

* * *

Les ***condensateurs*** sont, en règle générale, des protecteurs plus actifs et plus efficaces que les bobines de self ; mais, jusqu'à présent, ils n'ont pas été très employés pour la protection des installations, à cause de leur construction qui n'est pas encore parfaitement au point ; ils sont trop sujets encore à se percer, ce qui entraîne leur destruction et la disparition de la protection.

* * *

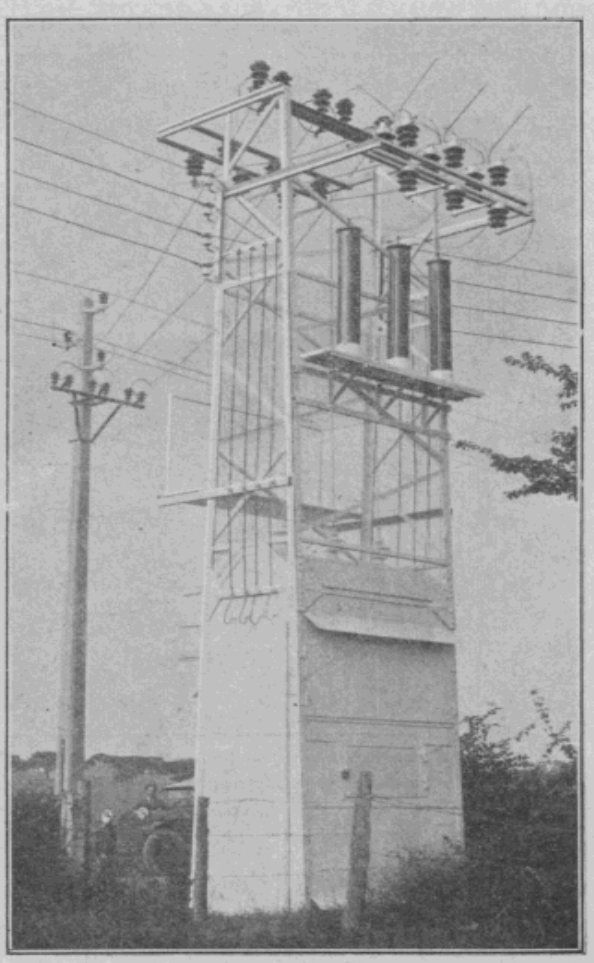


Fig. 419. — Poste de protection en campagne.

En général, sauf aux usines et sous-stations disposant d'un personnel spécialisé, on n'emploie pas les parafoudres électrolytiques et, pour la protection des lignes, on dispose sur leur trajet des postes de protection munis de parafoudres à cornes associés à des bobines de self et à des résistances liquides. La figure 418 montre un mode de groupement de ces éléments et la figure 419 une vue d'un des nombreux postes que l'on peut observer dans les campagnes au voisinage des lignes de transport de force.

Parfois l'installation comporte également un sectionneur, comme le représente la figure 420.

CANALISATIONS SOUTERRAINES

Dans les parties du parcours d'un transport de force où l'on ne peut poser des pylônes et réaliser une installation aérienne, dans les villes en par-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ticulier, on a recours à des *canalisations souterraines*. Actuellement, on n'hésite pas à effectuer de cette manière des transports à 60 000 volts.

Évidemment, les câbles souterrains doivent être construits avec un grand soin. Ils sont constitués de trois parties distinctes : les conducteurs de travail, l'enveloppe protectrice et l'isolant séparant les conducteurs

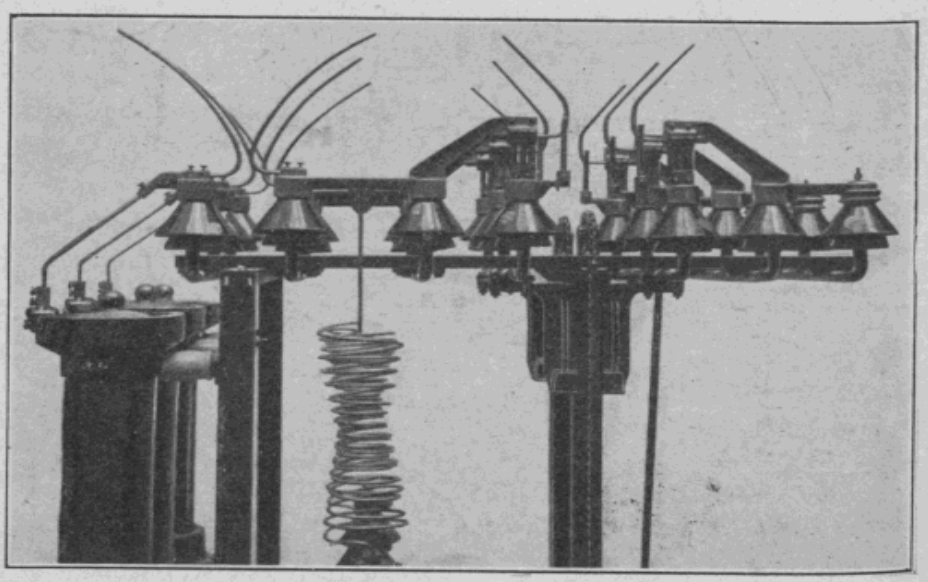


Fig. 420. — Poste de sectionnement triphasé muni d'un système de protection comprenant sur chaque phase un parafoudre à corne, une bobine de self et une résistance liquide.

de cette enveloppe. Les conducteurs sont uniques ou multiples (deux ou trois sous la même enveloppe) et ils sont constitués par des torons de section sensiblement circulaire, à 7, 19 ou 37 fils, suivant la section totale à réaliser.

L'***enveloppe protectrice*** extérieure a pour but d'assurer l'étanchéité et de protéger mécaniquement le câble pendant le transport et les opérations de pose. On la constitue par une gaine de plomb et une enveloppe en rubans d'acier, un matelas de filin goudronné étant interposé entre les deux.

A l'heure actuelle, l'***isolement des câbles*** est réalisé d'une façon à peu près générale à l'aide de papier imprégné spécialement d'une matière isolante à une température de 100 à 120°. Naturellement, le mode de fabrication varie suivant chaque constructeur et il est soigneusement gardé secret.

Nous donnerons quelques détails sur le câble à 60 000 volts de la Société des forges et ateliers de constructions électriques de Jeumont, qui est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'un des plus remarquables exemples de câbles à haute tension réalisés jusqu'à ce jour.

Le ***câble***, destiné au transport du courant triphasé, est prévu pour une intensité de 300 ampères par phase. Les trois conducteurs sont logés dans

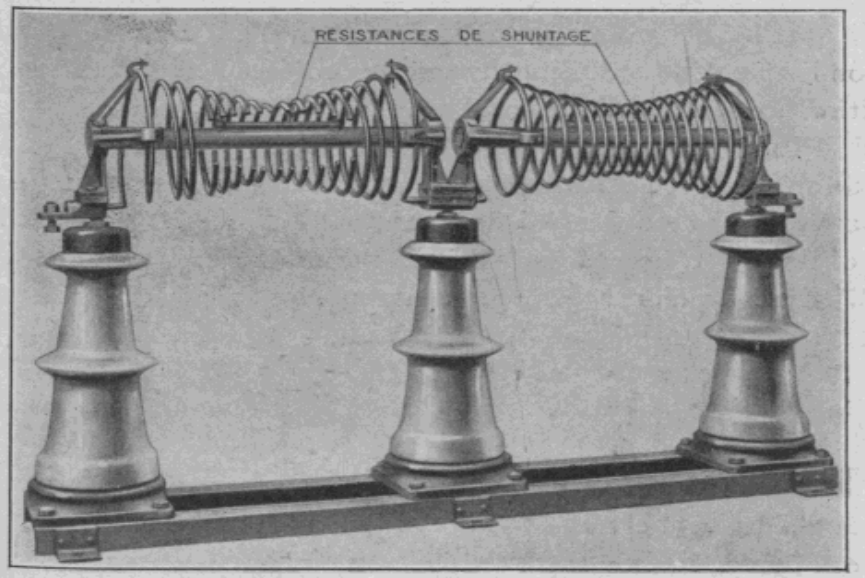


Fig. 421. — Spires de self 75 000 volts avec résistance de shuntage.

la même armature (fig. 422), et chacun d'eux est entouré d'une couche de papier métallisé. Une grosse difficulté de fabrication est de réaliser l'homogénéité de l'isolant, en l'espèce le papier, dans toute son épaisseur. Il est impossible d'en extraire complètement l'air, et, lorsque la tension dépasse une certaine valeur, cet air s'ionise, il se forme de l'ozone qui attaque les constituants de l'isolant organique et les carbonise lentement. Le gradient critique serait, d'après de nombreux essais, voisin de 3700 volts par millimètre.

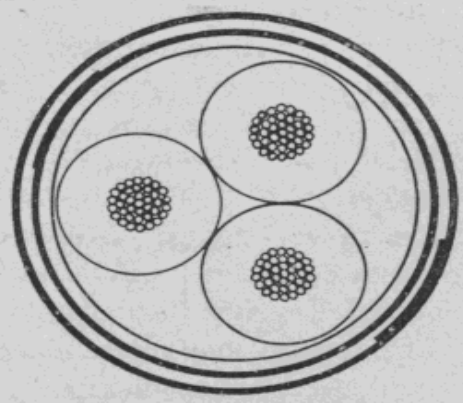


Fig. 422. — Coupe d'un câble armé tripolaire pour 60 000 volts.

Au point de vue thermique, une autre difficulté se présente, car une fraction seulement de la surface latérale des conducteurs de cuivre intervient pour le refroidissement.

La solution adoptée dans le câble dont nous parlons consiste à loger les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trois conducteurs, comme dans les câbles tripolaires ordinaires, dans une gaine de plomb elle-même entourée d'une armature de feuillard et de jute, mais sur chaque conducteur on enroule en plus une couche de papier métallisé, la couche métallique étant mise en contact avec le plomb. Cette gaine métallique joue le rôle d'écran électrostatique qui supprime les champs électriques tournants engendrés par le courant et permet de porter aux environs de 6 000 volts par millimètre le gradient critique d'ionisation. De plus, la bonne conductibilité thermique de l'écran électrostatique assure une déperdition rapide de la chaleur.

Le câble dont la figure 422 donne la section a les dimensions suivantes : section du cuivre, 3×150 millimètres carrés, correspondant, pour un courant de 300 ampères, à une densité de courant de 2 ampères par millimètre carré ; épaisseur d'isolant radial, 12 millimètres ; diamètre extérieur, 106 millimètres ; poids, 29 kilogrammes par mètre ; échauffement prévu, 30° en service normal.

* * *

Pour l'installation des canalisations souterraines, deux systèmes sont en présence. En France, en Italie et en Allemagne, on utilise le système dit des ***câbles armés*** qui consiste à poser les câbles munis d'une armature métallique extérieure à même le sol, dans des tranchées ouvertes dans la chaussée ; des grillages métalliques établis au-dessus d'eux en signalent la présence lors des travaux ultérieurs de fouilles.

En Angleterre et en Amérique, on utilise le ***conduit système*** dans lequel les câbles simplement revêtus de leurs gaines de plomb sont disposés dans des conduits cylindriques de types variés enrobés dans une maçonnerie en béton qui en fait un bloc unique percé d'alvéoles correspondant à chaque câble.

Dans l'un et l'autre système, des ***regards*** et des ***boîtes de jonctions*** disposés de distance en distance assurent la liaison et la surveillance des divers tronçons de l'installation.

Les canalisations souterraines ont peu à craindre les effets directs des perturbations atmosphériques ; en revanche, leur isolement est moins bon que celui des lignes aériennes ; de plus, comme elles sont connectées soit avec des lignes aériennes, soit avec des machines susceptibles de donner des surtensions internes, on est amené à les munir également des mêmes dispositifs de sécurité que nous avons étudiés plus haut.

La figure 423 montre comment les divers dispositifs de protection

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont disposés dans une centrale ayant trois distributions différentes, deux aériennes à 26 000 et 15 000 volts, et une souterraine à 6 000 volts. On voit comment le courant provenant des alternateurs triphasés à

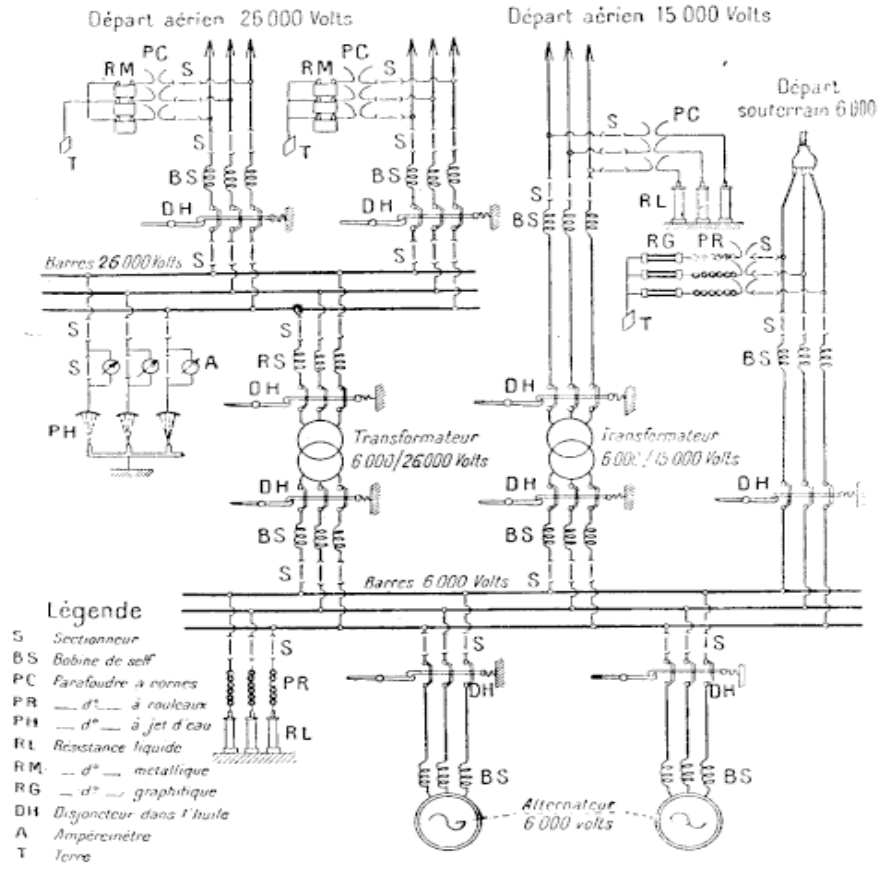


Fig. 423. — Schéma de l'installation électrique d'une centrale montrant les connexions des divers éléments de production de l'énergie et de protection de l'ensemble.

6 000 volts est transformé, les organes de manœuvre nécessaires, leur position ainsi que celle des dispositifs de protection. C'est un résumé graphique de tout ce que nous venons d'exposer sur la question.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXI

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sous-stations. — Stations de faible puissance. — Stations de grande puissance. — Stations automatiques : principe du fonctionnement. — Distribution de l'énergie électrique. — Courant continu. — Distribution en dérivation, en boucle, par feeders, distribution à trois fils. — Courant alternatif diphasé, distribution à quatre fils, à trois fils. — Courant alternatif triphasé : distribution en triangle, en étoile. — Courants tétraphasés, divers modes de couplage des circuits. — Compteurs. — Compteurs électrolytiques. — Compteurs électromécaniques. — Classification. — Compteurs à moteurs magnéto-électriques genre O'Keanan ; compteurs à moteurs dynamo-électriques, genre Elihu Thomson ; compteurs à moteurs à induction ou à champ tournant, genre C. A. C., Ferrari. — Compteur Sangamo à mercure. — Compteurs oscillants, genre Aron. — Compteurs à tarifs multiples, à dépassement. — Étalonnage des compteurs. — Sensibilité.

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié la production de l'énergie électrique et son transport à distance. Nous allons maintenant examiner de quelle manière on emprunte à la ligne haute tension l'énergie destinée à être utilisée sous des formes infiniment multiples dans le circuit d'utilisation, comment on la répartit entre les différents usagers et les systèmes de mesure de l'énergie ainsi consommée par chacun d'eux.

* * *

Il serait impossible, dans la plupart des applications industrielles, d'utiliser le courant à haute tension des lignes d'alimentation. Il faut donc, avant de le distribuer, commencer par le ***ramener à un voltage de quelques centaines de volts***. Ce courant sera soit distribué aux usagers qui l'utiliseront tel quel (chemins de fer métropolitains, tramways, etc.), soit réduit encore à un voltage plus bas (110 ou 220 volts) par des transformateurs disposés au voisinage immédiat du lieu de consommation (moteurs, lumière, etc.).

Par exemple, le courant à haute tension sera abaissé à une valeur de 1 500 volts au lieu de prise; ce courant à moyenne tension ira desservir une ville ou une usine et, au point d'arrivée, sa tension sera abaissée à la valeur la plus commode pour les applications.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est dans les ***sous-stations*** que s'effectue la première transformation du courant.

* * *

Une ***sous-station*** est donc constituée en principe par une série de transformateurs dont les enroulements primaire et secondaire sont reliés au circuit principal et au réseau de distribution et qui fonctionnent comme abaisseurs de tension. Autour des transformateurs sont groupés des appareils auxiliaires : disjoncteurs permettant de couper le courant avant ou après sa transformation, parafoudres et dispositifs de protection contre les surtensions d'origine interne ou externe, appareils de mesure (wattmètres, ampèremètres et voltmètres).

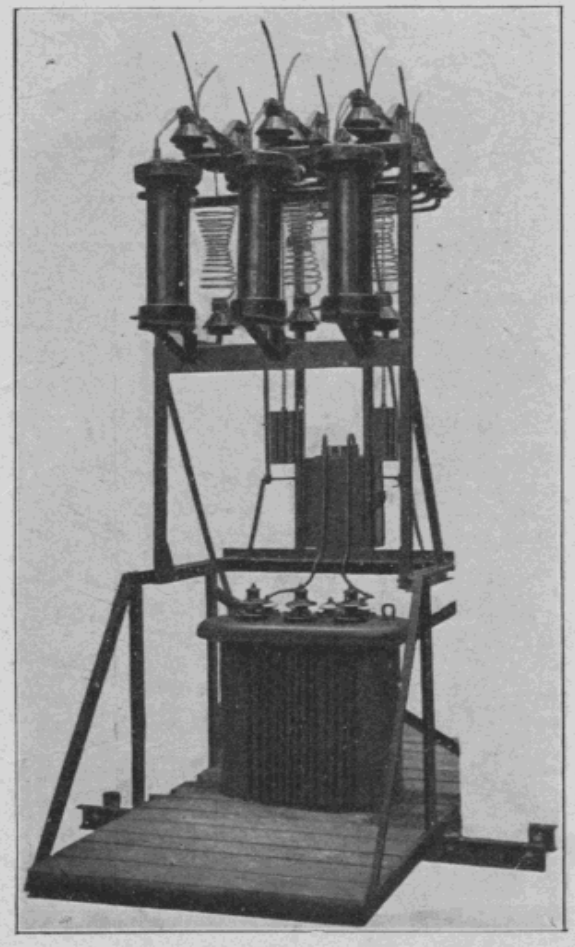


Fig. 424. — Poste aérien de transformation de 30 kilovolts-ampères.

Dans beaucoup de cas, lorsque la sous-station est de faible capacité, il n'y a pas d'appareils de mesure. De plus, comme il y a toujours à craindre les dangers d'incendie provenant de la présence d'une assez grande masse d'huile dans les transformateurs, l'usage s'est de plus en plus généralisé d'installer toute la sous-station à l'air libre, sans même l'abriter sous un hangar. La figure 424 est une vue typique d'une sous-station de petite puissance, dont la figure 425 montre le montage.

Les figures 426 et 427 donnent des vues d'ensemble de stations de plus grandes puissances.

* * *

Lorsque la *sous-station* est destinée à alimenter un ***réseau de traction,*** l'installation est un peu plus compliquée, car il faut non seulement abaisser

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la tension du courant, mais encore le ***transformer en courant continu*** ou monophasé. Dans ces conditions, la sous-station comprend en plus une commutatrice ou tout autre système de conversion du courant, batterie de redresseurs à vapeur de mercure par exemple. La figure 428 montre la

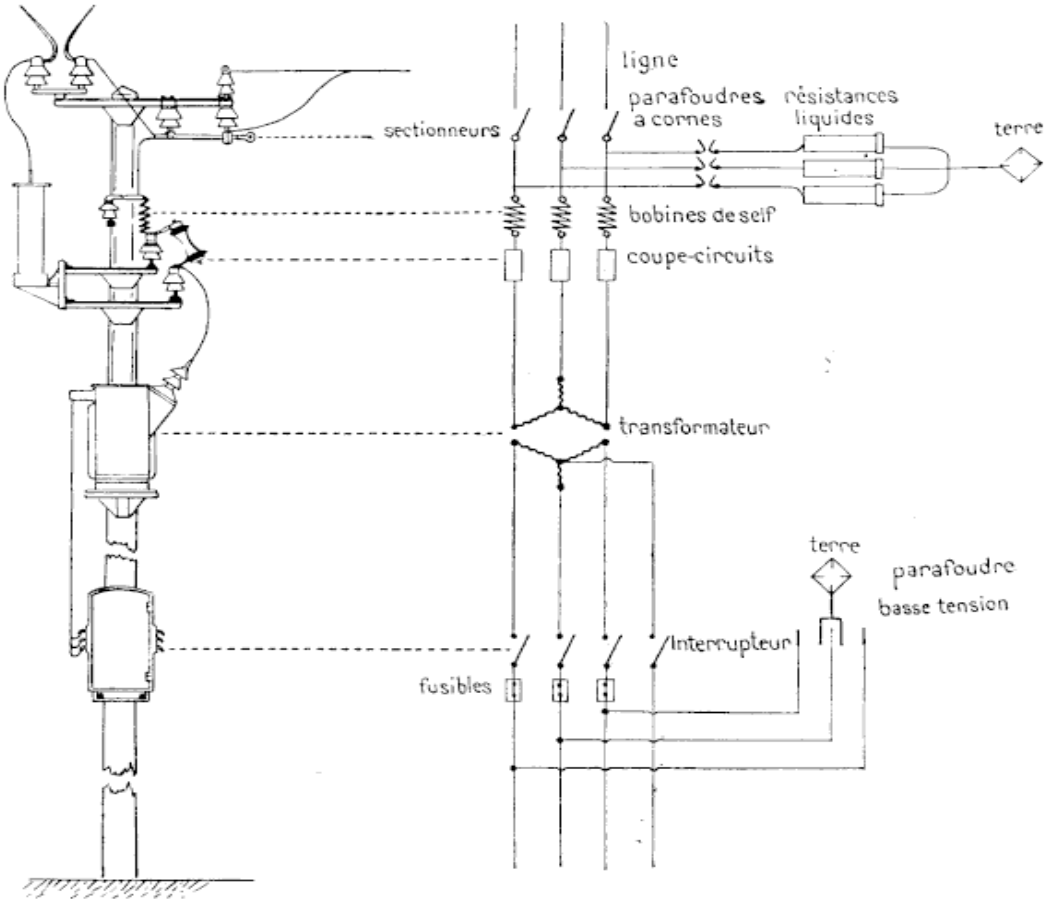


Fig. 425. — Schéma électrique d'un petit poste de transformation sur poteaux.

vue de la sous-station Nation du chemin de fer métropolitain de Paris (1 100 kilowatts), dans laquelle des redresseurs à vapeur de mercure assurent la transformation en courant continu à 600 volts du courant triphasé 5 000 volts 25 périodes fourni par l'usine de la Râpée.

* * *

Il nous faut dire un mot des ***sous-stations automatiques*** dont l'usage se répand de plus en plus. La besogne véritable des agents chargés de la conduite d'une sous-station se réduit en réalité à peu de chose.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

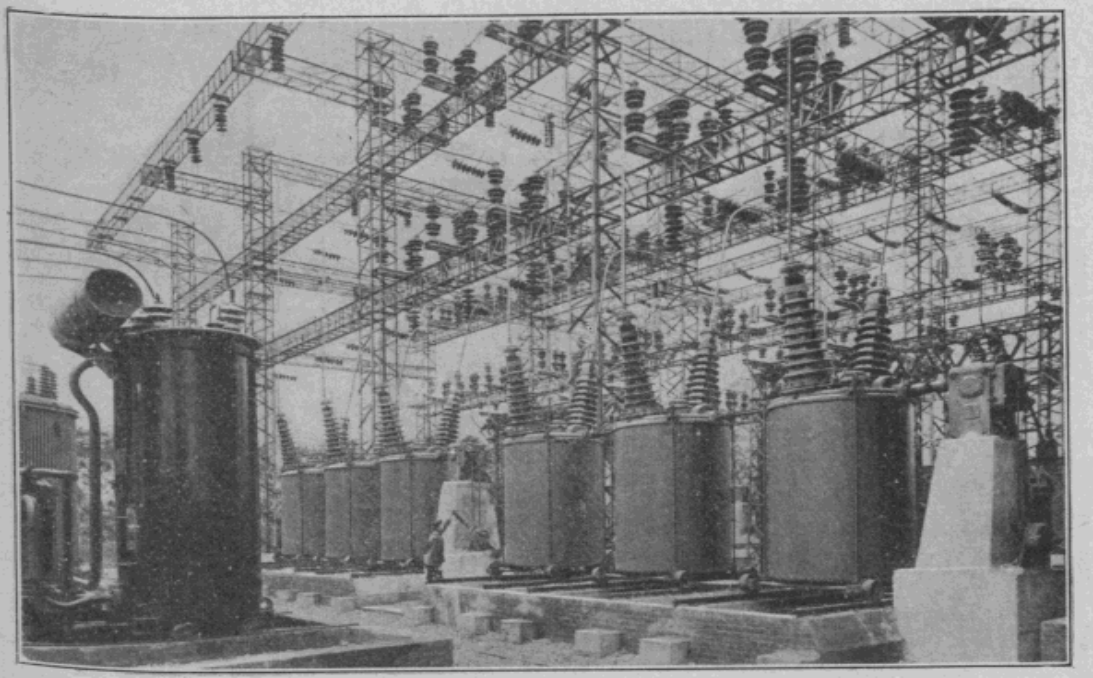


Fig. 426. — Sous-station de transformation d'Abbeville, 15/120 kilovolts.

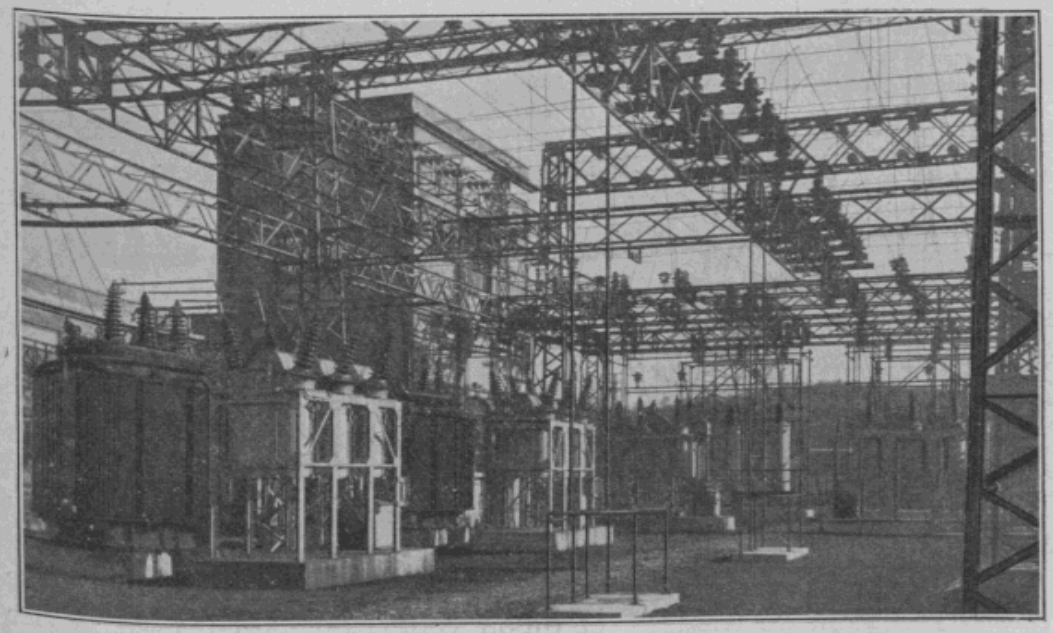


Fig. 427. — Interrupteurs à huile, parafoudres et transformateurs à 60.000 volts de la sous-station de Creil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le travail effectif à accomplir par eux est, pour la majeure partie, un simple travail de surveillance n'exigeant aucun effort physique et un effort intellectuel réduit au minimum, car il se ramène à l'exécution de consignes fixées à l'avance. Cet effort est si faible que, pour éviter que l'attention du personnel ne se détourne de son objet (tellement celui-ci lui en demande

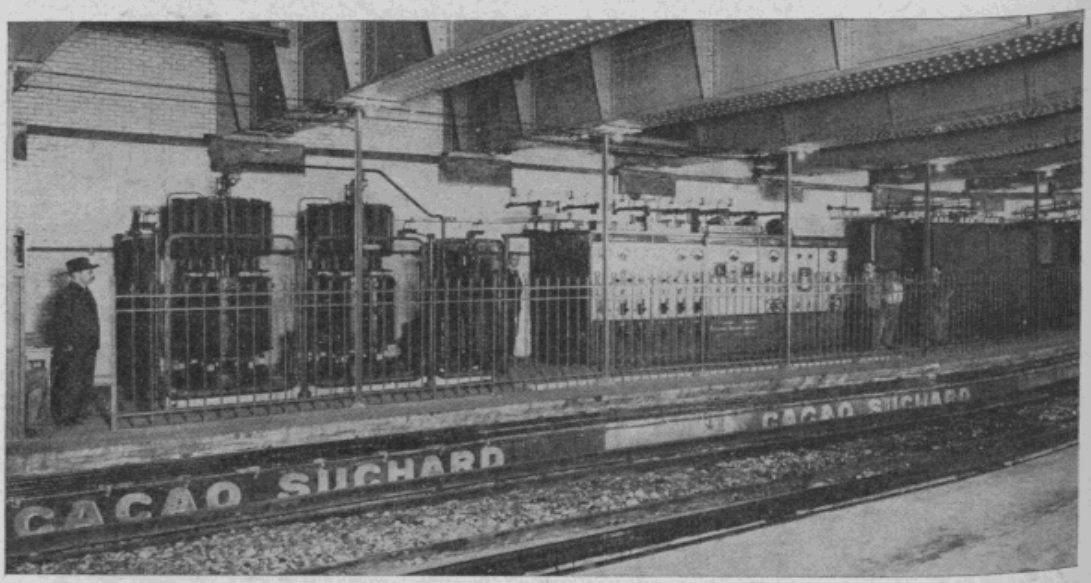


Fig. 428. — Convertisseurs métalliques installés dans une station du Métropolitain de Paris.

peu), on s'ingénie à lui trouver des occupations factices, telles que la lecture, à intervalles réguliers, de certains appareils de mesure, et cela uniquement pour tenir cette attention en éveil.

Pour les opérations normales à effectuer, les opérateurs se guident sur la lecture de ces appareils et agissent en conformité des changements dans les conditions de service qu'ils indiquent. Mais il n'est nullement indispensable de laisser à leur jugement et à leur attention le soin de tirer de ces lectures les conclusions nécessaires, et il est au contraire tout naturel d'utiliser ces changements pour provoquer automatiquement les manœuvres dont la consigne serait donnée à ces agents.

La figure 429 montre la vue d'une sous-station automatique de traction avec commutatrice de 1 000 kilowatts.

Le principe du fonctionnement est le suivant. Supposons qu'il s'agisse d'une sous-station de traction, et qu'on veuille qu'elle entre en service lorsque le voltage sur le réseau, au point où elle est branchée, tombe au-dessous d'une certaine limite, 20 à 25 p. 100 par exemple au-dessous du voltage normal. Ce cas peut se produire soit lorsque la circulation aug-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

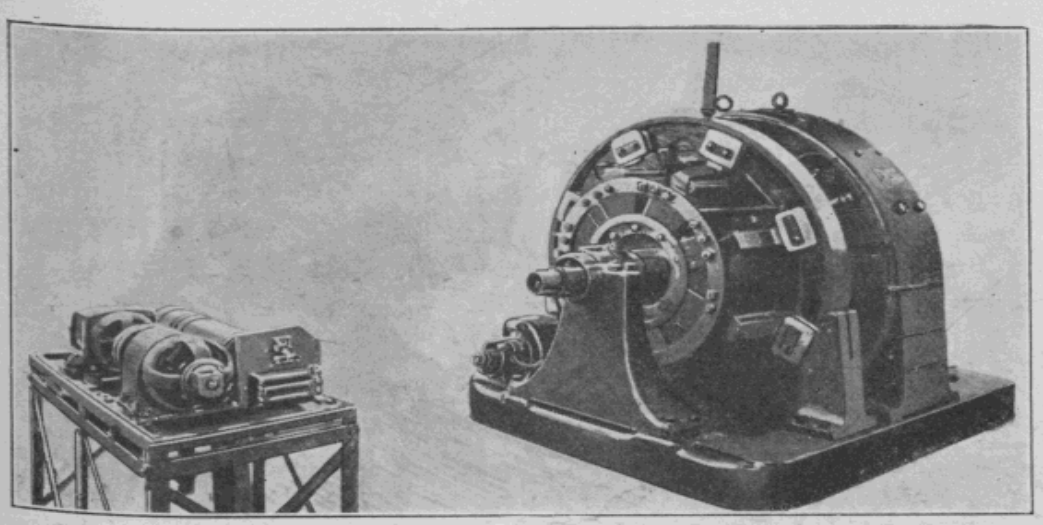


Fig. 429. — Les organes essentiels d'une sous-station automatique, commutatrice de 1 000 kilowatts et appareil de commande.

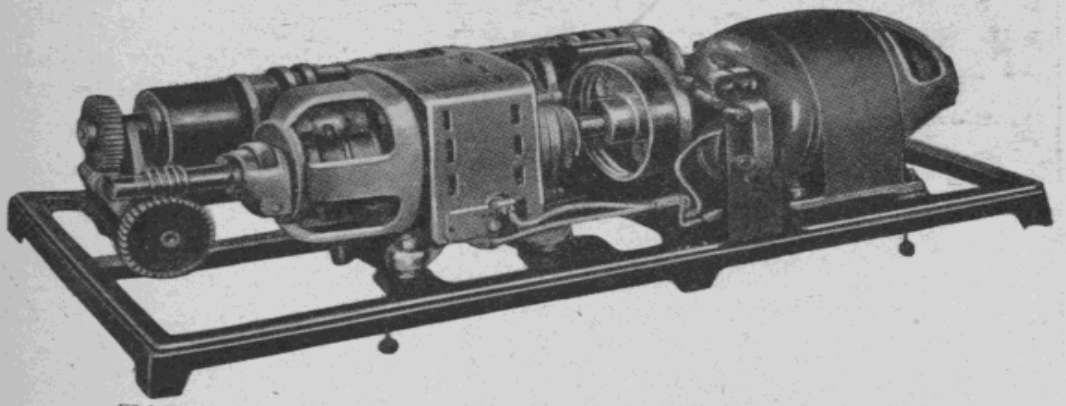


Fig. 430. — Contrôleur à commande électrique et excitatrice.

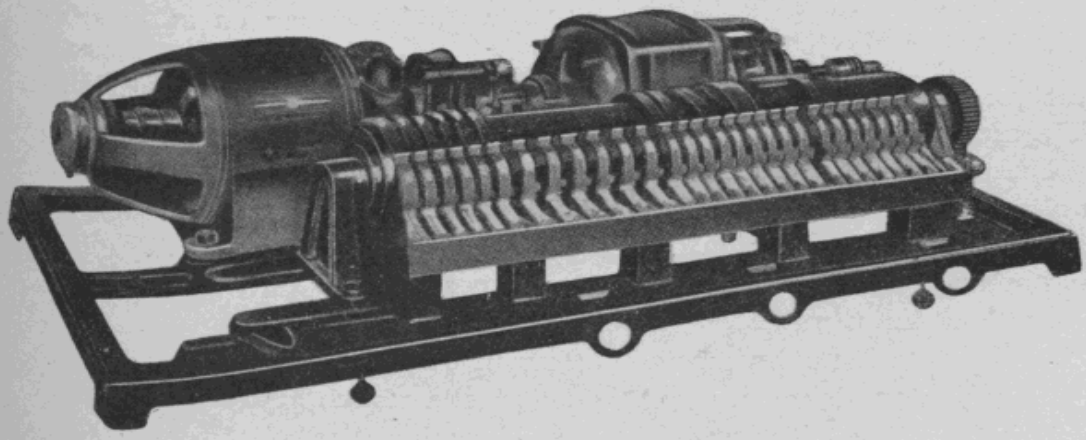


Fig. 431. — Vue de l'autre face du même contrôleur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mente, soit quand un train absorbant une grande puissance entre dans la section alimentée par cette sous-station.

La baisse de voltage est alors utilisée pour déterminer le fonctionnement d'un voltmètre à contact (fig. 432) qui ferme un circuit électrique commandant un « controller » ou « contrôleur » analogue en principe à celui des tramways que nous étudierons plus loin. Cet appareil consiste essentiellement en un moteur commandé par le voltmètre à contact ; ce moteur agit, par des engrenages de réduction de vitesse que l'on voit sur les figures 430 et 431, sur un arbre portant des contacts disposés autour de lui suivant des orientations calculées d'avance. A chaque position de rotation de l'arbre, des contacts déterminés sont en prise avec les machines correspondantes, fermant ainsi le circuit électrique déterminant une manœuvre spéciale. Cette commande s'effectue en général par l'intermédiaire de relais électromagnétiques ou contacteurs.

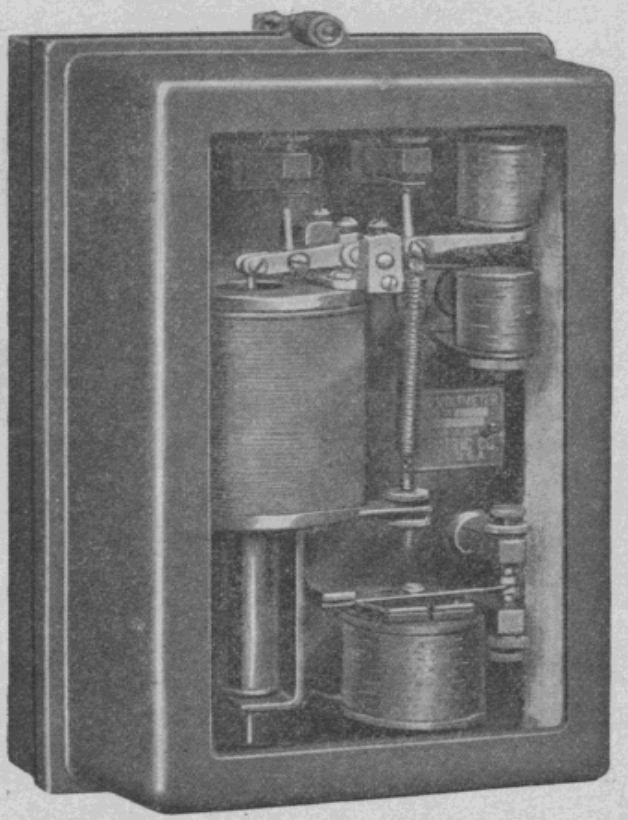


Fig. 432. — Voltmètre à contact.

Les contacts du contrôleur font entrer en action, dans l'ordre convenable, les contacteurs qui produisent, d'abord, le démarrage par le côté alternatif de la commutatrice, puis ensuite ceux qui en déterminent l'excitation.

Une fois que la commutatrice a atteint sa pleine vitesse et son plein voltage, les contacteurs qui la relient au réseau se ferment ; le voltage aux bornes d'alimentation du réseau monte et détermine, au moyen du voltmètre à contact, l'arrêt du moteur du contrôleur et, par suite, de ce contrôleur lui-même.

La sous-station alors continue à fournir du courant tant que la charge conserve une valeur convenable ; quand elle tombe au-dessous de cette valeur, un relais à action différée en détermine l'arrêt.

Bien entendu, différents dispositifs de protection doivent, en outre,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être prévus pour accomplir les fonctions confiées d'ordinaire à la surveillance d'un électricien de service.

Ces fonctions sont les suivantes :

Limitation des surcharges possibles ;

Limitation de la température des appareils ;

Arrêt des machines en service en cas de court-circuit du côté continu ou alternatif, en cas d'interruption dans le fonctionnement du réseau qui alimente la sous-station ou d'un défaut de fonctionnement d'un appareil essentiel quelconque, enfin en cas d'emballement.

Toutes ces fonctions sont exactement remplies par une série de dispositifs appropriés, dont le fonctionnement ne dépend plus de l'attention et des aptitudes personnelles d'un agent, mais devient d'une certitude absolue.

Ajoutons que l'automaticité et la sécurité de manœuvre que permettent de réaliser les dispositifs électriques ont été étendues non seulement aux sous-stations de distribution, mais également à la commande des usines hydrauliques génératrices. Il est en effet très facile de commander par des fils pilotes les moteurs ouvrant les vannes d'arrivée de l'eau aux turbines. Une fois celles-ci en mouvement, un controller convenable permet de commander toutes les manœuvres nécessaires. On peut ainsi équiper, avec une automaticité plus ou moins grande, des usines dont la puissance atteint 15 000 kilowatts. Au-dessus, les économies sur le personnel perdent de leur intérêt par suite des charges de premier établissement entraînées par les dispositifs automatiques, qui croissent proportionnellement à la puissance.

* * *

De la sous-station partent des lignes de courant continu ou alternatif qu'il s'agit de distribuer aux différents appareils d'utilisation.

La ***distribution*** peut se faire, dans le cas du courant continu, soit à intensité constante, soit à voltage constant, mais c'est surtout ce dernier mode qui est de beaucoup le plus répandu.

La disposition la plus simple consiste évidemment à disposer tous les appareils en ***dérivation*** entre les fils de ligne entre lesquels existe une différence de potentiel de 110 volts (voltage le plus courant) comme l'indique la figure 433. Mais alors on constate que le voltage aux bornes de chaque appareil (lampes, par exemple) diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source

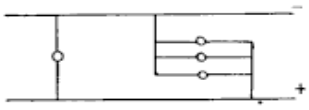


Fig. 433. — Distribution en dérivation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'énergie, et il en résulte que les appareils les plus éloignés n'auront pas un voltage suffisant.

On remédie à cet inconvénient par la ***distribution en boucle*** (fig. 434) qui maintient une différence de potentiel sensiblement uniforme aux bornes des divers récepteurs, car la longueur totale du circuit est la même pour chaque appareil. Malheureusement, ce système exige une plus grande dépense de conducteurs, sauf lorsque l'on peut, comme c'est le cas pour un groupe de maisons, disposer le circuit comme l'indique la figure 435.

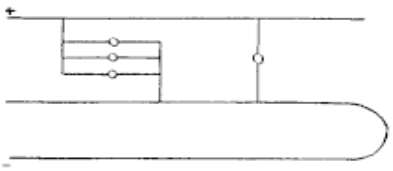


Fig. 434. — Distribution en boucle.

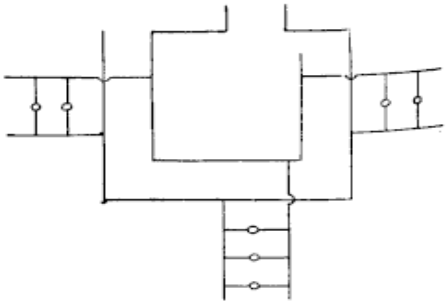


Fig. 435. — Distribution en boucle d'un groupe de maisons.

Dans une installation importante, on emploie le système de distribution par ***feeders*** (fig. 436). Les lampes ou les appareils d'utilisation sont, comme précédemment, montés en dérivation sur des câbles de distribution, mais ceux-ci sont reliés directement à la source d'énergie par des conducteurs plus gros et sur lesquels on ne fait aucun emprunt. On cherche autant que possible à répartir également la charge entre les diverses sections. Des survolteurs placés à l'origine des feeders permettent de compenser les variations accidentelles de voltage en cours de fonctionnement.

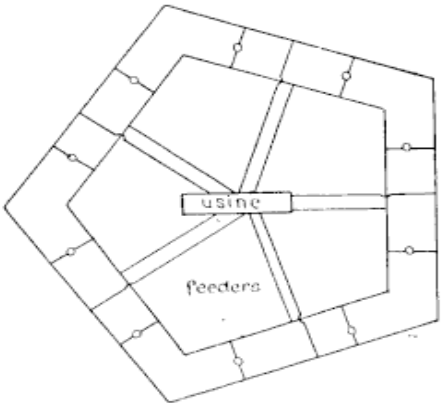


Fig. 436. — Distribution par feeders.

Nous avons vu que plus le voltage est élevé, plus la section des conducteurs peut être réduite, et en même temps les frais d'installation de ligne. Mais, si on applique cette propriété aux distributions, certains appareils qui fonctionnent sur un voltage de 110 volts par exemple devront être groupés par deux si la distribution est faite sous 220 volts, ce qui, dans la pratique, peut présenter des inconvénients sérieux. On résout la difficulté par ce qu'on appelle la ***distribution à trois fils***.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A cet effet, deux génératrices à 110 volts sont montées en série. Elles alimentent le circuit à trois fils A, B, C (fig. 437) ; ce dernier, appelé *fil neutre* ou de *compensation*, est souvent mis à la terre ; il est de section plus faible que les fils A et B, car il est parcouru par un courant dont l'intensité n'est que la différence des intensités dans A et B. Si l'on avait installé deux circuits indépendants, il aurait fallu quatre fils de même importance. L'économie est donc notable ; de plus, on peut utiliser la différence de potentiel totale (220 volts) en se branchant entre les lignes A et B. Naturellement, il ne faut pas mettre de coupe-circuits sur le trajet du fil C, car alors on se trouverait en présence d'une distribution à 220 volts et, si les charges sur A et B étaient inégales, la tension deviendrait trop grande sur la ligne la moins chargée et trop faible sur l'autre : certains appareils grilleraient et d'autres ne fonctionneraient plus. En répartissant les charges sur les circuits AC et BC, on arrive à n'avoir dans C qu'un courant très faible.

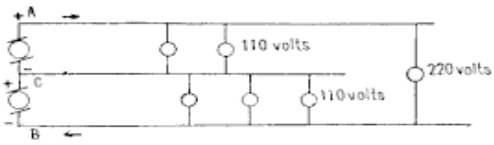


Fig. 437. — Distribution continue à trois fils.

On peut généraliser le principe de la distribution à trois fils et, par exemple, en employant quatre générateurs en série, réaliser avec *cinq fils* quatre circuits de distribution ordinaire.

* * *

Pour les ***courants alternatifs***, divers cas sont à considérer suivant la nature de ces courants.

Si le courant est ***diphasé***, il faut, dans la distribution la plus simple, deux circuits complets, soit quatre fils (fig. 438), et tout se passera comme

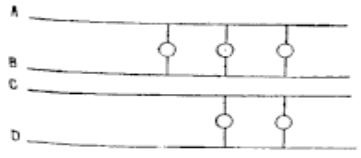


Fig. 438. — Distribution diphasée à quatre fils.

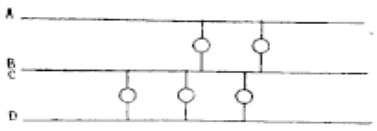


Fig. 439. — Distribution diphasée à trois fils.

si on avait deux lignes à courant alternatif monophasé ordinaire. On peut simplifier la canalisation en réunissant en un seul les fils de retour B et C, mais alors, si V est la différence de potentiel entre A et B et B et D, le voltage efficace entre A et D sera seulement :

$$V \times \sqrt{2} = 1{,}41\ V.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, dans une distribution diphasée à trois fils, entre les fils A et D (fils de phase) et le fil commun (ou fil de retour) la tension est de 100 volts, elle sera de 141 volts entre les deux phases A et D (fig. 439).

Quant au courant circulant dans le fil commun, il est égal à $I\sqrt{2}$, si I est l'intensité efficace circulant dans les deux circuits, ce qui fait que ce fil aura une section moindre que l'ensemble des deux fils dans la distribution à quatre fils, d'où économie dans l'établissement de la ligne.

Pour les ***courants triphasés***, il semble à première vue qu'il faille trois lignes différentes, soit six fils, mais, comme précédemment, des arti-

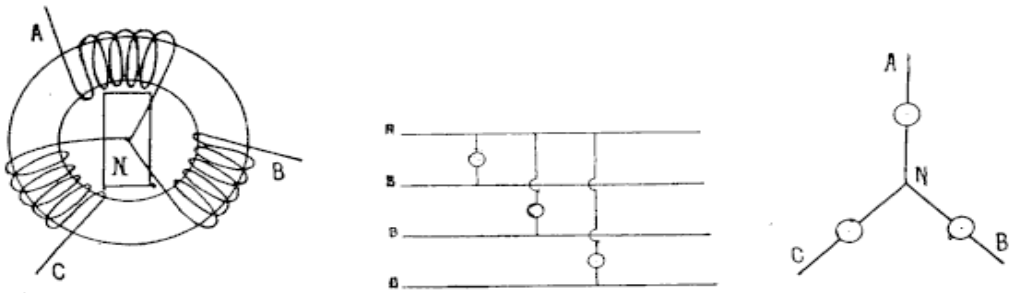


Fig. 440. — Distribution triphasée en étoile.

fices permettent de réduire ce nombre théorique et, en pratique, on n'emploie jamais la distribution indépendante.

Supposons que l'on réunisse ensemble les extrémités des trois enroulements théoriques de l'alternateur triphasé (fig. 440). On aura trois fils de phase, A, B, C, et un quatrième fil, dit neutre, N. On dit alors que l'alternateur est monté ***en étoile***.

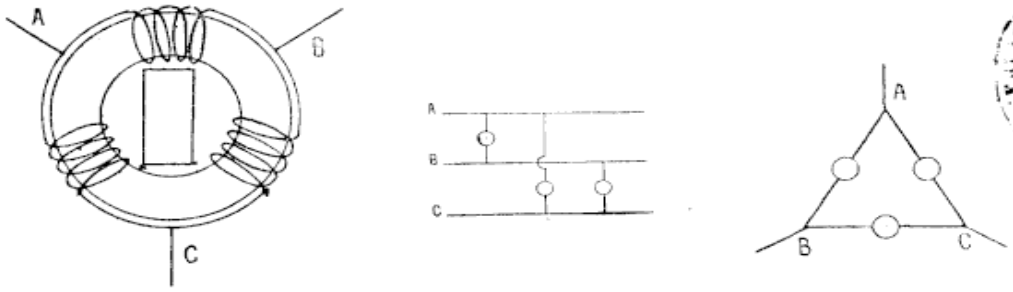
Si V est la différence de potentiel entre le fil neutre et un fil de phase, on démontre qu'entre deux fils de phase (BA, BC, AC) la différence de potentiel maximum est $V \times \sqrt{3} = 1{,}73$ V. Par exemple, si la différence de potentiel entre phase et unité est 110 volts, elle sera de 190 volts entre phase.

Le calcul montre aussi que si les trois circuits A, B, C sont identiques, c'est-à-dire également chargés, l'intensité dans le fil de retour N, égale à la somme des intensités des trois courants, est nulle, et par conséquent ce fil peut être supprimé. On relie en général le point neutre de l'alternateur au sol et on établit les connexions entre deux fils, dont un est parcouru par le courant et l'autre relié à la terre. Comme, en pratique, il est impossible d'équilibrer exactement la charge sur les trois phases, on conserve cependant le fil neutre, mais on peut ne lui donner qu'une section très faible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un autre mode de montage est dit ***en triangle*** (fig. 441). Les trois circuits générateurs sont réunis en série, et aux points de jonction on fixe les trois fils de ligne A, B, C. On montre que la différence de potentiel entre les phases est simplement égale à V.

On peut également réaliser les montages spéciaux avec les courants ***tétraphasés*** qui sont identiques aux courants diphasés, cette dernière appellation tendant à disparaître de la nomenclature électrotechnique. La figure 442 montre trois modes de connexion pour un alternateur : deux circuits indépendants, montage en étoile et montage en triangle.



BIBLIOTHÈQUE

Fig. 441. — Distribution triphasée en triangle.

Ces montages exigent quatre fils de ligne, mais on peut, par exemple, dans le montage à circuit indépendant, réunir les fils A et B′.

Remarquons que le générateur d'électricité peut être un transformateur, et les mêmes montages peuvent alors être effectués, en particulier les

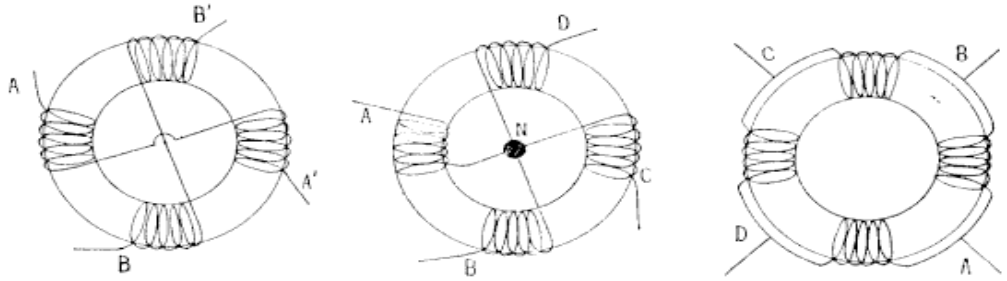


Fig. 442. — Montages tétraphasés.

montages triangle et étoile, par les courants triphasés. Comme un transformateur triphasé est constitué par trois transformateurs monophasés, on peut les accoupler comme les lignes d'alimentation dans les cas précédents.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COMPTEURS

Les *compteurs* d'électricité sont de types multiples et diffèrent non seulement par leur principe, mais aussi par les dispositions diverses qu'impose le mode de vente de l'énergie électrique : à double tarif, à tarif multiple, à dépassement, à paiement préalable, etc. Chaque compagnie d'électricité a son compteur d'un genre particulier qu'elle place chez ses abonnés. Aussi ne pouvons-nous entrer dans l'étude des différents appareils ; nous nous contenterons d'indiquer le principe des plus répandus.

Une simple mention suffit pour les ***compteurs électrolytiques*** ou ***électrochimiques***, peu répandus, et dans lesquels une fraction connue du courant traverse une cuve électrolytique. Des dispositifs appropriés permettent d'évaluer la quantité de substance décomposée, qui est proportionnelle à la quantité d'électricité consommée.

Les ***compteurs électromécaniques*** sont les plus employés. Ils comportent deux parties distinctes : un dispositif électrique engrenant avec un système mécanique actionnant un mouvement d'horlogerie dont les aiguilles ou les chiffres sauteurs indiquent la consommation d'énergie. On peut distinguer trois classes de compteurs électromécaniques : les compteurs moteurs, pendulaires et oscillants.

Dans les *compteurs moteurs*, comme leur nom l'indique, de petits moteurs magnéto-électriques (compteur O'K), dynamo-électrique (compteur Thomson), à induction ou à champ tournant (compteur BT) mettent en mouvement le mécanisme d'horlogerie.

Le ***compteur O'K*** (O'Keanan) est constitué par une petite magnéto fonctionnant à vide. L'inducteur est un aimant permanent entre les pôles duquel se trouve un cylindre de fer doux, fixe également. On constitue ainsi deux entrefers dans lesquels se déplace l'induit. Celui-ci a la forme d'une cloche renversée et porte un petit collecteur (de 3 millimètres environ de diamètre) auquel le courant est amené par deux balais en forme d'étrier. La figure 443 montre le schéma électrique de cet appareil. Sous l'influence du courant dérivé, l'induit tourne avec une vitesse proportionnelle au courant utilisé. L'appareil

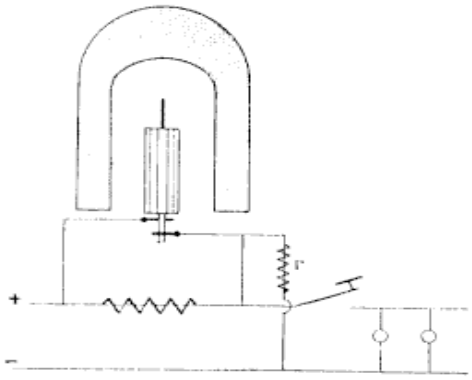


Fig. 443. — Schéma d'un compteur de quantité courant continu, type O'K.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est donc un *compteur de quantité*. On équilibre les frottements de l'appareil en le *compoundant*, c'est-à-dire en reliant l'induit d'une façon permanente au secteur par l'intermédiaire d'une résistance r très grande. On crée ainsi un couple permanent un peu inférieur au couple résistant dû aux frottements, sans quoi le moteur tournerait même à vide. On peut modifier l'étalonnage de l'appareil en *shuntant magnétiquement* l'aimant permanent. A cet effet, deux pièces en fer doux peuvent être placées plus ou moins près de l'aimant, dérivant ainsi une partie plus ou moins grande du flux inducteur, ce qui fait varier le champ dans l'entrefer.

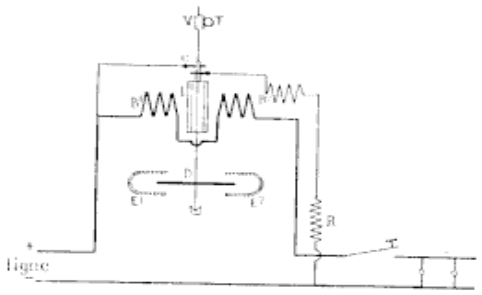


Fig. 444. — Schéma d'un compteur de puissance Elihu Thomson.

Les ***compteurs à collecteurs*** ou ***dynamos électriques*** genre Elihu Thomson sont extrêmement répandus. Ce sont de petites dynamos sans fer employées comme réceptrices. L'inducteur est constitué par deux bobines à gros fil, B_1, B_2 (fig. 444) dans lesquelles passe le courant total à mesurer. L'induit en tambour a ses spires traversées par un courant dérivé pris sur les deux fils de ligne. Ce courant, après avoir traversé une forte résistance additionnelle R, pénètre dans l'induit par deux légers balais qui appuient sur le collecteur C. L'arbre vertical de l'induit repose par un pivot sur une crapaudine formée par un rubis, et il peut tourner très facilement, engrenant dans son mouvement un tambour F par l'intermédiaire d'une vis sans fin V, mettant ainsi en marche le mécanisme d'horlogerie des aiguilles indicatrices du compteur.

Pour que la vitesse de rotation de l'induit demeure petite, on crée un *freinage* proportionnel à cette vitesse au moyen d'un disque en cuivre rouge D monté sur l'arbre de l'induit et qui tourne entre deux aimants E_1, E_2. Les courants de Foucault qui prennent naissance dans le disque tournant engendrent un couple résistant proportionnel à la vitesse de rotation et sur lequel on peut agir en modifiant les positions relatives des aimants et du disque.

Le compteur à collecteur mesure la ***puissance*** et peut s'employer aussi bien sur courant continu que sur courant alternatif, à condition que la résistance additionnelle R ne soit pas inductive.

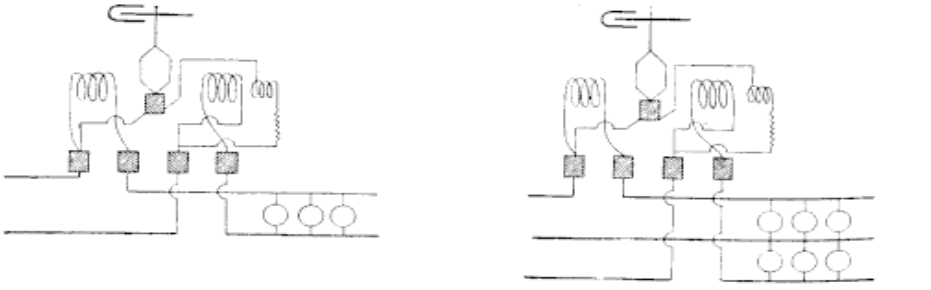
Pour compenser le frottement au démarrage, on opère comme dans le cas précédent en *compoundant* l'inducteur. A cet effet, à l'enroulement à gros fil en série, on ajoute quelques spires d'un enroulement de fil fin en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dérivation, ce qui crée un couple permanent que l'on s'arrange pour rendre légèrement inférieur au couple de démarrage. Suivant les modèles, le disque est situé à la partie supérieure ou à la partie inférieure de l'appareil, et les détails de réglage seuls diffèrent.

La figure 445 montre les schémas de montage d'un compteur à deux fils et d'un compteur à trois fils.

Les ***compteurs d'induction*** ou ***à champ tournant*** sont de petits moteurs asynchrones dont l'équipage mobile, le rotor est constitué par un



Montage d'un compteur à deux fils. Montage d'un compteur à trois fils.

Fig. 445.

disque de cuivre ou d'aluminium tournant dans l'entrefer d'un aimant permanent et d'un ou plusieurs électro-aimants (constituant le stator) parcourus les uns par le courant principal et les autres par le courant d'utilisation.

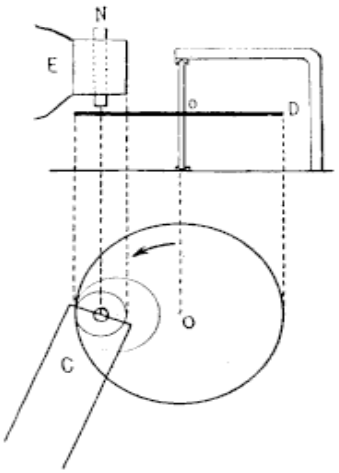


Fig. 446.

Afin de faire comprendre le principe de fonctionnement de ces appareils, nous commencerons par rappeler une expérience classique d'Elihu Thomson sur les courants de Foucault.

Disposons, au-dessus d'un disque de cuivre D mobile autour d'un axe O (fig. 446), un électro-aimant E parcouru par du courant alternatif. Cet électro-aimant induit dans le disque des courants de Foucault et, par raison de symétrie, ces courants ne peuvent produire la rotation du disque. Mais introduisons entre l'électro-aimant et le disque une plaque de cuivre C recouvrant partiellement le noyau de l'électro-aimant. Dans ces conditions, le champ de l'électro-aimant est perturbé, il n'est plus symétrique, et on constate alors que le disque se met à tourner dans le sens qui va de la partie non couverte vers la partie couverte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons maintenant qu'au lieu d'une bobine, nous en disposions deux au-dessus du disque D (fig. 447) : l'une, B_1, à gros fil, parcourue par le courant d'utilisation ; l'autre, B_2, alimentée par une dérivation prise sur le circuit d'alimentation et dont la réactance est assez grande pour que le courant qui la traverse (et par suite le champ magnétique alternatif qu'elle produit) soit en quadrature avec le courant circulant dans B_1 (et par suite en quadrature avec le champ induit par B_1). Dans ces conditions, chacun des électro-aimants engendre dans le disque métallique des courants de Foucault sur lesquels agit le champ de l'autre électro-aimant. Il en résulte deux couples tendant à faire tourner le disque ; ces couples sont inégaux, de sens contraires, mais proportionnels à la puissance moyenne, et le couple résultant, égal à leur différence, provoque la rotation du système mobile.

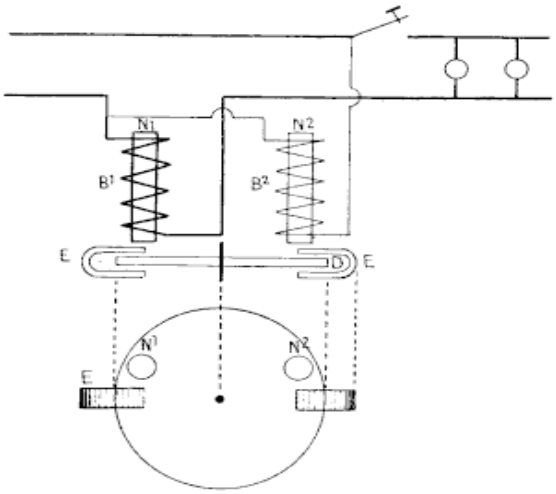


Fig. 447.

D'autre part, en freinant le disque grâce à l'action de deux aimants permanents, comme dans les autres systèmes de compteurs, la vitesse limite qu'il atteint pour chaque régime de débit électrique est elle-même proportionnelle à la puissance consommée.

La figure 448 montre la disposition intérieure d'un compteur C. A. C. fonctionnant d'après ces principes ; on y reconnaît les deux bobines B_1, B_2, montées sur le même entrefer N ; le freinage du disque D est produit par un seul aimant E de forme appropriée.

La figure 449 représente une autre réalisation ; c'est le ***compteur Ferrari***, également très employé. Dans cet appareil, un anneau feuilleté AA′ porte deux groupes de deux bobines P_1P_2, B_1B_2 disposés à 180° l'un de l'autre. Les bobines P_1, P_2, à gros fil, sont parcourues par le courant total débité dans l'installation, tandis que les bobines B_1, B_2, à fil très fin, sont alimentées par une dérivation prise sur les fils du secteur. Le courant qui y circule est décalé en arrière du courant principal d'un quart de période, par suite de la grande réactance de ces bobines dont le bobinage est très important. On a donc finalement un système de deux courants diphasés dont les champs alternatifs se continuent pour donner un champ résultant tournant, qui est encore renforcé par un noyau feuilleté *nn′*.

Ce champ tournant entraîne un rotor constitué par un cylindre creux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'aluminium *aa'* porté par un axe vertical O qui engrène avec le compteur de tours par l'intermédiaire de la vis sans fin V. Un disque D en cuivre

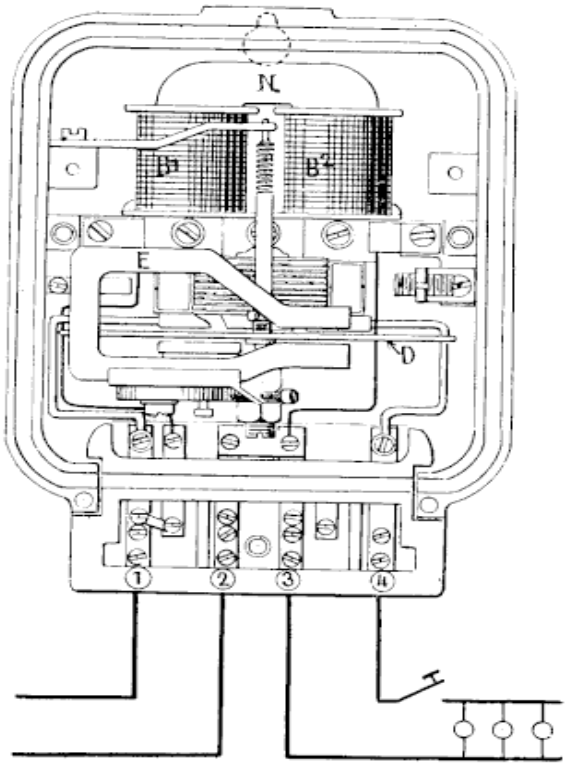


Fig. 448. — Compteur C. A. C. pour courant monophasé deux fils.

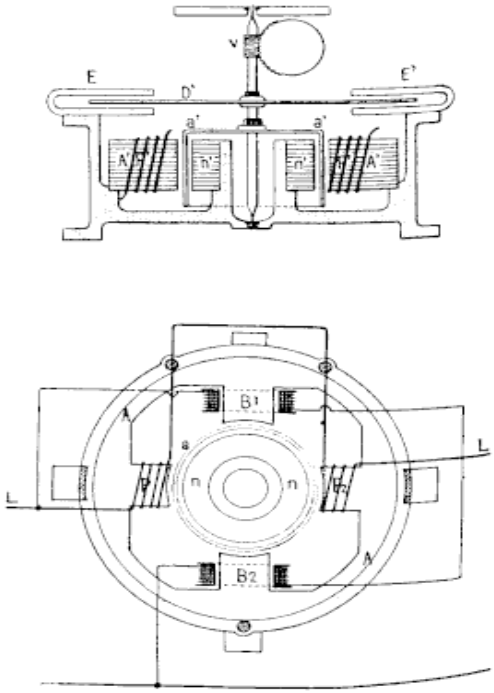


Fig. 449. — Compteur Ferrari pour courants alternatifs.

monté sur le même axe et tournant entre deux aimants permanents E, E' sert à freiner le système.

Le compteur ***Sangamo***, ou ***compteur à mercure***, est surtout employé en Amérique, mais son application à la traction en particulier semble devoir se développer. Il fonctionne exactement comme la classique roue de Barlow. Un disque métallique émaillé flotte dans un bain de mercure entre les pôles d'un aimant, le courant entrant et sortant du bain en des points diamétralement opposés. Dans ces conditions, on sait qu'un couple moteur tend à faire tourner le disque, sa valeur étant proportionnelle à l'énergie dépensée.

La figure 450 montre la réalisation pratique de l'appareil. Le moteur est placé à la partie inférieure du compteur ; sur son axe se trouve également monté le plateau de frein et une vis sans fin actionnant le mouvement d'horlogerie. Le fond de la cuvette à mercure est en alliage non magnétique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

émaillé et sa partie supérieure est constituée par un isolant moulé dans lequel est encastrée une couronne de tôle d'acier fermant le circuit de l'électro-aimant de shunt. Cet électro est constitué par des tôles de fer et il est excité par une paire de bobines (non représentées sur la figure) dont les enroulements sont disposés en série avec un enroulement de chauffage d'un couple thermo-électrique servant à compenser le frottement aux faibles charges.

L'électro-aimant de champ est fixé à la base de la cuvette. Les aimants permanents amortisseurs sont supportés chacun par quatre pieds en cuivre rivés à la base de fonte du compteur.

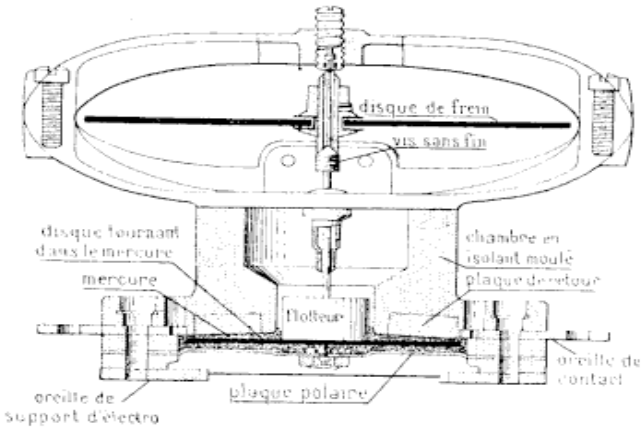


Fig. 450. — Compteur Sangamo.

La vitesse du compteur est réglée par un shunt magnétique formé d'un disque de fer doux monté sur une vis sans fin et que l'on peut faire monter ou descendre à volonté.

Enfin, nous ne dirons que quelques mots des ***compteurs oscillants***, dont l'emploi est assez rare en France. Leur principe est le suivant. Deux

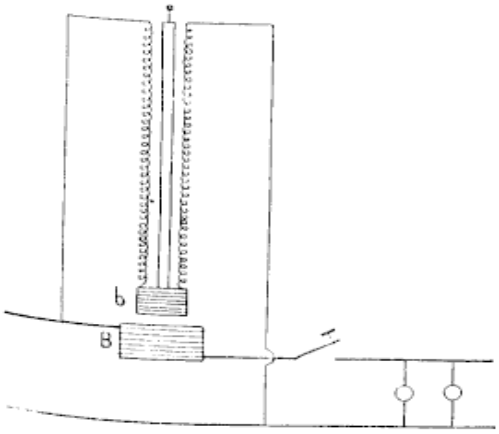


Fig. 451. — Principe du compteur Aron.

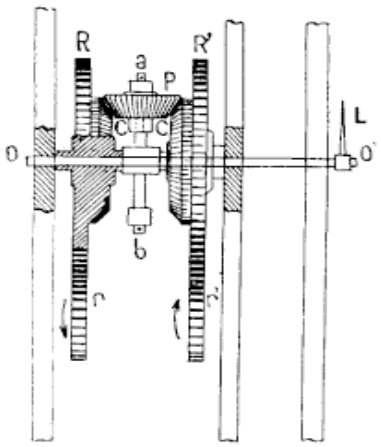


Fig. 452. — Mécanisme du compteur Aron.

mouvements d'horlogerie identiques sont réglés, l'un par un balancier ordinaire et l'autre par un balancier dont la lentille est remplacé par une bobine de fil fin *b* en dérivation sur les deux fils de ligne (fig. 451). Cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bobine oscille à l'intérieur ou au voisinage d'une seconde bobine à gros fil B, parcourue par le courant à mesurer. Quand il ne passe aucun courant dans le circuit d'utilisation, les deux balanciers ont la même période. Quand le circuit est fermé, l'action mutuelle des deux courants dans les bobines s'ajoute à l'action de la pesanteur, et par suite le balancier portant la bobine *b* oscille plus vite que le balancier de comparaison. On démontre que la différence des nombres d'oscillations est proportionnelle à EI, puissance du courant. L'appareil fournit donc une mesure de la *puissance*, à condition que l'on puisse enregistrer la différence de période des pendules. Aron y est arrivé en utilisant un différentiel analogue à celui des automobiles (fig. 452). Les balanciers actionnent leurs mouvements d'horlogerie dont les deux dernières roues, *r*, *r'*, tournant en sens inverse, sont en prise avec deux roues R, R' montées folles sur un axe OO'. Ces roues portent également un embrayage conique CC' engrenant avec un pignon conique P fou sur un axe *ab* fixé sur la tige OO' qui peut tourner en actionnant les aiguilles L du compteur.

Quand les deux roues *r*, *r'* ont la même vitesse de rotation (le compteur ne marquant pas), le pignon P ne fait que tourner autour de son axe. Mais, si la vitesse des deux roues est différente (quand il passe du courant dans le circuit d'utilisation) il en résulte, outre le mouvement de rotation de P, un mouvement de rotation de l'ensemble P, *a*, *b* autour de OO' dans le sens de la roue qui tourne le plus vite. Par suite, le levier *ab* entraînera l'axe OO' avec une vitesse égale à la moitié de la différence des vitesses des deux roues (d'après la formule mécanique de Willis), c'est-à-dire avec une vitesse proportionnelle à la puissance consommée.

Le remontage des mouvements d'horlogerie se fait automatiquement par un électro-aimant en dérivation sur le courant d'alimentation. Cet appareil marche aussi bien sur courant alternatif que sur courant continu ; la difficulté pratique est le réglage du synchronisme à vide des deux pendules.

* * *

A côté des compteurs totalisant simplement l'énergie électrique consommée, il existe un grand nombre d'*appareils plus compliqués et destinés à tenir compte des* ***conditions spéciales de vente de l'électricité***. Nous ne ferons que les signaler ici, leurs dispositions électriques étant analogues à celles des compteurs ordinaires, seuls les systèmes mécaniques variant de l'un à l'autre.

Pour la charge des accumulateurs pendant la nuit, à des heures où la consommation est peu importante sur un secteur, on fait souvent des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conditions de vente plus favorables. On emploie alors des compteurs ***double tarif***, totalisant d'une part l'énergie consommée pendant la journée, vendue à un prix plus élevé que l'énergie dépensée pendant la nuit, qui se totalise séparément.

Dans d'autres cas, lorsque l'électricité est vendue, comme le gaz dans certaines villes, d'après le système dit à ***paiement préalable***, il faut introduire dans le compteur une pièce d'argent pour que celui-ci permette le passage d'une quantité d'énergie correspondant au prix payé, après quoi le courant est automatiquement coupé, et il faut introduire une nouvelle pièce d'argent pour le rétablir.

Lorsque la vente de l'énergie électrique a lieu à forfait, on se sert de ***compteurs à dépassement*** qui n'enregistrent que la consommation d'électricité excédant la valeur du forfait.

Beaucoup de tarifications de l'énergie reposent sur une limitation de la puissance absorbée par le client pendant un temps plus ou moins long constituant une « pointe » dont le secteur a intérêt à réduire l'importance. On se sert alors de compteurs ***indicateurs de maximum***.

* * *

La ***fabrication des compteurs*** électriques est très délicate, car les conditions à remplir sont multiples et de plus en plus rigides. En particulier, avec l'emploi des lampes dites demi-watt, des petits transformateurs de sonnerie, etc., il faut que le compteur démarre pour une charge qui souvent n'est même pas égale au dixième de sa charge normale. Il faut donc que le couple moteur soit relativement puissant, ce qui entraîne

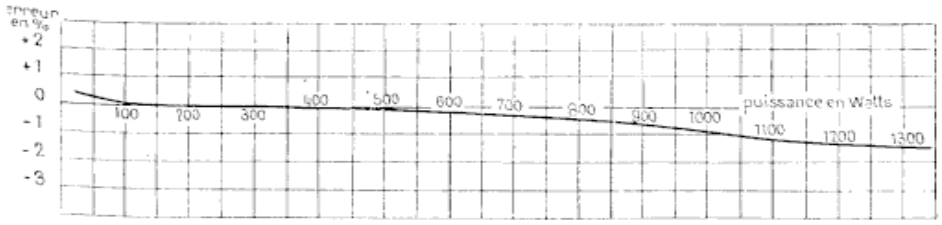


Fig. 453. — Étalonnage d'un compteur.

comme conséquence que le freinage par l'aimant soit également très intense. Mais alors une autre difficulté se présente : il faut que l'aimantation des aimants ne varie pas pendant la vie du compteur, et qu'elle ne soit pas influencée par les actions extérieures : champ magnétique des autres organes du compteur, variations de température, etc.

Il faut que le compteur sensible soit aussi exact, et cela dans de grandes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

limites de charge. En général, pour les faibles charges, les compteurs avancent légèrement et retardent lorsque la charge est voisine du maximum. Les règlements officiels ne tolèrent qu'une erreur maxima de $\pm$ 3 p. 100 dans les cas extrêmes. La figure 453, relative à un essai d'un compteur M 4 de 1 000 watts, montre que les constructeurs arrivent à se tenir très en dessous de cette limite.

Enfin, les compteurs à vide ne doivent pas consommer dans les enroulements en dérivation permanente sur le secteur une énergie trop considérable.

Pour fixer les idées, nous dirons que le couple moteur, dans les bons compteurs, est de l'ordre de 5 grammes-centimètre et la consommation inférieure à 1 watt.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TROISIÈME PARTIE

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE XXII

GÉNÉRALITÉS SUR LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES

Les conducteurs électriques de distribution. — Constitution. — Jonction. — Supports de lignes. — Isolateurs. — Moulures. — Tubes Bergmann. — Règles à observer dans les installations intérieures. — Les fusibles. — Caractéristiques. — Forme. — Les coupe-circuits unipolaires à barrette mobile, sur coffret, en tubes isolants. — Les interrupteurs. — Interrupteurs pour faible intensité, à balais, à bascule. — Interrupteurs industriels à rupture brusque. — Interrupteurs pour très grandes intensités, à lames multiples ; interrupteurs dans l'huile. — Disjoncteurs industriels dans l'air, dans l'huile, à maxima, à minima, à retard. — Cataracte de mercure, retardeurs. — Disjoncteurs ultra-rapides. — Rhéostats à variation continue. — Rhéostats industriels. — Les appareils de mesure. — Ampèremètres et voltmètres à cadre mobile (Desprez-d'Arsonval), électrodynamiques, thermiques, à fer doux, à induction, électrostatiques. — Montage des appareils de mesure. — Tableaux. — Schémas d'installations domestiques usuelles.

L'étude de la production de l'énergie électrique et de son transport jusqu'aux lieux de consommation a fait l'objet des chapitres précédents. Il reste maintenant à passer en revue les multiples ***applications de l'électricité*** : lumière, force motrice, traction, électrochimie, télégraphie et téléphonie avec ou sans fil, électricité médicale, etc. Ce sera l'objet de la troisième partie de ce volume. Mais, avant toute chose, il faut assurer la liaison entre l'appareil électrique installé soit dans une usine, soit dans notre propre demeure, et le secteur fournissant l'énergie.

Cette liaison doit comporter des dispositifs de sécurité protégeant à la fois un appareil déterminé sujet à être détérioré par suite d'une fausse manœuvre ou d'un accident et le reste de l'installation. Enfin, pour s'assurer du fonctionnement normal de l'ensemble, des instruments de mesure sont indispensables sitôt que l'installation électrique est tant soit peu importante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le plan de ce chapitre se trouve donc ainsi tout tracé, et ses divers paragraphes traiteront des canalisations, des fusibles, des interrupteurs et disjoncteurs, des rhéostats, des appareils de mesure (ampèremètres, voltmètres, etc., à lecture directe et enregistreurs). Nous terminerons en donnant quelques schémas de montage relatifs aux applications domestiques. Dans tout ce qui va suivre, il ne sera question que des installations à bas voltage, 110 ou 220 volts par les applications domestiques, 600 volts maximum pour les applications industrielles.

* * *

La ***canalisation électrique*** comprend deux éléments distincts : la ligne et son support.

La *ligne* doit être établie de façon à ce que l'échauffement du métal sous l'action du courant ne dépasse pas certaines limites et, d'autre part, à ce que la chute de tension entre le compteur et l'appareil le plus éloigné ne soit que de quelques pour cent.

Les fils électriques d'installation sont le plus souvent des conducteurs isolés ; suivant le diamètre de leur âme métallique, ils comportent un seul fil ou plusieurs torons, et l'isolement, dont la valeur varie de 300 à 1 200 mégohms d'après la tension du courant, est toujours constitué, comme l'indique schématiquement la figure 454, par des couches concentriques d'isolant électrique et de protecteur mécanique. Pour les fils souples,

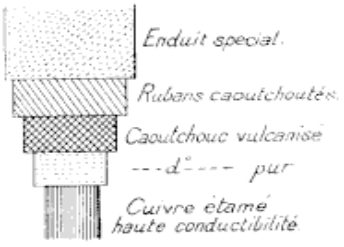


Fig. 454. — Isolement des fils conducteurs.



Fil souple.

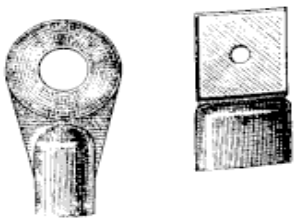


Fig. 455. — Cosses.

le conducteur est formé par une série de brins de cuivre très fins et plus ou moins nombreux suivant la grosseur du câble.

La réunion des conducteurs aux appareils est assurée, lorsque le fil est souple ou d'un diamètre petit, en l'engageant simplement dans des bornes à serrage par vis. Lorsque le diamètre augmente, il faut réaliser un bon contact, car autrement l'importance de l'ampérage qui doit traverser la jonction y déterminerait un échauffement anormal et dangereux. On monte alors sur l'extrémité des câbles des manchons en cuivre électrolytique, analogues à ceux représentés figure 455, que l'on appelle des *cosses*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le trou que porte la partie plane de ces cosses s'engage sur une tige filetée constituant la borne; un écrou et une rondelle assurent le contact parfait.

Support. — Dans les installations industrielles et dans les locaux où les fils peuvent être apparents, on les soutient à l'aide d'isolateurs de formes différentes (fig. 456) en porcelaine. Dans les appartements et les installations domestiques on les dispose au milieu ou à l'intérieur de tubes de fer-blanc isolés (tubes Bergmann) (fig. 456, F). Certaines règles sont à observer pour l'exécution des installations électriques en ce qui concerne la section à adopter pour les conducteurs en fonction de l'intensité qui doit y circuler, et la pose de la ligne elle-même. Nous donnons ci-dessous quelques indications empruntées au règlement établi par l'Union des syndicats de l'électricité :

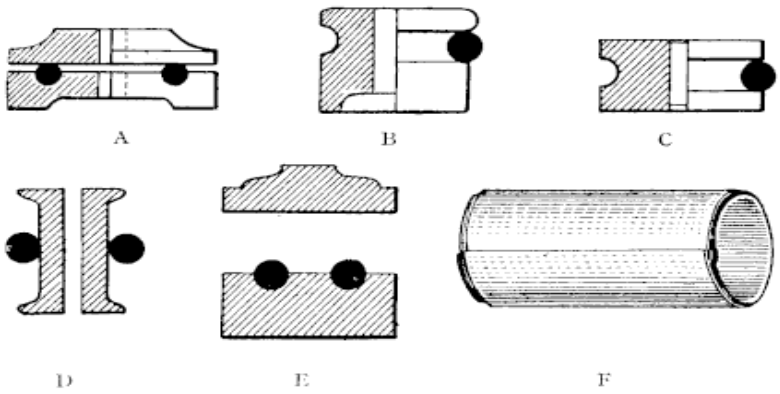


Fig. 456. — Isolateurs pour intérieur.

A, isolateur serre-fil ; B, forme haute ; C, forme basse ; D, isolateur en os pour fil souple ; E, moulure en sapin ; F, tube Bergmann en fer-blanc isolé.

Les conducteurs en cuivre isolés non placés en terre devront avoir des *sections* telles qu'en régime normal la densité du courant reste voisine des valeurs du tableau ci-après enseignées par la pratique :

Densité de courant admissible en amp. par mm².	*Section correspondante en mm².*
5	jusqu'à 5
4	de 6 jusqu'à 15
3	de 16 jusqu'à 50
2	de 51 jusqu'à 100
1,5	de 101 jusqu'à 200
1	au-dessus de 200

Les intensités de courant ci-dessus indiquées ne doivent être dépassées que pour des surcharges de très courte durée.

Dans le cas de *service intermittent*, les valeurs du tableau précédent peuvent être dépassées, à la condition de ne pas provoquer un échauffement supérieur à celui qui résulterait, en service normal, de l'application des valeurs indiquées à ce tableau.

Les densités approximatives indiquées plus haut sont recommandables pour les *conducteurs nus* jusqu'à 50 millimètres carrés de section environ ; pour les sections

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

supérieures, les densités de courant pourront être plus élevées, tout en restant dans les limites compatibles avec la sécurité.

Il est conseillé de déterminer les sections des conducteurs des installations d'éclairage par incandescence de façon que la *perte de charge* entre le compteur ou l'interrupteur général et la lampe la plus éloignée ne dépasse pas 3 p. 100 de la tension au compteur ou à l'interrupteur général, quand la totalité des lampes devant fonctionner simultanément se trouve alimentée.

Les *sections minima* des conducteurs en cuivre sont déterminées conformément aux recommandations suivantes :

a. Conducteurs isolés : 0,64 millimètre carré correspondant au fil de $0^{mm},9$ de diamètre, sauf exception pour les fils câblés d'équipement de lustrerie où l'on peut admettre 0,40 millimètre carré correspondant au fil de $0^{mm},7$ de diamètre.

b. Conducteurs nus à l'intérieur des bâtiments et conducteurs isolés aériens ou apparents à l'intérieur des bâtiments, lorsque l'écartement des points de fixation dépasse 1 mètre : 4 millimètres carrés.

c. Lignes aériennes extérieures à basse tension : 6 millimètres carrés.

Les sections des conducteurs *en métal autre que le cuivre* devront être calculées en tenant compte du rapport des résistivités du métal considéré et du cuivre.

Les câbles et conducteurs en cuivre jusqu'à 6 millimètres carrés de section et les fils souples jusqu'à 25 millimètres carrés de section devront être fixés sur les appareils au moyen de dispositifs assurant en permanence un parfait contact, et évitant notamment l'éparpillement des brins constituant le conducteur.

Au delà de ces dimensions, les extrémités des fils et câbles devront être munis de pièces terminales (cosses) appropriées.

Les canalisations constituées par des fils souples devront toujours être apparentes.

Il est recommandé d'observer entre conducteurs nus de polarités différentes un écartement minimum de 5 centimètres environ pour des portées de $2^{m},50$.

L'écartement de ces conducteurs par rapport aux murs voisins devra être de 5 centimètres environ, à moins qu'il ne soit pris des dispositions spéciales pour assurer l'isolation et éviter le contact des conducteurs,avec les parois voisines.

Les écartements indiqués ci-dessus pourront être sensiblement réduits dans le cas de conducteurs formés de barres en métal massif ou de fils de forte section présentant une rigidité suffisante ; tels sont, par exemple : les conducteurs reliant les accumulateurs, machines et tableaux ; ceux réunissant les éléments des batteries d'accumulateurs ou servant au couplage de conducteurs d'alimentation ou à la répartition et à la distribution sur les tableaux.

Les *conducteurs isolés* apparents posés sur poulies ou taquets en matière isolante installés à l'extérieur des bâtiments devont être écartés des murs et parois d'au moins 2 centimètres.

A l'intérieur des locaux, ils devront être écartés des parois d'au moins 1 centimètre.

Les conducteurs isolés, destinés à être noyés dans la maçonnerie, devront être protégés, sur toute la longueur de la partie noyée, par des *tubes étanches* non pénétrables ni attaquables par les enduits ou l'humidité.

Les *moulures*, s'il en est fait emploi, devront être en bois sec ou matière isolante ; l'intervalle entre les rainures sera d'au moins 5 millimètres pour permettre le clouage. La ligne de pose des pointes sera, autant que possible, indiquée sur le couvercle.

Les dimensions des rainures devront être telles que les fils ou câbles y soient parfaitement libres.

Les moulures servant de protection mécanique aux conducteurs devront être aussi jointives que possible dans les raccords et aux changements de direction.

Les moulures non imprégnées d'un enduit hydrofuge ne pourront être employées que dans les locaux secs, à moins de dispositifs de pose appropriés.

Dans les *locaux humides*, des cales en matière non hygroscopique devront être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

interposées entre les murs et les moulures, de façon à ménager un espace d'air d'au moins 5 millimètres.

Sur les *plâtres frais*, les moulures devront être enduites, avant la pose et au moins sur la face appliquée contre le mur, d'un produit hydrofuge.

Une même rainure ne devra recevoir qu'un seul conducteur.

Les conducteurs à la traversée des murs, cloisons et planchers devront être protégés en ces endroits par des tubes ou conduits d'une résistance mécanique suffisante les conducteurs devront être en outre pourvus d'un isolement supplémentaire.

Les fourreaux résistants devront faire saillie d'au moins 15 centimètres et les garnitures isolantes supplémentaires des conducteurs dépasser d'au moins 5 millimètres les fourreaux de protection.

* * *

Pour protéger l'installation lorsque l'intensité du courant qui y circule devient dangereuse, par exemple en cas de court-circuit, on emploie des fils **fusibles** placés en série sur la ligne, qui fondent lorsque le circuit atteint une certaine valeur.

Ces éléments fusibles sont soit en plomb pur, soit en cuivre, soit en alliage de plomb (67 p. 100) et étain (33 p. 100). Voici, d'après des expériences de M. Laporte, les intensités critiques amenant la fusion dans différents cas.

Fils de cuivre. — Fils très fins de haute conductibilité.

COURANT EN AMPÈTRES AMENANT LA FUSION.

Longueur du fil entre attaches en cm.	*Diamètre des fils en mm.*				
	0,09	0,13	0,18	0,245	0,307
1	4,4	7,91	10,2	»	»
2	3,45	5,7	8,0	12,0	»
3	3,2	5,3	7,7	10,8	15,3
4	3,0	5,0	7,1	10,2	14,0
6	2,9	4,7	6,6	9,75	12,4
10	2,9	4,7	6,4	9,2	»

Fils de plomb. — Résistivité : 20,7 microhms-centimètre à 15° C.

COURANT EN AMPÈRES AMENANT LA FUSION.

Longueur du fil entre attaches en cm.	*Diamètre des fils en mm.*						
	0,491	0,6	0,712	0,94	1,27	1,51	2
1	8,6	11,7	»	»	»	»	»
2	6,1	8,0	11,0	18,2	24 (?)	»	»
3	4,8	6,4	8,1	12,3	19,3	»	»
4	4,3	5,6	7,2	10,9	16,3	21,5	»
6	3,9	5,1	6,5	9,6	13,5	»	20,5
8	»	»	»	»	»	17,5	»
10	3,9	4,8	6,0	8,7	12,3	16,2	23,0

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fil alliage.

Plomb	67,9 p. 100
Étain	31,5 —
Cuivre	0,6 —

COURANT EN AMPÈRES AMENANT LA FUSION.

Longueur du fil entre attaches en cm.	*Diamètre des fils en mm.*								
	0,367	0,57	0,82	0,97	1,2	1,59	1,97	2,36	2,5
1	4,0	9,2	»	»	»	»	»	»	»
2	3,04	6,1	11,4	15,1	21,0	33,5	»	»	»
3	2,56	4,9	8,4	12,2	17,4	»	»	»	»
4	2,3	4,4	7,7	9,9	14,8	21,9	33,0	»	»
6	2,2	4,0	6,5	8,4	11,7	18,0	26,1	34	45,2
8	»	»	»	»	»	16,0	»	»	»
10	2,15	3,7	5,9	7,5	9,9	15,0	20,2	»	38,0

En pratique, pour les petites intensités, on se sert de fils cylindriques de 5 à 6 centimètres de longueur en alliage de plomb et on adoptera les diamètres suivants :

Pour 5 ampères	.....	diamètre 0mm,55
Pour 10 —	.....	— 0mm,9
Pour 15 —	.....	— 1mm,5
Pour 15 à 20 —	.....	— 2mm.
Pour 20 à 30 —	.....	— 2mm,5
Pour 30 à 40 —	.....	— 3mm.
Pour 40 à 50 —	.....	— 4mm.

Lorsque l'intensité devient plus considérable, on remplace les fils par des lamelles de composition et de forme variées suivant les constructeurs (fig. 457), portant un chiffre indiquant le courant normal pour lequel elles sont établies.

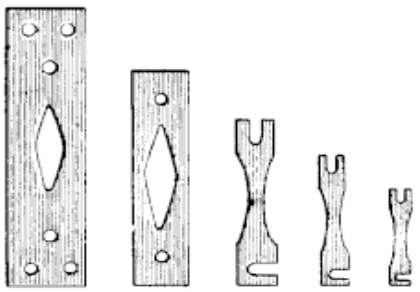


Fig. 457. — Lames de coupe-circuit pour fortes intensités.

Les ***coupe-circuits*** sur lesquels sont montés les fusibles sont extrêmement variés comme forme (fig. 458). Le fusible est enfermé dans des parois isolantes et incombustibles pour éviter que les projections de plomb fondu ne viennent blesser les ouvriers et incendier les matières combustibles qui peuvent se trouver dans leur voisinage.

Pour les fortes intensités, le fusible est logé à l'intérieur d'une cartouche qui empêche les projections (fig. 459).

La longueur de la partie fusible est calculée de façon à empêcher un arc de pouvoir s'amorcer entre les extrémités.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les installations industrielles, les coupe-circuits sont disposés sur les tableaux au voisinage des interrupteurs commandant les lignes qu'ils

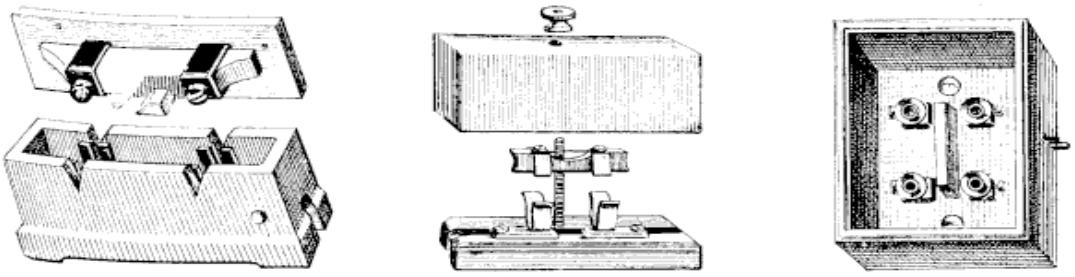


Fig. 458. — Diverses formes de coupe-circuits.
A, coupe-circuit unipolaire ; B, coupe-circuit à barrette mobile ; C, coupe-circuit sous coffret vitré plombable.

protègent et sont ainsi facilement accessibles. Au contraire, dans les installations domestiques, en général les coupe-circuits sont placés en des endroits où il est impossible ou très difficile de les surveiller et de les réparer lorsqu'un court-circuit s'est produit. Cette pratique est absolument inintelligente, et on devrait s'efforcer, dans toutes les installations, de grouper en un même endroit, facilement accessible, tous les coupe-circuits ou, si cela n'est pas possible, de disposer chaque coupe-circuit au voisinage immédiat du commutateur du branchement secondaire qu'il protège.

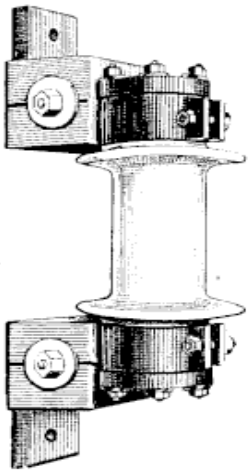


Fig. 459. — Coupe-circuit protégé pour forte intensité.

* * *

Les ***interrupteurs*** sont extrêmement variés, et plus l'intensité du courant qu'ils doivent couper est grande, plus leur construction doit être étudiée en détail, afin d'empêcher la formation des arcs à la rupture, entraînant la désagrégation des pièces de contact et pouvant provoquer des détériorations importantes des appareils électriques.

Pour les installations ordinaires, les interrupteurs unipolaires de divers types (fig. 460) conviennent parfaitement. Lorsque l'intensité n'est que de quelques ampères, les interrupteurs rotatifs à lames ou à balais sont couramment employés et leur prix est minime. Les interrupteurs à bascule type tumbler, qui assurent une rupture brusque du circuit, sont cependant préférables, car ils fonctionnent avec beaucoup plus de sûreté et leur durée est supérieure à celle des interrupteurs ordinaires.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque les intensités à couper dépassent 10 ampères, on fait usage des interrupteurs à manette, dont la figure 461 donne divers types. Ces interrupteurs à un, deux, trois, quatre pôles sont du type à couteau, c'est-à-dire qu'une barre métallique, le couteau, solidaire de la poignée de manœuvre

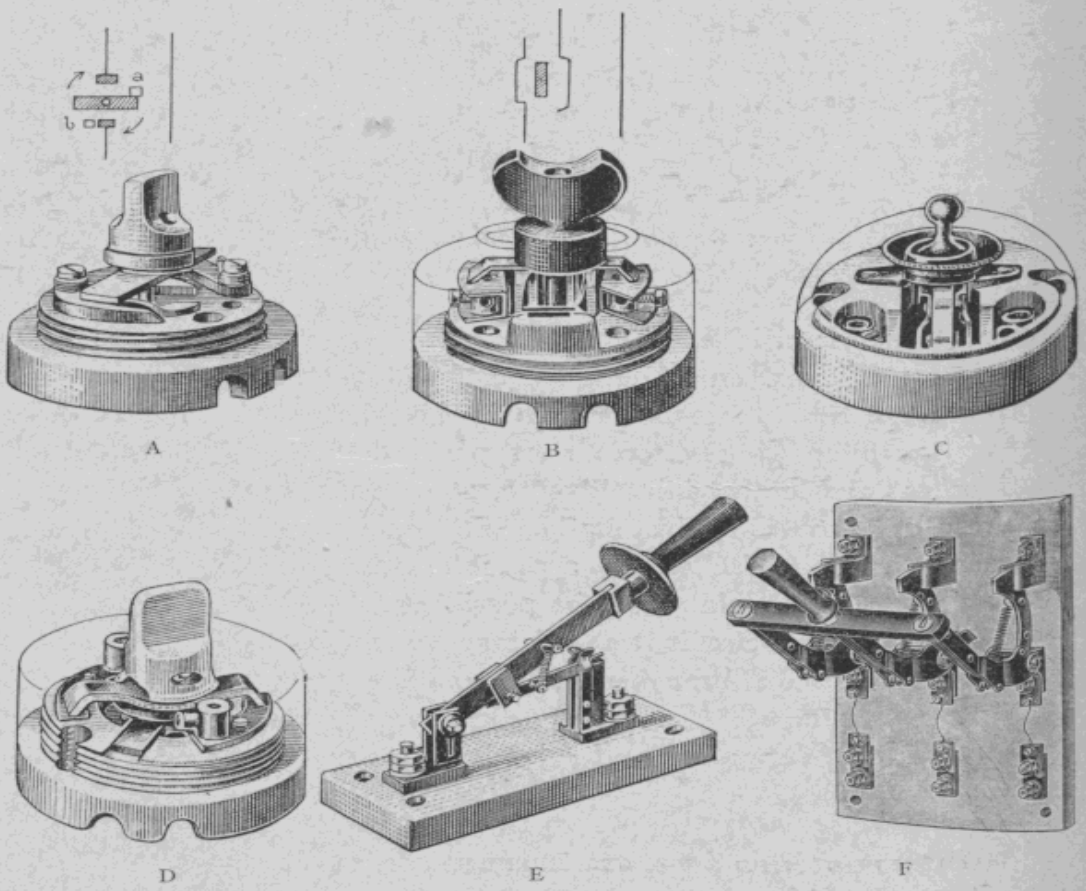


Fig. 460. — Divers modèles d'interrupteurs.

A, interrupteur unipolaire à rotation dans un sens (*a*, *b*, butées) ; B, interrupteur unipolaire à rotation dans les deux sens ; C, interrupteur rumbler à bascule ; D, interrupteur à balais double contact non rotatif ; E, interrupteur unipolaire 10 ampères à rupture brusque ; F, interrupteur tripolaire à rupture brusque.

et pivotant autour d'un axe relié à une des bornes du courant, vient s'engager entre deux lames de ressort reliées à l'autre borne.

Afin d'éviter la formation d'un arc entre les pièces polaires et le couteau, celui-ci est souvent constitué comme l'indique la figure 460, F. La poignée de l'interrupteur, lorsqu'on la manœuvre, bande des ressorts qui, à un certain moment, arrachent les couteaux de leur logement.

Au fur et à mesure que l'ampérage à couper augmente, atteignant dans un grand nombre d'installations plusieurs milliers d'ampères, on augmente le nombre des lames du couteau (fig. 462) et on les munit de pare-étin-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

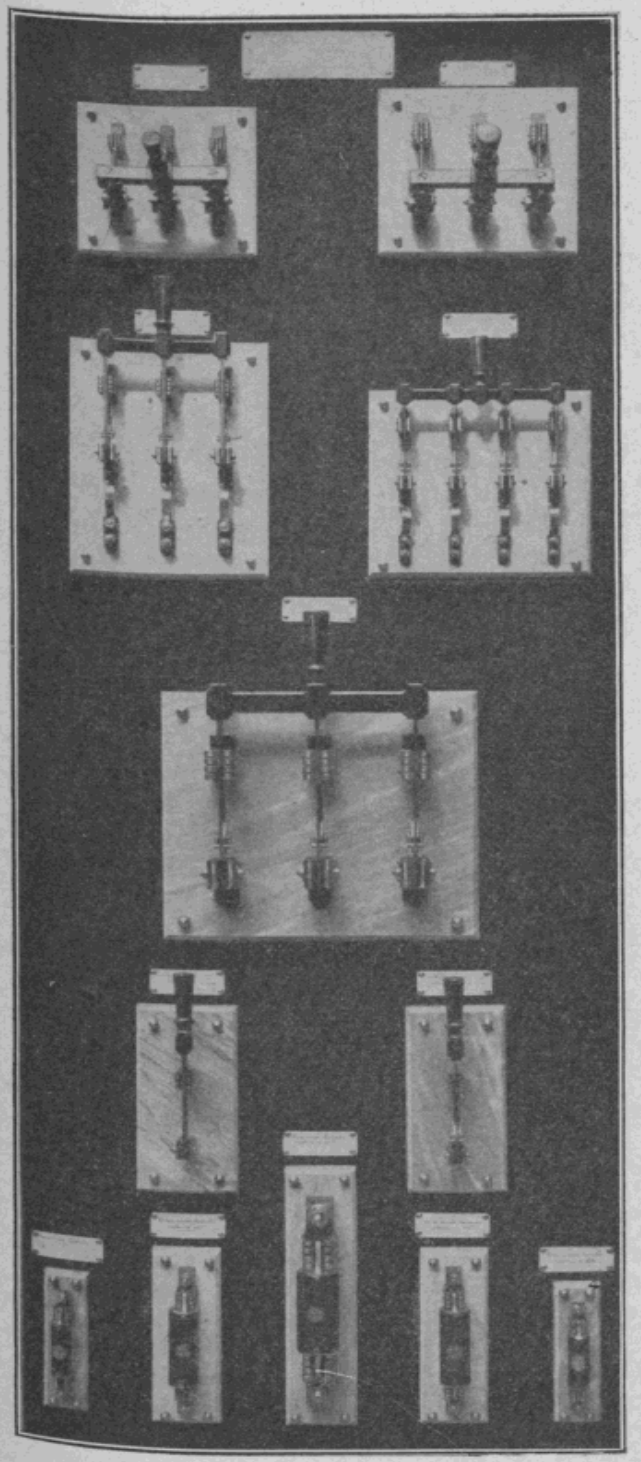


Fig. 461. — Interrupteurs à manettes.

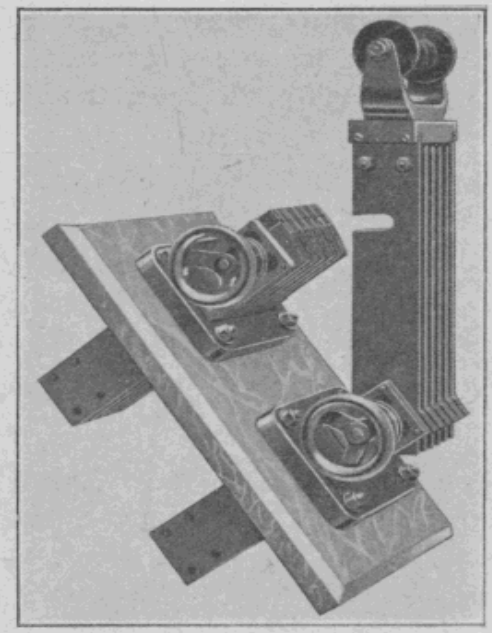


Fig. 462. — Interrupteur 4 000 ampères, 250 volts.

celles vibrants (cuivre et charbon), comme dans le modèle représenté par la figure 463, qui coupe 9 000 ampères sous 600 volts.

Pour des voltages plus élevés, mais que l'on ne peut assimiler aux hautes tensions des lignes de transmission, par exemple 1 000 à 2 000 volts, on a recours aux interrupteurs dans l'huile, analogues aux interrupteurs haute tension que nous avons décrits précédemment, mais dans lesquels il n'est plus nécessaire d'avoir une course des pièces polaires aussi considérable, ce qui diminue également la capacité de la cuve d'huile et l'encombrement total de l'appareil.

La figure 464 montre la vue d'ensemble d'un interrupteur triphasé de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3 200 ampères sous 1200 volts, pesant à vide 380 kilogrammes environ. La figure 465 représente l'appareil sorti de la cuve à huile et la figure 466 indique le fonctionnement des pièces polaires. On remarquera sur les côtés les deux larges pare-étincelles placés sur le côté de l'interrupteur principal en lames de cuivre. Ces pare-étincelles s'arrachent brusquement, après que l'interrupteur principal a rompu le contact. Ajoutons que tous ces appareils peuvent être commandés à distance à l'aide de leviers de renvoi appropriés.

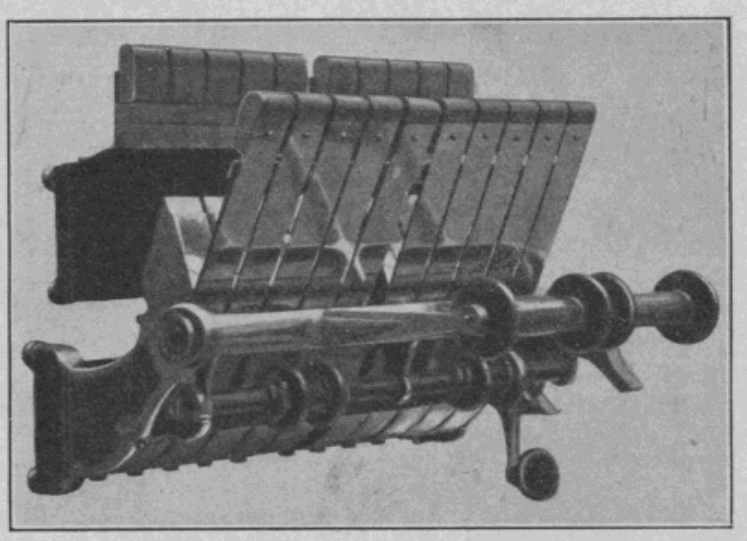


Fig. 463. — Interrupteur unipolaire 9 000 ampères sous 600 volts.

* * *

Les ***disjoncteurs*** sont des interrupteurs qui fonctionnent automatiquement suivant que la valeur du courant devient supérieure (disjoncteurs à maxima) ou inférieure (disjoncteurs à minima) à la valeur normale du fonctionnement.

Ils comprennent donc un dispositif constitué en principe par un électro-aimant attirant une pièce polaire solidaire des leviers de manœuvre de l'interrupteur, dont la figure 467 montre le principe de fonctionnement. Dans le *disjoncteur à maxima*, un électro-aimant E en dérivation sur la ligne attire, lorsque l'intensité débitée dépasse une certaine valeur, une pièce polaire M en fer doux, mobile autour d'un axe O, qui, par l'intermédiaire de la tige T, ouvre l'interrupteur I.

Dans le *disjoncteur à minima*, le courant total traverse l'électro-aimant E et l'attraction de la pièce polaire M, mobile autour de O, provoque la fermeture de l'interrupteur I. Quand la valeur du courant tombe au-dessous d'une certaine intensité, la pièce M n'est plus attirée avec suffisamment de force, elle retombe et rompt le contact de l'interrupteur I.

Au point de vue pratique, la question est plus compliquée, car on ne pourrait accepter, dans une installation, un disjoncteur trop sensible qui fonctionnerait pour une variation passagère de l'intensité. On est alors

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conduit, comme dans les appareils à haute tension, à adjoindre des dispositifs retardateurs qui, tout en permettant au disjoncteur de fonctionner instantanément lors d'un court-circuit, bloquent sa manœuvre pendant un temps plus ou moins long dépendant de la valeur de la surcharge.

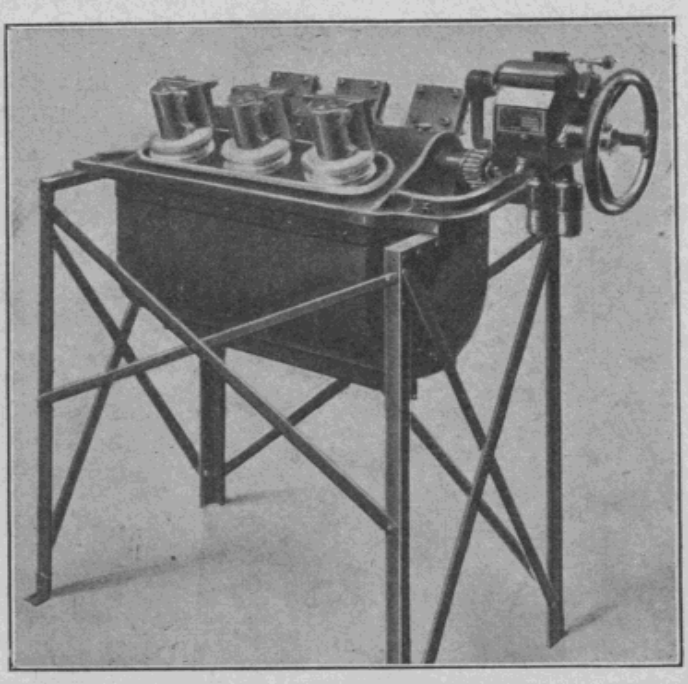


Fig. 464. — Vue d'ensemble d'un interrupteur dans l'huile triphasé 3 200 ampères sous 1 200 volts.

A titre d'exemple, nous décrirons la *cataracte à mercure* de la Compagnie générale électrique de Nancy, permettant la temporisation des déclenchements dans des limites très grandes (une à vingt secondes).

L'appareil se compose (fig. 468) d'un récipient A, d'une coupelle C et d'un support B. Le récipient A contient du mercure et la coupelle C plonge

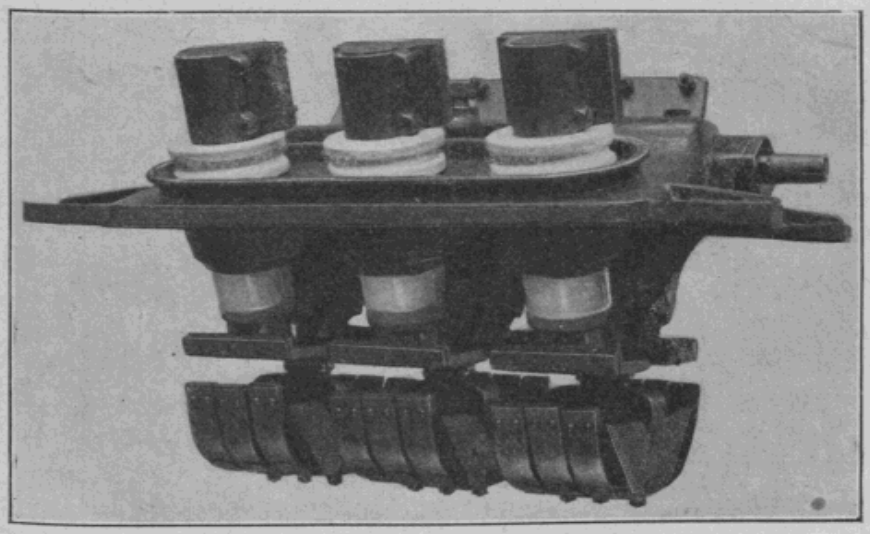


Fig. 465. — L'interrupteur hors de sa cuve à huile.

plus ou moins dans le mercure suivant que l'on monte ou que l'on des-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cend le récipient ; la coupelle est percée, à la partie inférieure, d'un petit

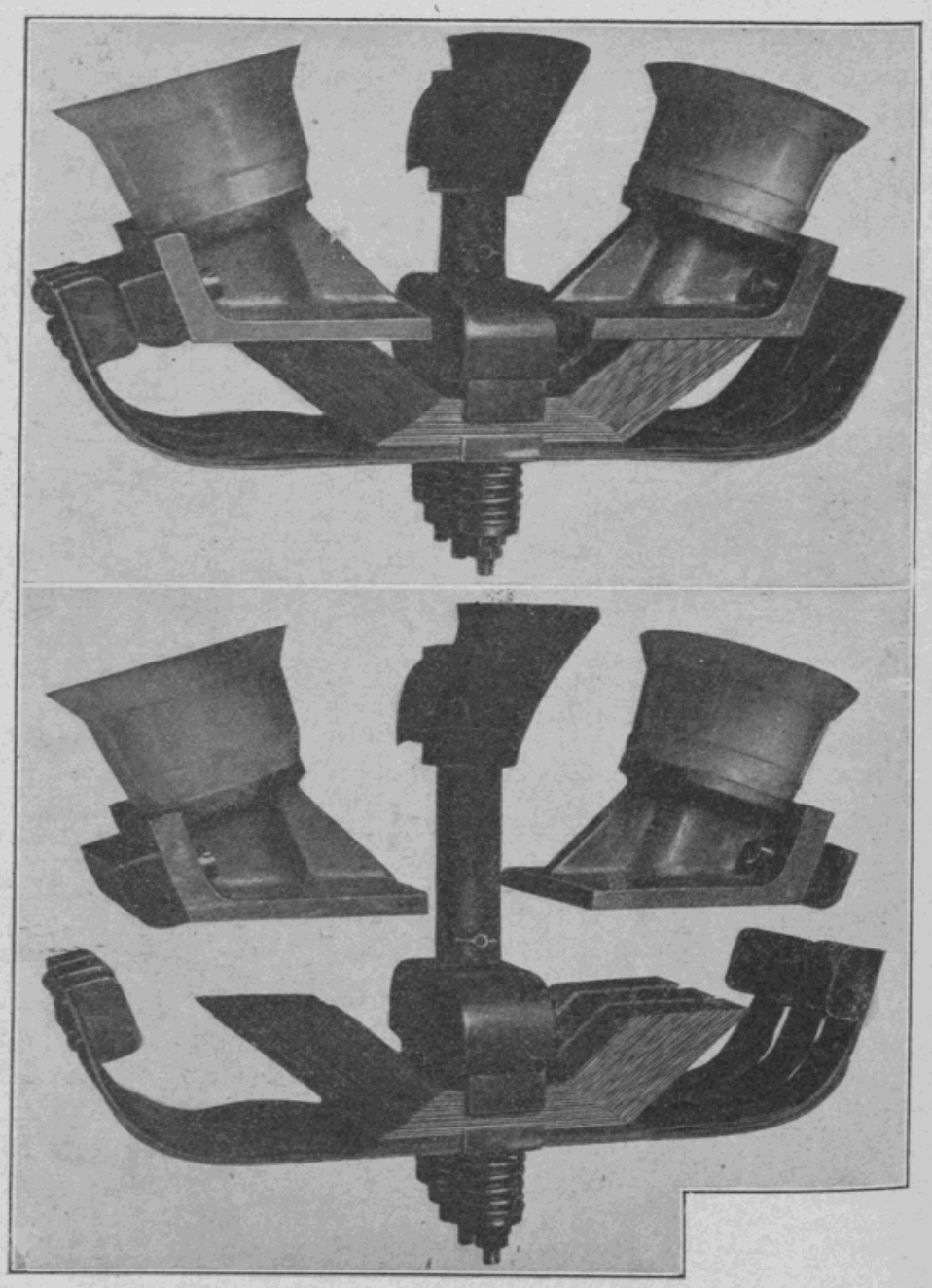
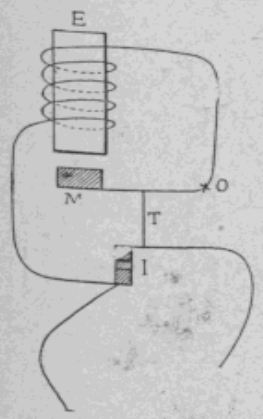


Fig. 466. — Fonctionnement des interrupteurs pour forte intensité. En haut, le circuit est fermé. En bas, le circuit est ouvert.

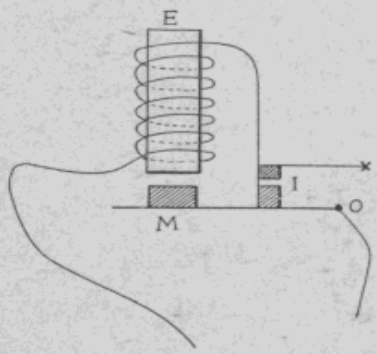
trou, et de plusieurs gros trous à la partie supérieure ; elle est reliée, par une tige d'acier au nickel, au noyau d'un solénoïde.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La force attractive de la bobine tend à soulever le tout, mais le poids du mercure et de tout l'ensemble s'y oppose ; si l'intensité est assez élevée,



Disjoncteur à maxima.



Disjoncteur à minima.

Fig. 467. — Principe des disjoncteurs.

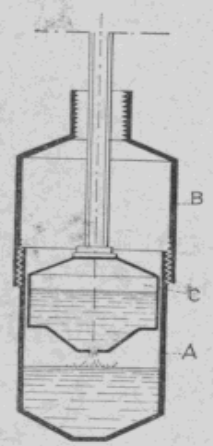


Fig. 468. — Schéma d'une cataracte à mercure.

l'attraction devient alors suffisante pour soulever le noyau de toute la course, et le déclenchement a lieu ; si l'intensité est plus faible et insuffisante pour que l'ensemble soit attiré, il y a tout de même attraction ; la coupelle est soulagée ; le mercure placé à l'intérieur est un peu plus haut que celui venu de l'extérieur, ce qui l'oblige à s'écouler par l'orifice inférieur. La coupelle s'allège petit à petit et, quand la quantité de mercure restant à l'intérieur n'est plus suffisante pour équilibrer l'action attractive du solénoïde, le noyau part brusquement comme précédemment. On obtient ainsi des coupures précises de l'intensité par rapport au temps, qui dépendent du niveau normal du mercure et de

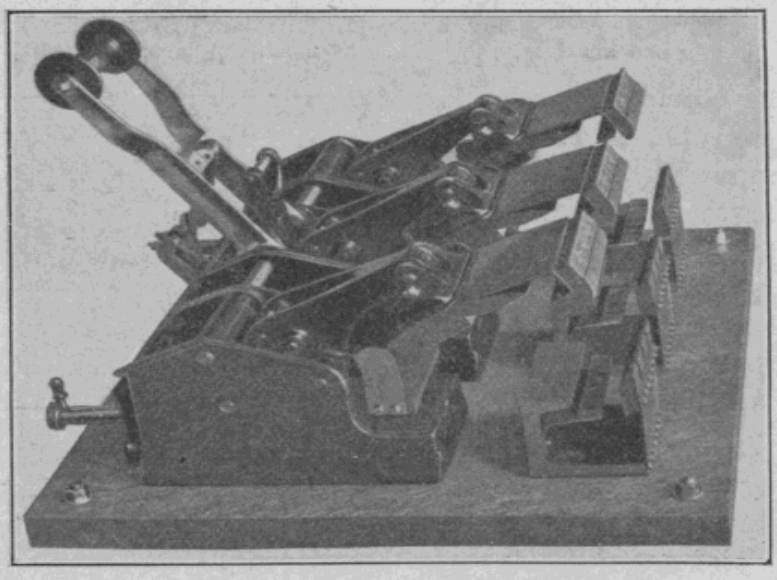


Fig. 469. — Disjoncteur dans l'air, basse tension, 600 volts, 750 ampères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

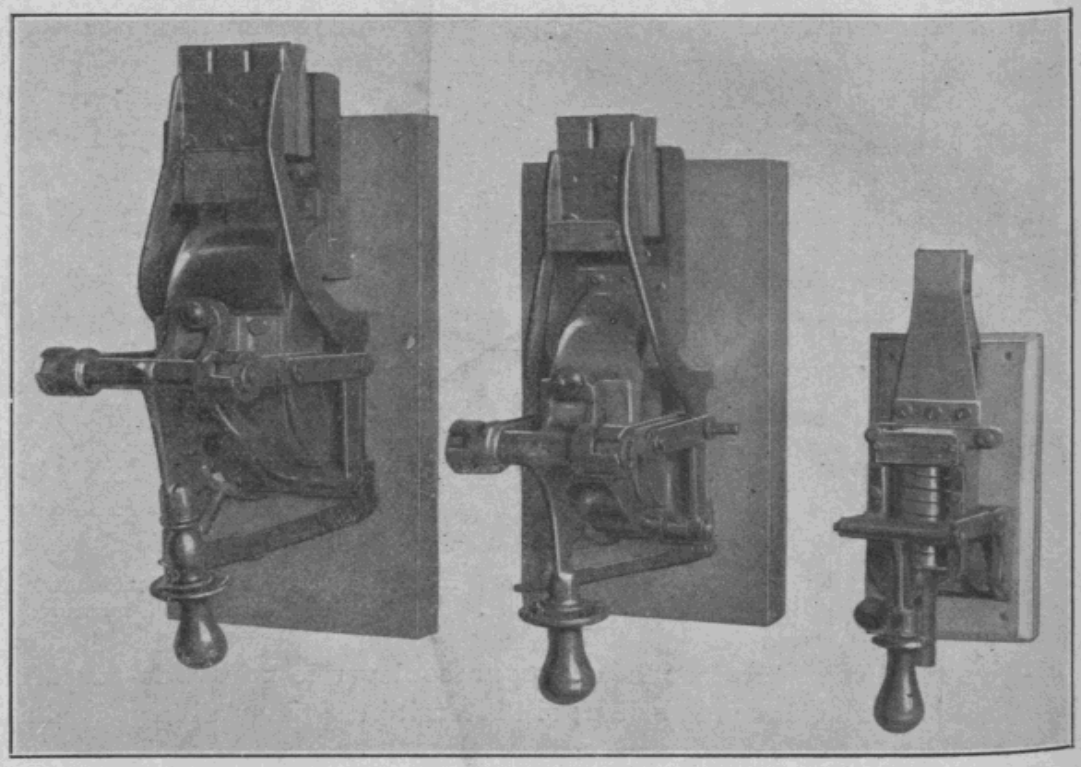


Fig. 470. — Disjoncteurs de diverses puissances.
4 000 ampères, 750 volts. 2 000 ampères, 750 volts, 700 ampères, 750 volts.

la dimension des trous. Le niveau du mercure agit sur l'intensité normale ; le diamètre du trou agit seulement sur le temps.

Inversement, il faut que le courant puisse être coupé en un temps extrêmement court, de l'ordre du millième de seconde, s'il se produit un court-circuit sur la ligne. C'est particulièrement le cas lorsque l'alimentation a lieu en cou-

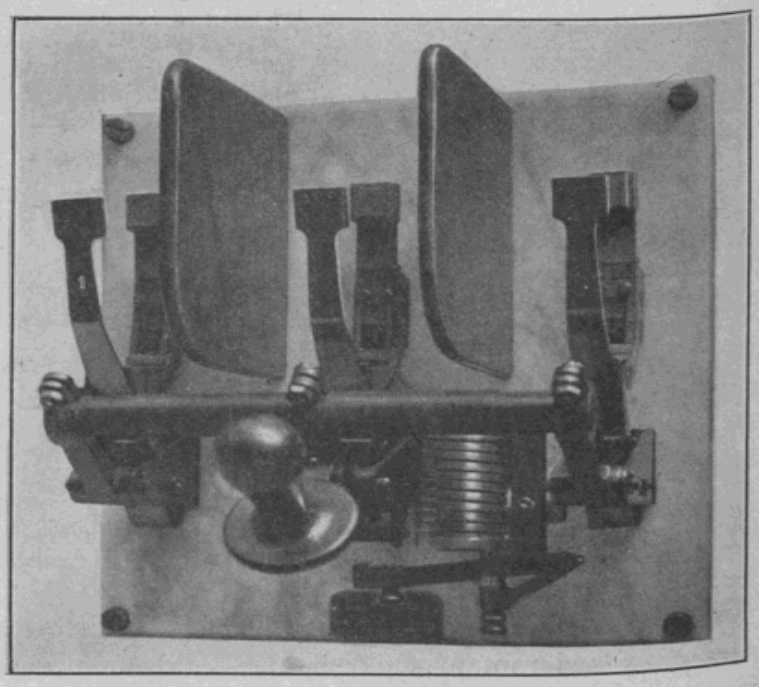


Fig. 471. — Disjoncteur tripolaire, avec une bobine à maxima.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant continu, par des commutatrices. Il peut se produire au collecteur de ces machines des amorçages d'arc ou « flash » entre les lignes de balais consécutives, qui persistent si la rupture n'a pas lieu en temps voulu. Il résulte du mode même de formation des flash que, pour être efficace, le disjoncteur extra-rapide doit couper le courant dans un temps notablement inférieur au temps que met une lame de collecteur à passer d'une ligne de balais à l'autre, c'est-à-dire en moins d'un demi-cycle (soit en moins de 0,01 seconde dans le cas d'une commutatrice à 50 périodes).

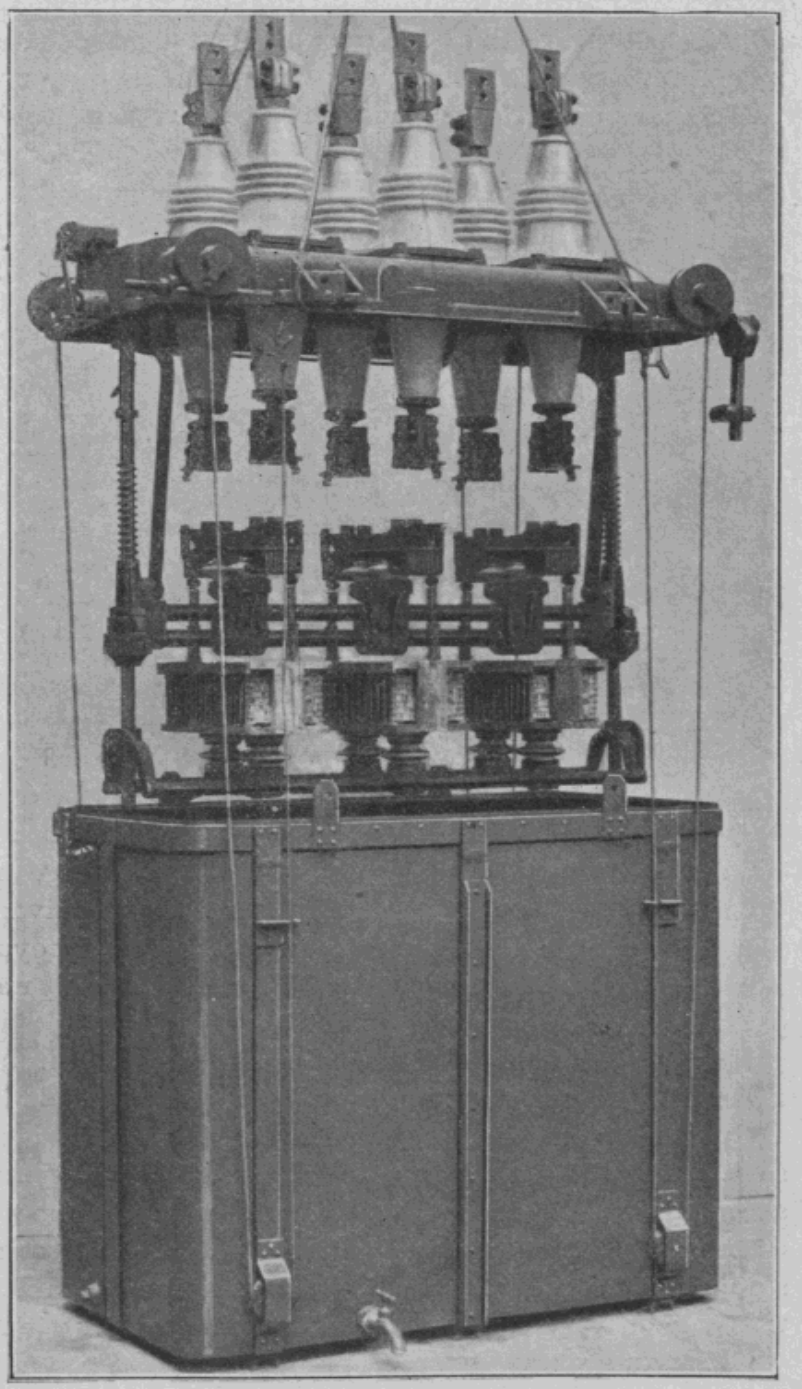


Fig. 472. — Type de disjoncteur tripolaire 1 000 ampères, ouvert.

En pratique, on admet qu'avec un interrupteur coupant en 0,006 seconde, les machines les plus sensibles (à 60 périodes) peuvent être court-circuitées sans flash, dans les conditions les plus défa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vorables. C'est donc entre les limites de 0,003 seconde et 0,006 seconde que devra se produire la rupture du courant pour que l'action soit efficace au point de vue de la suppression du flash.

De nombreux dispositifs ont été proposés pour arriver à satisfaire à ces délicates conditions. Nous signalerons seulement l'un des plus récents, le disjoncteur ultra-rapide de la Société alsacienne de constructions mécaniques (fig. 474). Une pièce métallique A, mobile autour d'un axe O, entraîne l'interrupteur proprement dit (non représenté sur la figure). Cette pièce est maintenue dans la position indiquée par la figure, qui correspond à la marche normale, par un collage magnétique qui équilibre l'action d'un ressort puissant (150 kilogrammes) tendant à la faire pivoter autour de l'axe. Le principe du collage magnétique est le suivant : une bobine à fil fin S_1, en dérivation sur le circuit, aimante le noyau métallique N sur lequel se trouve également enroulée une bobine S_2 en gros fil parcourue par une partie du courant principal.

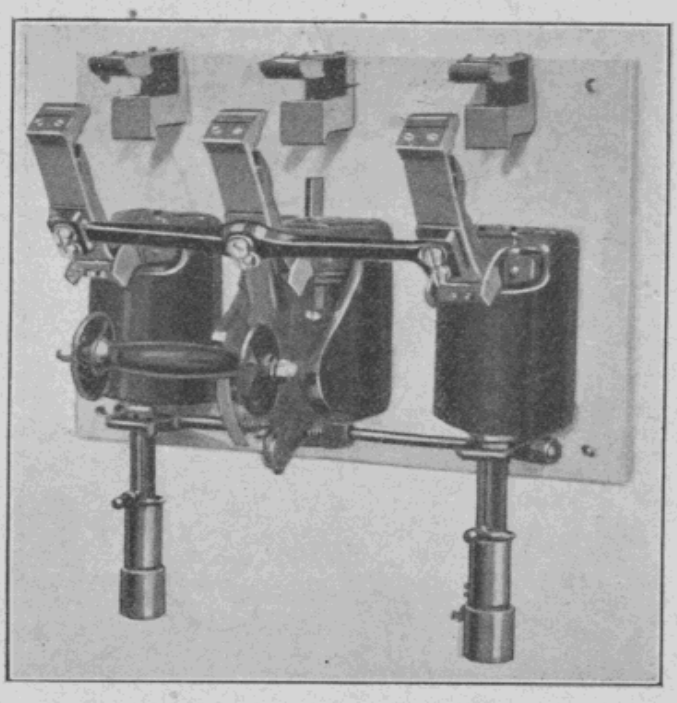


Fig. 473. — Disjoncteur tripolaire à deux maxima d'intensité et retardateurs.

Les flux des deux bobines s'ajoutent dans le circuit extérieur BCDE, mais sont en sens contraire dans le circuit GAH de la pièce A.

Quand l'intensité augmente dans le circuit principal, les deux flux s'accumulent dans la pièce A qui obéit alors à l'action du ressort. De plus, si l'augmentation du courant dans la bobine S_2 est très rapide, il se produit par induction mutuelle dans la bobine S_1 un courant instantané qui s'oppose à l'augmentation du flux dans la portion BC du circuit magnétique, d'où une plus grande rapidité de l'action démagnétisante en GH

Grâce au montage adopté pour la bobine S_2, son action antagoniste sur la bobine S_1 ne devient suffisante que si l'augmentation de l'intensité du courant est très rapide ; autrement dit, pour des surcharges en service normal augmentant relativement lentement, le disjoncteur ne déclenche pas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La vitesse de déclenchement sera donc d'autant plus rapide que l'établissement du court-circuit est lui-même plus brusque. Une bobine de soufflage extrêmement puissante éteint immédiatement l'arc qui tend à se former. On arrive, grâce à ces dispositifs, à obtenir des ruptures en moins de 0,005 seconde, même en cas de court-circuit franc.

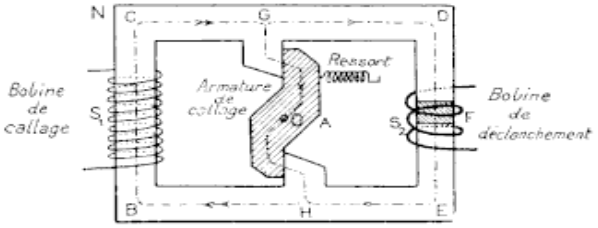


Fig. 474. — Schéma de principe du système de commande électromagnétique du disjoncteur extra-rapide de la Société alsacienne de constructions mécaniques.

Les disjoncteurs peuvent être établis soit avec contacts métalliques, soit avec contacts entre charbons, ces derniers convenant particulièrement lorsque le courant à couper est du courant continu (fig. 469, 470, 471, 472, 473).

* * *

Les ***rhéostats*** peuvent être considérés comme des appareils de manœuvre. Ils sont constitués par des résistances en maillechort ou en ferro-nickel. Les intensités maxima par millimètre carré de section que l'on admet pour les résistances restant constamment en circuit sont de 6 ampères pour le maillechort et 4 ampères pour le ferro-nickel.

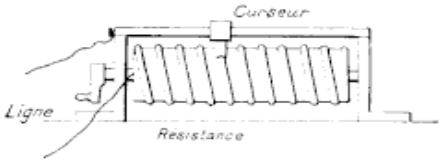


Fig. 475. — Rhéostat à variation continue.

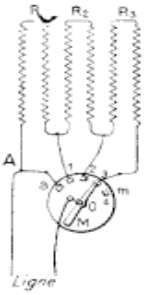


Fig. 476. — Rhéostat industriel.

Les rhéostats sont construits soit à plots, soit à curseurs, et doivent être toujours largement aérés pour éviter un échauffement trop intense. Les figures 475 et 476 donne le principe des deux montages et les figures 477 à 480 la vue de quelques types de rhéostats industriels.

* * *

Toute installation de quelque importance, en particulier lorsqu'un tableau existe sur lequel sont groupés les divers organes de manœuvre, comporte des ***voltmètres*** et ***ampèremètres*** à lecture directe ou enregistreurs, destinés à renseigner à tout moment sur la marche générale de l'ensemble. Aussi la description de ces appareils rentre-t-elle dans le cadre de ce chapitre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut les diviser en plusieurs classes, dont nous allons indiquer rapidement les caractéristiques.

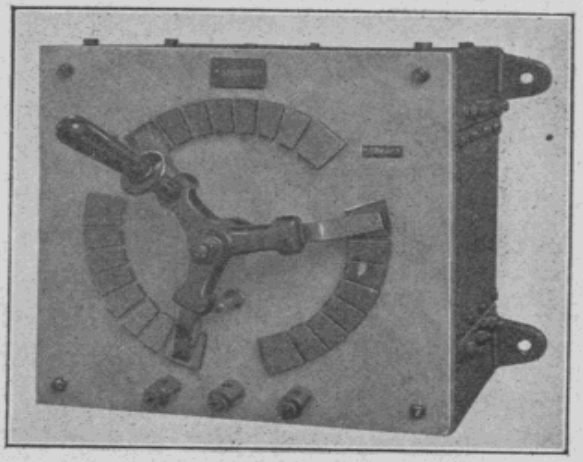


Fig. 477. — Rhéostat de démarrage sans déclenchement.

1° ***Appareils à cadre mobile.*** — Les voltmètres et ampèremètres de ce type dérivent du galvanomètre Desprez-d'Arsonval, dont ils ne diffèrent que par des détails de construction : la forme des aimants dont on réduit l'encombrement ; la suspension du cadre qui est monté sur pivot au lieu d'être attaché à un fil de suspension ; l'amortissement qui est réalisé en enroulant le fil du cadre sur une baguette de cuivre ou d'aluminium ; les courants de Foucault qui se produisent dans cette masse métallique sont suffisants pour que l'aiguille s'arrête sans oscillation. La figure 481, A représente la partie mobile d'un ampèremètre de ce type qui ne convient que pour les courants continus.

2° ***Appareils électrodynamiques.*** — Dans ces appareils, le couple actif résulte de l'action d'une bobine fixe sur une bobine mobile traversée par un courant. Le couple antagoniste est produit par la tension d'un ressort (schéma, fig. 481, B). Ces appareils peuvent servir pour les courants alternatifs et les courants continus

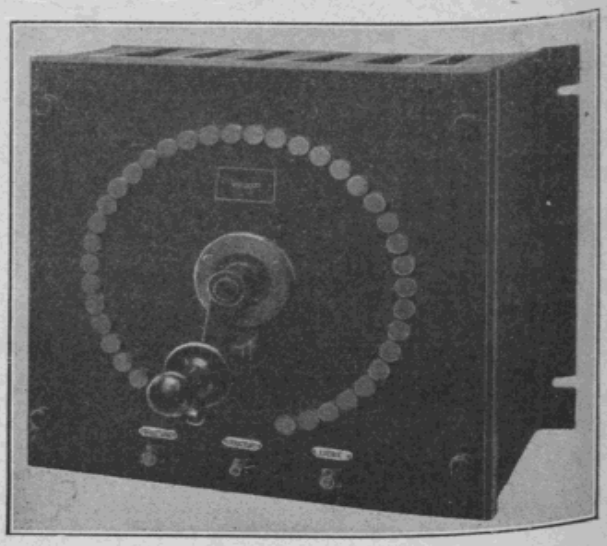


Fig. 478. — Rhéostat d'excitation 40/2 000 à trois bornes. Vue avant.

3° ***Appareils thermiques.*** — Leur principe est le suivant : un fil métallique s'échauffe sous l'action du courant qui le traverse, et s'allonge ; un système mécanique transmet en l'amplifiant le déplacement à l'aiguille du quadrant. Ces appareils fonctionnent pour toutes les natures de courants.

La figure 481, C représente un dispositif très employé. Le fil de platine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

AB est parcouru par une fraction du courant et s'allonge. En son milieu M est attaché un fil appelé fil de pont COM, auquel est fixé en O un fil de soie fortement tendu par le ressort à lame R et qui s'enroule sur une poulie P solidaire de l'aiguille indicatrice. Un aimant permanent devant lequel se déplace un disque d'aluminium monté sur le même axe que l'aiguille et non représenté sur la figure sert à l'amortissement des oscillations de l'aiguille.

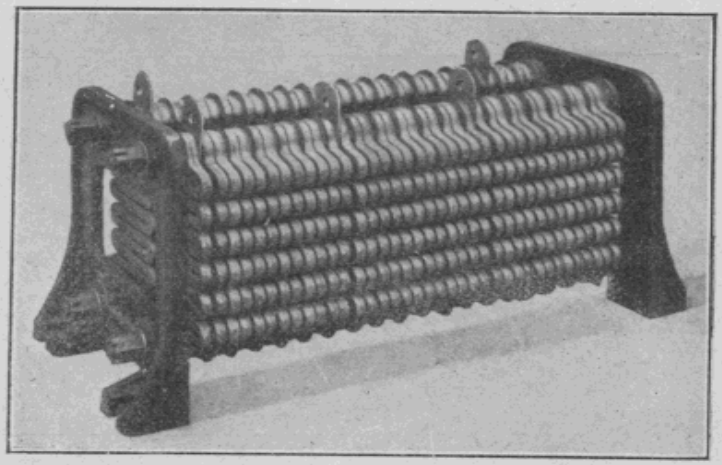


Fig. 479. — Résistance industrielle.

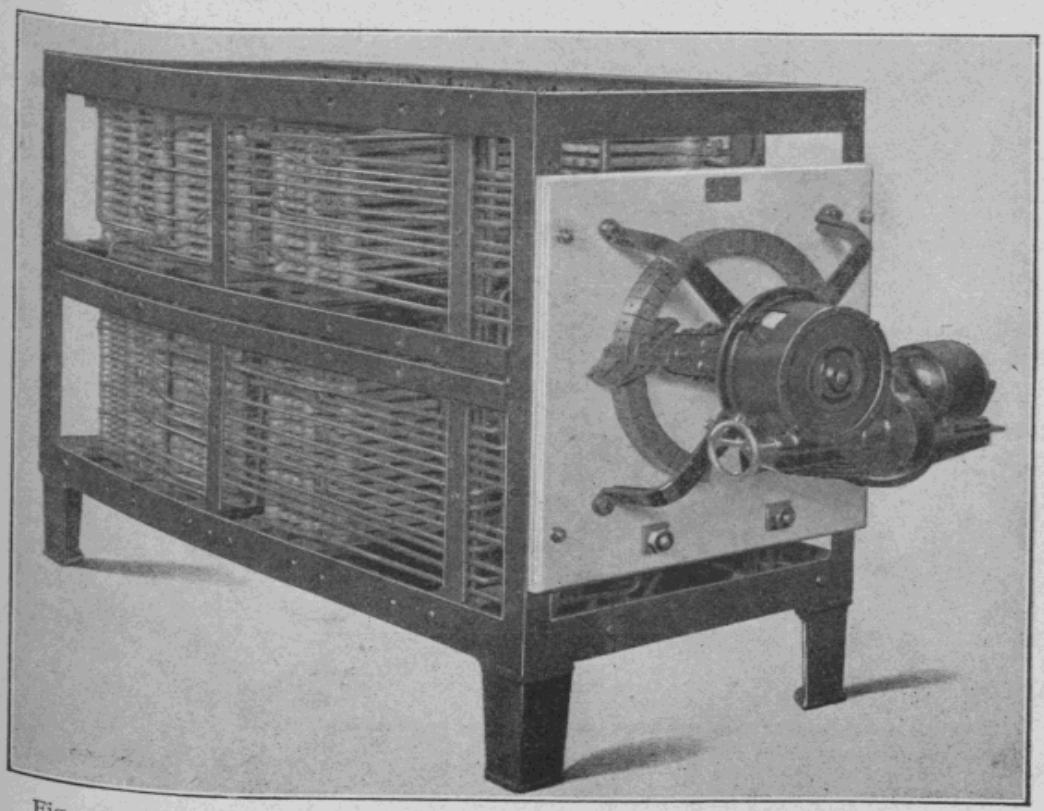


Fig. 480. — Rhéostat d'excitation 43 plots, 550 ampères, à commande électrique.

4° ***Appareils à fer doux.*** — L'action d'une bobine fixe parcourue par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le courant aimante deux barreaux de fer doux, A et B, parallèles à l'axe de la bobine (fig. 481, D), créant ainsi deux pôles nord à une extrémité et

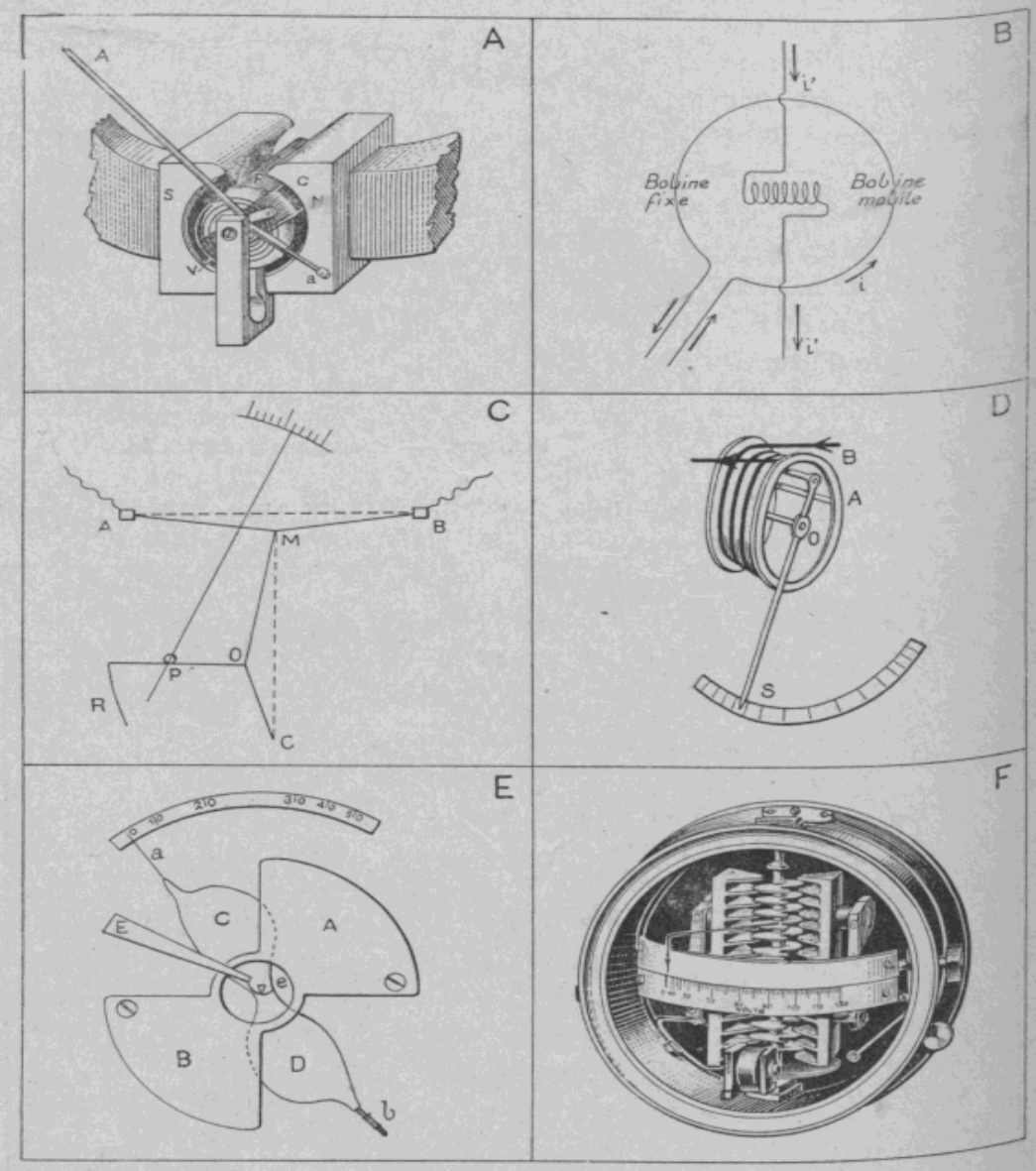


Fig. 481. — Principes des appareils de mesure.

A, ampèremètre à cadre mobile (NS, aimant permanent ; F, cylindre de fer doux ; C, cadre mobile ; V, ressort spiral d'amenée du courant (un second, en arrière de l'appareil, sert à la sortie) ; Aa, aiguille et son contrepoids). B, appareils électrodynamiques ; C, ampèremètre thermique ; D, ampèremètre à fer doux ; E, F, voltmètres électrostatiques.

deux pôles sud à l'autre. Quel que soit le sens du courant, il y a donc répulsion entre les deux barreaux. Comme l'un d'eux, A, est fixe et l'autre, B,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobile autour d'un axe O et solidaire de l'aiguille de la graduation, il en résultera un déplacement jusqu'à ce qu'un ressort antagoniste fixe l'aiguille dans une position stable. Les appareils peuvent fonctionner sur courants alternatifs ou continus.

5° ***Appareils à induction***. — Le couple actif provient de l'action d'un ou de deux champs alternatifs ou d'un champ tournant sur les courants induits par eux dans l'équipage mobile constitué par un disque ou un cylindre d'aluminium ou de cuivre. Des ressorts antagonistes s'opposent au couple de rotation et l'aiguille s'arrête quand les deux couples auxquels elle est soumise s'équilibrent. Ces appareils ne peuvent évidemment fonctionner que sur courant alternatif.

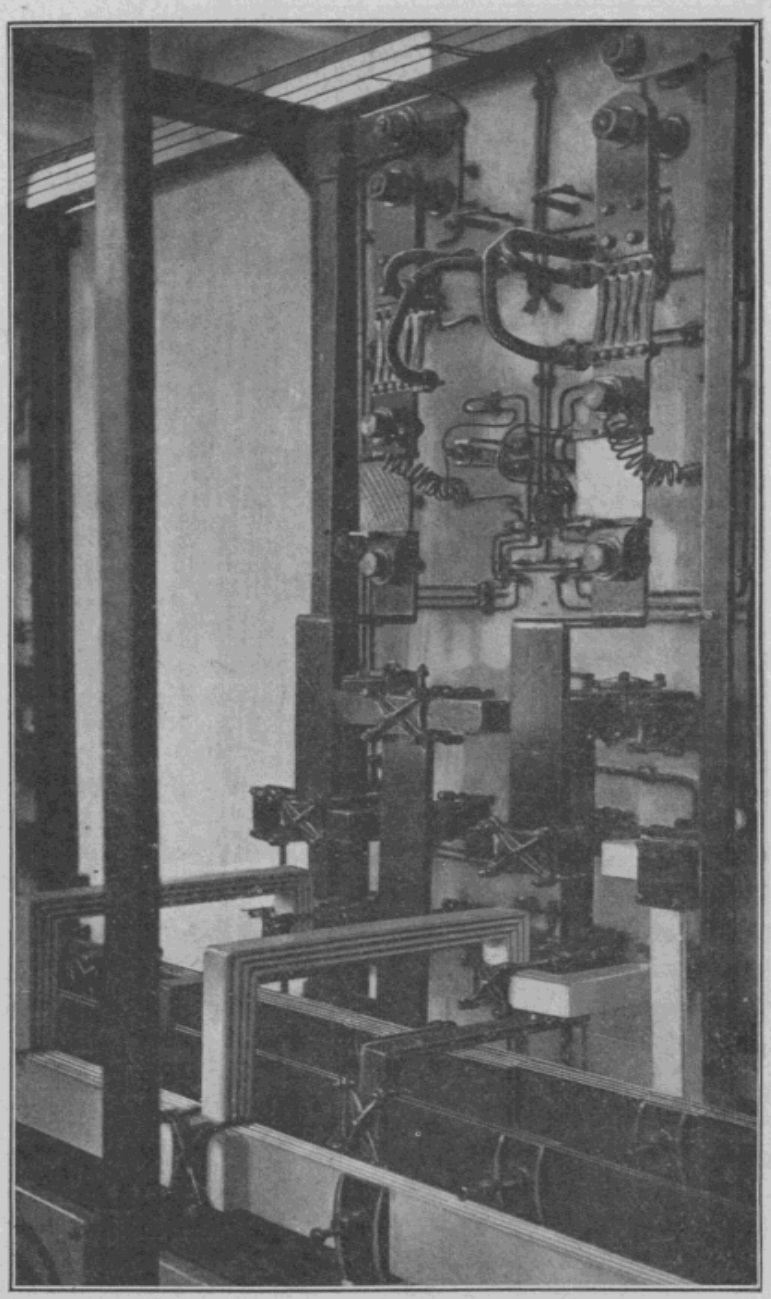


Fig. 482. — Vue arrière d'un tableau (sous-station Vaugirard).

6° ***Appareils électrostatiques***. — Destinés particulièrement aux mesures de tension, ils sont une modification de l'électromètre de lord Kelvin. La figure 481, E montre le principe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de ces appareils. AB est un conducteur fixe et CD un conducteur mobile sur une arête *e* ; l'ensemble est disposé verticalement. Quand une différence de potentiel est établie entre deux conducteurs, C tend à se rapprocher de A, et D de B. L'aiguille *a* se déplace. Des contrepoids *b* et E s'opposent au mouvement, et l'aiguille se fixe dans une position d'équilibre fonction de la différence de potentiel établie. Dans les appareils industriels, l'équipage mobile est constitué par plusieurs lames CD montées sur un axe vertical et tournant entre des conducteurs AB. Le système de conducteurs mobiles et l'ensemble des conducteurs fixes se charge au potentiel à mesurer et des ressorts antagonistes équilibrent l'action du couple directeur. La figure 481, F représente un de ces appareils qui, moyennant l'adjonction de condensateurs additionnels, peuvent fonctionner jusqu'à 250 000 volts.

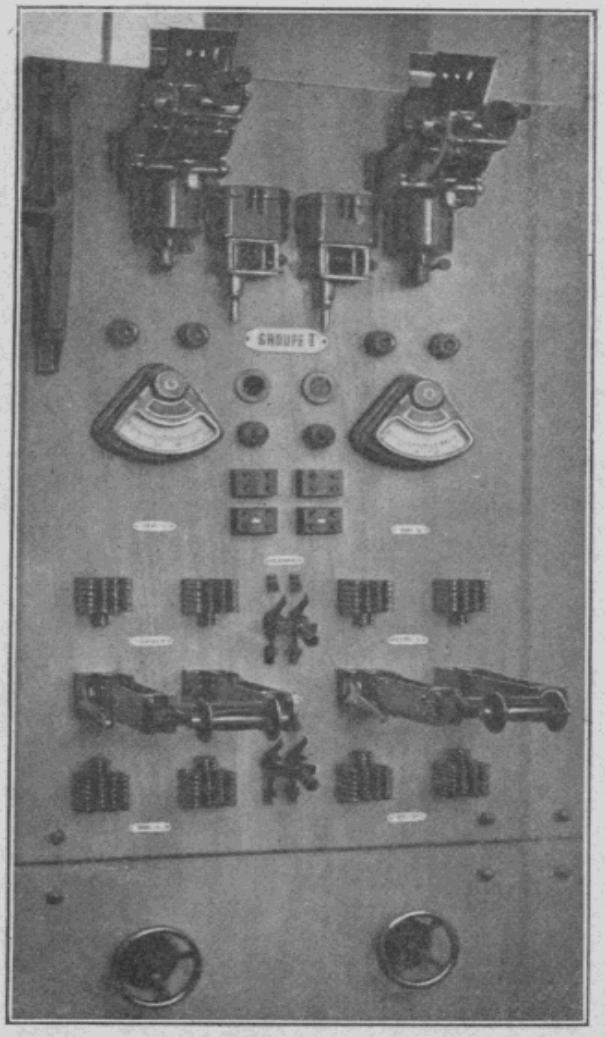


Fig. 483. — Vue avant d'un tableau de manœuvre (sous-station Vaugirard).

* * *

Dans tout ce qui précède, nous n'avons pas fait de dis-

Fig. 484. — Divers montages de lampes.

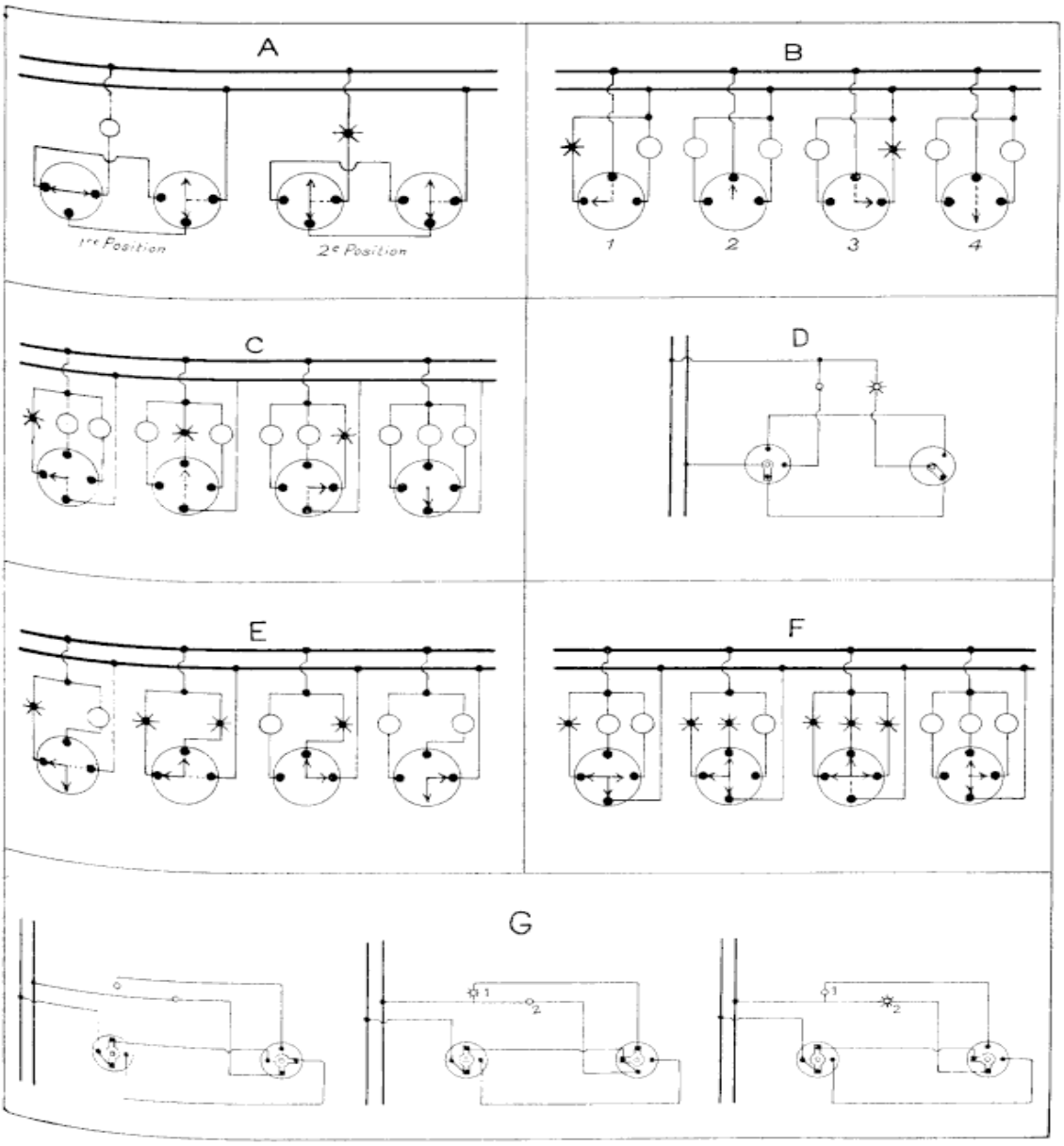
A. *Commutateur à deux directions sans plot mort.* Sert à allumer une lampe de deux points différents par deux commutateurs.

B. *Commutateur à deux directions avec plot mort.* S'emploie pour allumer et éteindre alternativement deux lampes.

C. *Commutateur à trois directions et plot mort.* Sert pour allumer et éteindre alternativement trois lampes (les quatre positions sont représentées).

D. *Commutateur à trois directions sans plot mort.* Sert dans les chambres d'hôtel. Il permet d'allumer ou d'éteindre de la porte la lampe du milieu seulement, d'allumer ou d'éteindre du lit soit la lampe du milieu, soit celle du lit, en les combinant avec un commutateur ou une poire à mouvement avant-arrière, à deux directions, sans plot mort. Les lampes ne peuvent jamais brûler en même temps.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



E. *Commutateur à deux allumages (pour lustre).*

Position 1. La première lampe s'allume ; 2. La première lampe reste allumée et la deuxième lampe s'allume ; 3. La deuxième lampe reste allumée, la première lampe s'éteint ; 4. Tout s'éteint.

F. *Commutateur à trois allumages.*

Position 1. La première lampe s'allume ; 2. La première lampe reste allumée et la deuxième lampe s'allume ; 3. Les première, deuxième et troisième lampes sont allumées ; 4. Tout s'éteint.

G. *Commutateur à quatre directions.* Ces commutateurs permettent d'allumer ou d'éteindre soit la lampe du milieu, soit la lampe du lit, en les combinant, soit avec un commutateur, soit avec une poire à deux directions, sans plot mort, suivant le schéma. Les lampes ne peuvent jamais brûler en même temps.

Position 1. Les deux lampes sont éteintes ; 2. La lampe 1 est allumée ; la lampe 2 est éteinte ; 3. La lampe 2 est allumée, la lampe 1 est éteinte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tinction entre les ampèremètres et les voltmètres. C'est qu'en effet rien ne les distingue en principe. Cependant, leur construction présente une différence fondamentale, par suite de leur mode d'emploi.

L'ampèremètre est placé *en série* sur la ligne et il est généralement traversé par le courant total dont il mesure l'intensité. Par conséquent, il

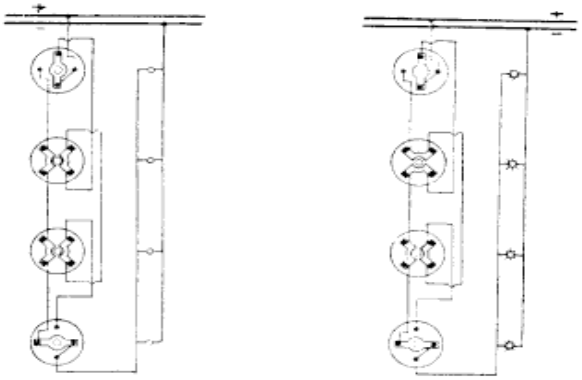


Fig. 485. — Commutateurs de croisement pour montées d'escalier, permettant d'allumer ou d'éteindre une lampe ou un groupe de lampes de plusieurs points différents.

doit ne présenter qu'une *faible résistance* pour ne pas s'échauffer outre mesure et ne pas perturber la région électrique du circuit.

Au contraire, le voltmètre est monté *en dérivation* entre les deux fils de ligne d'un circuit, et il faut par suite que sa résistance soit très grande pour ne pas modifier le régime du courant.

D'une façon générale, ils ne doivent pas rester constamment en circuit. Ajoutons que, dans le cas où les intensités sont très considérables, on *shunte* les appareils, c'est-à-dire que l'ampèremètre est branché en dérivation aux extrémités d'une résistance 9 fois ou 99 fois plus faible que la sienne par exemple; de cette façon, le courant qui le traverse n'est que la dixième ou la centième partie du courant total. Ces résistances sont généralement logées dans le socle de l'ampèremètre qui porte alors autant de graduations différentes qu'il comporte de shunts. On construit également des voltmètres à plusieurs graduations (1).

* * *

Tous les appareils de manœuvre, de sécurité et de contrôle que nous venons de décrire : coupe-circuits, interrupteurs, disjoncteurs, voltmètres,

(1) Montrons comment le voltmètre, qui est un ampèremètre à grande résistance, permet la mesure de la différence de potentiel entre les bornes du circuit d'utilisation. Si V est cette différence de potentiel, il passe dans le voltmètre une intensité $i = \frac{V}{R}$, R étant sa résistance. Par suite, $V = iR$ et, pour lire V sur la graduation de l'appareil, il suffit d'inscrire sur celle-ci non pas les valeurs de i, mais les produits iR.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ampèremètres, sont groupés dans les usines sur des *tableaux* en marbre, ou, si leurs dimensions sont trop considérables, manœuvrés de ces tableaux à l'aide de renvois mécaniques.

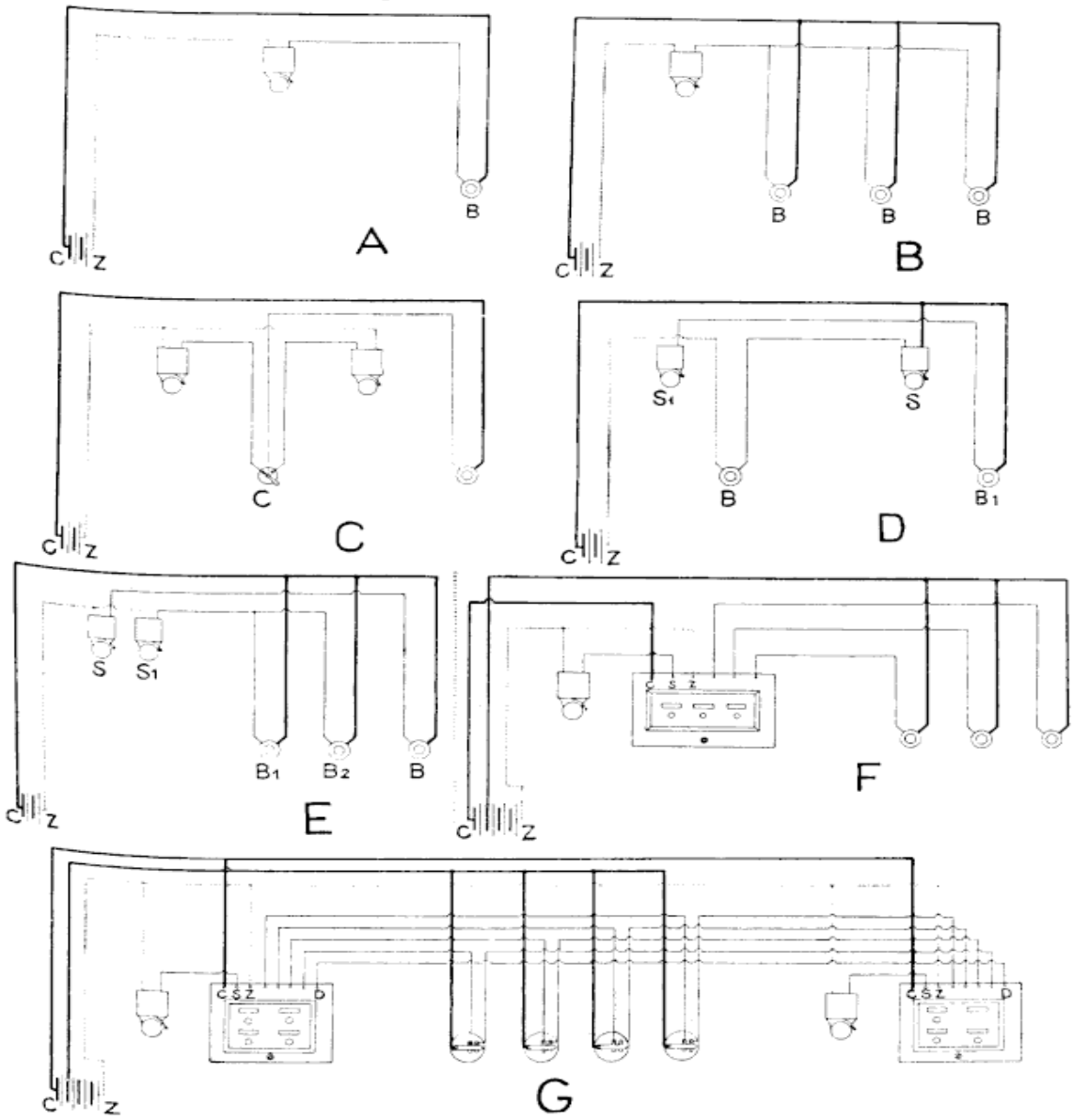


Fig. 486.— Divers montages de sonneries.

A, une sonnerie actionnée par un appel ; B, une sonnerie actionnée par plusieurs appels ; C, un appel actionnant l'une ou l'autre sonnerie, suivant la position d'un commutateur à deux directions C, D, installation dite « demande-réponse » à trois fils. Le bouton B actionne la sonnerie S_1, et le bouton B_1, la sonnerie S ; E, installation dite « d'appartement ». Le bouton B actionne la sonnerie S_1 ; les boutons B_1, B_2 actionnent la sonnerie S ; F, installation d'un tableau indicateur ; G, installation des deux tableaux fonctionnant ensemble et disparaissant l'un par l'autre. Le fil D, qui réunit les deux tableaux, assure leur solidarité.

A titre d'exemple, nous reproduisons dans les figures 482 et 483 la vue d'avant et la vue d'arrière d'une partie du tableau basse tension de la sous-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

station de Paris-Vaugirard des chemins de fer de l'État. On y voit à la partie supérieure les disjoncteurs automatiques, en dessous les instruments de mesure, puis les divers interrupteurs et, à la partie inférieure, les roues de commande des rhéostats. La vue arrière montre la disposition des barres et le mode de fixation des divers appareils.

* * *

Nous terminerons ce chapitre en donnant quelques schémas pratiques de montage que chacun peut réaliser sans l'intervention d'un électricien spécialiste. Ces montages sont relatifs à des installations de lampes et de sonneries, mais on peut aussi bien les appliquer à la commande d'autres appareils, ventilateurs, radiateurs, petits moteurs, etc.

Les organes de manœuvre sont soit de simples boutons, soit des commutateurs à deux ou plusieurs plots. Ce sont des interrupteurs tournants analogues à ceux dont nous avons parlé précédemment, mais dont la partie mobile permet de réaliser plusieurs connexions différentes. Il est inutile de s'étendre sur leur construction ; les schémas que nous donnons indiquent très clairement pour chaque cas particulier les manœuvres spéciales que doit pouvoir effectuer le commutateur (fig. 484, 485 et 486).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXIII

L'ÉCLAIRAGE

Historique des procédés d'éclairage. — Rappel des lois du rayonnement thermique : loi de Kirchoff, loi de Stephan-Boltzmann, loi de Wien. — Sensibilité de l'œil aux diverses radiations. — Expériences de Nutting. — Les diverses solutions du problème de l'éclairage. — Lampes à incandescence à filament de charbon, d'osmium, de tantale, de tungstène. — Comparaison. — Lampes à filament et atmosphère gazeuse : lampe demi-watt. — Construction des lampes à incandescence. — Fabrication du filament. — Procédés indirects : nourrissage simple, suivi de décarburation, par substitution. — Procédés directs : filage, étirage. — Les perfectionnements récents, par étirage à partir d'un seul cristal. — Fabrication de l'ampoule. — Montage du filament dans l'ampoule. — Formes des lampes à incandescence. — La lampe Nernst. — Propriétés électriques des terres rares. — Résistance de chauffage auxiliaire. — Les lampes à arc. — Mécanisme de l'arc électrique. — Différents procédés d'augmentation du rendement des arcs : arcs enfermés ; arcs à flammes. —Les charbons des lampes à arcs : minéralisés, homogène, à zones. — Les lampes à arcs métalliques. — Arcs entre métaux dans le vide. — Industrie des charbons électriques. — Charbons agglomérés. — Charbons graphités. — Les colorants. — Fonctionnement d'un arc électrique. — Dispositifs de réglage. — Montages en série, en dérivation, différentiel. — Description de quelques lampes à arc. — Régulateurs Pilsen, Brianne, A. E. G. — Lampes Bremer, Beck, Bardon, C. G. E. — Les lampes de grande puissance. — Lampes de projection à filaments métalliques. — Lampes à arcs de projection à réglage à la main. — Lampes de projecteur Sperry. — Lampes à gaz lumineux. — Lampe Cooper-Hewitt à mercure. — Mode de fonctionnement. — Dispositifs d'allumage : Weintraub, Bodde. — Lampes Bastian et Salisbury, Heraeus, Lumière. — Fonctionnement en courant alternatif. — Tube de Moore, soupape de Moore. — Tubes à gaz rares de Claude. — Caractéristiques électriques des diverses lampes électriques. — Lampe à filament de carbone — Lampe à filament de tungstène. — Lampes à atmosphère gazeuse. — Lampes à arc. — Lampes à vapeur de mercure. — Tubes de Moore et Claude — Caractéristiques photométriques des diverses lampes électriques. — Facteur physiologique. — Rendement lumineux des diverses lampes. — Répartition du flux lumineux des lampes ordinaires à filament, des lampes demi-watt, des lampes à arc nu ou sous globe. — Le problème de la distribution des foyers lumineux. — Influence de l'éclairage sur les conditions de travail. — Choix des lampes à incandescence. — Règles pratiques pour l'établissement d'un projet d'éclairage, exemples.

L'éclairage est sans aucun doute l'application la plus importante de l'électricité. La moitié au moins de la puissance totale des usines génératrices est dépensée pour produire la lumière, dont le besoin va sans cesse en croissant avec les exigences de plus en plus impérieuses de la vie moderne.

L'***histoire*** de l'éclairage mérite d'être rappelée, tout au moins succincte-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment, car elle est un exemple frappant du prodigieux développement de la science dans la période contemporaine.

* * *

L'antiquité n'a connu, pour dissiper les ténèbres, que la vulgaire torche baguette de bois résineux garnie d'étoupe imprégnée de poix. Les Romains et les Grecs employaient des burettes alimentées par de l'huile ou des graisses, et, jusqu'au XVIII[e] siècle, si l'on en excepte les flambeaux de cire, apanage des nobles et des riches, ce sont les mêmes instruments que l'on trouve encore en usage.

On ne conçoit pas actuellement de fête sans une véritable orgie lumineuse : si l'on calcule le nombre de bougies par mètre cube d'espace éclairé, on trouve dans les théâtres des nombres variant de 20 à 30. Nos rues même, dont on critique cependant la luminosité insuffisante, ont en moyenne, dans les artères principales des grandes villes, deux ou trois bougies par mètre cube. Combien ténébreuses nous paraîtraient aujourd'hui les fêtes données par nos grands rois, dont notre imagination se plaît à évoquer les fastes, puisque, en 1785, on considéra comme une débauche de lumière sans précédent l'emploi, dans la Galerie des Glaces du Palais de Versailles, de 1 800 chandelles de cire, donnant à peine 2/10 de bougie par mètre cube ! Lorsque, en 1878, à l'occasion de l'Exposition universelle, on alluma dans la même salle 8 000 bougies, atteignant ainsi une valeur de près de 9/10 de bougie par mètre cube, on ne put même pas arriver à satisfaire tous les invités. De nos jours, il faudrait en installer au moins vingt fois plus.

Entre 1800 et 1820, l'antique lampe à huile, déjà perfectionnée au siècle précédent par Argand, qui imagina la lampe à double courant d'air, fut encore améliorée par Carcel et Gagneau, mais déjà le gaz, inventé en 1785 par l'ingénieur français Lebon, ouvrait une nouvelle ère dans l'histoire de l'éclairage.

Régnant sans conteste entre 1820 et 1860, malgré le développement de la bougie stéarique, due aux travaux de Chevreul et commercialisée en 1834 par de Milly, le gaz vit surgir à ce moment un concurrent sérieux : le pétrole, dont Drake, en 1858, trouva à Titusville, en Pensylvanie, la première source ayant un débit suffisant pour justifier une exploitation industrielle.

La lampe à pétrole et le bec de gaz ordinaire, du type papillon, le seul connu à cette époque, se partagèrent le domaine de l'éclairage domestique jusqu'en 1878.

Déjà, il est vrai, en 1844 l'électricité avait permis à Delueil et Foucault

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de réaliser le premier arc électrique, qu'ils avaient installé place de la Concorde à Paris, sur les genoux de la statue de la ville de Lille, mais c'est la découverte de la lampe à incandescence par Edison qui ouvrit véritablement l'ère nouvelle de l'éclairage et révolutionna la vie moderne. Depuis cette date, la lutte entre le gaz et l'électricité a été des plus âpres, et, comme nous le verrons, ce n'est que tout récemment que l'électricité semble avoir conquis la suprématie, tout au moins momentanément.

Il est intéressant de signaler que la découverte de l'ampoule à incandescence avait été déjà réalisée deux fois avant Edison. En 1845, W. Starr, de Cincinnati, avait présenté à Faraday une lampe constituée par un fil de charbon porté à l'incandescence par le courant électrique et renfermé dans une cloche dans laquelle on avait préalablement fait le vide. Faute d'appui financier, cette invention tomba dans l'oubli. Elle fut de nouveau redécouverte en 1858 par un Français, de Changy, qui proposa même l'emploi de fibres végétales calcinées et de pâtes de plombagine tréfilées pour constituer le filament. Découragé par l'accueil fait à son invention par l'Académie des sciences, de Changy renonça à en poursuivre la réalisation, et il fallut la ténacité d'Edison et l'audace financière des Américains pour qu'enfin, en 1878, la lampe à incandescence puisse prendre son essor.

On sait quelle merveilleuse source lumineuse l'ampoule à incandescence est devenue aujourd'hui, grâce à ses perfectionnements successifs que nous étudierons en détail ; nous verrons aussi quels prodiges d'ingéniosité et d'habileté il a fallu accomplir pour arriver à sa production industrielle en grande série.

* * *

S'il est vrai, comme on l'a dit, que le degré de civilisation se juge à la manière dont on s'éclaire, nous pouvons être fiers du développement de l'humanité dans les cinquante dernières années, mais cela signifie-t-il que nous soyons en droit de chanter victoire et de considérer le problème comme finalement résolu? Hélas ! non, et il est fort probable que, dans quelques siècles, nos descendants nous considéreront comme bien barbares encore. En effet, même dans les lampes demi-watt, qui sont nos sources lumineuses les plus parfaites actuellement, c'est à peine si 2 à 3 p. 100 de l'énergie consommée est transformée en radiations lumineuses utiles ! Tout le reste est gapillé en pure perte sous forme de chaleur ou de radiations invisibles, ultra-violettes ou infra-rouges. Quel pitoyable rendement lorsqu'on le compare à celui du ver luisant (*Pyrophorus noctilocus*) par exemple. Il n'émet aucune radiation inutile; toutes sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

comprises dans l'intervalle des longueurs d'onde qui impressionnent le plus vivement l'œil, et l'énergie dépensée par l'animal est certainement infime.

Il est vrai que nous sommes ici en présence d'un phénomène de luminescence, et non de rayonnement thermique, et c'est pourquoi l'effort des chercheurs se dirige actuellement vers l'étude de l'éclairage par lumière froide, par luminescence, d'où sortira sans doute la grande découverte de l'avenir.

* * *

Afin de mieux comprendre l'état actuel du problème de l'éclairage, il est nécessaire de commencer par un ***rapide exposé des lois du rayonnement.***

Tout d'abord, qu'est-ce qu'un corps lumineux ?

Pour donner une réponse précise à cette question, réponse qui, comme nous le verrons, pose nettement le problème de l'éclairage, nous distinguerons deux cas différents, suivant l'origine de l'énergie rayonnée. Celle-ci peut être empruntée dans le premier cas à une source calorifique extérieure, sans qu'il y ait altération du corps rayonnant : on se trouve alors en présence d'un *rayonnement thermique* proprement dit.

Dans le second cas, on considère les phénomènes dans lesquels le corps rayonnant reçoit de l'énergie qui n'est pas de la chaleur, provenant d'une source à la même température que lui. Nous désignerons ces phénomènes par le terme générique de *luminescence*.

Deux lois fondamentales régissent le rayonnement thermique : la ***loi de Kirchoff*** et la ***loi de Stephan-Boltzmann.***

Considérons un corps à une certaine température et faisons tomber sur lui un rayon de lumière monochromatique. En observant ce qui est renvoyé par le corps, nous avons un moyen de déterminer ce qui est conservé par lui. Le rapport de ce qu'il a conservé à ce qu'il a reçu définit le *pouvoir absorbant* A constant lorsque l'on interroge le corps dans les mêmes conditions.

Le *pouvoir émissif e* est au contraire défini comme la quantité d'énergie rayonnée par le corps pendant l'unité de temps. Nous admettrons qu'il est seulement fonction de la température ; les corps environnants notamment n'ont aucune influence sur lui.

Kirchoff a trouvé par des considérations théoriques que le rapport des pouvoirs émissif et absorbant, pour une radiation donnée, est le même pour tous les corps et ne dépend que de la température. C'est la loi de Kirchoff qui se traduit par la formule :

$$\frac{e}{A} = K.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour A = 1, c prend sa valeur maximum égale à K. Le corps qui absorberait ainsi toutes les radiations a été appelé *corps noir* ou *radiateur intégral*, nom expressif qui rappelle sa propriété essentielle d'émettre tout ce qu'il reçoit.

Ce corps noir n'est réalisé qu'imparfaitement par le noir de fumée ; on peut en avoir cependant une représentation aussi précise qu'on le désire, en pratiquant dans une cavité isotherme une ouverture infiniment petite. Cette cavité fonctionnera comme une surface noire, car toute la lumière qui pénètre à l'intérieur s'y diffuse et ne ressort pas.

Quand on regarde à l'intérieur de la cavité, on ne voit donc pas la forme de certains des corps qui s'y trouvent à l'exception des autres, car alors il existerait une direction privilégiée et l'équilibre ne serait certainement pas atteint. On conçoit pourquoi Drapen a pu énoncer cette proposition : dans une enceinte fermée, tous les corps commencent à luire à la même température.

Comparons maintenant le rayonnement émis par le radiateur intégral aux différentes températures. La loi de Stephan-Boltzmann nous apprend que l'énergie totale émise par le corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue, c'est-à-dire que si W est la puissance rayonnée exprimée en watts, S la surface du corps en centimètres carrés et T la température absolue du corps noir, on a :

$$W = PST^4,$$

P étant une constante dont la valeur est voisine de 6.10^{-12}.

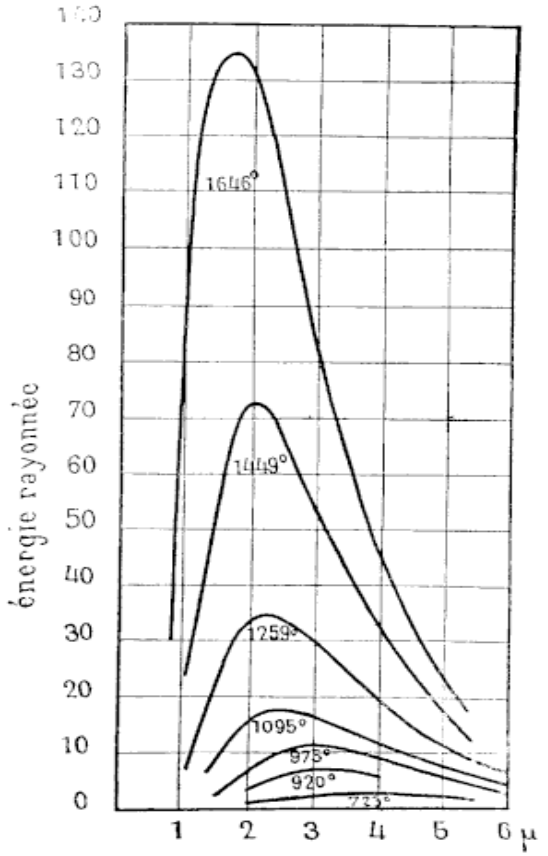


Fig. 487. — Courbe du déplacement du maximum de rayonnement avec la température.

Wien, s'appuyant sur ce résultat, a montré que l'on passe d'une courbe donnant la répartition de l'énergie émise en fonction de la longueur d'onde pour une température donnée à la courbe correspondante pour une autre température en réduisant les abscisses (les longueurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'onde) en raison inverse des températures absolues et en multipliant les ordonnées par la cinquième puissance de ce rapport des températures.

Il s'ensuit, et c'est là un fait capital pour le problème qui nous occupe, que, lorsque la température s'élève, tout le spectre est déplacé du côté des petites longueurs d'onde (fig. 487).

Or l'œil perçoit les vibrations correspondant environ à une octave comprise entre les longueurs d'onde 0,4 μ et 0,8 μ (le μ est le millième de millimètre). Les radiations utiles au point de vue de l'éclairage sont ainsi

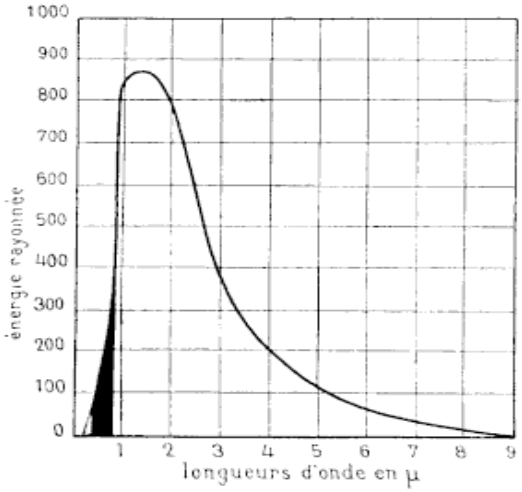


Fig. 488. — La partie hachurée correspond à la fraction de l'énergie totale rayonnée transformée en énergie lumineuse.

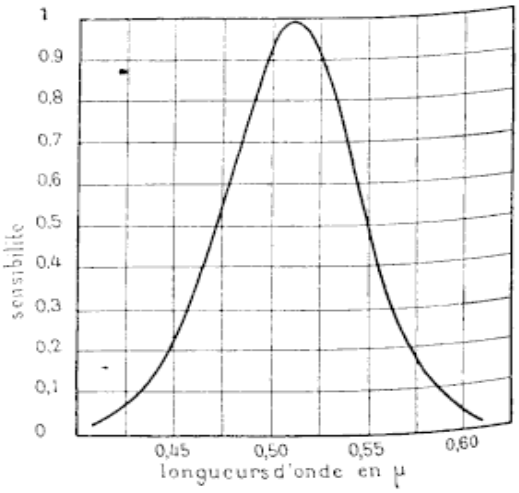


Fig. 489. — Sensibilité de l'œil aux diverses radiations.

déterminées; les autres ne sont d'aucun secours; elles correspondent à une énergie non efficacement employée et constituent un phénomène nuisible (fig. 488).

* * *

Même dans le spectre visible, la ***sensibilité de l'œil*** varie énormément avec la longueur d'onde, et les différentes radiations simples sont par suite d'une utilité très inégale. Bien que la sensibilité aux différentes couleurs varie d'un observateur à l'autre, voici un tableau indiquant, d'après Nutting, la valeur relative des sensibilités moyennes pour les diverses radiations.

On a pris ici la sensibilité spectrale maxima, qui, pour 90 p. 100 des observateurs, se trouve dans le vert, au voisinage de la longueur d'onde 0,51, pour unité ; la figure 489 traduit graphiquement ces résultats.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Longueur d'onde	0,41 (violet)	0,450 (bleu)	0,470	0,490	0,510 (vert)
Sensibilité	0,02	0,23	0,49	0,81	1,0
Longueur d'onde	0,530	0,550 (jaune vert)	0,570	0,590	0,610 (rouge)
Sensibilité	0,81	0,49	0,22	0,07	0,02

* * *

Nous sommes à même maintenant de poser d'une façon précise le ***problème de l'éclairage***.

Un corps lumineux est un corps émettant des radiations susceptibles d'impressionner notre œil. Il sera d'autant plus lumineux qu'il émettra plus de radiations voisines du jaune et du vert. Son rendement sera d'autant meilleur qu'il se rapprochera plus de celui du corps noir à la même température.

Non seulement nous avons ainsi mis en évidence les conditions essentielles à résoudre, mais encore la loi de Wien nous permet d'en satisfaire au moins une en chauffant le corps pour déplacer le maximum d'énergie lumineuse rayonnée vers les courtes longueurs d'onde qui sont les plus utiles pour l'éclairage.

Malheureusement, si l'on calcule la température à laquelle devrait être porté le corps noir pour que la radiation correspondant au maximum d'énergie soit par exemple dans le jaune, on trouve une température d'environ 4 600 degrés, que nous sommes impuissants à réaliser. Même à 2 000 degrés, la radiation d'intensité maxima est encore à la longueur d'onde 1,25 μ, c'est-à-dire dans l'infra-rouge, très loin du spectre visible.

Ce que nous venons de dire s'applique seulement au radiateur intégral, et presque tous les corps s'en écartent plus ou moins, ce qui est particulièrement avantageux pour l'éclairage. La puissance de radiation est bien pour tous les corps inférieure, à température égale, à celle du corps noir, mais il se pourra que leur pouvoir émissif se rapproche beaucoup, dans la partie visible du spectre, de celui du radiateur intégral, tout en en différant notablement dans les régions obscures.

Parfois même, nous constatons que l'émission d'une radiation particulière est plus forte que celle de cette radiation dans le radiateur intégral.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous devons en conclure que ce cas ne relève pas du rayonnement thermique, mais qu'il fait partie des phénomènes de luminescence auxquels ces lois ne s'appliquent pas.

C'est ainsi, par exemple, que le platine donne un spectre dans lequel le maximum est beaucoup plus près de la région visible que celui du corps noir à la même température (Lummer). Le pouvoir émissif, très élevé dans la partie visible du spectre, est tel que le platine rayonne, pour une même quantité de radiations lumineuses, moins de radiations invisibles que le corps noir. A 1 850 degrés absolus, le rendement lumineux du platine est 2,37 fois plus grand que celui du corps noir, le rendement lumineux étant défini comme le rapport de l'énergie comprise dans le spectre visible à l'énergie totale rayonnée. Nous reviendrons sur cette question.

Le platine n'est pas le seul corps jouissant de cette propriété ; les métaux réfractaires ont aussi un pouvoir sélectif, de même que les oxydes des terres rares constituant les manchons des becs Auer et les éléments éclairants des lampes Nernst :

Le problème est maintenant bien déterminé :

1° Si l'on veut se servir de corps noirs ou pratiquement considérés comme tels, il faut déplacer vers la partie visible du spectre le maximum de l'énergie rayonnée, et pour cela élever la température. Même si la température est très élevée, la partie utile de l'énergie employée est extrêmement petite par rapport à l'énergie totale rayonnée.

2° Si, au contraire, on s'adresse à des corps colorés, on s'appuie sur leur pouvoir sélectif. On cherchera à obtenir un corps émettant, à une température donnée, avec l'intensité maxima (celle du corps noir à la même température), les radiations de pouvoir éclairant maximum (les radiations vertes, par exemple), et celles-là seulement.

3° On peut aussi, lorsqu'on s'adresse à des corps colorés, arriver à avoir dans la partie visible du spectre une intensité supérieure à celle du corps noir en faisant alors intervenir, en plus du rayonnement thermique, des phénomènes de luminescence.

4° Enfin, on peut résoudre le problème en s'adressant à la luminescence seule, à la lumière froide, qui dès maintenant semble être la voie dans laquelle les recherches ont le plus de chances d'aboutir.

* * *

Nous commencerons l'***étude*** de l'éclairage électrique par celle des ***lampes à incandescence***, examinant d'abord leur évolution, depuis la lampe à filament de charbon d'Edison jusqu'aux lampes demi-watt actuelles à filament de tungstène étiré et à atmosphère gazeuse. Nous décri-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rons ensuite le mode de fabrication du filament, puis son montage dans l'ampoule de verre.

La lampe Nernst nous servira de transition pour passer à l'examen du problème très complexe de l'arc électrique. Le plan de son étude sera parallèle à celui suivi pour les lampes à incandescence. En premier lieu, évolution depuis les arcs au carbone pur jusqu'aux arcs modernes, arcs flammes, arcs métalliques, arcs à vapeur de mercure. Ensuite, nous passerons en revue les réalisations pratiques de l'éclairage par l'arc électrique : fabrication des charbons, construction des lampes.

Nous dirons ensuite quelques mots du problème de la lumière froide.

La comparaison des divers modes d'éclairage, caractéristiques des lampes à incandescence, des lampes à arc, rendement lumineux, répartition de leur flux lumineux dans l'espace, etc., nous amènera à l'étude de leur action sur l'œil et de la meilleure utilisation dans les diverses circonstances des sources d'éclairage, qui terminera ce chapitre.

* * *

On s'est adressé pendant longtemps pour l'éclairage au corps noir. Par exemple, la flamme du gaz est éclairante grâce aux particules de charbon qui s'y trouvent en suspension et qui sont portées à l'incandescence par suite de la combustion. C'est également le ***charbon*** que l'on utilisa à l'origine dans les ampoules à incandescence et dans les arcs électriques dont il est encore le constituant essentiel.

Ce choix fut pendant longtemps considéré comme le meilleur, parce qu'il porte sur un corps qui se rapproche théoriquement du corps noir. Le courant électrique permettant de réaliser commodément des températures très élevées, rien ne semblait s'opposer à l'obtention du rendement maximum, le point de fusion du carbone étant supérieur à 3 000 degrés. On était obligé d'opérer dans le vide pour éviter la combustion du filament de charbon, mais un phénomène imprévu, l'évaporation du charbon dans le vide, vint compromettre la solution du problème. Cette évaporation est un phénomène de projection cathodique qui amincit et bientôt coupe le filament, recouvrant par surcroît l'ampoule d'une couche de charbon pulvérulent qui diminue considérablement le rendement lumineux, ainsi que le montrent les nombres suivants empruntés à M. Bainville :

Volts	250	125	120
Ampères	0,24	0,78	1,33
Bougies : Avant nettoyage	7,7	22,7	13,1
Bougies : Après nettoyage	10,77	47,9	44
Absorption p. 100	20,6	54	70

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On fut donc conduit à un compromis entre l'amélioration du rendement et la durée de vie des lampes.

Les lampes actuelles à filament de charbon diffèrent des premières en ce que le filament possède un éclat métallique dû à son recouvrement par un dépôt de charbon graphitique. Ainsi constitué, l'ensemble résiste mieux à la désagrégation cathodique et, de plus, le rendement photogénique de la lampe est amélioré, car les propriétés du filament se rapprochent plus de celles du platine poli que de celles du corps noir. Le rendement lumineux est voisin de celui d'une lampe à filament noir possédant une température supérieure d'environ 12 p. 100, c'est-à-dire qu'il est environ le double de celui de la même lampe équipée avec un ancien filament. Il semble que l'on soit arrivé ainsi au maximum de perfectionnement de ce genre de lampes, car la température du filament (qui varie de 1 500 à 1 800 degrés suivant les auteurs) semble ne plus pouvoir être élevée sans inconvénient. Les améliorations réalisées (lampes à haut voltage, lampes de grande puissance) dépendent surtout de la meilleure utilisation du réseau électrique.

* * *

Les tentatives faites pour avoir un filament moins altérable que le charbon sont nombreuses. Des résultats intéressants ont été obtenus en employant des ***métaux plus réfractaires que le platine***. Après de nombreuses recherches, Auer von Welsbach fixa son choix sur l'***osmium***, l'un des métaux rares du groupe du platine ne fondant que vers 2700° (Burgess).

Le filament d'osmium est poreux et a une surface rugueuse ; comme il est mou à la température de l'incandescence, on est obligé de l'ancrer à l'aide de petits crochets en thorine fixés à l'extrémité de baguettes de verre elles-mêmes soudées à l'ampoule. Le filament d'osmium a un coefficient de température positif, contrairement au filament de charbon, c'est-à-dire que sa résistance augmente avec la température, ce qui permet à la lampe de mieux supporter les surtensions accidentelles du réseau de distribution. En régime normal, la consommation d'énergie est d'environ 1,8 watt par bougie. A certains points de vue, la lampe à l'osmium serait la lampe idéale : elle jouit d'une grande longévité et son rendement est remarquablement constant. Malheureusement, l'osmium est rare et, pour alimenter une fabrication régulière, on est forcé de compter sur le retour à l'usine des lampes hors de service. Aussi ne rencontre-t-on plus cette lampe dans le commerce, sauf en Allemagne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Dans le courant de 1905, Siemens et Halske, sur les indications de von Bolton, s'adressèrent au ***tantale***, autre métal rare se rapprochant du fer. Sa résistivité à la température ordinaire est de 16 microhms-centimètre, c'est-à-dire dix fois celle du cuivre et deux fois celle du platine; aussi est-il nécessaire d'employer des fils longs et fins. La longueur du filament atteint

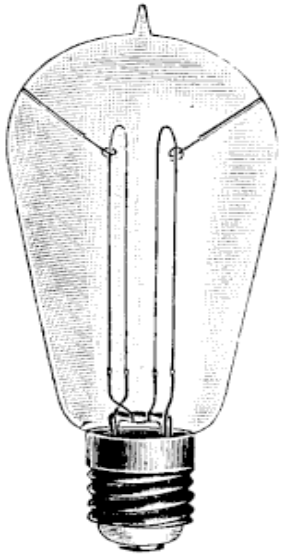


Fig. 490. — Lampe à vis à filament de charbon.

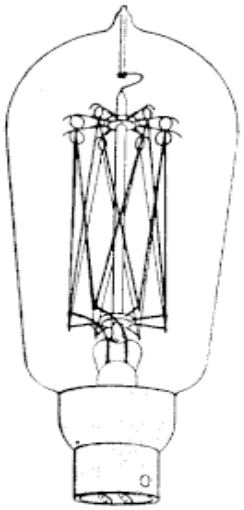


Fig. 491. — Lampe Z.

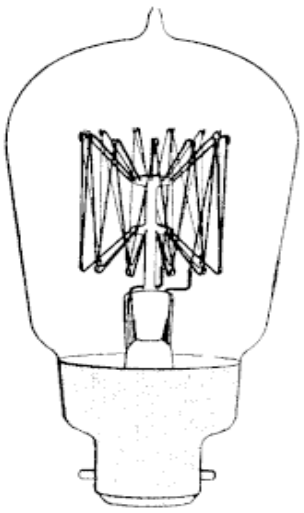


Fig. 492. — Lampe tantale.

dans les lampes environ 650 millimètres; son diamètre est de $0^{mm},05$ et son poids voisin de 22 milligrammes. Il est supporté par deux séries de crochets en fil de nickel assez forts pour éviter l'échauffement et disposés en étoile à douze branches à la partie supérieure et onze branches à la partie inférieure.

* * *

Actuellement, on s'adresse très fréquemment au tungstène, dont la température de fusion, d'après les récentes déterminations de Burgess, Mean et Waidner, serait de 2 950°. La lampe à ***filament de tungstène***, qui est actuellement la plus répandue, semble être supérieure à celle à filament d'osmium au point de vue de la consommation pratique, probablement à cause de la température plus élevée qu'elle peut supporter. De plus, le coefficient de température du tungstène est de beaucoup le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus considérable, ce qui, comme nous l'avons déjà fait remarquer, est un grand avantage pratique, la lampe fonctionnant alors comme un autorégulateur de potentiel.

Le tableau de la page 503 résume les principales propriétés des substances utilisées pour la fabrication des filaments métalliques.

La figure 493 reproduit les courbes de résistance de divers filaments équivalents au point de vue de l'éclairage (32 bougies, 110 volts).

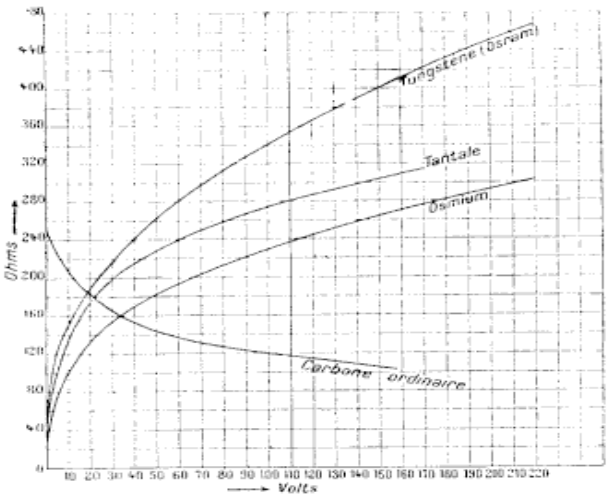


Fig. 493. — Variation de la résistance de divers filaments en fonction du voltage.

* * *

Nous avons vu que l'évaporation du filament de carbone dans le vide, lorsque l'on cherche à augmenter sa température afin d'accroître le rendement lumineux, a conduit à lui substituer des filaments métalliques difficilement fusibles. Malgré le gain très apréciable qui en est résulté, puisque la consommation, qui était de 2,8 watts par bougie dans les meilleures lampes à filament graphité, a pu être abaissée à 1.5 watt par bougie (lampes à osmium et tantale) et finalement à 1 watt (lampes à tungstène), il ne semblait pas possible de continuer à améliorer le rendement en persévérant uniquement dans la même voie. Toutes les lampes en effet périssent, comme celles à filament de charbon, par suite de la volatilisation de la matière incandescente. Non seulement le filament se brise, mais, bien avant que la lampe ne soit « brûlée », le dépôt sur ses parois d'un revêtement de métal pulvérulent, son « noircissement », a diminué déjà notablement son pouvoir lumineux.

Toute la question se ramène donc à empêcher le filament de se vaporiser et de noircir la lampe. Deux solutions ont été proposées :

1° Introduire dans l'ampoule des gaz qui se combineront à chaud avec le métal du filament et donneront des composés transparents qui, par conséquent, ne diminueront pas le pouvoir éclairant de la lampe en se déposant sur ses parois. L'oxygène et le chlore en particulier ont été utilisés dans les lampes à tungstène et ont ainsi permis de pousser un peu plus leur chauffage et de faire tomber à 0,8 watt la dépense d'énergie par bougie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Corps incandescents.	Températures en degrés C. d'emploi.	Températures en degrés C. de fusion.	Poids spécifique.	Chaleur spécifique à temp. ordinaire.	Poids atomique.	Résistance spécifique en microhms par cm³ à chaud.	Résistance spécifique en microhms par cm³ à froid.	Coefficient de dilatation.	Coefficient de température n pour 100 par degré.
Carbone	1650 à 1700	(3600)	2,25	(0,16)	12	35 à 40	63	0,000003	— 0,04
Osmium	1900 à 2000	2700	22,5	0,31	190	80	9,5	—	0,37
Osram	—	—	17,8	0,33	—	76,0	7	0,0000048	—
Tantale	1850 à 2000	2800	16,6	0,0331	181	83	14,6	0,000008	0,25
Zirconium	—	> 1500	6,44	0,067	90	68,4	19	—	—
Tungstène	2000 à 2200	2950	18,6	0,032	184	76	7	0,000004	0,44
Molybdène	—	2585	9	0,068	96	—	—	—	—

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Actuellement, on préfère opérer différemment et introduire dans l'ampoule des ***gaz*** qui au contraire sont ***chimiquement inertes***, mais qui empêchent la volatilisation du métal. Évidemment, les pertes d'énergie par rayonnement calorifique sont beaucoup plus considérables, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte par une expérience très simple. On introduit de l'azote dans une lampe ordinaire au tungstène et on constate qu'immédiatement le filament rougit à peine.

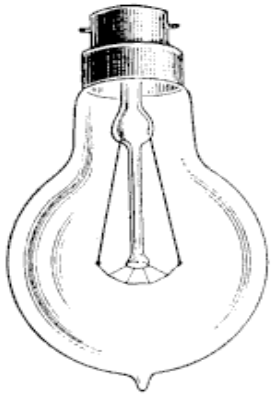


Fig. 494. — Lampe demi-watt.

Aussi, dans les lampes à atmosphère inerte, est-on conduit à donner au filament une forme extrêmement ramassée pour réduire les pertes par convection au minimum. La meilleure solution consiste à enrouler le filament sous forme d'une hélice à pas très serré.

Il peut paraître paradoxal que, dans ces conditions, on arrive à un meilleur rendement lumineux, puisque l'on augmente considérablement la dépense d'énergie par un rayonnement calorifique intensif. Mais il suffit de se rappeler que les pertes par rayonnement ne croissent que comme la puissance 2/3 de la température, tandis que le rayonnement croît comme la puissance 4,7 de la température pour le tungstène (s'il s'agissait du corps noir idéal, ce serait seulement comme la puissance 4 de la température). Par conséquent, en élevant la température, on obtient un rendement meilleur que celui de la même lampe dans laquelle on aurait fait le vide.

En poussant la température jusque vers 2 500° (soit environ 500 degrés plus haut que dans les lampes à vide), on arrive à une consommation de 0,5 watt par bougie. De plus, comme le filament est très ramassé, on peut réduire considérablement les dimensions de l'ampoule. C'est ainsi que les lampes demi-watt de 50 bougies par exemple sont moins volumineuses que des lampes ordinaires de 16 bougies.

Le gaz dont on se sert pour le remplissage des ampoules de grande puissance (1 000 bougies et plus) est l'azote. Dans les petites ampoules, comme la spirale est très petite, on préfère prendre de l'argon, dont la conductibilité calorifique est plus faible que celle de l'azote (le coefficient de conductibilité calorifique, à 0 degré, de l'azote est de $0{,}568.10^{-4}$, tandis que celui de l'argon est seulement $0{,}389.10^{-4}$). Comme cependant l'argon se laisse plus facilement traverser par la décharge électrique, on lui ajoute une légère proportion d'azote pour éviter les courts-circuits.

La pression de remplissage est d'environ deux tiers d'atmosphère ; en fonctionnement, la température du gaz ne dépasse pas 150 à 200°.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La pression dans l'ampoule est alors voisine de la pression atmosphérique.

Ce perfectionnement si remarquable n'a été possible que grâce à la mise au point d'une méthode de fabrication qui permet d'obtenir des filaments de $0^{mm},02$ de diamètre et suffisamment souples pour pouvoir être enroulés en spires dont le diamètre ne dépasse pas $0^{mm},05$.

* * *

Ayant ainsi rapidement retracé l'évolution de la ***lampe à incandescence***, il nous reste, avant de passer aux autres modes d'éclairage électrique, à indiquer sommairement ***comment on la construit***. La fabrication comprend deux séries d'opérations distinctes : la préparation du filament et le montage de l'ampoule.

Nous ne dirons qu'un mot de la fabrication des filaments de charbon, dont la disparition n'est plus qu'une question de temps.

On commence par préparer un liquide sirupeux de couleur bleutée et dont la composition moyenne est :

Cellulose (coton hydrophile, paille de riz, etc.)	5	grammes.
Chlorure de zinc neutralisé	100	—
Eau distillée	50	—

On chauffe légèrement et on fait passer cette pâte à travers une filière ; les fils en sortant tombent dans un bain d'alcool à 90°.

Le filament est ensuite lavé à l'eau avec soin, séché et enroulé sur des blocs de graphite que l'on empile ensuite dans des creusets, recouverts de poussier de charbon très fin pour empêcher l'entrée de l'air pendant la cuisson, qui dure vingt-quatre heures, à une température de 1 500°. La cellulose se transforme ainsi en carbone, et le fil, qui conserve la forme du moule sur lequel il a été enroulé, peut être monté dans l'ampoule.

Afin d'éliminer les irrégularités de diamètre qu'il peut présenter et le rendre en même temps moins poreux, on lui fait cependant encore subir un traitement appelé *carburation* ou *nourrissage*. A cet effet, on chauffe électriquement le filament dans une atmosphère gazeuse riche en hydrocarbures (gaz d'éclairage, gazoline, acétylène, etc.). Il se forme alors sur lui un dépôt épais de charbon qui augmente sa résistance mécanique.

Enfin, en soumettant à l'abri de l'air les filaments carburés à une température de 3 000 à 3 500°, on détermine la formation d'un revêtement superficiel de graphite (Howell). Nous avons déjà dit précédemment qu'il en résulte une amélioration notable du rendement lumineux en même temps qu'une augmentation de la résistance mécanique du filament.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les procédés de ***fabrication des filaments métalliques*** sont extrêmement nombreux et peuvent être classés en deux catégories :

1° Procédés indirects, dans lesquels on prépare d'abord un filament servant de support temporaire ou définitif au revêtement métallique qui constituera la surface rayonnante.

2° Procédés directs, dans lesquels on obtient le filament à partir du métal directement ou d'un de ses sels.

Dans le groupe des procédés indirects, on peut distinguer :

a. Les procédés de nourrissage simple.

b. Les procédés de nourrissage suivi de décarburation.

c. Les procédés de nourrissage par substitution.

Dans les procédés de *nourrissage simple*, on recouvre simplement le filament de carbone par un dépôt de métal ou d'oxyde précipité par une réaction se produisant au contact du filament incandescent. Ce mode de préparation n'est plus très employé actuellement.

En 1905, Just et Hanamann mirent au point le procédé de *nourrissage suivi de décarburation*, qui consiste à porter à l'incandescence un filament de charbon dans une atmosphère formée d'un gaz réducteur (hydrogène, par exemple) mélangé à des composés réductibles (chlorures de tungstène ou de molybdène). On forme d'abord une couche mince, puis on porte le filament dans un gaz inerte à haute température. Le carbone se combine alors avec le métal. On introduit ensuite une petite quantité de vapeur d'eau qui détruit le carbone des couches superficielles. On continue le traitement jusqu'à disparition complète du support de carbone.

Enfin, dans les procédés de *nourrissage par substitution*, on réunit en une seule les deux opérations du nourrissage et de la décarburation : l'oxydation du filament de carbone se produit en même temps que le dépôt métallique s'effectue.

Les procédés directs peuvent être également divisés en plusieurs catégories :

a. Filaments *filés* à la presse à partir de pâtes plastiques constituées soit de poudres métalliques pures, soit de poudres métalliques renfermant des impuretés qui ne peuvent être éliminées que par un traitement ultérieur, soit enfin de poudres formées de mélanges de composés métalliques binaires qui ne peuvent être transformés en métal pur que par un traitement chimique approprié.

b. Filaments *étirés* à partir du métal lui-même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les innombrables brevets qui ont été pris pour couvrir les modes de préparation des filaments par filage de pâtes plastiques montrent combien le problème est complexe, et nous n'en dirons que quelques mots, car ils tendent à être de moins en moins employés.

Dans un procédé, on comprime la poudre de tungstène sèche à très forte pression sous forme d'un bâtonnet que l'on chauffe ensuite avec précaution pendant trente minutes à 1 300° dans un four électrique parcouru par un courant d'hydrogène. Le bâtonnet prend ainsi un peu de consistance et peut ensuite être soumis à l'action du courant électrique, à une température voisine de la température de fusion, ce qui achève de lui donner de la consistance. L'opération suivante consiste en une série de passages à la filière ou au laminoir, à une température de 1 500° environ au début, puis, lorsque le fil s'amincit, à des températures de plus en plus basses, pour terminer à 400° environ lorsque le fil a un diamètre de $0^{mm},001$.

Dans d'autres procédés, on part de solutions colloïdales obtenues par la méthode de Bredig (arc jaillissant sous l'eau entre deux électrodes du métal à pulvériser). Ces solutions évaporées donnent un colloïde gélatineux que l'on file. Le filament est ensuite desséché vers 100°, de façon à lui donner une conductibilité suffisante pour que le courant électrique puisse le parcourir. Sous l'influence de l'élévation de température, le filament prend la structure métallique homogène.

Siemens et Halske ont employé un autre mode de fabrication. La poudre de tungstène est enfermée dans un tube d'aluminium lui-même placé dans un tube de fer. Après expulsion des gaz occlus par un léger chauffage, on étire tout l'ensemble, qui se comporte comme un tube homogène, et, lorsqu'il a été réduit à un diamètre convenable, on élimine les deux enveloppes métalliques par action de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. Il reste alors l'âme de tungstène que l'on peut employer directement dans les lampes.

Enfin, on prépare dans certains cas des filaments à partir de fils en métal impur, l'impureté étant introduite par l'agglomérant (goudron, sucre, etc.) ajouté pour permettre le filage de la pâte. C'est en particulier par un procédé de ce genre que les filaments des lampes Osram ont été préparés par la société Auer. L'osram est un mélange d'*osmium* et de tungstène, en allemand *wolfram*. En général, il se forme un carbure du métal, qu'il faut ensuite réduire par un courant d'hydrogène à haute température.

Au lieu de partir du métal, ce qui suppose une opération préliminaire très coûteuse, on utilise, dans certains procédés, celui de Lux en particulier, les oxydes des métaux comme matière première. On traite par exemple

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'oxyde de tungstène par l'ammoniaque en excès pour former l'acide tungstique hydraté gélatineux que l'on file, puis dessèche et finalement transforme en métal pur par action du courant électrique.

Le développement des lampes demi-watt a conduit à employer presque exclusivement les procédés d'étirage à partir du métal pur pour la préparation du filament.

L'un des perfectionnements les plus importants dans cette voie est dû à Bottger (1917). Il consiste à former le filament de tungstène par étirage d'*un seul cristal* de métal. On ajoute de l'oxyde de thorium à la poudre de tungstène, on fait de ce mélange une émulsion que l'on passe sous pression à travers des filières de diamant. Les fils sont déplacés dans une enceinte chauffée entre 2 400 et 2 600°, avec une vitesse telle qu'elle soit inférieure à la vitesse de cristallisation du tungstène. On obtient ainsi un cristal unique, très allongé, très tenace et extrêmement flexible, qu'il suffit de tréfiler pour l'amener au diamètre désiré. On réalise ainsi des filaments de $0^{mm},02$ de diamètre et 25 mètres de longueur formés d'un seul cristal de tungstène.

* * *

Nous allons maintenant passer en revue les multiples opérations que comporte le ***montage du filament dans l'ampoule.***

Les éléments dont on part pour constituer l'ampoule à incandescence se composent d'un tube de verre de 8 millimètres de diamètre et $3^{mm},5$ de longueur environ, d'une baguette de verre de 3 millimètres de diamètre et 8 centimètres de long et d'une ampoule de cristal (fig. 495). Le nombre des opérations que doivent subir ces éléments avant que la lampe soit terminée étant supérieur à cinquante, nous nous contenterons d'indiquer les principales phases de la fabrication.

Celle-ci comprend trois périodes distinctes : fabrication du pied portant le filament éclairant et les fils d'arrivée du courant ; montage du pied dans l'ampoule ; vidage et finissage de la lampe. La figure 495 montre les différentes transformations que subissent le tube, la baguette de verre et l'ampoule.

Le tube est d'abord *évasé* et la baguette munie d'une *perle* obtenue par refoulement du verre préalablement ramolli en un point par un chalumeau.

On place ensuite dans le tube les deux conducteurs d'amenée du courant et on soude la baguette au tube tout en aplatissant celui-ci, afin de fixer les deux conducteurs qui sont ainsi noyés dans le verre.

Primitivement, ces conducteurs étaient constitués par un fil de nickel soudé à un fil de cuivre par l'intermédiaire d'un petit tronçon de platine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui assurait la soudure de l'ensemble au verre de l'ampoule, le platine ayant le même coefficient de dilatation que le cristal. Depuis l'augmentation considérable du prix du platine, on utilise des conducteurs en ferro-nickel enfermés dans une gaine de cuivre rouge recouverte d'un vernis à base de borates. Au moment où l'on enferme ces conducteurs dans la base du pied portée au rouge sombre, il se produit une combinaison de verre qui « mouille » le cuivre et fait corps avec lui. Ce ferro-nickel ainsi préparé, que l'on appelle *platinite*, a le même coefficient de dilatation que le verre et, par suite, ne peut s'en séparer au refroidissement, assurant ainsi la parfaite étanchéité de l'amenée de courant.

Les branches des étoiles qui servent à supporter le filament sont en molybdène et insérées automatiquement à la base et au sommet de la tige chauffée sous le dard de chalumeaux. Il reste à monter sur cette armature le filament de tungstène. Nous avons vu comment on le fabrique, mais il est encore une manipulation qu'il faut lui faire subir, afin de pouvoir le manipuler facilement ; nous voulons parler du recuit.

Celui-ci est obtenu en faisant passer un courant électrique dans le filament plongé dans une atmosphère réductrice ou inerte. Le fil ainsi recuit est recouvert d'un mélange de phosphore rouge et d'un sel halogéné en suspension dans l'alcool méthylique, puis séché, verni et séché à nouveau avant d'être monté sur le support.

A ce moment, le pied est terminé ; il faut le placer dans l'ampoule, qui a déjà été l'objet d'un certain nombre de manipulations. Telle qu'elle est livrée de la verrerie, elle a l'aspect de la figure 495.3 et est munie à l'extrémité de son col d'une masse de verre, appelée *mors de canne*, au-dessous d'un bourrelet destiné à la rendre moins fragile au cours du transport.

On commence par couper cet excédent de verre, puis on lave l'intérieur de l'ampoule à l'eau acidulée avant de fixer à son sommet un petit tube de verre par lequel on fera ultérieurement le vide dans la lampe terminée. Cette opération s'appelle le *queusotage*.

On introduit ensuite le pied tout garni dans l'ampoule ainsi préparée et une machine ferme la lampe en soudant le bord intérieur de l'ampoule à l'évasement qui se trouve à la base du pied.

Le vidage des lampes est une opération particulièrement délicate et très importante. Il est réalisé à l'aide de pompes perfectionnées, l'ampoule étant chauffée de façon à chasser les gaz et l'humidité qui peuvent adhérer aux parois. Un chalumeau coupe ensuite le queusot au ras de l'ampoule.

Le vide, dans une bonne lampe monowatt, est de l'ordre de quelques millièmes de millimètre de mercure, et on le vérifie en faisant passer dans les lampes le courant d'une bobine d'induction en chambre noire. On observe une teinte livide très légère qui est caractéristique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On branche ensuite les lampes sur un circuit à voltage plus élevé que celui d'utilisation normale : le filament de tungstène se tend sous l'action de la chaleur et son état cristallin change, tandis que se dégagent les

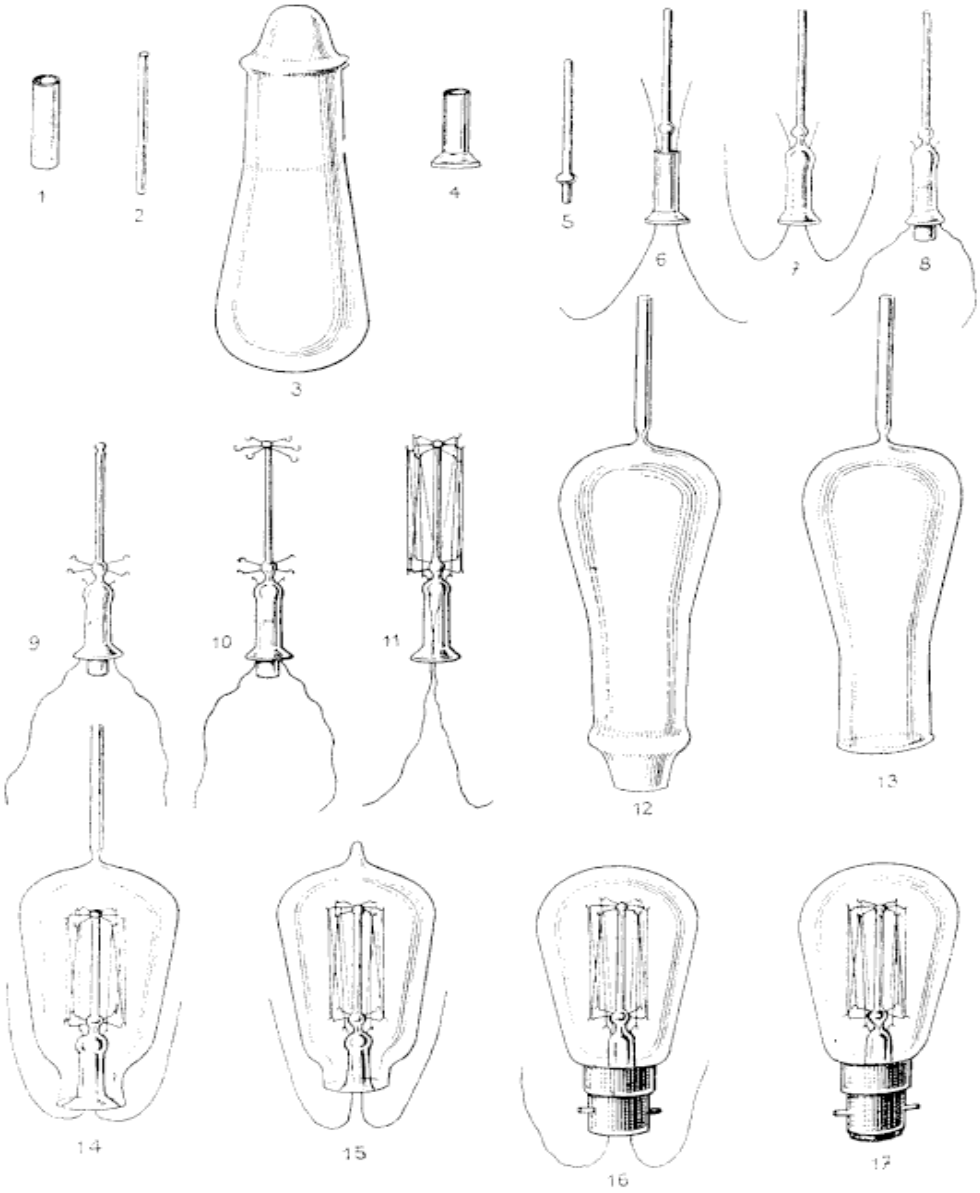


Fig. 495. — Les différents stades de la construction des ampoules électriques.

produits chimiques dont il est recouvert et les gaz qui y étaient occlus. Sous l'influence de l'ionisation intense qui se produit alors sous l'action des électrons émis par le filament, toutes ces vapeurs sont adsorbées par les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parois de l'ampoule et le vide qui avait baissé dans la lampe se trouve finalement encore plus poussé que précédemment.

Il ne reste plus qu'à monter le culot métallique à l'aide d'un mortier de gomme laque épaisse en solution dans l'alcool, additionné de marbre pulvérisé par exemple, et à fixer les fils d'amenée du courant aux pastilles de contact de la douille.

Lorsque l'on fabrique des lampes demi-watt à atmosphère gazeuse, après le vidage réalisé comme nous l'avons dit précédemment, on introduit le gaz par une manœuvre de robinets.

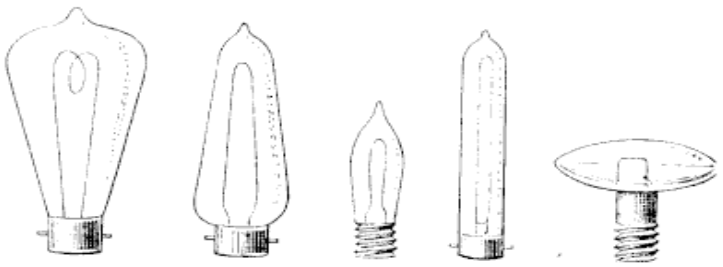


Fig. 496. — Diverses formes de lampes.

Naturellement, nous n'avons pas donné une description complète de la fabrication des lampes à incandescence, car nous avons passé sous silence de nombreuses opérations de fabrication proprement dite ou de contrôle électrique ou photométrique. Ce que nous avons dit suffit pour apprécier la complexité et la délicatesse des opérations qu'un semi-automatisme très perfectionné permet seul de pouvoir réaliser industriellement avec un déchet insignifiant.

* * *

Les ***formes que l'on peut donner aux ampoules*** sont extrêmement nombreuses et peuvent être variées à l'infini suivant les usages spéciaux auxquels on les destine et suivant leur condition de montage (fig. 496).

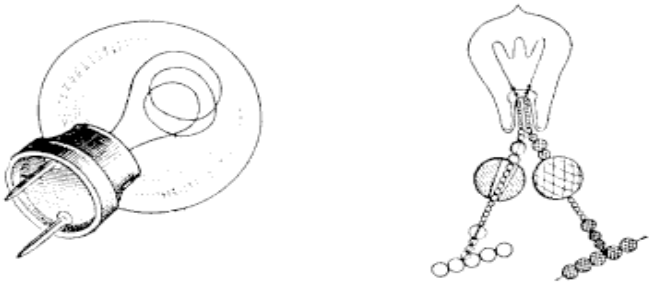


Fig. 497. — Autres dispositifs de montage des ampoules.

Lorsque l'on désire des lampes de faible intensité lumineuse ou de très petit volume, on ne peut plus employer une tension d'alimentation élevée, 110 ou 220 volts. On utilise alors les lampes basse tension, fonctionnant entre 4 volts (lampes de poche) et 20 volts (lampes perles pour décoration, lampes pour instruments médicaux et chirurgicaux, etc.).

Ces lampes sont montées, comme les lampes ordinaires, soit à vis, soit à baïonnette.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous signalerons deux dispositifs de montage des lampes à incandescence particulièrement intéressants.

Dans l'un, le culot de la lampe se termine par deux pointes métalliques de 15 à 20 millimètres de longueur. Il suffit de piquer ces pointes entre les brins des câbles de cuivre des conducteurs électriques, et le serrage produit par les fils des câbles sur les pointes est suffisant pour maintenir la lampe sans autre mode de fixation, tout en assurant les connexions électriques. Ce système permet un montage extrêmement rapide ; il est surtout employé dans les installations volantes des illuminations.

Les lampes destinées à certains lustres à cristaux ou à des dispositifs particuliers d'éclairage (en médecine, par exemple, dans les miroirs de Clar) n'ont ni douille ni culot. Elles sont mises en série sur un fil de cuivre nu et maintenues à une certaine distance par des perles de verre enfilées sur le fil de cuivre. Les boules de verre forment ainsi l'isolant du fil et les extrémités des fils sortant des ampoules sont simplement attachées aux conducteurs. La figure 497 permet de se rendre compte du mode de montage de ces « perles lumineuses », sans qu'il soit besoin d'insister.

* * *

Guidé par le succès du bec Auer, le professeur ***Nernst***, au lieu de s'adresser aux métaux, comme dans les lampes à incandescence, eut l'idée d'employer d'autres substances douées d'un grand pouvoir émissif, telles que les oxydes des terres rares. Mais une grave difficulté se présentait : pour que ces oxydes soient portés à l'incandescence par le passage du courant, il est nécessaire qu'ils conduisent ce courant. Or ces corps sont, à basse température, des isolants presque parfaits. Heureusement, vers 600°, ils acquièrent une conductibilité de nature électrolytique qui permet le passage d'un courant suffisant pour entretenir et pousser l'incandescence, car leur résistance diminue quand la température s'élève, comme c'est le cas pour tous les électrolytes.

Une nouvelle difficulté surgit alors : le régime de la lampe est éminemment instable. En effet, si le filament s'échauffe, sa résistance diminue et le courant qui le traverse augmente d'intensité. Par suite, le filament est porté à une température plus élevée et arrive bientôt à la rupture par fusion. Voici comment Nernst a résolu ces différents problèmes.

Le filament, ou plus exactement le bâtonnet, est formé d'une pâte plastique filée à la presse et desséchée. Cette pâte contient des agglomérants et de l'oxyde de zirconium mélangé à d'autres oxydes de terres rares. On peut aussi utiliser la magnésie, dont le pouvoir éclairant est considérable. Pour que le courant puisse passer dans le bâtonnet constituant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'élément éclairant, il faut *allumer* la lampe, c'est-à-dire porter la matière réfractaire à une température de 600°. Dans ce but, Nernst adjoint une

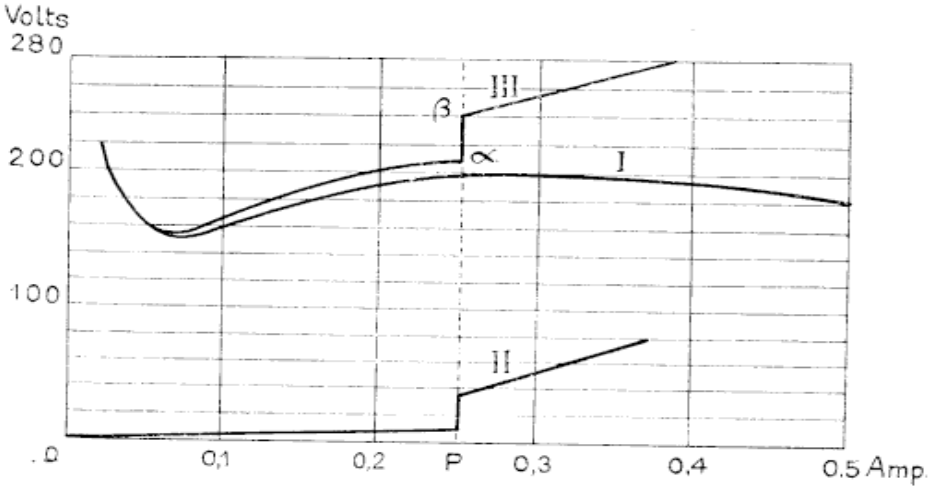


Fig. 498. — Courbes caractéristiques de la lampe Nernst.
I, caractéristique du filament seul ; II, caractéristique de la résistance seule ; III, caractéristique de la lampe.

spirale métallique noyée dans du kaolin qui constitue l'appareil d'allumage, dont un mécanisme électromagnétique coupe le circuit lorsque le filament devient conducteur.

Pour combattre l'instabilité du régime, on ajoute, en série avec la lampe, une résistance d'un métal tel que sa résistance augmente avec la température. Mais il importe, au point de vue pratique, qu'elle n'ait pas une consommation de courant trop forte tout en ayant un grand coefficient de température. Ces considérations ont fait choisir le fer, dont la résistance triple brusquement à la température du rouge naissant qui correspond à son premier point de transformation. Le fil de fer est enfermé dans une

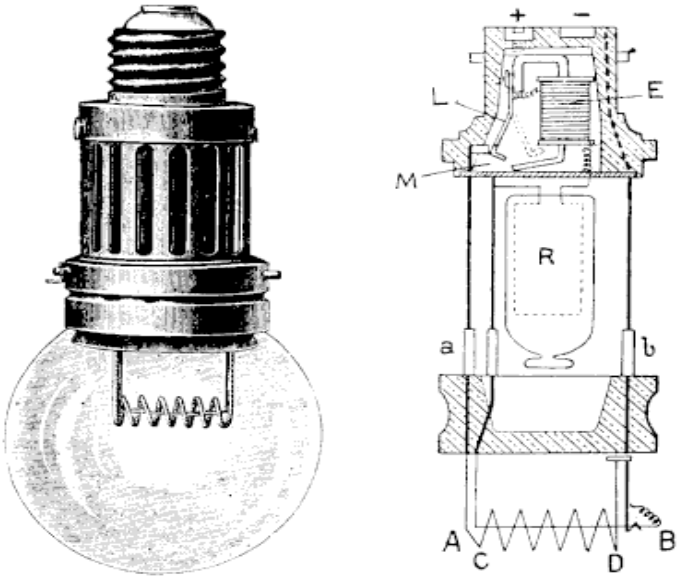


Fig. 499. — Lampe Nernst. Vue extérieure et schéma des connexions électriques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ampoule remplie d'hydrogène pour empêcher son oxydation. Le régime ainsi obtenu est d'une stabilité remarquable, ainsi que le montre la figure 498. Le voltage peut en effet varier de P_2 à P_3 sans que l'intensité et par suite l'éclat varient.

La figure 499 montre l'aspect extérieur d'une lampe Nernst ainsi que les connexions électriques.

Le bâtonnet éclairant AB est entouré par la spirale chauffante CD. Le courant électrique arrive par la vis marquée +, passe dans la lame de l'électro-aimant E, traverse la broche *a*, la spirale chauffante CD et revient à la borne marquée — par la broche *b*. Dès que le filament devient conducteur, le courant passe dans la bobine de l'électro-aimant, dans la résistance R (fil de fer fin dans une ampoule remplie d'hydrogène), dans le filament AB et revient par la broche *b* au pôle négatif. Sous l'influence de l'électro-aimant, la lame L se trouve attirée et coupe le circuit de chauffage en M. L'électro-aimant E joue donc le même rôle qu'un disjoncteur automatique.

Il n'a pas été possible de construire une lampe fondée sur l'emploi de conducteurs électrolytiques fonctionnant dans le vide, ce qui eût encore amélioré le rendement de la lampe Nernst. La consommation de cette lampe, qui donne une très belle lumière blanche, est voisine de 1,5 watt par bougie. Alimentée par du courant à 110 volts, la résistance en absorbe environ 15. La température du bâtonnet est voisine de 2 500°.

* * *

Pendant que les lampes à incandescence étaient l'objet de si remarquables travaux, les ***lampes à arc*** se perfectionnaient aussi. Avant de passer en revue les différents types de lampes à arc existant, il est nécessaire de faire l'étude de l'arc lui-même, qui est le siège de phénomènes particuliers dont la connaissance est indispensable pour la compréhension des problèmes à résoudre.

Nous avons vu que les corps conducteurs sont caractérisés par la facilité avec laquelle leurs atomes perdent un électron laissant comme résidu un ion positif. S'il existe au voisinage du conducteur un champ électrique qui en éloigne les électrons au fur et à mesure de leur production, et si la température est suffisamment élevée, afin d'accroître l'émission électronique, on constate le passage d'un véritable courant, c'est l'*émission thermo-ionique* que nous avons étudiée précédemment (voir chapitre X).

Sous l'influence du champ électrique existant entre les deux charbons d'un arc, les électrons émis par la cathode se précipitent vers l'anode avec une vitesse telle qu'ils la portent à l'incandescence lorsqu'ils la rencontrent.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les arcs très puissants, comme ceux des projecteurs qui consomment une centaine d'ampères, ce jet d'électrons est si puissant qu'il produit à l'extrémité de l'anode un cratère taillé obliquement en sifflet quand la cathode est légèrement désaxée, et pousse la flamme à contre-sens. La vaporisation de l'anode qui se produit ainsi sous l'influence du choc des électrons n'est qu'une évaporation facilitée par l'incandescence et par la force électromotrice qui tend à libérer les molécules ionisées par le choc (c'est ce que M. Blondel appelle l'*électrovaporisation*).

Ainsi donc, lorsqu'entre les charbons on établit une différence de potentiel suffisante pour que l'ionisation par choc se produise (c'est pourquoi il faut une tension minima pour que l'arc s'amorce), il y a un flux d'électrons sortant de la cathode et frappant l'anode et un flux d'ions positifs émis par l'anode et se dirigeant vers la cathode, la recombinaison pouvant avoir lieu soit près de la surface d'une des électrodes, soit à la rencontre des deux flux d'ions projetés. Dans les arcs à charbons minéralisés, ces deux flux sont visibles sous forme de panaches lumineux.

Mais l'arc électrique présente aussi des phénomènes d'un ordre tout différent, qu'on peut appeler des *effets de luminescence* et qui ont leur siège exclusivement dans la partie gazeuse de l'arc.

Lorsque l'on incorpore dans les charbons des substances minérales facilement vaporisées, ces substances se dégagent dans l'arc et, sous l'influence du choc des électrons et des ions, elles sont portées à l'incandescence.

D'après les théories de Lorenz et de Zeeman, les effets lumineux des flammes minéralisées sont dus aux oscillations libres des ions décomposés ayant une très faible masse par rapport à celle des molécules non ionisées. Ces dernières, quand elles sont portées à l'incandescence par les chocs des ions, vibrent forcément à une fréquence moindre et donnent une émission de lumière sans un accompagnement aussi considérable de radiations calorifiques que dans le cas des solides portés à l'incandescence. Cette luminescence ne peut avoir pour cause un simple échauffement, car l'élévation de température d'un gaz ne fait qu'augmenter sa pression et la luminosité des gaz à haute température est très faible. Il faut qu'il y ait soit une combinaison chimique, soit une vibration forcée des molécules produite par le passage d'un courant électrique.

* * *

On peut donc ***augmenter le rendement des arcs*** en agissant soit sur l'incandescence, soit sur la luminescence.

Il est difficile d'accroître la température de l'arc, qui se trouve limitée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par la température d'évaporation du carbone. Aussi, comme dans les lampes à incandescence, a-t-on emprunté aux métaux à l'état pur leurs propriétés sélectives pour augmenter le rendement lumineux, mais ils donnent des scories gênantes. On a cherché également à employer comme électrode, ou à chauffer dans l'arc, des corps blancs ou analogues, présentant soit une réduction de l'émission des radiations calorifiques, soit un pouvoir émissif exceptionnel pour les radiations visibles. Mais le choix des substances utilisables est limité par la loi du déplacement de Wien qui a une importance considérable dans ces cas, puisque la température est très élevée. Le maximum d'émission se déplace vers les radiations très réfrangibles et l'ultra-violet, de sorte que par exemple le mélange des manchons Auer, qui donne d'excellents résultats à la température du bec Bunsen, n'émet plus qu'une lumière peu éclairante aux températures très élevées réalisées dans les arcs électriques. Au contraire, les composés blancs à base de calcium ou des métaux voisins (zinc, strontium, baryum), qui ne donnent dans la flamme du gaz qu'une teinte rougeâtre, ont, à la température de l'arc électrique, leur maximum d'émission dans le jaune, c'est-à-dire la région la plus favorable du spectre.

Dans la lampe à arc ordinaire, 85 p. 100 de la lumière émise provient du cratère positif, 5 p. 100 du charbon négatif et 10 p. 100 de l'arc lui-même. Le rendement est d'ailleurs excellent (0,6 watt par bougie).

Pour éviter l'usure des charbons par oxydation à l'air, on a construit des lampes à *arc enfermé*, dont les propriétés sont nettement différentes de celles de l'arc ordinaire. L'arc est très allongé et fonctionne sous une tension de 75 à 80 volts, double de la tension ordinaire. Dans ces lampes (Lilliput, Marks, Janders, etc.), la combustion est considérablement retardée et le renouvellement des charbons ne se fait que toutes les cent ou cent cinquante heures.

Malheureusement, les arcs enfermés diffèrent des arcs libres en ce qu'ils possèdent une lumière beaucoup plus bleue et surtout un rendement médiocre qui n'atteint pas les deux tiers de celui des arcs ordinaires (Blondel), même lorsque la lampe fonctionne bien et qu'aucun dépôt accidentel de charbon sur les globes ne vient encore en diminuer l'éclat.

Pour tirer le meilleur parti de la luminescence, il n'y a pas d'autre moyen que de chercher expérimentalement les substances vaporisables qui soient facilement ionisables et présentent le spectre le plus avantageux. Comme les vapeurs des métaux donnent en général des spectres surtout riches en radiations bleues, violettes et ultra-violettes, le choix est assez limité.

C'est, en particulier, le cas pour l'arc dans le vide, qui exige des électrodes très fusibles. Le mercure est le seul corps pratique, bien que Kuch et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Retchinski aient réussi, dans les lampes en quartz, à utiliser le plomb, le bismuth, l'étain, l'antimoine, etc. Il faut alors chauffer préalablement le tube et les électrodes pour que l'arc puisse s'établir, puis les refroidir pour éviter leur échauffement excessif pendant que l'arc fonctionne.

Dans les *arcs à flammes* formés d'électrodes additionnées de substances minérales, la luminescence est d'autant plus forte que l'ionisation est plus grande dans la flamme et que le spectre tend vers celui des métaux constituants. Plus l'arc est court et de grande intensité, plus les phénomènes d'incandescence tendent à prédominer sur ceux de luminescence.

Nous avons vu que l'anode, sous l'action du bombardement cathodique, a tendance à se vaporiser. Suivant les cas, il y a intérêt à favoriser ce phénomène ou au contraire à le réduire au minimum.

C'est ainsi que dans les arcs flamme entre électrodes contenant des matières alcalino-terreuses, il y a avantage non seulement à produire une électrovaporisation à l'anode, mais encore à minéraliser les deux électrodes, afin d'avoir deux sources de luminescence. Par contre, dans l'arc au mercure, si on laisse l'anode se vaporiser, il en résulte une pression plus grande à l'intérieur du tube, la colonne de vapeur devient plus résistante et le rendement lumineux diminue finalement, malgré la lumière supplémentaire dégagée à l'anode.

* * *

M. Blondel distingue les catégories suivantes dans les arcs électriques reposant sur les phénomènes de luminescence :

1° Arc dit *à flamme* entre électrodes mixtes formées de charbon mélangé de substances minérales (arc carbo-minéral, par exemple)

2° Arc dit *métallique* entre métaux ou entre métal et charbon (arc au titane, par exemple) ;

3° Arc entre *oxydes* ou composés métalliques purs (arc entre bâtonnets de zircone, par exemple) ;

4° Arc entre *métaux* dans le vide (arc au mercure, par exemple).

* * *

Les ***arcs flamme*** sont très nombreux et peuvent être groupés en trois classes :

a. Charbons minéralisés homogènes (Bremer) ;

b. Charbons ordinaires à mèche additionnée de substances minérales ;

c. Charbons à deux zones formées d'un noyau minéralisé d'une manière homogène entouré d'une enveloppe en charbon pur (Blondel).

Dans les charbons de cette dernière catégorie, l'addition de l'enveloppe

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a pour but d'éviter les scories que donnent en abondance les charbons homogènes minéralisés et qui font qu'on ne peut les employer qu'avec les pointes dirigées vers le bas pour que les scories fondues s'écoulent en gouttes. Cette condition à remplir a forcé à employer des lampes spéciales dites *intensives* (Bremer par exemple) dans lesquelles les charbons, au lieu d'être placés l'un au-dessus de l'autre, sont disposés sous forme d'un V tournant sa pointe vers le bas.

Au contraire, les charbons à enveloppe peuvent être employés dans les lampes dites *carbo-minérales* (Blondel), à charbons placés l'un au-dessus de l'autre.

Les charbons à mèche peuvent être montés dans les deux types de lampes, mais s'y comportent différemment par suite du petit diamètre de la mèche. En effet, l'arc se forme à la fois sur le corps principal du charbon en carbone pur et sur la mèche centrale. Il en résulte que, pour maintenir constante la proportion des substances minérales dans l'arc et obtenir un degré de minéralisation aussi élevé que dans les deux autres catégories d'arcs, on est conduit à employer des charbons de petit diamètre (7 à 9 millimètres pour un arc de 10 ampères), très longs (jusqu'à 80 centimètres), à cause de leur usure rapide (3 à 4 centimètres à l'heure). Cette grande longueur fait que la résistance électrique des charbons est très considérable, et on est ainsi conduit à ajouter des âmes métalliques (fils de cuivre ou d'aluminium) pour amener le courant, ou encore à utiliser des contacts frottant au voisinage immédiat des pointes des charbons.

Dans certaines lampes intensives (Beck par exemple), la disposition en V des charbons a été mise à profit pour simplifier le mécanisme de réglage. Les charbons descendent par leur propre poids et l'un d'eux porte une nervure par laquelle il repose sur un support métallique et règle l'avance du système des deux charbons.

Dans les lampes intensives, les charbons homogènes du type Bremer sont remplacés maintenant par des charbons à mèches.

Au contraire, dans les lampes à charbons disposés l'un au-dessus de l'autre, on emploie presque exclusivement des charbons à enveloppe. Lorsque l'on opère avec du courant continu, il faut se servir de deux charbons de composition différente. Le charbon supérieur (la cathode) doit être faiblement minéralisé pour éviter la chute des scories sur le charbon inférieur (l'anode) qui est plus fortement minéralisé.

Le corps principal de la composition est toujours le fluorure de calcium, mais on doit l'additionner de borates et de silicates (alcalino-terreux principalement) pour régulariser sa vaporisation et donner une lumière plus blanche. Le charbon est constitué de deux zones : la zone centrale est très minéralisée (jusqu'à 50 p. 100), tandis que la zone extérieure est faite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en charbon presque pur et constitue une enveloppe protectrice destinée à empêcher l'accès de l'air autour du noyau intérieur qui se trouve ainsi préservé de la scorification due, dans les charbons homogènes Bremer, à une combustion prématurée du carbone. En même temps, cette enveloppe bonne conductrice compense la mauvaise conductibilité du noyau minéralisé.

Les charbons minéralisés ont tous l'inconvénient de donner d'abondantes fumées renfermant en particulier du peroxyde d'azote. Aussi les lampes dans lesquelles on les emploie doivent-elles être munies de dispositifs spéciaux pour leur élimination.

* * *

Les ***arcs métalliques*** fonctionnent entre des métaux ou des alliages. On s'est adressé tout d'abord aux oxydes de fer, et spécialement à la magnétite (oxyde de fer magnétique) qui donne un peu plus de lumière que le métal ou l'oxyde rouge et s'use moins vite (3 millimètres environ par heure). En réalité, la lumière provient des impuretés, en particulier du titane et des métaux analogues. Aussi actuellement incorpore-t-on directement du titane pur ou son oxyde (rutile) dans une électrode formée d'oxyde de fer plus ou moins réduit, afin de le rendre conducteur (formant ainsi une électrode presque entièrement métallique) et contenu dans un tube de fer. L'addition de titane est limitée par la formation de scories de carbure de titane infusible.

On emploie surtout avantageusement le ferro-titane, obtenu soit directement au four électrique, soit par réduction d'un mélange de fer et de rutile. On peut alors augmenter la proportion de titane, mais les scories limitent encore les compositions.

L'arc au titane nécessite en plus une construction spéciale de la lampe. Il est en effet très instable, et on est obligé de le fixer par un courant d'air assez énergique qui sert en même temps à entraîner les fumées opaques. De plus, les scories de carbure de titane sont isolantes, et il faut prévoir un dispositif spécial pour qu'à l'allumage, l'arc puisse s'établir entre deux parties non recouvertes de scories.

L'intérêt de ces arcs est qu'ils donnent une belle couleur et que leurs électrodes ont une longue durée. D'autre part, ils ont un rendement lumineux peu supérieur à celui des arcs au carbone, sont plus instables et la présence dans leurs radiations de nombreuses radiations ultra-violettes en limite actuellement l'emploi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

L'idée de faire jaillir l'arc entre des électrodes formées d'oxydes qui ne s'usent pas à l'air est séduisante, mais, actuellement, malgré de nombreux essais, il ne semble pas que l'on soit arrivé à une solution réellement pratique.

* * *

Dans les ***arcs entre métaux dans le vide***, dont l'arc à mercure est le meilleur exemple, les phénomènes sont un peu différents de ceux que l'on observe dans l'arc métallique à l'air libre.

Il se forme un foyer lumineux très brillant à la cathode. Les électrons qui en sont émis viennent ioniser par choc la colonne de mercure située en avant et qui forme une partie de la colonne de lumière anodique. Nous avons dit précédemment qu'il y a intérêt à empêcher l'électrovaporisation de l'anode; aussi la constitue-t-on soit en charbon ou en métal, soit en mercure refroidi. La lampe à vapeur de mercure réalise donc un arc à une seule électrode électrovaporisée, tandis qu'il y a en deux dans tous les autres arcs lumineux.

L'emploi de tubes de quartz pour constituer les lampes à vapeur de mercure joint à la diminution de leur longueur ont permis d'augmenter notablement le rendement lumineux et d'améliorer la qualité de la lumière qui, ainsi qu'on le sait, est caractérisée par la grande intensité des radiations bleues et l'absence ou l'insuffisance de radiations rouges. Dans les lampes Heræus, par exemple, on arrive à concentrer la vapeur de mercure en un filet de 4 à 5 millimètres de diamètre occupant l'axe du tube et porté à une température de 5 000 à 6 000°, la température la plus haute que l'on puisse réaliser actuellement. Les phénomènes d'incandescence ont alors une part importante dans la production de la lumière. A ces températures, le maximum de l'énergie émise par incandescence est en effet dans la région optima pour la vision et la lumière totale de la lampe est d'une teinte beaucoup plus satisfaisante.

* * *

Nous avons rapidement exposé les différents procédés d'obtention de la lumière par le passage de l'électricité, soit sous forme d'arc jaillissant à l'air libre entre des conducteurs de compositions chimiques diverses, soit sous forme d'arc se produisant dans la vapeur d'un métal vaporisé.

Il nous reste maintenant à examiner comment ces divers modes d'éclairage ont été ***réalisés pratiquement***. Nous commencerons par l'étude

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des lampes à arc. Nous la diviserons en deux parties distinctes : d'abord la préparation des charbons, ensuite la réalisation électrique et mécanique des appareils dans lesquels brûlent ces charbons.

* * *

L'***industrie des charbons*** électriques présente une physionomie très particulière, à cause de l'importance très grande que présentent les divers tours de main et de l'absence presque complète de documentation spéciale dans les périodiques scientifiques. Il n'est donc pas possible de donner tous les détails de fabrication, et nous devons nous borner à esquisser les grandes lignes des préparations. Les renseignements qui suivent nous ont été gracieusement communiqués par la C^ie^ lorraine de charbons lampes et appareillage électriques.

Les matières premières sont broyées à un degré de finesse qui dépend des résultats à obtenir. En tout cas, pour atteindre un résultat déterminé, un contrôle granulométrique très soigné doit être effectué de façon absolument régulière.

Les diverses poudres à agglomérer sont ensuite malaxées ensemble à sec dans un mélangeur-pétrisseur d'un type spécial.

Après trituration suffisante à sec, on ajoute une matière agglomérante qui est le plus souvent constituée soit par du brai, soit par du goudron de houille. Le mélange est effectué à chaud et, lorsque la trituration est suffisamment parfaite, ce que seule l'habitude permet d'apprécier, la pâte obtenue, qui est encore mal liée, est laminée soit sous des meules roulant sur une piste (genre des anciens broyeurs à meule de boulangerie), soit dans un système de cylindres formant calandre.

Ce malaxage a pour effet de mouiller complètement tous les grains et de transformer la structure de la pâte. Le mélange précédent n'a eu pour résultat que de disperser l'agglomérant en gouttelettes enrobées chacune dans la poudre restée sèche. Le meulage amène ces conglomérats hétérogènes à l'état de pâte homogène extrêmement épaisse.

Cette pâte est alors amenée à l'état compact au moyen d'une pression hydraulique très élevée, et, dans le cas des charbons de lampes à arc, forcée à travers une filière de forme appropriée. Si la pièce doit être munie d'un trou central, la filière supporte une aiguille qui empêche la pâte de sortir au centre et réserve ainsi le trou du charbon.

On obtient des pièces qui sont encore molles, surtout à chaud, et dont la conductibilité électrique est pratiquement nulle. Pour obtenir un charbon dur, compact, conducteur, une cuisson finale est nécessaire. Elle a pour effet de carboniser l'agglomérant, tout en déterminant un certain

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

retrait (d'environ 1 à 4 p. 100 sur les dimensions linéaires) qui contribue à la solidité de l'ensemble. La température de cuisson est généralement comprise entre 1 000° et 1 400°.

Dans certains cas, le procédé général ci-dessus est modifié, soit pour tenir compte de ce que l'agglomérant n'est pas le goudron (il peut être le glucose, la mélasse, etc.), soit pour tenir compte des propriétés des substances introduites.

Pour les charbons munis d'une âme différente de l'écorce extérieure, cette âme est le plus souvent introduite après cuisson de l'écorce. A cet effet, celle-ci est remplie sous pression d'une pâte relativement claire comportant comme agglomérant soit du silicate de potasse liquide, soit des agglomérants organiques, et les charbons ainsi méchés sont ensuite étuvés à une température convenable, mais toujours relativement basse. Parfois le tube de charbon est muni d'un autre charbon plein préparé exactement comme le tube lui-même par moulage sous pression suivi de cuisson.

Dans tous les cas, une fois le charbon solide et durci, on lui fait subir des opérations purement mécaniques destinées à lui donner les dimensions et la forme exacte correspondant à chaque emploi.

On fabrique également des charbons dits *graphitiques*, dont la préparation repose sur la transformation plus ou moins totale du carbone amorphe introduit dans les compositions, en graphite. Le procédé le plus employé à cet effet a été inventé par Acheson et consiste simplement à utiliser les pièces à graphiter comme résistances d'un four électrique. Les pièces sont calorifugées en les emprisonnant dans une matière pulvérulente aussi peu conductrice que possible et qui ne subit pas de transformation, du fait de la haute température à laquelle elle se trouve portée (on emploie généralement du charbon de bois ou du coke).

La résistance des charbons diminue au fur et à mesure de l'avancement de la graphitation, de sorte que l'on doit brancher le four sur un réseau à voltage variable. Le plus pratique consiste à utiliser un transformateur variable qui donne tous les voltages voulus entre 150 et 75 volts environ. Bien entendu, ces voltages dépendent de la résistance du four, c'est-à-dire à la fois de ses dimensions et de la nature des pièces à graphiter.

On admet que la graphitation pratiquement complète exige dans les conditions moyennes de 7 à 10 kilowatts-heure par kilogramme de charbon graphité. Cette consommation est d'autant plus faible que l'isolement thermique et électrique du four est meilleur et que la graphitation est favorisée par la présence d'un catalyseur.

Dans un autre procédé, inventé en France par Girard et Street, les barres à graphiter défilent à une vitesse convenable dans un arc élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trique. Cette méthode n'est employée que dans certains cas particuliers.

L'effet de la graphitation est d'accroître le retrait obtenu par une cuisson préalable et d'améliorer considérablement la conductibilité électrique.

Ajoutons que les diverses colorations de flammes sont données en général par addition des sels suivants :

Fluorure de calcium pour la lumière jaune ;

Fluorure de baryum pour la lumière jaune verdâtre ;

Fluorures des métaux des terres rares pour la lumière blanche ;

Composés divers de magnésium, zinc, aluminium, fer, pour donner des rayonnements actiniques riches en rayons ultra-violets.

Les divers spectres des métaux en présence pouvant avoir des réactions les uns sur les autres, l'expérience seule indique les proportions des divers minéralisants à adopter dans chaque cas particulier.

Pour accroître la durée d'utilisation des charbons, on y incorpore fréquemment de petites quantités de substances métalloïdiques, généralement de l'acide borique.

* * *

Le problème qu'ont résolu les constructeurs pour utiliser pratiquement l'arc électrique à l'éclairage est extrêmement délicat.

Il faut d'abord amener les charbons au contact, puis les écarter à une certaine distance (1 à 6 millimètres, suivant les intensités du courant employé), afin que l'arc s'amorce, et ensuite imaginer un réglage qui les maintienne à une distance constante l'un de l'autre pendant le fonctionnement de la lampe.

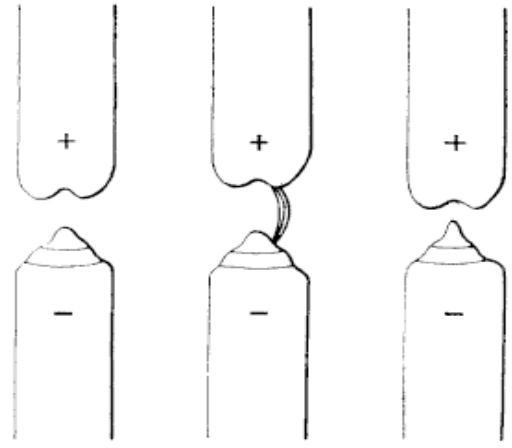


Fig. 500. — Divers aspects des charbons des arcs électriques.

Nous avons vu que le cratère positif, tout au moins dans les lampes à arc fonctionnant sur courant continu, et à charbon pur, est le siège de l'émission lumineuse. Aussi le place-t-on à la partie supérieure.

Pour que l'arc soit stable, il faut, pour chaque régime, une distance bien déterminée entre les deux charbons, de façon à ce qu'ils présentent au bout de quelques minutes de fonctionnement la forme *a*, figure 500.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si les charbons sont trop éloignés, la pointe du charbon négatif s'arrondit, il se produit une forte flamme qui consume les charbons (*b*, fig. 500).

Lorsque, au contraire, les charbons sont trop rapprochés, le charbon négatif s'use en présentant une pointe effilée, l'arc fait entendre un fort sifflement, la lumière est faible et il se produit rapidement des filaments ou « champignons » qui réunissent les deux charbons et les mettent en court-circuit (*c*, fig. 500).

Les tableaux suivants donnent les longueurs des arcs en fonction de la tension aux bornes et de l'intensité du courant pour une lampe ordinaire alimentée par le courant continu et par le courant alternatif.

Courant continu.

Intensité	3	6	9	12	15	20	30	40 ampères.
Tension aux bornes	36	38	41	42	43	44	45	52 volts.
Longueur de l'arc	0,7	1,6	2,5	3,2	3,5	4,2	5	6 millim.

Courant alternatif.

Intensité	6	10	15	20	35	ampères
Tension aux bornes	28	29	31	32	34	volts.
Longueur de l'arc	1,5	1,7	1,9	2	2,7	millim.

Ces nombres varient d'ailleurs suivant les types de lampes employés.

Les charbons s'usent inégalement lorsque l'arc est alimenté en courant continu, le positif environ deux fois plus vite que le négatif ; aussi lui donne-t-on en général une section à peu près double de celle du charbon négatif.

* * *

L'***agent de réglage*** est le courant alimentant la lampe. Il faut que le dispositif mécanique qu'il actionne soit suffisamment sensible et précis pour que le mouvement des charbons suive immédiatement et sans à-coups toute variation du courant, même légère. On a établi de nombreux types de lampes ; tous emploient les propriétés des électro-aimants et peuvent se classer, abstraction faite des dispositifs de détail, en trois catégories, suivant le mode d'accouplement du circuit de réglage et du circuit d'alimentation de l'arc.

1° *Lampes série.* — Le courant total alimentant la lampe passe dans un électro-aimant E dans lequel peut se déplacer un noyau de fer doux F (fig. 501). Les mouvements de ce noyau de fer sont rendus solidaires de ceux du charbon positif, le charbon négatif étant fixe dans la lampe

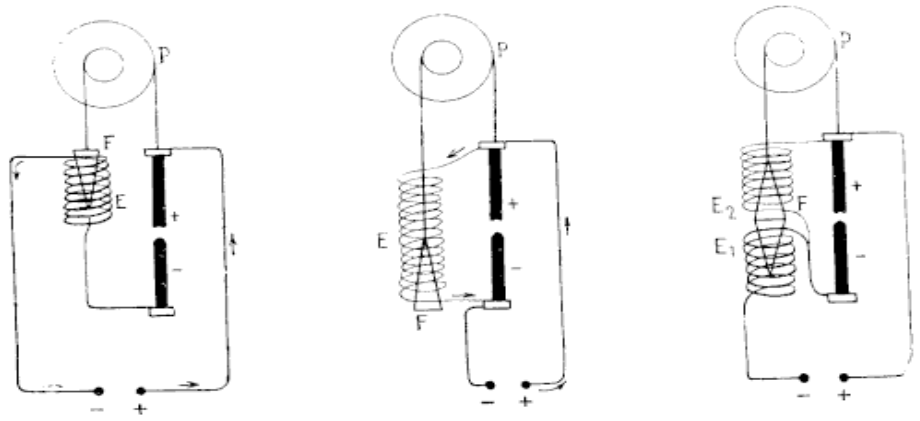
A cet effet, par exemple, le charbon positif et son support sont fixés à une cordelette qui passe sur une poulie P. Leur poids est en partie équi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

libré par celui du noyau de fer doux F, qui est également fixé à une cordelette solidaire de la poulie P.

Lorsque le courant ne passe pas, les deux charbons sont *au contact*. Aussitôt que le circuit d'éclairage est fermé, l'électro-aimant E est excité et attire le noyau de fer F, déterminant l'écartement des deux charbons. L'arc est amorcé et les poids des divers organes sont calculés de façon à ce que la position d'équilibre en fonctionnement corresponde à la longueur convenable de l'arc.

Si l'intensité diminue, l'électro-aimant attire moins fortement le noyau de fer F et les deux charbons se rapprochent. Au contraire, si l'intensité



Montage en série. Montage en dérivation. Montage différentiel.

Fig. 501. — Les systèmes de réglage des lampes à arc.

augmente, l'attraction devient plus forte et les charbons s'écartent. Nous avons donc bien réalisé un système de réglage.

Mais ce dispositif n'est utilisable que dans des cas spéciaux. Une lampe ainsi construite ne fonctionnera bien que si elle se trouve *seule* dans le circuit d'éclairage. En effet, supposons qu'il y ait deux lampes en série dans le circuit et admettons que la première fonctionne normalement, tandis que les charbons de la seconde sont trop écartés. Le régulateur de cette dernière rapprochera les charbons et augmentera par suite l'intensité totale qui circule dans le circuit. Immédiatement, le régulateur de la première lampe entrera en action et écartera les charbons. Si la deuxième lampe brûle maintenant normalement, c'est la première qui fonctionne dans de mauvaises conditions. On voit donc que le réglage est déplorable, même lorsqu'il n'y a que deux lampes branchées sur le circuit. *A fortiori*, lorsqu'il y en a un plus grand nombre, est-il impossible de l'utiliser.

2° *Lampes tension ou dérivation.* — Une simple modification permet de remédier à ces inconvénients. Il suffit de diviser le courant arrivant à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lampe en deux circuits dérivés. Dans l'un, on intercale la lampe et, dans l'autre, le système régulateur (fig. 501). Le circuit de réglage ne devant consommer qu'une intensité assez faible, pour ne pas nuire au circuit de l'arc, au lieu de le constituer par une bobine à gros fil comme dans le cas précédent (où toute l'intensité traversait l'électro-aimant), on l'établit en fil fin, et on compense par un plus grand nombre de spires la diminution de la force attractive qui en résulterait.

Le noyau de fer F est à la partie inférieure, et son poids est un peu supérieur à celui du charbon positif et de son support.

Lorsque le courant ne passe pas, les deux charbons sont *écartés*. Aussitôt que le circuit d'éclairage est fermé, le courant passe dans l'électro-aimant E, le noyau de fer est attiré vers l'intérieur de la bobine, il se soulève et les deux charbons viennent au contact. L'arc s'allume, mais alors, la plus grande partie du courant passant par l'arc, la chute de tension aux bornes du solénoïde diminue brusquement, le noyau de fer F est moins attiré et les charbons s'écartent jusqu'à ce qu'il y ait équilibre.

Si l'écart des charbons augmente, la différence de potentiel aux bornes de l'arc diminue, donc elle croît aux bornes de l'électro-aimant qui attirera alors plus énergiquement le noyau de fer, ce qui déterminera le rapprochement des charbons. C'est ici la différence de potentiel aux extrémités du solénoïde qui est maintenue constante de façon que son attraction ait toujours la même valeur sur le noyau de fer F.

La valeur réelle du courant dans les deux branches importe moins que dans le cas précédent, car les variations du circuit extérieur modifient les intensités dans les deux branches dans les mêmes proportions. Cependant, elle n'est pas sans avoir encore une action sensible.

En effet, si le courant arrivant à la lampe devient trop intense, il passe avec une grande intensité dans les dérivations : l'arc devient plus fort que normalement. En même temps, l'électro-aimant de réglage a également une action plus énergique, ce qui tend à faire encore rapprocher les charbons. Le courant déjà trop intense augmente encore d'intensité. L'inverse a lieu pour une intensité trop faible.

Deux lampes montées en série éclairent donc ou trop ou pas assez. Par contre, lorsqu'on les branche séparément dans des circuits parallèles, la tension étant constante aux extrémités de ces dérivations parallèles, le fonctionnement est excellent.

3° *Lampes à régulateur différentiel.* — Dans ces lampes, on combine les deux modes de réglage précédents. Comme on le voit sur la figure 501, le noyau de fer doux F est beaucoup plus long que dans les systèmes série et dérivation et s'engage dans deux solénoïdes E_1, E_2.

E_1 est l'électro-aimant du système série (gros fil, parcouru par le cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rant total de la lampe) ; E_2 est l'électro-aimant du montage en dérivation (fil fin, parcouru par une fraction du courant total).

Les charbons étant initialement en contact, lorsque l'on ferme le circuit, le régulateur E_1 entre en jeu et les écarte. Mais immédiatement E_2 entre en action et tend à les rapprocher. L'action différentielle est ainsi obtenue très facilement.

Le réglage maintient donc invariable le rapport entre la tension (dans la bobine E_2 en dérivation) et l'intensité (dans la bobine E_1). Or, ce rapport est précisément la résistance de la lampe. Plusieurs lampes montées en série conservent donc toujours la même résistance et par suite la même intensité. Aussi ces lampes sont-elles préférables à toutes les autres pour le montage en série.

En résumé, on peut dire, pour caractériser les trois modes de réglage que nous venons de décrire, que :

1° Une lampe série agit sur l'intensité du courant, qu'elle maintient constante.

2° Une lampe en dérivation agit sur la tension du courant qu'elle maintient constante.

3° Une lampe différentielle agit sur la résistance, qu'elle maintient constante.

Ajoutons que, lorsque l'on monte en série plusieurs lampes des types 2 ou 3, il est indispensable d'ajouter à l'installation un dispositif qui permette d'enlever du circuit une lampe qui viendrait à ne plus fonctionner, par suite de la rupture d'un charbon, par exemple. En effet, en l'absence de ce dispositif, le courant total passerait par la dérivation de la lampe éteinte, c'est-à-dire que le fil fin de l'électro-aimant brûlerait, tandis que d'un autre côté le courant que laisserait passer cette bobine serait si faible que les autres lampes s'éteindraient. Aussi, un petit aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant de la lampe intercale un fil épais à la place des charbons au moment où l'intensité du courant augmente trop fortement dans la bobine du régulateur.

* * *

Les types de lampes des divers constructeurs diffèrent très peu entre eux au point de vue du réglage électrique. Au contraire, pour la partie mécanique, ils présentent de nombreuses variantes. Dans la plupart des lampes, en effet, les électro-aimants n'agissent pas directement sur le mouvement des charbons. Ils mettent le plus souvent en action des mécanismes plus ou moins complexes, ayant pour but d'obtenir plus de douceur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans les déplacements et d'éviter le « pompage », c'est-à-dire les oscillations des charbons autour de leur position d'équilibre.

Nous ne décrirons que quelques-uns de ces systèmes à titre d'exemple

* * *

Le ***régulateur Pilsen*** est le plus simple. Il est représenté schématiquement figure 502.

Les deux porte-charbons sont fixés à l'extrémité d'une cordelette qui passe sur une poulie mobile P. Le porte-charbon supérieur D est plus lourd que le porte-charbon C. Par conséquent, lorsque le courant ne passe pas, les deux charbons sont en contact. Les porte-charbons sont prolongés par des noyaux de fer doux, F, F′ engagés dans deux bobines S et S′, l'une en série dans le circuit (S), l'autre en dérivation (S′).

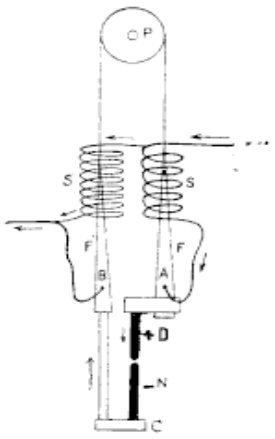


Fig. 502. — Régulateur Pilsen.

Lorsque l'on ferme le circuit, S attire F, séparant ainsi les deux charbons : l'arc s'amorce. Lorsqu'il s'allonge, le courant diminue dans S et il passe une intensité plus forte dans S′. Par suite, le noyau F étant moins attiré, le charbon P descend, tandis que simultanément, sous l'action de l'attraction plus forte de S′, le charbon N remonte. Les actions des deux bobines ont donc pour effet de rapprocher les charbons.

* * *

Dans le ***régulateur Brianne*** (fig. 503), un volant dentelé V porte en son centre une petite roue dentée A actionnant une crémaillère solidaire du charbon supérieur P. Le volant V est mis en mouvement par le secteur denté C, lui-même commandé par le levier coudé ODF dont l'extrémité F est formée par un noyau de fer doux engagé dans le solénoïde S.

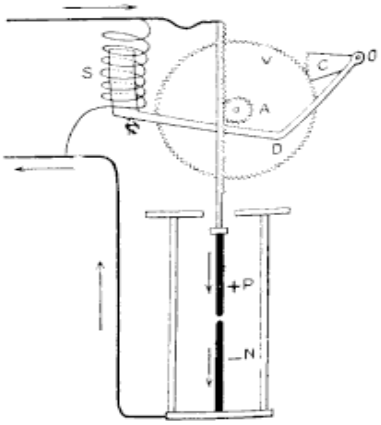


Fig. 503. — Régulateur Brianne.

Lorsque le courant ne passe pas, le noyau F tombe sous l'action de son poids et maintient les deux charbons écartés. Quand le circuit est fermé, F est attiré, le secteur denté C entraîne le volant V et la roue dentée A qui rapproche les deux charbons jusqu'au contact. Mais alors, l'intensité dans S diminuant, les deux charbons se séparent et l'arc s'amorce. Quand

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la distance des charbons augmente, l'intensité dans S croît, F se trouve attiré et les charbons se rapprochent.

* * *

Les montages et les régulateurs que nous venons de décrire fonctionnent aussi bien sur courant alternatif que sur courant continu. En effet, la régulation électrique est toujours obtenue par le mouvement d'attraction d'un électro-aimant sur son armature ou par l'aspiration d'un noyau de fer dans une bobine. Or, un électro-aimant attire le fer doux aussi bien par son pôle nord que par son pôle sud, parce que ses pôles induisent toujours dans le fer du magnétisme de nom contraire. Dans le second type de réglage, la bobine attire le noyau de fer, quel que soit le sens du courant qui la parcourt. Ces deux modes de régulation s'appliquent donc aussi bien aux courants alternatifs. Il faut cependant, dans les lampes destinées à fonctionner sur courant alternatif, ne pas oublier de feuilleter le fer de l'électro-aimant, afin d'éviter les échauffements par courants de Foucault.

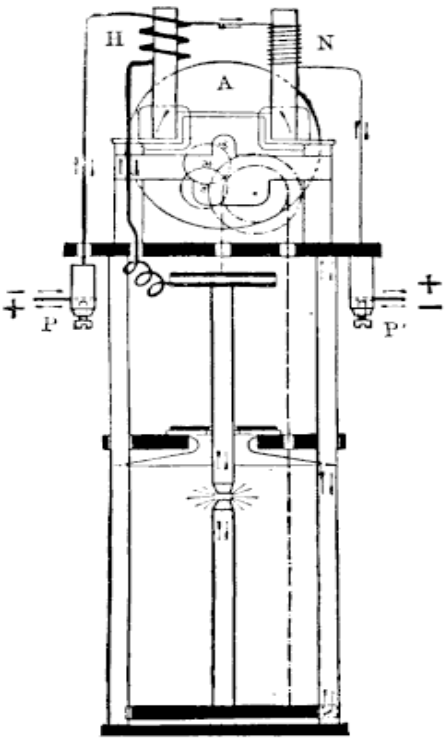


Fig. 504. — Régulateur A. E. G.

* * *

Il existe des systèmes de réglage qui, au contraire, ne fonctionnent que sur *courant alternatif*. Nous n'en décrirons qu'un : le ***régulateur à moteur A. E. G.*** La figure 504 en montre le principe. Un disque d'aluminium A peut tourner entre les pièces polaires de deux électro-aimants, l'un en série, H, l'autre en dérivation, N, sur le circuit. Les pôles de ces deux aimants sont partiellement recouverts de plaques de cuivre. Lorsque le courant alternatif passe, il engendre, aussi bien dans le disque en aluminium que dans les plaques de cuivre, des courants d'induction qui déterminent une rotation du disque mobile A. Les charbons sont reliés à ce disque par l'intermédiaire de roues dentées. L'électro-aimant en série tend à écarter les charbons, tandis que l'électro-aimant en dérivation, au con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

traire, a pour effet de les rapprocher. Le courant est branché aux bornes P et P'.

* * *

Les lampes à arc flamme dans lesquelles les charbons, au lieu d'être disposés l'un au-dessus de l'autre, sont disposés de façon à former un V, nécessitent une construction différente de celle des lampes ordinaires, et nous allons en décrire quelques types.

La ***lampe Bremer*** (fig. 505) a ses porte-charbons guidés par des tiges fixes, A et B, sur lesquelles ils peuvent glisser solidairement avec un poids P qui actionne un mouvement d'horlogerie M. Celui-ci est commandé par l'électro-aimant E qui détermine également, par l'intermédiaire du doigt D et du système de leviers L, L', L'', le mouvement de la pointe inférieure du charbon négatif.

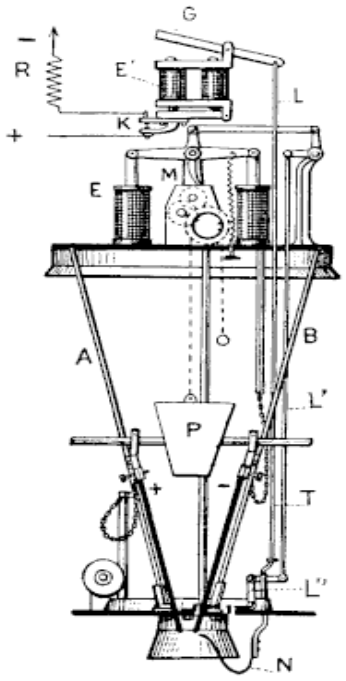


Fig. 505. — Lampe Bremer.

Comme les scories formées sur les charbons empêchent, comme nous l'avons déjà dit, l'établissement direct de l'arc entre eux, au moment de la mise en circuit, l'électro-aimant E' attire son armature G qui, par l'intermédiaire de la tige T, amène le doigt N en contact avec le charbon négatif. Comme cette tige est reliée à la borne positive d'arrivée du courant, l'arc s'amorce, puis, l'électro-aimant E' cessant son attraction, le doigt N s'écarte.

Le réglage en fonctionnement s'établit par extinctions et rallumages successifs de l'arc qui se produisent extrêmement rapidement.

L'électro-aimant E' est encore muni d'un autre dispositif, K, intercalant automatiquement dans le circuit la résistance R équivalente à celle de la lampe lorsque celle-ci s'éteint sans pouvoir se rallumer. On évite ainsi la détérioration des électro-

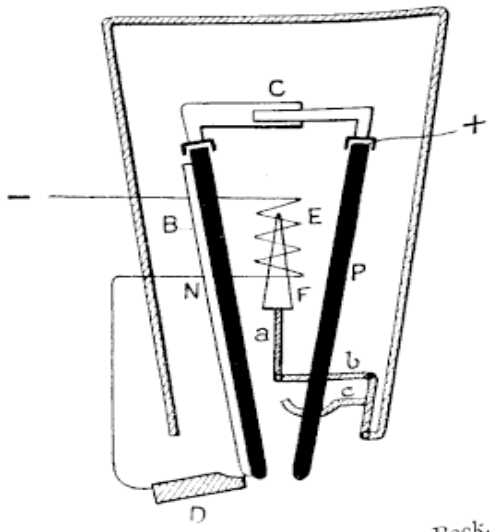


Fig. 506. — Schéma d'une lampe Beck.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aimants qui, sans cela, seraient parcourus par le courant total.

* * *

La ***lampe Beck*** est extrêmement simple, car elle ne contient aucun mécanisme d'horlogerie ni aucun système de réglage. La figure 506 montre le principe de son fonctionnement.

Les charbons sont fixés à un chariot extensible C, constitué par deux tubes pouvant coulisser l'un dans l'autre. Tout l'ensemble repose sur le charbon négatif. Celui-ci est muni d'une nervure latérale B, par laquelle il repose sur un doigt métallique D qui sert également de borne de sortie du courant (afin de diminuer la résistance intérieure de la lampe en éliminant celle du charbon négatif). Lorsque ce charbon se consume, la nervure B brûle simultanément et provoque la descente du chariot, et par suite le rapprochement des deux charbons.

Le seul mécanisme se réduit à un électro-aimant E en série avec la lampe et qui, au moment où il est excité, attire le noyau F et, par l'ntermédiaire des leviers *a*, *b*, *c*, sépare les charbons primitivement au contact et amorce l'arc.

* * *

Un certain nombre de lampes à arc flamme ont conservé la disposition des charbons l'un au-dessus de l'autre. Telles sont les ***lampes Blondel, Bardon,*** etc. Nous décrirons seulement cette dernière, qui est une lampe à arc clos utilisant des charbons entièrement minéralisés et fonctionnant indifféremment sur courant continu ou alternatif.

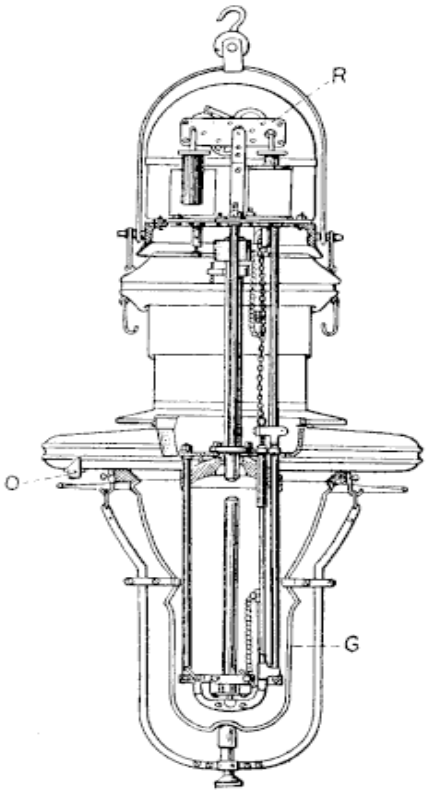


Fig. 507. — Lampe Bardon.

L'arc est enfermé dans un globe G hermétiquement clos (fig. 507). Le mécanisme se compose d'un rouage R, dont la cage peut basculer autour de son centre, grâce à une suspension à couteaux. La cage s'incline d'un côté ou de l'autre, suivant le sens de l'attraction résultante exercée par deux bobines, série et dérivée, agissant sur deux noyaux de fer librement suspendus aux extrémités de la cage. Des roues de renvoi et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une chaînette réunissent les tiges porte-charbons au système oscillant.

Lorsque l'enroulement dérivé prédomine, la cage s'incline vers la gauche, la roue d'échappement se dégage alors d'une butée fixe et les charbons se rapprochent jusqu'au contact, le porte-charbon supérieur étant convenablement lesté dans ce but. La prédominance de l'enroulement série fait au contraire basculer le rouage vers la droite, la butée fixe empêche l'échappement et les charbons s'écartent, ce qui permet à l'arc de s'amorcer.

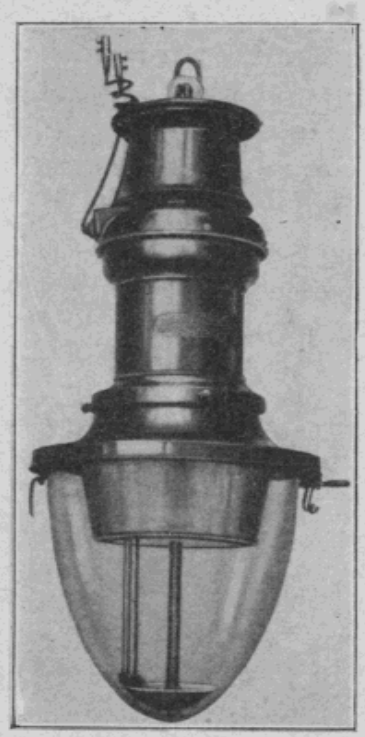


Fig. 508. — Lampe G. E. C. Vue d'ensemble.

Enfin, pour une certaine disposition de la cage qui correspond à des efforts magnétiques presque égaux, la roue d'échappement se dégage lentement et défile dent par dent : c'est la position de réglage.

Dans les lampes à charbons minéralisés, l'écart doit toujours se produire avec une certaine lenteur, afin d'éviter que l'arc amorcé ne s'éteigne aussitôt, par suite d'un accroissement de longueur trop rapide empêchant l'échauffement nécessaire. Au contraire, le rapprochement ne doit subir aucune gêne.

Pour satisfaire à ces conditions, un frein à air, solidaire de la cage oscillante, permet le rapprochement des charbons, tandis que la viscosité mécanique du système est d'autant plus grande que l'écart des charbons tend à se produire plus vite.

Les tiges du porte-charbon inférieur sont isolées et réunies à leur partie supérieure par une traverse conductrice, et le courant est amené en un point déterminé de cette traverse, afin que les courants dans les tiges du porte-charbon inférieur aient des actions magnétiques sur l'arc exactement équilibrées. Comme celui-ci est très sensible au souffle magnétique, on évite ainsi que les charbons s'usent en sifflet, ce qui rendrait l'arc instable.

La lampe ainsi construite ne fonctionne bien que sur courant alternatif. Grâce à un artifice, on est arrivé à pouvoir l'employer aussi bien sur courant continu. Cet artifice consiste à munir la partie supérieure de la chambre close d'un petit orifice O, formant un évent que l'on peut fermer plus ou moins à l'aide d'une cheville convenablement percée.

Il se produit alors dans le vase clos une lente circulation gazeuse accompagnée d'une très légère rentrée d'air. C'est par ce simple moyen qu'est obtenue la stabilité de marche en courant continu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 508 représente la vue d'ensemble du dernier modèle de ***lampe à arc métallique*** construit par la ***General Electric C°*** de Schennectady (États-Unis). La figure 509 montre la disposition du système optique employé pour améliorer la répartition lumineuse de l'arc. Les figures 510 et 511 montrent le mécanisme de la lampe et le schéma des connexions électriques.

L'arc, qui consomme de 4 à 6 ampères suivant les modèles, jaillit entre une électrode inférieure de magnétite et un bloc cylindrique de cuivre formant cathode. Lorsque la lampe ne fonctionne pas, les charbons sont écartés. Au moment de la fermeture du circuit électrique, l'électro-aimant de départ en dérivation amène les charbons au contact. Immédiatement, l'électro-aimant en série entre en action et provoque l'écartement des charbons, amorçant ainsi l'arc. Le réglage est du type différentiel que nous avons décrit précédemment.

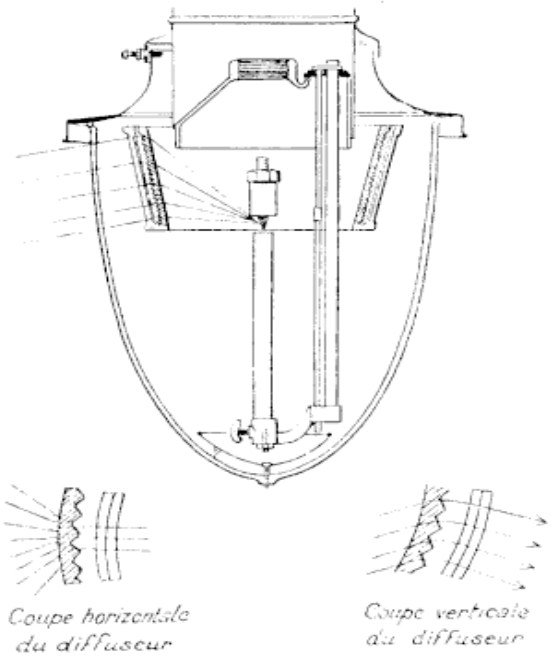


Fig. 509. — Vue du système optique de la lampe G. E. C.

L'emploi d'un réflecteur prismatique formé de deux troncs de cône s'emboîtant l'un dans l'autre est un des perfectionnements intéressants de cette lampe.

Le tronc de cône extérieur présente sur sa face interne une série de prismes à arêtes verticales servant à diffuser la lumière, tandis que le tronc de cône intérieur a sa face externe taillée en prismes à arêtes horizontales qui renvoient les rayons lumineux dans une direction faisant un angle de 10° en dessous de l'horizontale. Une importante cheminée axiale sert à l'élimination des vapeurs et des fumées, ce qui nécessite une disposition excentrée de tous les organes de réglage et de fonctionnement.

L'électrode supérieure en cuivre a une durée de 2 000 à 4 000 heures suivant la puissance de la lampe, et l'électrode inférieure a une vie moyenne de plusieurs centaines d'heures (150 à 350, suivant le type). Ces lampes ne peuvent être branchées qu'individuellement sur le circuit d'éclairage, car elles nécessitent une tension de 75 à 80 volts aux bornes, l'arc lui-même

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

absorbant 74 à 79 volts. Aussi ces lampes comportent-elles une assez grosse résistance en série pour absorber le voltage en excès.

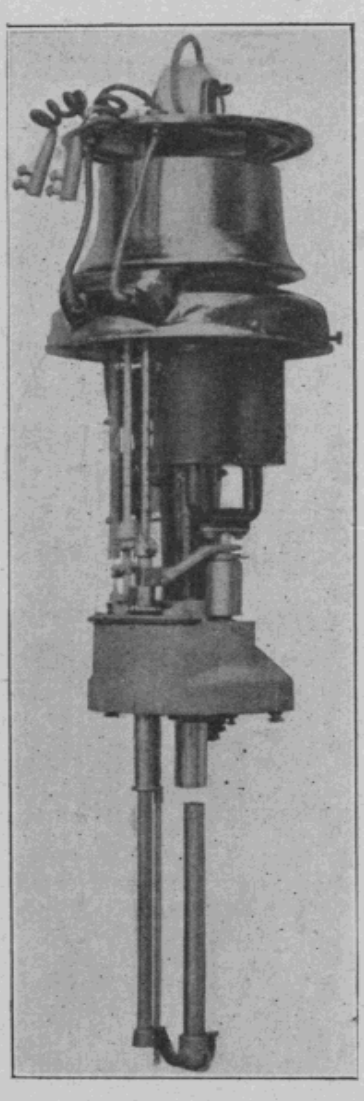


Fig. 510. — Lampe G. E. C. Vue du mécanisme.

* * *

Il nous reste à dire quelques mots des ***foyers lumineux de très grande puissance***, destinés à l'équipement des *projecteurs*, des *phares* et des *appareils de projection* cinématographiques.

Le problème est entièrement différent de celui de l'éclairage ordinaire, dans lequel on cherche à *répartir* le flux lumineux de la meilleure manière possible, afin d'éclairer également tous

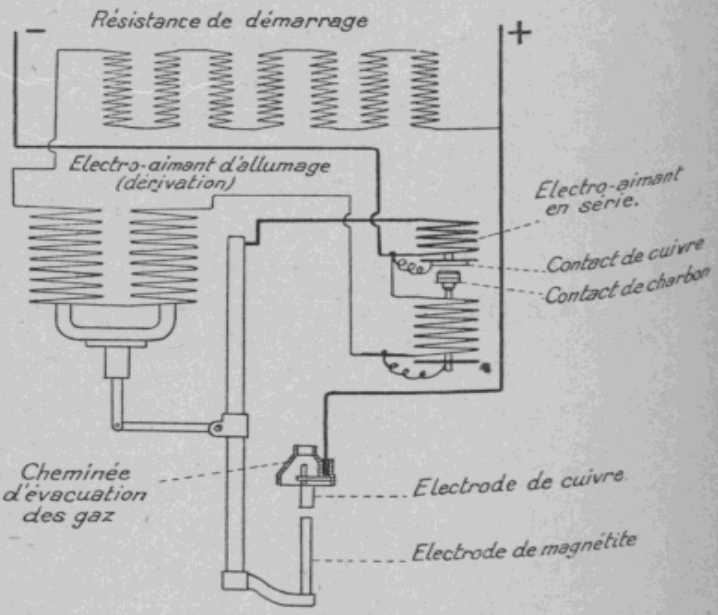


Fig. 511. — Schéma des connexions électriques.

les objets dans le champ. Il s'agit dans les projecteurs, au contraire, de *concentrer* l'émission lumineuse en un point, de façon à former une source ponctuelle d'un éclat intrinsèque aussi grand que possible. Cette condition est imposée par l'emploi de systèmes optiques pour produire les faisceaux lumineux émergents, et l'on sait que, sitôt que la source a des dimensions finies, les corrections à apporter aux lentilles sont extrêmement difficiles à réaliser et ne donnent finalement qu'un résultat

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peu satisfaisant : le faisceau s'éparpille toujours ; la puissance et la portée en sont considérablement réduites. Nous n'entrerons pas dans la discussion des dispositifs optiques, qui sortirait du cadre de ce livre ; nous ne parlerons que des sources lumineuses elles-mêmes.

On peut employer des lampes à incandescence ou des lampes à arc.

Les lampes à incandescence doivent être d'une fabrication spéciale, le filament étant aussi ramassé que possible, afin de donner une source de petites dimensions et aussi brillante que possible. Souvent, la paroi de l'ampoule est argentée sur une certaine surface, de façon à former miroir et à augmen-

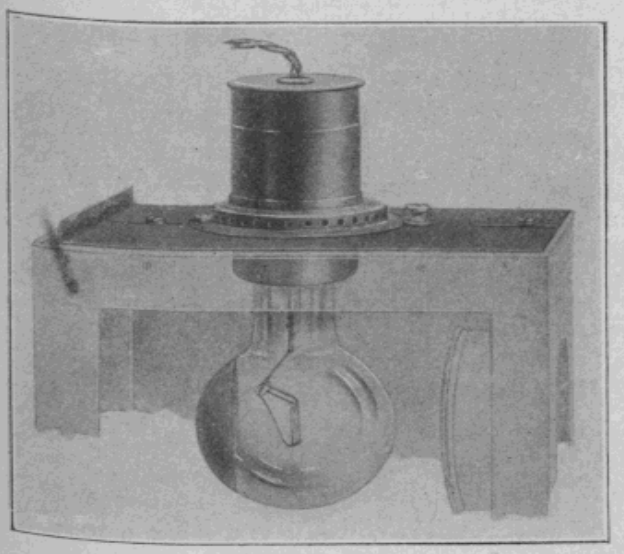


Fig. 512. — Lampe 3 000 bougies 110 volts pour projections fixes.

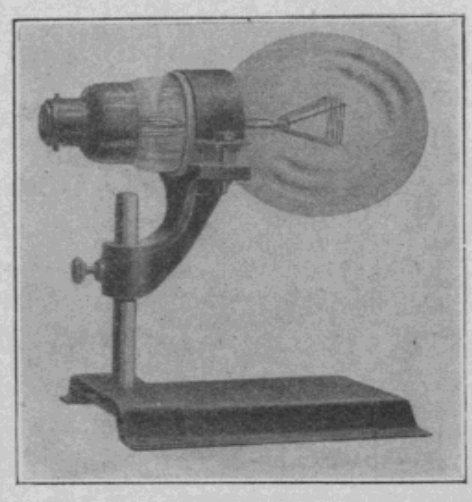


Fig. 513. — Lampe 300 bougies 110 volts pour projection de diapositifs.

ter le flux lumineux projeté dans une seule direction (fig. 512, 513 et 514).

Mais on ne peut réaliser, avec les lampes à incandescence, de sources lumineuses très intenses. L'impossibilité de donner au filament éclairant une forme assez concentrée pour que l'on puisse le considérer comme une source ponctuelle empêche l'obtention de faisceaux lumineux parallèles, et une partie notable du flux est inutilisée. D'autre part, les lampes à incandescence ne nécessitent aucun réglage en fonctionnement ; elles suppriment les dangers d'incendie que présentent les arcs électriques où la flamme est à nu ; enfin, elles ne dégagent ni vapeurs ni fumées, ce qui fait qu'on peut les utiliser dans les projecteurs d'automobiles, les appareils cinématographiques et de projection pour appartements, les appareils d'agrandissement photographiques, etc. ; aussi le champ de leurs applications est-il extrêmement vaste.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les lampes à arc sont employées chaque fois qu'il faut réaliser un appareil puissant. Très souvent, elles sont excessivement simples comme construction, et le réglage est obtenu à la main, par le jeu de crémaillères maintenant l'écartement des charbons et que manœuvre l'opérateur (fig. 515). Dans d'autres cas, la régulation est produite par un mouvement d'horlogerie ou par un des dispositifs que nous avons décrits précédemment. Afin d'augmenter la puissance, on utilise de gros charbons minéralisés dans lesquels on fait passer un courant aussi intense que possible (parfois 100 ampères et plus).

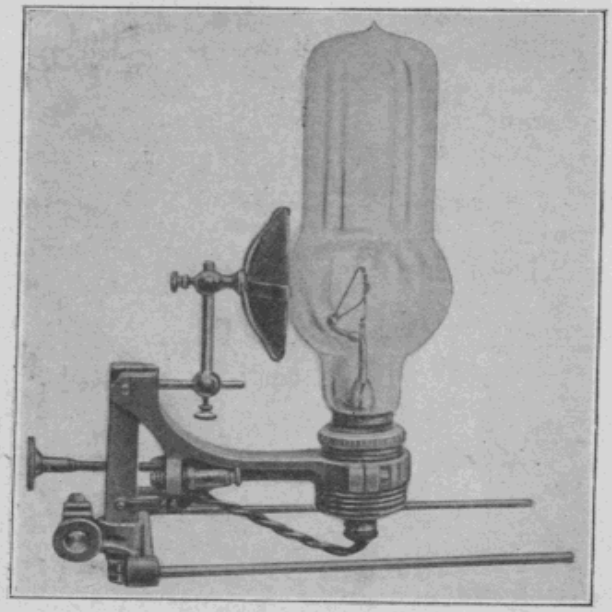


Fig. 514. — Lampe 1 000 watts 35 volts pour projections cinématographiques.

A titre d'exemple, et parce qu'il repose sur un principe un peu différent des autres arcs, nous décrirons avec quelques détails le ***projecteur Sperry***, qui est actuellement la source lumineuse la plus puissante.

Le foyer lumineux est constitué par des gaz incandescents maintenus dans le cratère du charbon positif. La figure 516 montre le fonctionnement de la partie éclairante de l'arc. Lorsque l'intensité du courant électrique est suffisante, la partie centrale de la flamme jaillissant du charbon négatif acquiert une puissance et une vitesse suffisantes pour maintenir les vapeurs provenant de la

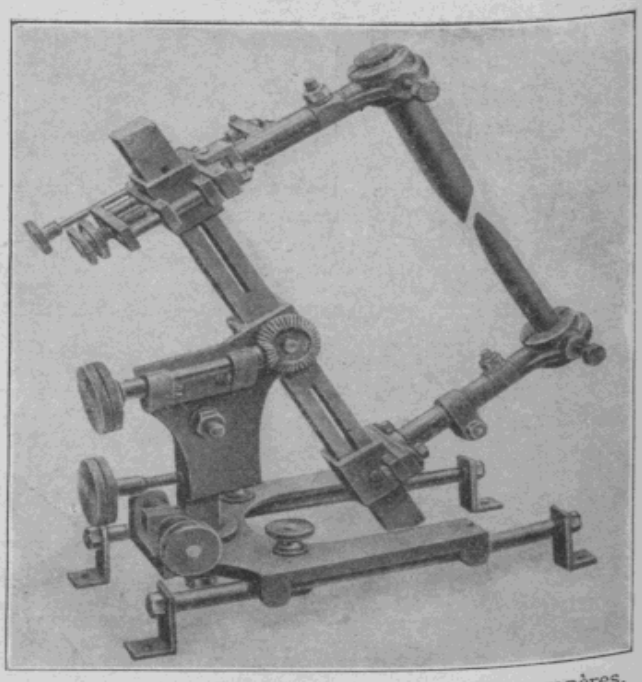


Fig. 515. — Lampe à arc à main de 100 ampères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

matière minéralisée du charbon positif dans le cratère positif qui devient alors extrêmement brillant (passant de 170 bougies par millimètre carré dans l'arc ordinaire à plus de 500), ce qui le différencie nettement des arcs ordinaires.

Un autre avantage est la grande réduction de la surface du cratère, qui est beaucoup plus petit que celui d'un arc ordinaire consommant la même intensité. C'est ainsi que l'arc Sperry de 150 ampères a un charbon

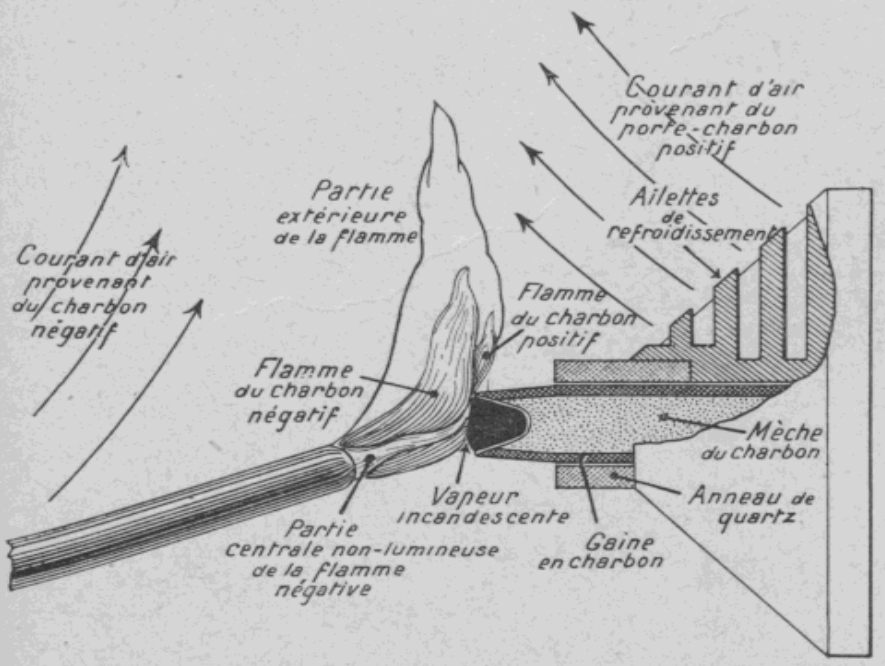


Fig. 516. — Schéma du fonctionnement de la partie éclairante du projecteur Sperry.

positif de 16 millimètres de diamètre et un charbon négatif de 11 millimètres seulement. Ajoutons que le charbon positif est animé d'un mouvement de rotation, afin d'assurer la régularité de la forme du cratère. Si celui-ci, en effet, s'usait plus vite d'un côté que de l'autre, ce qui arriverait forcément si le charbon était immobile, les gaz pourraient alors s'échapper, et le rendement lumineux baisserait immédiatement. La lampe comprend en plus un ventilateur qui refroidit les porte-charbons, et particulièrement le charbon positif, grâce à un système d'ailettes entre lesquelles circule l'air.

Cette lampe, qui est montée dans des projecteurs de $1^{m},5$ de diamètre, comporte en plus quelques détails techniques originaux. La figure 517 montre la vue d'ensemble de la lampe, et la figure 518 le schéma des connexions électriques.

Le corps de la lampe renferme un moteur électrique entraînant le ven-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tilateur et commandant les mouvements de l'arc : rotation du charbon positif et réglage de la distance des deux charbons.

Le réglage de la position du charbon positif, qui doit être au centre

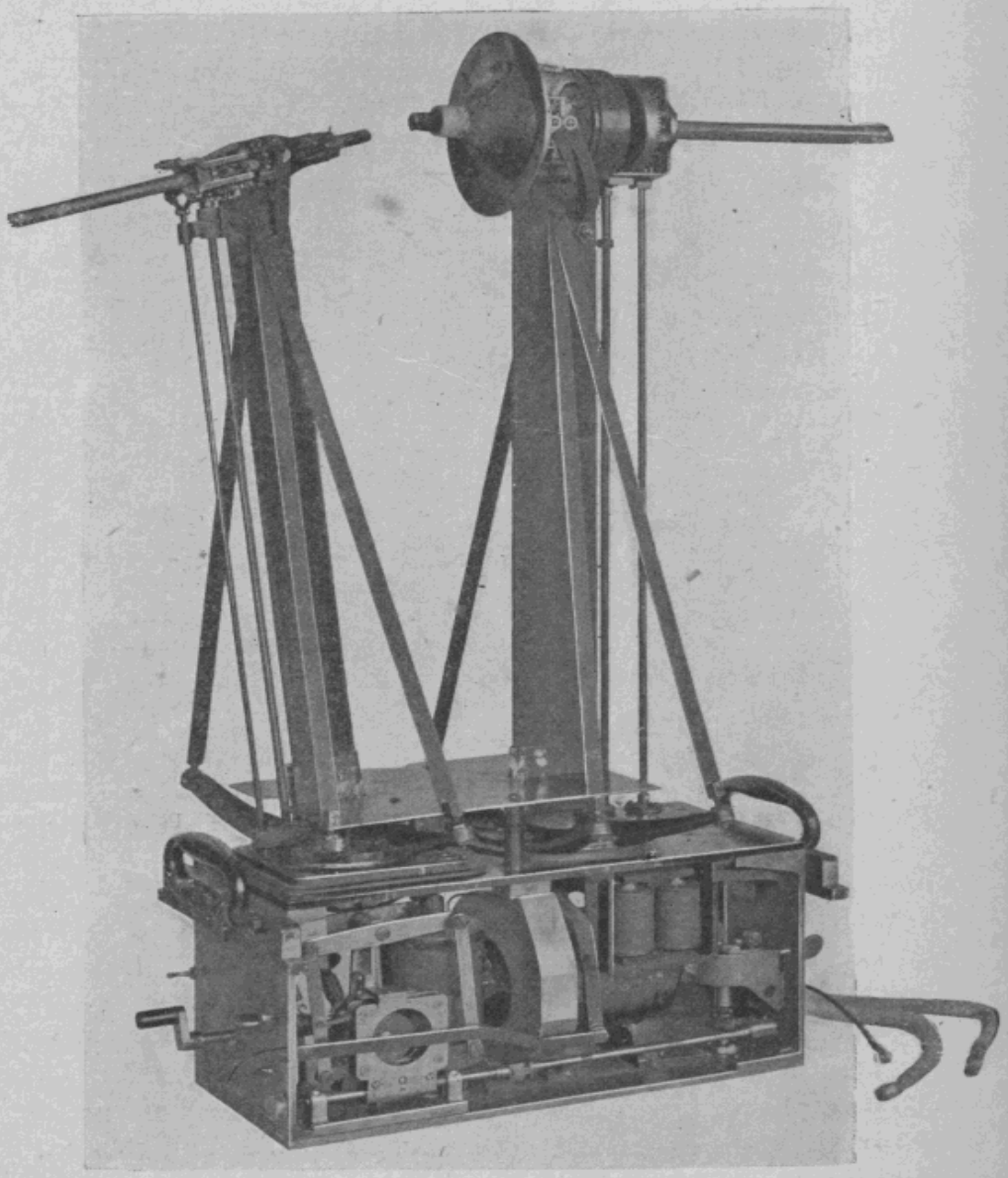


Fig. 517. — La lampe du projecteur Sperry.

optique du projecteur, est obtenu au moyen d'une commande thermostatique des électro-aimants l'actionnant.

Le thermostat est monté sur le tambour du projecteur et il est disposé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de telle sorte que, lorsque en brûlant le charbon positif s'éloigne du foyer du miroir, la lumière provenant de la divergence du faisceau qui en résulte frappe le thermostat, dont elle fait varier la résistance électrique. Des relais

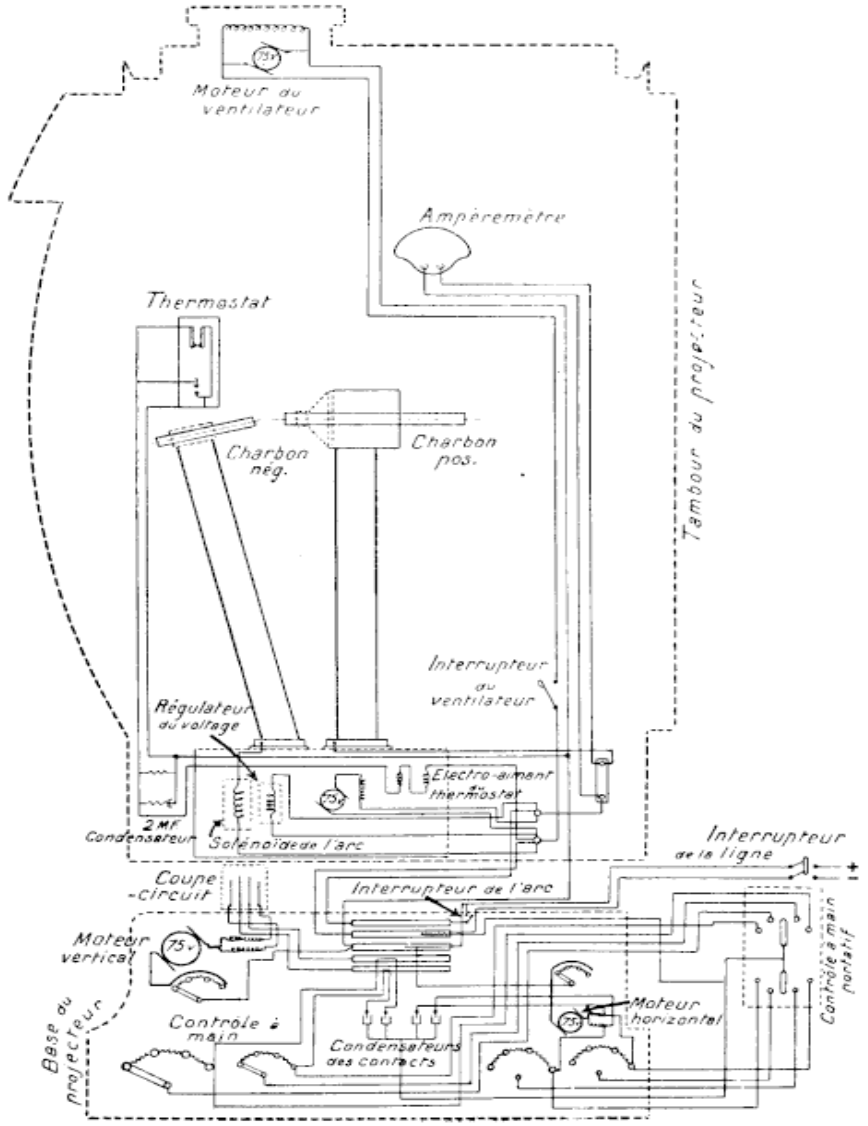


Fig. 518. — Connexions électriques du projecteur Sperry et de ses organes de réglage.

entrent alors en jeu, produisant la mise en marche du mécanisme, jusqu'à ce que le cratère soit de nouveau au foyer du miroir.

Le réglage du charbon négatif est commandé par un électro-aimant relié directement aux bornes à l'arc et qui fait déplacer le charbon dans un sens ou dans l'autre, suivant que la tension augmente ou diminue.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Nous avons vu que les lampes à arc, par suite de leur puissance lumineuse et des vapeurs et fumées qu'elles émettent, ne convenaient pas pour l'éclairage de l'intérieur des édifices et des maisons d'habitation. Cependant, un certain nombre de constructeurs ont réalisé des ***lampes à arc de faible puissance***, ne consommant que 1 à 3 ampères et donnant de 100 à 300 bougies. Nous décrirons seulement la lampe Lilliput.

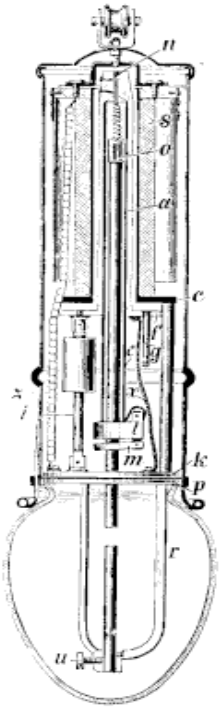


Fig. 519.
Lampe Lilliput.

Dans cette lampe, le faible volume total que l'on cherchait à réaliser imposait de réduire au minimum le système de réglage. La figure 519 montre l'intérieur de cette lampe. Tant qu'elle n'est pas parcourue par le courant, la rondelle de coincement *m* repose sur la plaque de guidage *k*. Le charbon supérieur est alors libre et vient reposer sur le charbon inférieur. Dès que le courant passe, la bobine *s* attire le noyau *a* et, avec lui, la rondelle de coincement. Celle-ci se place obliquement et vient saisir le charbon positif, qui est ainsi séparé du charbon négatif ; l'arc se forme. Quand les charbons s'usent, le courant diminue dans la lampe, le noyau *a*, moins fortement attiré, redescend, la rondelle de coincement vient de nouveau reposer sur la plaque *k* et le charbon positif se rapproche du charbon négatif. Une pompe à air *z* ralentit le mouvement de façon à éviter le « pompage ».

* * *

La ***lampe à vapeur de mercure*** Cooper-Hewitt est formée d'un tube de verre de 80 centimètres environ de longueur et 2 à 3 centimètres de diamètre. A l'une des extrémités, jouant le rôle d'anode, se trouve fixé un dé en fer relié au circuit électrique. L'autre extrémité est constituée par une poche dans laquelle une petite quantité de mercure fonctionne comme cathode. Le tube est incliné, la cathode de mercure étant à la partie inférieure (fig. 520). La résistance en fonctionnement est d'environ 28 à 30 ohms pour un courant de 3,5 ampères, et la tension aux bornes de la lampe est d'environ 80 volts. Il est donc nécessaire de mettre en série avec la lampe une résistance pour absorber le voltage en excès. Cette résistance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est placée au-dessus de l'appareil, ainsi qu'une bobine de self-induction protégeant la lampe contre les variations brusques de tension (fig. 521).

La température à l'intérieur du tube est comprise entre 125° et 170° pour les lampes ordinaires.

Le procédé d'allumage le plus simple consiste à basculer la lampe de façon

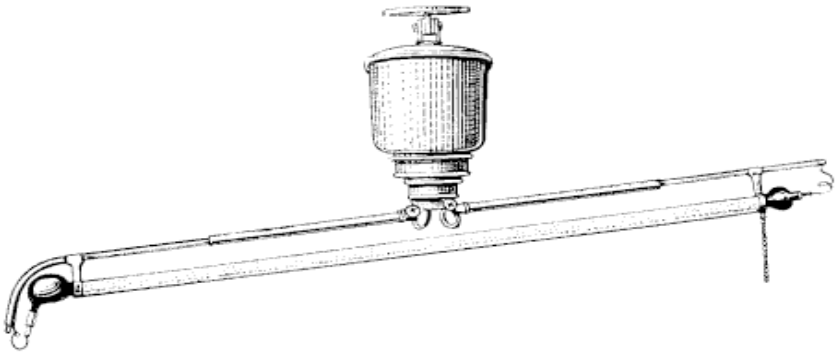


Fig. 520. — Lampe Cooper-Hewitt.

à réunir les électrodes par un filet de mercure, puis à la ramener à sa position primitive. Le filet de mercure se rompt alors, un arc jaillit au point de rupture et suffit pour amorcer l'arc dans tout le tube. Ce basculage peut être fait soit à la main, soit automatiquement par l'action d'un électro-aimant qui est excité lorsque le circuit électrique est fermé.

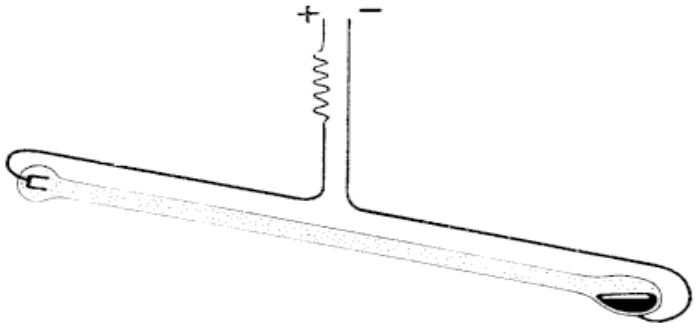


Fig. 521. — Schéma d'une lampe Cooper-Hewitt.

De nombreux dispositifs ont été proposés pour provoquer l'allumage sans qu'il soit nécessaire de basculer le tube de verre, ce qui est une opération toujours un peu délicate. Nous n'en citerons que quelques-uns. L'un des plus connus est celui de ***Weintraub***. Il consiste à produire un petit arc à la cathode, à l'intérieur du tube. A cet effet, la cathode porte une petite tubulure latérale T dans laquelle se trouve un noyau de fer F, flottant sur le mercure (fig. 522). Lorsque la lampe ne fonctionne pas, la partie immergée du noyau de fer fait monter le niveau du mercure dans la tubulure, de façon que sa surface libre soit commune avec celle de la cathode principale. Un électro-aimant E, placé à l'extérieur, peut attirer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le noyau de fer. Lorsque l'on ferme le circuit, l'armature flottante est attirée par l'électro-aimant, et par suite le niveau du mercure baisse dans l'électrode auxiliaire. La rupture de la nappe de mercure produit un arc qui détermine l'amorçage. A ce moment, l'électro-aimant E′ est parcouru par le courant de la lampe et attire sa pièce polaire F′, rompant ainsi le circuit d'allumage.

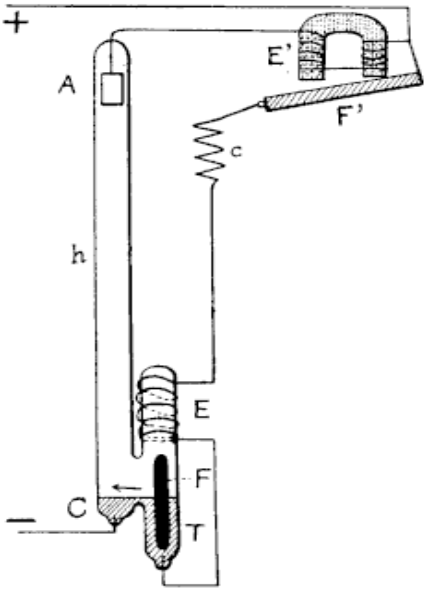


Fig. 522. — Allumage Weintraub.

Dans le dispositif de **Bodde**, on vaporise le mercure, non par un arc comme dans le cas précédent, mais par échauffement. Lorsque l'on ferme le circuit de la lampe, le courant passe initialement par une anode auxiliaire comme dans le dispositif de Weintraub, mais ayant la forme indiquée figure 523. P est un fil de platine enfermé dans une pièce de verre présentant un renflement formant une petite ampoule A munie d'un orifice O la faisant communiquer avec l'intérieur du tube principal de la lampe.

Toute l'intensité du courant parcourant P, il se produit au point N de contact avec la cathode un échauffement considérable. Le mercure se trouve vaporisé dans l'ampoule A, d'où il s'échappe par l'orifice O et se répand dans la lampe, permettant à l'arc de s'amorcer. La vaporisation continue jusqu'à ce que, le niveau ayant baissé à la cathode au-dessous de N, le circuit d'allumage se trouve automatiquement coupé. Cette succession de phénomènes s'effectue d'ailleurs instantanément.

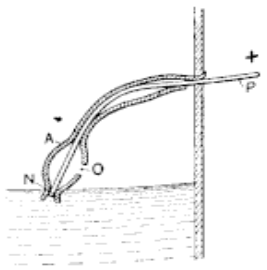


Fig. 523. — Allumage Bodde.

* * *

Les ***modèles de lampes à vapeur de mercure*** sont assez nombreux et ne diffèrent souvent que par des détails secondaires ; aussi n'en décrirons-nous que quelques-uns.

Dans la ***lampe Bastian*** (fig. 524), on a cherché à augmenter la densité de vapeur et réduire les dimensions du tube de verre. L'allumage est provoqué par basculage de la lampe sous l'action d'un électro-aimant E que l'on voit sur la figure. Afin de remédier à la coloration blafarde de la lumière

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

émise par la vapeur de mercure, une ampoule à incandescence à filament de charbon L (afin d'avoir une émission de radiations rouges) est disposée en série avec le tube de la lampe.

Nous avons vu que l'emploi des tubes de quartz a permis d'augmenter considérablement le rendement lumineux, tout en mettant à la disposition des médecins, des chimistes, des physiciens une source de lumière ultra-violette infiniment précieuse pour les applications.

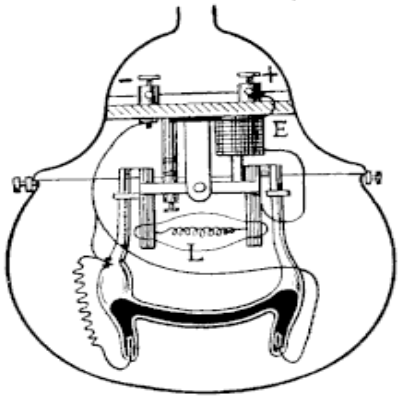


Fig. 524. — Lampe Bastian et Salisbury.

Dans la **lampe Heraues**, les réservoirs de mercure constituant l'anode et la cathode sont entourés d'ailettes métalliques destinées à assurer leur refroidissement et qui donnent à la lampe son aspect bien caractéristique (fig. 525). L'allumage s'opère par un mécanisme de bascule automatique dont la figure 525 permet de suivre le fonctionnement. Le brûleur *ax* est relié par la tige *v* à l'armature d'un électro-aimant *q*. Dans le circuit principal se trouvent le brûleur, les résistances *h* et *m* en fil de fer et une bobine de réactance *l*. Au moment de la fermeture du courant, l'aimant *q* attire son armature, ce qui relève l'un des côtés du brûleur, son anode *a*. Le mercure s'écoule alors vers *x* et établit le contact entre les deux électrodes. Mais alors la bobine de réactance *l* entre en action, attire son armature *o*, ce qui coupe le courant dans la dérivation de l'électro-aimant *q*. La lampe reprend sa position primitive, la colonne de mercure se rompt et l'arc s'amorce.

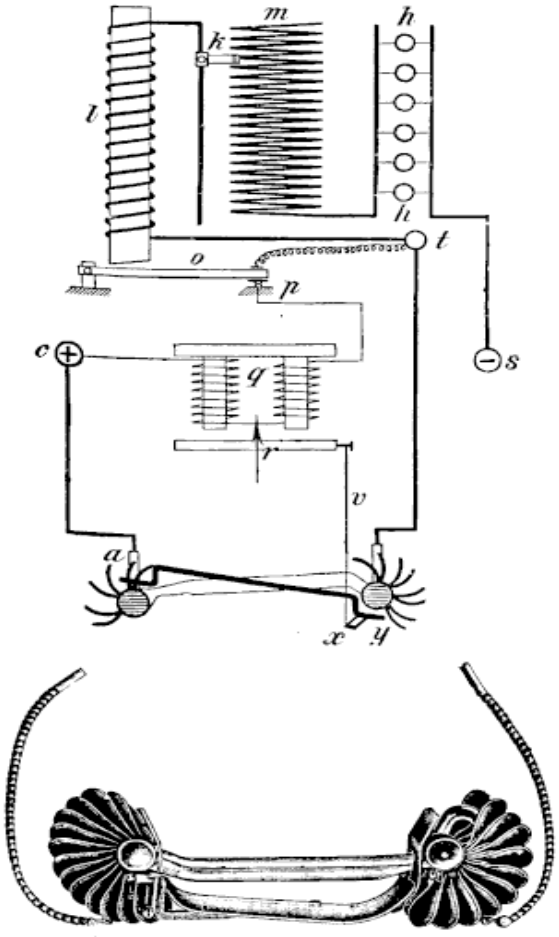


Fig. 525. — Lampe Heraues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La lampe n'a pas besoin en général d'autres dispositifs de réglage.

La lampe à vapeur de mercure ***Lumière*** est particulièrement bien adaptée au travail médical. Elle comprend un tube de quartz qui, au repos, est

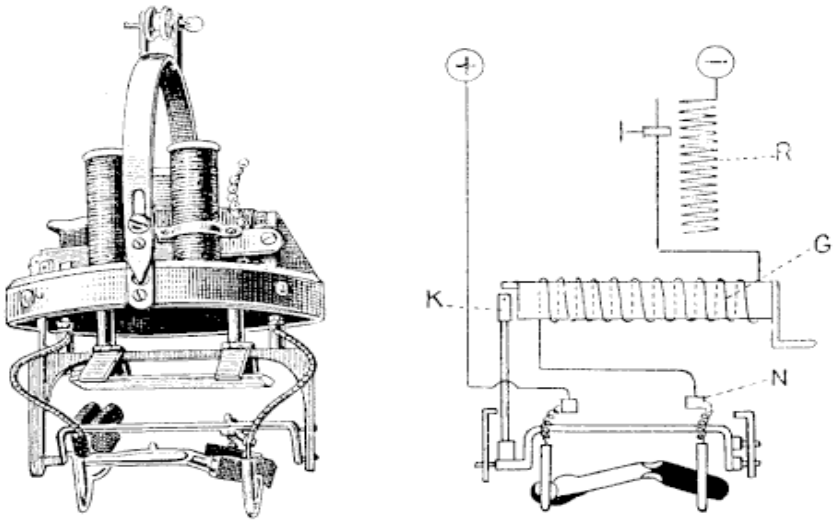


Fig. 526. — Lampe Lumière. Vue extérieure et schéma du montage.

horizontal. Dans cette position, un filet de mercure relie les deux électrodes. Lorsque l'on ferme le circuit électrique, la lampe bascule sous l'action de l'électro-aimant G qui attire le noyau de fer K en série avec la lampe, le filet est rompu et l'arc s'amorce. Une résistance variable R permet de régler l'intensité du courant circulant dans la lampe (fig. 526).

* * *

On a étudié de nombreux moyens d'***améliorer la couleur*** assez désagréable de la lumière émise par la vapeur de mercure. Nous avons déjà signalé la solution de Bastian ajoutant une lampe à filament de charbon en série avec la lampe à mercure. D'autres inventeurs ont proposé d'envelopper les tubes de tissus fluorescents qui absorbent la lumière du mercure et la transforment en radiations de plus grande longueur d'onde. Mais, dans ces conditions, le rendement lumineux devient très mauvais.

On a également cherché à ajouter au mercure des corps qui se vaporisent dans la lampe et donnent un spectre de luminescence corrigeant celui du mercure.

Un mélange de 98 p. 100 de cadmium et 2 p. 100 de mercure donne d'excellents résultats. Une très petite quantité de mercure se renouvelle sans cesse à la surface de l'alliage fondu et se vaporise en même temps qu'une beaucoup plus grande quantité de cadmium.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a également proposé un mélange d'étain avec 5 p. 100 de cadmium et 3 p. 100 de mercure. La cathode est solide à la température ordinaire et l'allumage est produit par une étincelle d'induction. La lumière émise présente avec une intensité à peu près égale les spectres du cadmium et du mercure. L'étain ne bout qu'à 1 200° dans le vide, tandis que le cadmium se vaporise à 450° et le mercure à 150° environ ; c'est pourquoi on n'obtient pas de spectre de l'étain dans la lumière émise. Ce corps agit seulement comme dissolvant des deux métaux à vaporiser et assure leur évaporation en proportion constante à la surface de l'électrode.

* * *

Nous avons vu que l'arc au mercure fonctionne comme une soupape ne laissant passer, lorsqu'il est branché sur courant alternatif, que l'onde pour laquelle le mercure est cathode. On conçoit que, pour l'éclairage, cette propriété, si intéressante dans d'autres cas, constitue un gros défaut. Pour pouvoir ***utiliser les deux ondes des courants alternatifs,*** *Weintraub* a proposé le dispositif représenté figure 527.

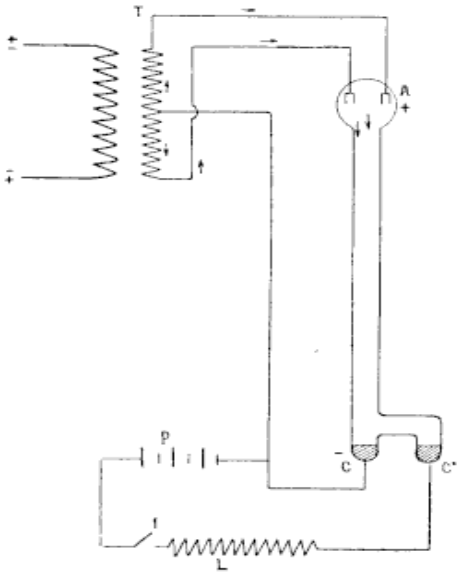


Fig. 527. — Dispositif Weintraub pour l'alimentation des lampes à vapeur de mercure par les deux ondes du courant alternatif.

Le courant alternatif du secteur passe dans le primaire d'un transformateur T. Le secondaire est connecté à ses deux extrémités à deux anodes disposées dans la lampe. Le milieu de l'enroulement du secondaire est relié à la cathode. Il est facile de voir que, dans ces conditions, tantôt une anode, tantôt l'autre fonctionne, suivant le sens du courant dans le secondaire, le milieu de l'enroulement secondaire jouant toujours le rôle de cathode.

Comme, chaque fois que le courant change de sens, il s'annule, il en résulte que la lampe s'éteindrait à chaque demi-période, si on ne lui adjoignait un dispositif qui en provoque automatiquement le rallumage.

A cet effet, une pile P est reliée à une cathode auxiliaire C′ à travers une bobine de self-induction L. Dans ces conditions, en fermant l'interrupteur I au moment de la mise en service de la lampe, lorsque l'arc s'éteint

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au moment du changement de sens du courant d'alimentation, la bobine L se décharge et provoque un arc entre C et C′ suffisant pour rallumer la lampe.

On voit donc que la lampe à mercure n'est guère pratique sur courant alternatif, puisqu'elle nécessite deux anodes, deux cathodes et un circuit auxiliaire d'allumage.

* * *

Il nous reste à dire quelques mots de l'***éclairage par les gaz, azote, argon, néon,*** illuminés par la décharge électrique et qui, depuis les travaux de G. Claude et de Beaufort, ont pris un développement des plus intéressant. Il n'y a plus ici aucun phénomène d'incandescence, et les lois du rayonnement thermique du corps noir ne s'appliquent plus. Le seul phénomène qui intervient est la luminescence, et c'est pourquoi on a souvent donné à ce procédé d'éclairage le nom de « lumière froide ».

Nous avons vu que, lorsque la décharge électrique passe sous forme d'effluve à travers un tube renfermant un gaz sous faible pression ($0^{mm},1$ de mercure dans le cas présent), le gaz s'illumine. C'est sur ce phénomène que reposent les procédés d'éclairage par tubes au néon, à l'azote, à l'acide carbonique, etc., de Moore et G. Claude. Le principe des appareils est très simple : il suffit d'appliquer aux extrémités du tube de Geissler rempli du gaz une différence de potentiel assez élevée.

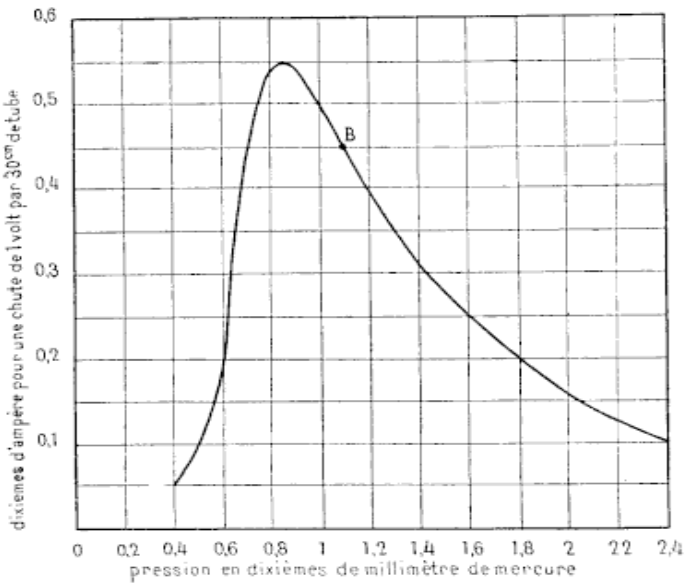


Fig. 528. — Tube de Moore.

Mais les difficultés pratiques qu'il a fallu vaincre ont nécessité une étude extrêmement serrée du phénomène et beaucoup d'ingéniosité de la part des constructeurs. En particulier, Moore constata dès le début de ses recherches que le vide augmentait peu à peu dans le tube au cours de son fonctionnement et que finalement la décharge ne pouvait plus le traverser.

La courbe figure 528 montre comment varie la conductibilité du tube

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en fonction de la pression intérieure. Elle augmente d'abord avec la pression jusqu'à un maximum et finalement décroît très vite. Le point B correspond à la pression normale de fonctionnement du tube, que l'on cherche à maintenir constante.

On se trouve en présence d'un phénomène d'absorption des gaz par les électrodes auquel il fallait à tout prix remédier.

Moore construisit une soupape laissant automatiquement rentrer dans le tube une petite quantité de gaz, de façon à y maintenir une pression voisine d'un dixième de millimètre de mercure. La soupape est sensible à une variation de pression d'un quarante-millième d'atmosphère, et son principe est le suivant (fig. 529).

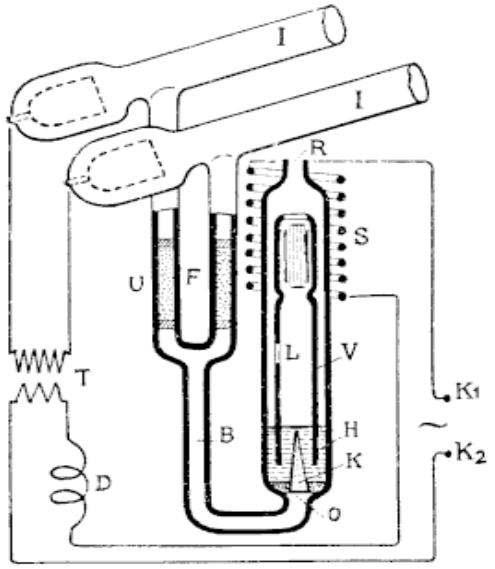


Fig. 529. — Soupape Moore.

T, transformateur ; D, bobine de réactance ; S, solénoïde ; L, trou permettant au gaz aspiré en R d'arriver au charbon K ; U, sable maintenu par des bouchons et destiné à éviter la production de décharges sur ce trajet.

Les tubes de l'apareil d'éclairage I sont réunis par un tube en U dans les branches duquel des bouchons de sable fin F forment une résistance électrique suffisante pour empêcher la décharge de jaillir d'une électrode à l'autre à travers le tube en U. La branche unique B de ce tube est reliée à un récipient en verre R, lui-même solidaire de l'appareil générateur de gaz utilisé dans le tube.

L'orifice d'arrivée O du tube B dans le réservoir R est obturé par un cône de charbon poreux K immergé dans un bain de mercure H et coiffé d'un tube de verre V portant à sa partie supérieure un noyau de fer doux. Un petit orifice L, sorte de lumière latérale, met l'intérieur de ce tube en communication avec le réservoir R. Le noyau de fer est au centre d'un solénoïde S monté en série avec le primaire du transformateur T alimentant les tubes.

Si la pression diminue à l'intérieur des tubes, la conductibilité commence par augmenter (voir la courbe, fig. 528) et l'intensité du courant croît dans le solénoïde. Le noyau de fer doux est soulevé, entraînant le tube de verre. Le niveau du mercure baisse et découvre la pointe supérieure du cône de charbon, ce qui permet au gaz de rentrer dans l'appareil. Quand la pression a repris sa valeur normale, le noyau de fer doux retombe, le mercure recouvre le charbon et ferme l'arrivée du gaz. Une bobine de réactance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est de plus insérée dans le circuit primaire du transformateur pour stabiliser l'arc.

G. Claude est arrivé à supprimer la soupape de Moore dans ses tubes à néon en employant de très grandes électrodes métalliques ayant au moins une surface de 5 décimètres carrés par ampère.

La lumière des tubes à néon est rouge; celle des tubes à azote est jaune orangé. Pour améliorer l'effet lumineux, Moore ajoute dans ses tubes des traces de mercure et Claude combine les tubes au néon avec des lampes à vapeur de mercure.

* * *

La ***diversité des modes d'éclairage*** que l'électricité a mis à notre disposition dans les dernières années est donc considérable, et il est intéressant de pouvoir les ***comparer*** entre eux. C'est ce que nous allons faire maintenant. Nous étudierons d'abord les *caractéristiques électriques* des diverses lampes, puis leurs *caractéristiques lumineuses*. Nous avons préféré réunir ainsi toutes les données relatives à la consommation d'énergie, au rendement lumineux, à la répartition du flux, etc., plutôt que de donner ces renseignements pour chaque lampe, afin de permettre au lecteur de faire plus facilement la comparaison entre les multiples sources de lumière entre lesquelles il a actuellement le choix et entre lesquelles, ainsi qu'on pourra s'en rendre compte, il est extrêmement difficile de décider sans hésitation.

* * *

Le problème est relativement simple pour la lampe à filament de charbon. C'est la plus ancienne des lampes à incandescence, et sa fabrication est arrivée aujourd'hui à une telle uniformité que les nombres trouvés par les différents expérimentateurs sont tous concordants.

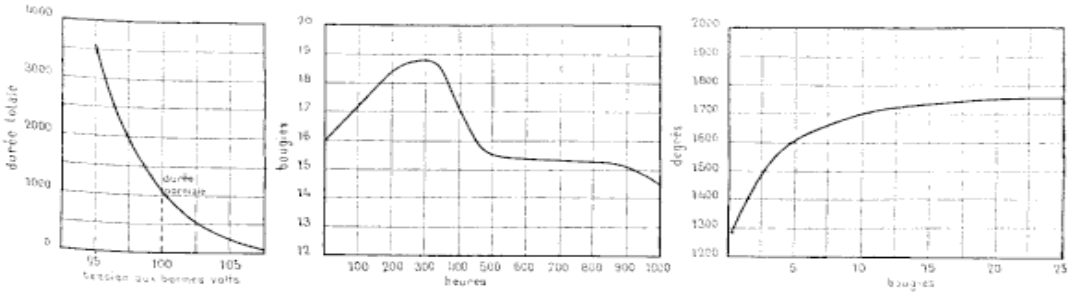
Les figures 530 montrent l'influence de la tension sur la durée et la variation de l'intensité lumineuse en fonction du temps et de la température du filament.

On voit que, la tension augmentant, la durée de la lampe décroît très rapidement. D'autre part, son intensité lumineuse augmente au début de son fonctionnement, passe par un maximum après deux cents à trois cents heures d'éclairage, puis retombe aux environs de sa valeur initiale, pour ensuite baisser rapidement après neuf cents heures de service.

Pour les lampes à filaments métalliques, les conclusions que l'on peut tirer des expériences sont beaucoup moins nettes. La diversité des métaux employés et surtout le mode de fabrication du filament, qui diffère avec chaque marque de lampe, ne permettent d'accorder aux nombres expéri-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mentaux que la valeur d'indications valables seulement pour la lampe étudiée. Elles peuvent d'ailleurs ne plus s'appliquer, même pour les



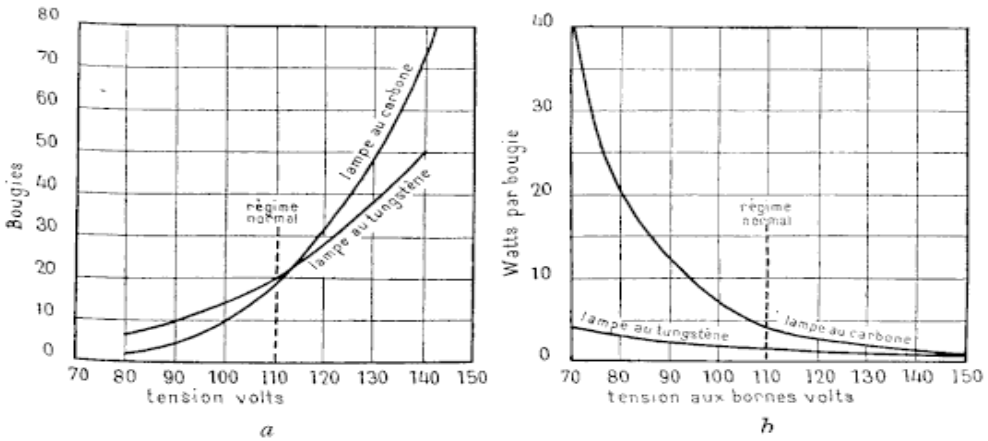
a *b* *c*

Fig. 530. — Lampe à filament de carbone.

a, influence de la tension sur la durée en heures ; *b*, variation de l'intensité lumineuse d'une lampe de 16 bougies, 100 volts, en fonction du temps ; *c*, variation de l'intensité lumineuse avec la température pour un filament de charbon (on voit que la température de 1 680° environ est la température optima d'utilisation).

lampes de la même marque, après quelques mois, car les procédés de fabrication changent sans cesse

Aussi nous contenterons-nous de faire, d'après les essais de M. Laporte, au Laboratoire central d'électricité, une comparaison générale entre les



a *b*

Fig. 531. — Lampe à filament de carbone et lampe au tungstène.

a, influence de la tension sur l'intensité lumineuse ; *b*, influence de la tension sur la consommation d'énergie.

lampes à filaments de carbone et les lampes au tungstène ordinaires. Les courbes de la figure 531 montrent que l'intensité lumineuse croît moins vite en fonction du voltage pour la lampe au tungstène que pour la lampe carbone et que, de même, pour des variations importantes de la tension, la consommation en watts par bougie reste sensiblement constante et toujours inférieure à celle de la lampe à filament de carbone.

Pour les nouvelles lampes demi-watt au tungstène et atmosphère ga-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

zeuse, dont le mode de fabrication est uniforme pour les diverses marques, on peut donner des indications plus précises. La figure 532 traduit, d'après M. Pécheux, la variation d'intensité en fonction du voltage pour les diverses puissances lumineuses. Elle montre que le coefficient angulaire croît rapi-

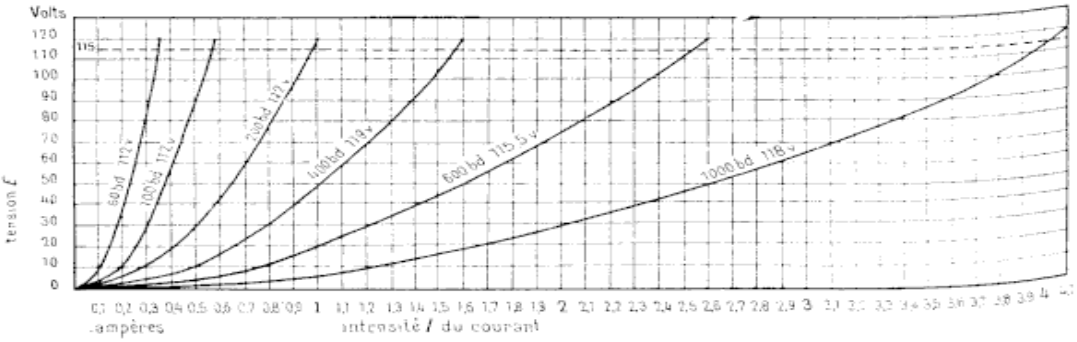


Fig. 532. — Courbes caractéristiques de différentes lampes demi-watt au tungstène à atmosphère gazeuse (d'après Pécheux).

dement jusqu'à la tension pour laquelle le filament commence à rougir, puis moins vite. Cette tension de commencement de luminosité est d'autant plus forte que la lampe est moins puissante, ainsi que le montrent les chiffres suivants :

Lampe.....	50	100	200	400	600	1 000 bougies.
Volts.....	13	12	10	9	7	6

Ajoutons que, pour toutes les lampes à incandescence, la nature du courant d'alimentation importe peu, et les courbes sont sensiblement les mêmes, que l'alimentation de la lampe soit faite par du courant continu ou du courant alternatif. Tout au plus pourrait-on noter un léger avantage en faveur du courant alternatif.

* * *

Il n'en est pas de même pour les lampes à arc. Celles-ci ont fait l'objet de nombreuses études, et l'arc en courant continu a été examiné en particulier par Mme Ayrton et M. Blondel. Les figures 533 et 534 donnent les caractéristiques de cet arc, soit que l'on cherche la variation de l'intensité du voltage en fonction de l'ampérage, pour une longueur d'arc fixée, soit, au contraire, que, maintenant constante l'intensité, on veuille connaître la longueur de l'arc pour les différents voltages appliqués.

On constate dans le premier cas que la force électromotrice diminue quand l'intensité augmente, d'abord rapidement, puis plus lentement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour chaque longueur d'arc, à partir d'un certain moment on rencontre

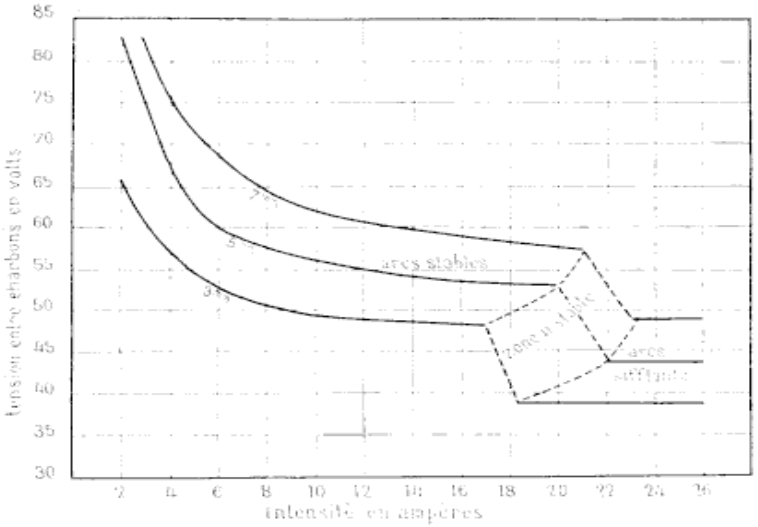


Fig. 533. — Caractéristiques des arcs électriques.

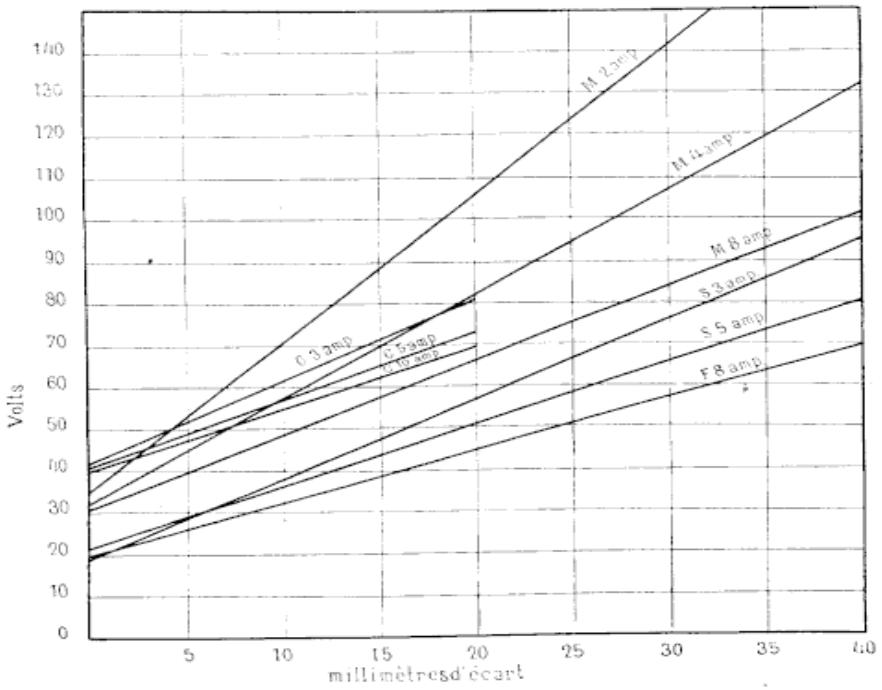


Fig. 534. — Courbes des tensions en courant continu entre électrodes, pour des écarts croissants et pour différentes catégories d'électrodes.

C, charbons purs (d'après Mme Ayrton) ; F, charbon à mèche à flamme (d'après Zeidler) ; S, charbons au spath (à 50 p. 100 dans la pâte) (d'après Blondel) ; M, électrodes de magnétite (d'après Steinmetz).

une zone d'instabilité, puis une zone où l'arc siffle et ne s'allume que difficilement Les courbes de la figure 533 sont relatives à un arc jaillissant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre deux charbons purs. Si, comme c'est le cas le plus général, le charbon positif est à âme et le négatif en charbon pur, on trouve que la force électromotrice passe par un minimum quand l'intensité croit, puis augmente ensuite avant d'arriver à la zone instable.

On voit d'après la figure que les arcs courts et intenses nécessitent une tension faible, tandis que les arcs longs et faibles ne fonctionnent que sous une tension élevée. Dans tous les cas, quel que soit le rapprochement des électrodes, un arc ne peut jaillir que si on établit une certaine différence de potentiel minima entre ses extrémités.

Quant à la loi de la variation du voltage en fonction de l'écart à intensité constante, cette loi est linéaire, aussi bien pour les charbons purs que pour les charbons minéralisés, comme le montre la figure 534.

* * *

Les figures 535 et 536 donnent les caractéristiques de l'arc à vapeur de mercure de Cooper-Hewitt. On voit par exemple que l'arc de 3 ampères donne 500 bougies avec une consommation d'énergie de 0,4 watt par bougie

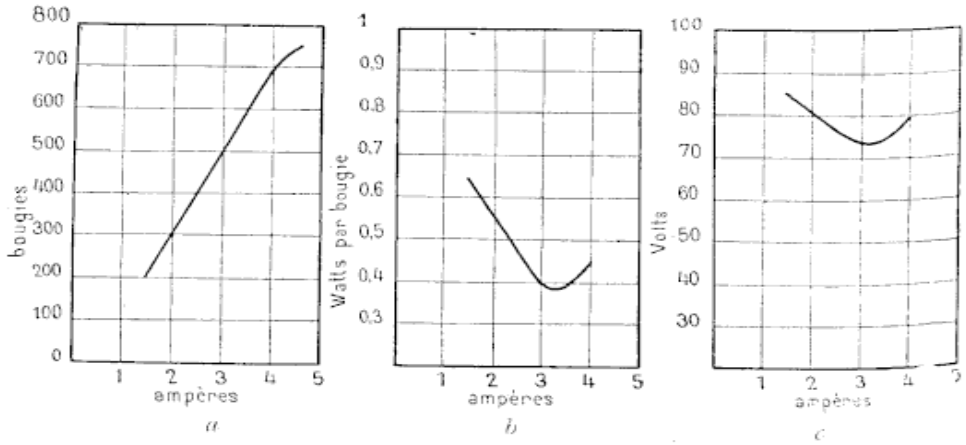


Fig. 535.

a, variation de l'intensité lumineuse en fonction de l'ampérage (lampe à vapeur de mercure) ; *b*, variation du nombre de watts par bougie en fonction de l'ampérage ; *c*, variation du voltage aux bornes de la lampe en fonction de l'ampérage.

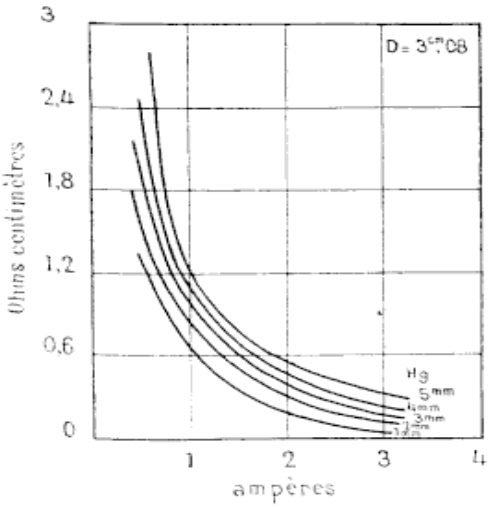
et que ce régime est le régime optimum pour le tube considéré (d'après la courbe de l'ampérage en fonction du voltage), puisqu'il correspond à 74 volts seulement aux bornes du tube.

Von Recklinghausen, Willis, Weintraub, etc., ont étudié complètement l'arc à vapeur de mercure. Ils ont trouvé que la tension de l'arc est directement proportionnelle à la longueur et apparemment inversement proportionnelle au diamètre du tube.

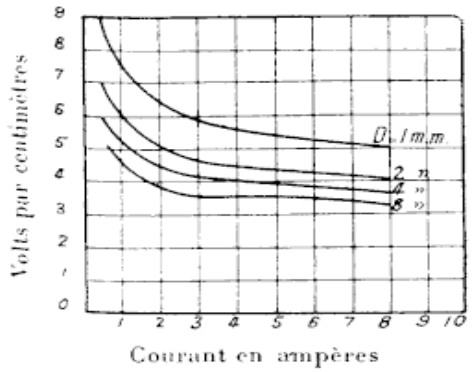
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

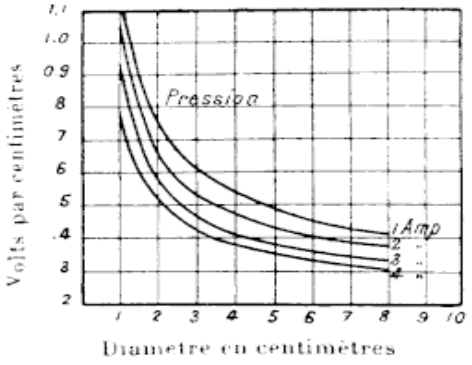
Des changements de 50 à 100 p. 100 dans l'intensité du courant ne modifient la tension que de quelques pour cent pour une pression de vapeur favorable. Celle-ci correspond normalement à une colonne de mercure de 2 millimètres et est réglée par une chambre de refroidissement de dimensions convenables.

La variation de potentiel est directement proportionnelle à la densité de la vapeur et inversement proportionnelle au diamètre du tube (Willis). La chute de potentiel à la cathode est constante et égale à 5,27 volts, tandis qu'à l'anode en



Variation de la résistance en fonction de la pression et de l'intensité du courant.





La pression est de 1 millimètre de mercure.

Fig. 536. — Caractéristiques de tubes à vapeur de mercure.

fer, elle est variable et fonction ducourant, comme le montre le tableau suivant :

Ampères.....	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25
Chute à l'anode.....	6,5	5,8	5,4	5,1	4,6
Température.....	123	143	172	200	243

* * *

Pour les tubes à gaz de Moore, la tension à appliquer aux bornes du tube est une fonction de sa longueur et de la pression intérieure. Elle est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indépendante du courant à travers le tube, dont l'intensité normale est de 2 à 3 dixièmes d'ampère. Elle croît avec la longueur du tube, mais moins vite que celle-ci ; par exemple, la tension pour un tube de 30 mètres de longueur est de 7 000 volts et de 12 000 seulement pour un tube de 60 mètres.

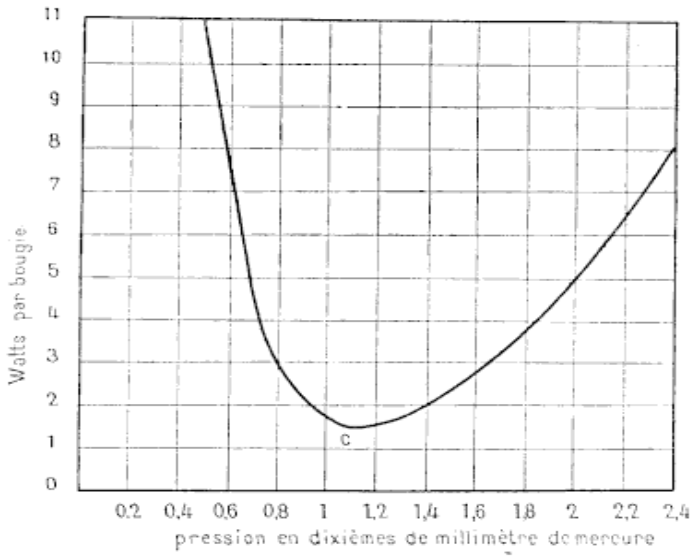


Fig. 537.

La figure 537 montre l'influence de la pression du gaz sur la dépense d'énergie par bougie et met en évidence l'existence très nette d'une pression optimum (point C).

Dans les tubes de Claude, la tension est inversement proportionnelle au diamètre et est de 100 volts par mètre pour un tube de 45 millimètres de diamètre et de 700 volts pour un tube de 7 millimètres de diamètre, les intensités étant respectivement de 1 et 0,3 ampère.

Ces tubes nécessitent une différence de potentiel plus faible que celle des tubes remplis d'azote ou d'acide carbonique, car le néon a une cohésion diélectrique inférieure à celle de ces gaz (Bouty).

Le rendement lumineux est difficile à évaluer, car la source, ainsi que pour les lampes à vapeur de mercure, n'est plus ponctuelle, et les appareils de photométrie ne sont pas établis pour fonctionner dans le cas de sources de grande surface. De plus, la lumière est ici fortement colorée. Si cependant on compare les intensités lumineuses émises par centimètre carré des sources, on trouve les nombres approximatifs suivants :

Arc électrique	20 000
Ciel nuageux	0,52 à 1,6
Tube à mercure	2
Tube Moore	0,16

On peut estimer le rendement lumineux d'un tube Moore à azote de 37 mètres de long à 51,4 bougies par mètre, ce qui donne une consommation de 1,7 watt par bougie. Pour un tube au néon de 7 mètres de long, la quantité de lumière émise est de 180 bougies par mètre et la consomma-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion de 0,70 watt par bougie. Enfin, pour une lampe à vapeur de mercure de 3,5 ampères donnant 1 000 bougies par mètre, la consommation tombe à 0,45 watt par bougie.

L'avantage des tubes à gaz est l'extrême diffusion de la lumière qu'ils produisent, ce qui permet de réaliser un éclairage parfaitement uniforme sans avoir recours à des artifices, tels que globes dépolis, écrans, réflecteurs, lumière indirecte, qui diminuent considérablement le rendement des autres sources, de sorte que ces tubes sont les plus avantageux modes d'éclairage lorsque l'on veut éclairer uniformément une grande surface, les salles de bal par exemple. Leur seul inconvénient est la coloration de la lumière qu'ils émettent.



* * *

Un facteur très important dans les mesures de photométrie est la grandeur variable de l'ouverture de la pupille, qui peut être vingt fois plus petite lorsque l'œil est en pleine lumière que lorsqu'il est dans la pénombre. Il semble d'ailleurs que ce soit l'éclat spécifique des objets lumineux qui détermine cette protection automatique de la rétine, bien plus que la quantité totale de lumière qui tombe sur l'œil. C'est ce qui explique sans doute la sensation que l'on éprouve en comparant un arc nu et un arc identique entouré d'un globe dépoli. Le premier brille plus qu'il n'éclaire, et, bien que le second ait 25 à 30 p. 100 de sa lumière absorbée par le diffuseur, il laisse pénétrer plus de lumière jusqu'à la rétine, par suite de la contraction moindre de la pupille : il semble plus lumineux. On comprend ainsi l'utilité et l'intérêt que présentent certains diffuseurs en verre cannelé ou strié qui donnent à la source une plus grande surface apparente sans absorption notable de lumière.

D'autre considérations d'ordre physiologique viennent encore compliquer le problème. Le rendement lumineux tel que nous l'avons défini, par le rapport de l'énergie comprise dans le spectre visible à l'énergie rayonnée totale, ne permet pas de tirer de renseignement précis sur la valeur éclairante d'une source. Suivant les différents observateurs, les limites du spectre visible sont variables, ce qui introduit une grave cause d'erreur, puisque justement ce sont les radiations dans le rouge et l'infra-rouge qui possèdent la plus grande énergie, ainsi que le montre immédiatement la figure 488. De plus, nous avons vu que l'œil est très inégalement impressionné par les diverses radiations, le maximum de sensibilité étant voisin du jaune verdâtre qui, justement, dans le spectre solaire, se trouve correspondre au maximum d'énergie. On peut voir là un exemple remarquable d'adaptation au milieu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour montrer la sensibilité énorme de notre œil à cette radiation, M. Guillaume a calculé qu'en transformant une petite calorie en énergie lumineuse correspondant à cette teinte, on pourrait impressionner un œil normal pendant cent millions d'années.

On aurait donc une meilleure évaluation du rendement lumineux si on faisait intervenir chaque radiation avec la part pour laquelle elle contribue à la vision. Mais le coefficient que l'on attribuerait ainsi à chaque radiation, et qui pourrait être, par exemple, celui que nous avons donné d'après Nutting (p. 497), n'aurait encore qu'une valeur relative, puisqu'il dépend de chaque observateur. On ne peut tourner la difficulté qu'en prenant une moyenne entre un grand nombre d'expériences faites par des opérateurs différents. Même dans ces conditions, il faut encore tenir compte de l'influence de la durée de l'impression lumineuse qui diffère avec les couleurs, et de la fatigue de l'œil, ainsi que l'ont montré MM. Broca et Sulzer.

Aussi ne donnerons-nous aucun chiffre, car même les valeurs relatives ne permettraient pas de tirer des indications précises. Au point de vue pratique, la consommation en watts par bougie est amplement suffisante pour différencier les divers modes d'éclairage. Le tableau suivant montre comment se classent actuellement les diverses lampes.

Lampes à incandescence.

Filaments.	*Watts par bougie.*
Carbone	4
Nernst	1,9
Tantale	1,5
Tungstène pressé	1,25
Tungstène étiré	1,0
Demi-watt	0,6

Lampes à arc (1). (Voir tableau page suivante.)

* * *

La connaissance de l'intensité lumineuse moyenne des sources d'éclairage et de leur rendement en watts par bougie n'est pas le seul élément intéressant. Il faut encore connaître comment se distribue dans l'espace le flux lumineux qu'elles émettent.

Nous ne dirons cependant que peu de choses de cette répartition. En effet, pour les lampes à incandescence, elle est fonction de la disposition du filament dans la lampe, disposition qui varie suivant chaque construc-

(1) D'après BLONDEL, *Rapport au Congrès international*, Marseille, 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comparaison approximative des différentes espèces d'arc. — Intensités lumineuses hémisphériques en bougies décimales et consommations spécifiques correspondantes sous 110 volts.

Type de lampe.	*Ampères.*	*Volts.*	*Watts* utiles.	*Watts* totaux (2).	*Intensité moyenne hémisphérique en bougies* (1).	*Consommation spécifique en watts par bougie hémisphérique moy.* absolue.	*Consommation spécifique en watts par bougie hémisphérique moy.* pratique sous 110 volts.	*Usure horaire de l'électrode minéralisée.*
	1	2	3	4	5	6	7	8
								Millimètres.
I. — *Courants continus.*								
Lampe ordinaire à charbons purs	9	40	360	495	700	0,514	0,710	14 à 16
Lampe ordinaire à charbons purs (par 3)	9	35	315	330	540	0,583	»	14 à 16
Lampe à flamme à charbons à mèche verticaux	9	40	360	495	910	0,396	0,610	27,5
Lampe à flamme *intensive* à charbons à mèche convergente	9	45	405	495	2 000	0,202	0,247	34 à 42
Lampes enfermées américaines	6,8	70	476	768	329	1,45	2,334	1,5 à 2
Lampe à la *magnétite*	3,5	91	320	385	400 (?)	0,800	0,962	1 à 2
Lampe Bremer (9 amp.)	9	48	412	495	4 814	0,131	0,143	35 à 45
Lampe *carbo-minérale* (9 amp.)	9,1	43	391,3	500	4 800	0,081	0,103	16 à 20
Lampe *carbo-minérale* (5 amp.)	5,01	50,3	252	275	883	0,133	0,146	16 à 20
Arc au mercure de Cooper-Hewitt	3,5	80	280	385	770	0,362	0,50	»
Arc au mercure de Küch					250	0,27	0,33	
Arc au ferro-titane	3,5	48,3	169	385	700	0,242	0,55	1 à 2
Arc lumineux entre charbons purs (lampe carbone)	10	90	90	110	070	0,82	0,98	18 à 20
Petits arcs enfermés	3	80	240	230	265	0,90	1,25	4 à 5
II. — *Courants alternatifs.*								
Lampe ordinaire à charbons non minéralisés	9	30	270	330	350	0,772	0,945	15 à 16
Lampe ordinaire à charbons purs à mèche	15	35	480	555	470	1,02	1,18	15 à 16
Lampe à flamme à charbons verticaux	9	30	270	330	700	0,386	0,471	30
Lampe à flamme à charbons convergents	9	45	405	495	2000	0,202	0,247	35 à 45
Lampe enfermée	6,6	70	482	726	314	1,535	2,312	1 à 2
Lampe Bremer	9	48	»	»	»	0,131	0,143	35 à 45
Lampe *carbo-minérale*	10	35 (reels)	255	370	1890	0,135	0,174	16 à 20

Voir les notes à la page suivante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur, et de la forme et de la texture de l'ampoule (ovale, ronde, dépolie, etc.). De plus, comme pratiquement on n'emploie jamais la lampe nue, mais munie d'un réflecteur, les résultats sont complètement modifiés. Il suffit, pour s'en convaincre, de se reporter à la figure 538, qui donne les courbes

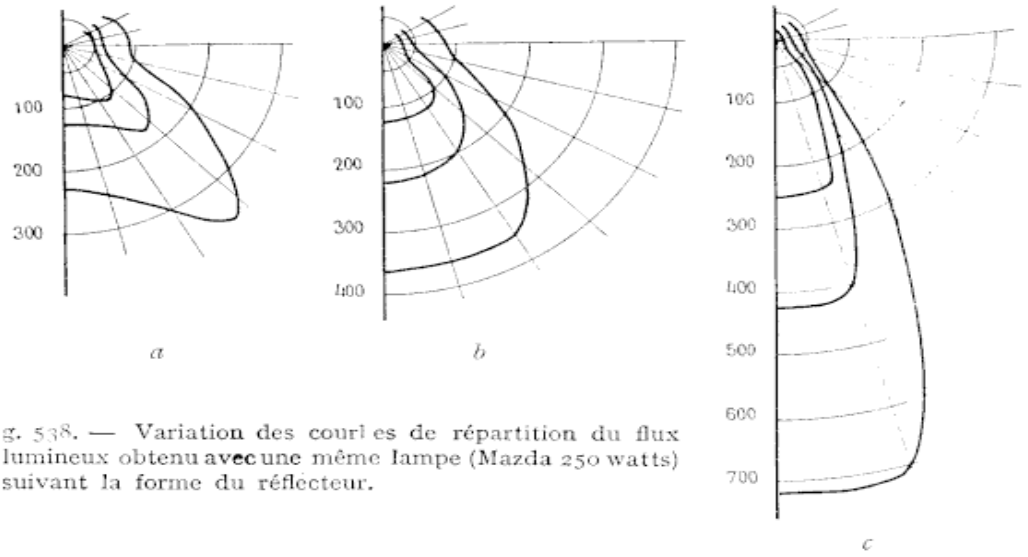


Fig. 538. — Variation des courbes de répartition du flux lumineux obtenu avec une même lampe (Mazda 250 watts) suivant la forme du réflecteur.

de répartition de la lumière pour une même lampe Mazda de 250 watts munie de trois réflecteurs de formes différentes. Ces réflecteurs ont d'ailleurs spécialement pour but de modifier la répartition au mieux du but à remplir. La forme *a* donne une répartition qui convient pour les magasins, antichambres et pièces à plafond bas ; au contraire, la forme *b* assure un éclairage brillant comme celui demandé dans les restaurants, salles de bal, etc. ; enfin, la forme *c* concentre la lumière dans un petit espace, comme il est désirable pour les vitrines des étalages, les pièces hautes et étroites.

Le cas des lampes demi-watt est tout différent de celui des autres

(1) Rappelons que l'unité d'intensité lumineuse n'est pas la même dans les différents pays et que la correspondance suivante existe entre les divers étalons employés :

	Carcel.	*Hefner.*	*Vernon-Harcourt.*	*Bougie décimale.*
Carcel	1	10,75	0,965	9,61
Hefner	0,093	1	0,09	0,895
Vernon-Harcourt	1,035	11,10	1	9,95
Bougie décimale	0,104	1,15	0,1	1

(2) Dans la colonne « watts totaux », on a tenu compte de la dépense d'énergie dans la résistance mise en série avec l'arc. Ainsi, la lampe ordinaire à charbons purs ne demande que 40 volts pour pouvoir fonctionner. On peut donc en mettre deux en série sur le secteur ; elles consomment 80 volts et il faut absorber 30 volts, soit 15 par lampe, dans une résistance *a* qui correspond à une dépense de $9 \times 15 = 135$ watts qui, ajoutés aux 360 watts utilisés dans l'arc, donnent 495 watts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lampes à incandescence à charbon ou métalliques. Le filament n'est plus disposé verticalement, mais horizontalement, de sorte qu'une grande partie de la lumière est renvoyée au-dessus de l'horizontale, ce qui rend

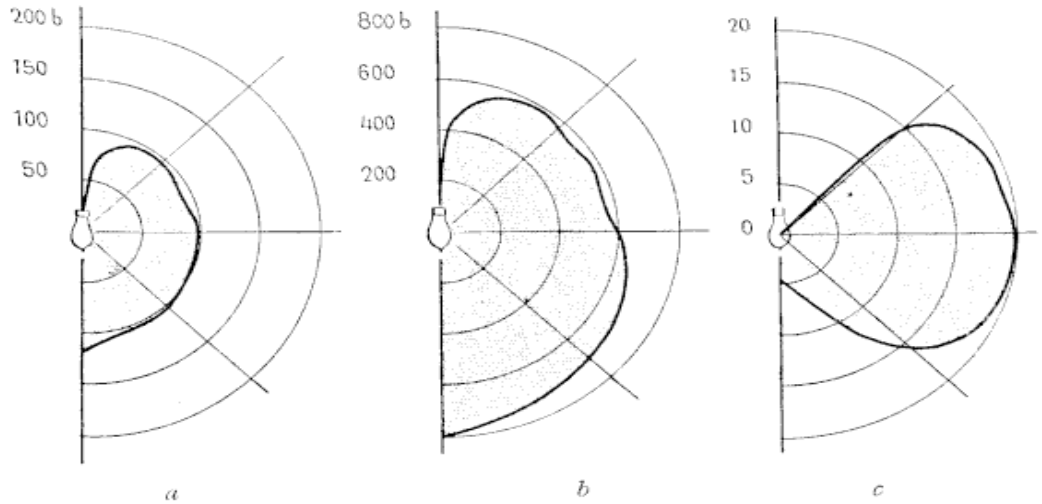


Fig. 539. — Répartition du flux lumineux des lampes demi-watt (d'après Pécheux).

a, lampe de 100 bougies ; *b*, lampe de 600 bougies ; en *c* est représenté le flux lumineux d'une lampe tantale ordinaire de 20 bougies (d'après Laporte).

l'emploi de réflecteurs spéciaux presque indispensable, si l'on veut profiter de toute la lumière émise. Les courbes de la figure 539, que nous reproduisons d'après M. Pécheux, donnent la répartition du flux des lampes de faible puissance (jusqu'à 100 bougies) dans lesquelles le filament, très fin, s'allonge sous l'action de la chaleur et forme légèrement chaînette, et celle des lampes puissantes (600 bougies et plus) où le fléchissement du filament ne se produit pas. Nous avons également reproduit d'après des nombres de M. Laporte, la courbe de répartition du flux d'une lampe tantale à filament en zigzags verticaux. On voit immédiatement que les deux types de courbes diffèrent totalement.

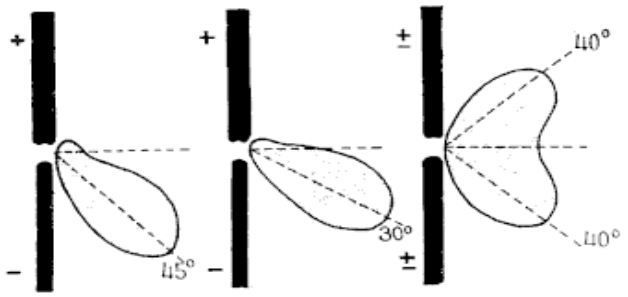


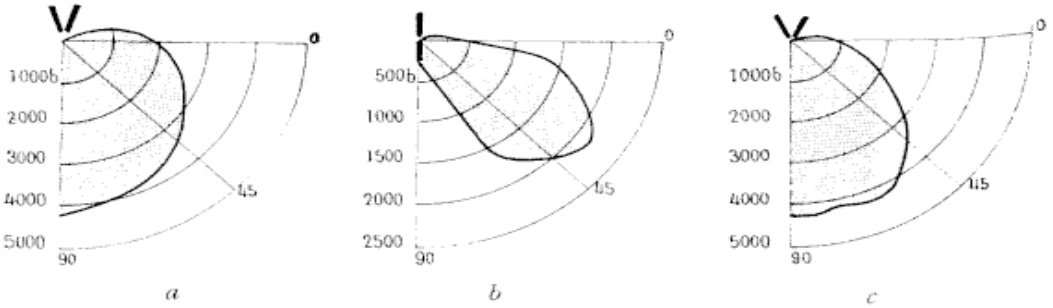
Fig. 540.

Arc à courant continu : à l'air libre, en vase clos. — Arc à courant alternatif.

Les lampes à arc ont une répartition du flux qui n'est pas la même, suivant qu'elles sont alimentées par du courant continu ou du courant alter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

natif, l'intensité maxima étant émise suivant une direction à 45° de l'horizontale dans le premier cas et suivant deux directions à 40° dans le second (fig. 540), d'où la justification du système optique que nous avons



a *b* *c*

Fig. 541. — Répartition du flux hémisphérique moyen dans les lampes à arc à charbon pur.

a, lampe Beck (64,5 volts, 11,2 ampères). Intensité hémisphérique moyenne inférieure, 3 220 bougies ; *b*, lampe Bardon (45,5 volts, 8,02 ampères) à vase clos. Intensité hémisphérique moyenne inférieure, 1 470 bougies ; *c*, lampe Bremer (45,7 volts, 9,45 ampères). Intensité hémisphérique moyenne inférieure, 2 200 bougies.

décrit dans la lampe de la General Electric Co. Quand l'arc continu fonctionne en vase clos, le maximum a alors lieu aux environs de 30° (lampe Bardon, par exemple).

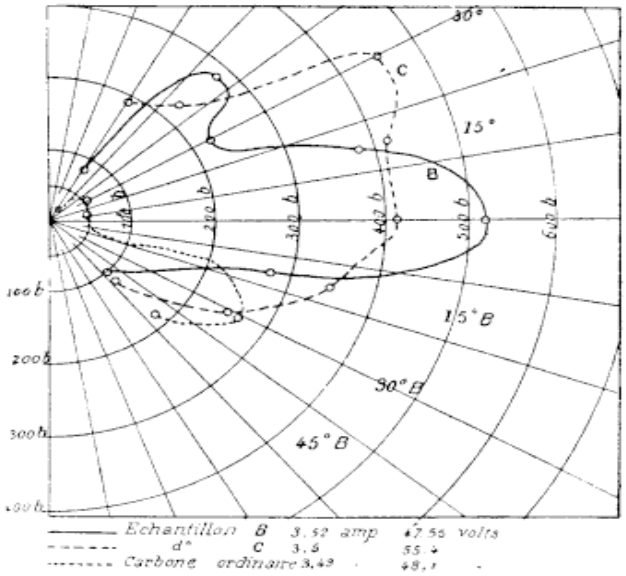


Fig. 542. — Courbes à feu nu d'arcs de 3,5 ampères avec positif au titane, (B) ferro-titane sous 47,5 volts, (C) rutile-magnétite sous 55,4 volts. La courbe pointillée se rapporte à l'arc ordinaire de 3,5 ampères en vase clos. Intensités sphériques moyennes : B = 510, C = 283 ; vase clos : 84 bougies (d'après Blondel).

Pour les lampes à charbons inclinés, la répartition du flux est influencée par l'angle des charbons, l'intensité du courant, la nature des substances ajoutées dans les charbons qui donnent des teintes variables et des longueurs de flamme différentes. Aussi une étude complète est-elle pratiquement impossible. A titre d'indication, nous avons reproduit les courbes de répartition relatives aux lampes Beck et Bremer que nous avons décrites.

Les figures 542 et 543, empruntées à un mémoire de M Blondel, montrent la complexité du problème et l'influence du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

globe dans lequel se trouve toujours enfermé l'arc plus ou moins hermétiquement.

On voit donc que la répartition du flux lumineux dans l'espace est un élément très important sur lequel on peut agir efficacement par l'emploi de réflecteurs et de diffuseurs appropriés. Ce dernier point est trop souvent négligé et, dans beaucoup d'installations, la forme des réflecteurs est choisie beaucoup plus d'après l'esthétique de leur silhouette que d'après leurs qualités optiques. Pour chaque but particulier, lampe et réflecteur sont nettement déterminés, et remplacer, comme on le fait trop souvent, les lampes à filament de charbon par des lampes métalliques ou des lampes demi-watt sans changer en même temps les réflecteurs est un nonsens au point de vue de l'éclairage. Dans bien des cas, c'est l'unique raison pour laquelle on n'obtient pas l'amélioration escomptée.

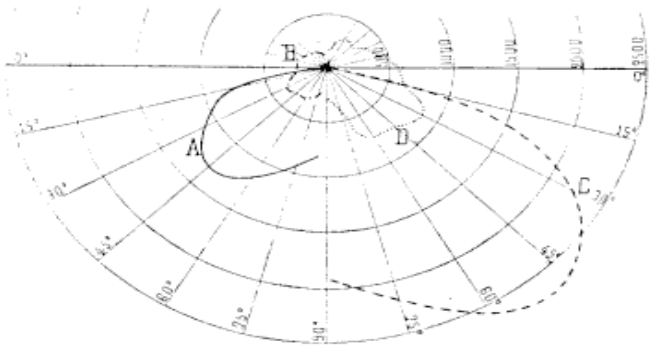


Fig. 543. — Courbes photométriques à feu nu et sous globe opale de deux arcs *carbo-minéraux*, courant continu, de 5 ampères (moitié droite de la figure) et 3 ampères (moitié gauche) sous 50 volts. Intensités moyennes sphériques en bougies : A = 420 (feu nu), B = 288 (globe), C = 786 (feu nu), D = 586 (globe). Intensités hémisphériques : A = 700, B = 363, C = 1 650, D = 765 (d'après Blondel).

* * *

De nombreuses recherches ont été faites non plus en vue de comparer les diverses sources lumineuses, mais au contraire pour chercher la meilleure utilisation d'un mode d'éclairage donné.

Cette question est particulièrement importante dans l'industrie. Il est établi que les ateliers sombres sont plus sales que ceux dans lesquels la lumière entre à profusion et que les ouvriers y travaillent plus lentement. Les accidents sont aussi plus fréquents dans les locaux industriels où la lumière est mal distribuée, laissant dans une clarté douteuse les poulies, les engrenages, etc. C'est surtout au travail à la lumière artificielle que s'appliquent avec le plus de force les remarques précédentes. L'éclairage rationnel augmente de 10 p. 100 environ le rendement du travail. Quant aux accidents, 25 p. 100 peuvent être attribués au mauvais éclairage des usines. La figure 544 est très suggestive à ce point de vue ; elle résulte d'une statistique américaine s'étendant sur une période de trois ans et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

portant sur 80 000 usines. On voit nettement la relation entre le nombre des accidents et les conditions d'éclairage.

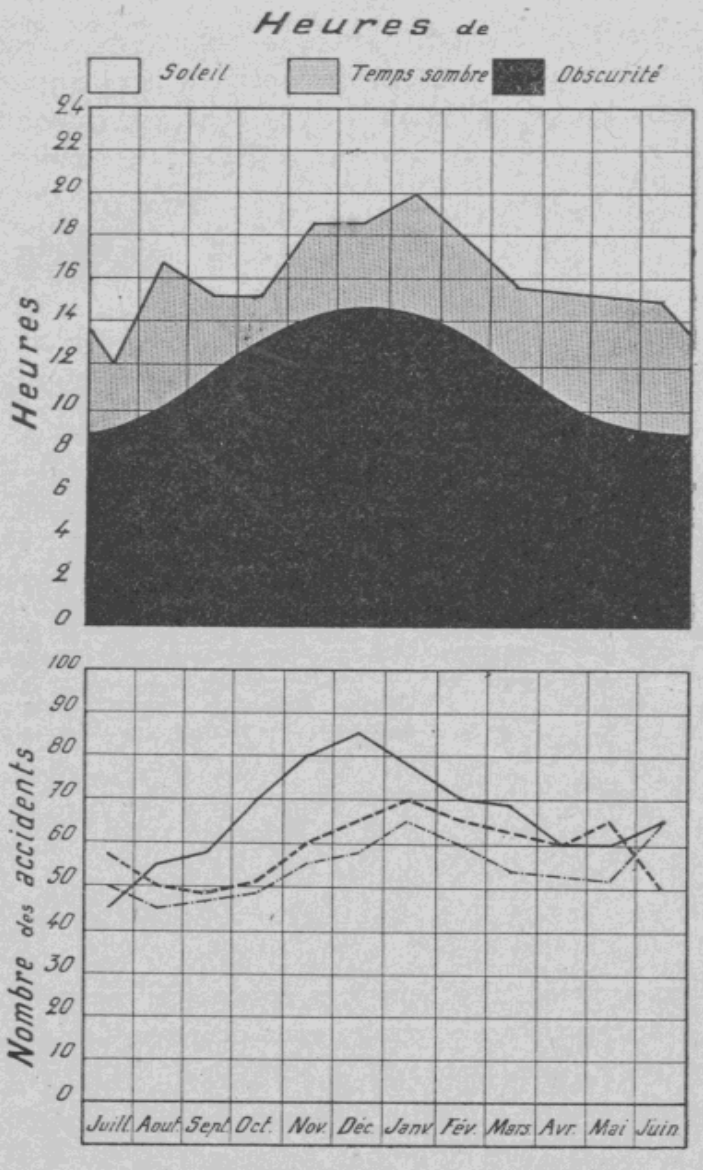


Fig. 544. — Correspondance entre le nombre des accidents et l'éclairage des ateliers. Le graphique supérieur donne la proportion des heures de lumière, temps sombre et obscurité par jour pour une année normale. Le graphique inférieur indique le nombre d'accidents correspondants. Le trait noir est relatif aux accidents se produisant la nuit, le trait interrompu aux accidents pendant la période de pénombre, la courbe en trait mixte aux accidents pendant le jour.

On sait que l'exposition à une lumière trop « crue » détermine une contraction des muscles ciliaires qui amène rapidement la fatigue. De plus, si l'œil est accommodé pour la vision nette d'un objet et que dans le champ visuel, en arrière particulièrement, existe un foyer lumineux intense, la fatigue de l'œil est très rapide. En tenant compte de ces deux remarques, il faut, dans les usines, non seulement que l'éclairage soit assez intense pour que l'on puisse discerner tous les objets sans fatigue, mais encore les sources de lumière, suffisamment espacées, doivent être garanties par des réflecteurs calculés de telle sorte que l'ouvrier travaillant sous l'une d'elles ne puisse être atteint par la lumière directe des autres. Il faut de plus que les lampes ne déterminent pas d'ombres portées s'entrecroisant, car il en résulte pour l'œil une impression pénible qui se traduit par une hésitation dans les mouvements et une fatigue générale plus rapide.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Pour le choix des lampes à incandescence, on peut se laisser guider par les indications suivantes, que nous empruntons à une étude du Dr L. Pech.

La lampe à filament de charbon a le défaut de rayonner une trop grande quantité de rayons infra-rouges qui entrainent rapidement, en traversant l'œil, de la céphalée, du larmoiement et une sorte de sensation d'échauffement du globe de l'œil. D'autre part, l'infra-rouge étant réfléchi et diffusé en grande quantité par les objets qui nous entourent, l'éclairage. même indirect, fatigue rapidement l'œil.

La lampe demi-watt tombe dans l'excès contraire, et son rayonnement ultra-violet très riche éblouit par un curieux phénomène de fluorescence. Le cristallin frappé par l'ultra-violet devient fluorescent et, la rétine étant impressionnée par ce rayonnement secondaire, les objets ne sont plus vus qu'à travers une sorte de halo lumineux. De plus, les dimensions du filament étant très réduites, on obtient une lumière très riche en oppositions, ce défaut étant encore accentué par la fluorescence que prennent presque tous les corps sous l'influence de la lumière ultra-violette. Il en résulte une diminution de la sensibilité rétinienne et la congestion de la conjonctive. Aussi ne doit-on utiliser ces lampes que pour l'éclairage indirect.

Quant aux lampes monowatt au tungstène, leur rayonnement infra-rouge est compensé par le rayonnement ultra-violet. En effet, si l'action d'une seule catégorie de rayons est nuisible à l'œil, lorsque les deux existent en proportions convenables, ils sont parfaitement tolérés par les téguments humains. Les lampes monowatt sont donc préférables pour les usages courants.

* * *

On voit combien le problème est complexe. Dans une très intéressante étude, P. C. Nutting, directeur du Laboratoire de recherches de la Westinghouse, a formulé quelques règles générales, fruits d'une longue expérience pratique et théorique, qui constituent le guide à suivre dans l'établissement de l'éclairage. Nous les résumons en quelques mots

L'objectif de tout éclairage est d'assurer la visibilité des objets sur lesquels se dirige l'attention. Les détails à observer peuvent être :

a. Les contours des grands objets (comme dans l'éclairage public) ;

b. Les contours des petits objets (comme dans la lecture) ;

c. Les détails les plus fins que l'œil soit capable de résoudre (comme dans la p hotogravure, la couture, le dessin, etc.).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La vision de la classe *a* ne nécessite qu'un faible éclairage. On opère si près de la limite inférieure de l'impression lumineuse que la rétine est incapable de percevoir les détails, excepté en cas de contraste accentué. On peut n'accorder qu'une faible attention à la direction de l'éclairage ou au rapport de la lumière diffusée à la lumière directe, car l'œil opère toujours avec une faible efficacité. Cependant, il faut éviter l'éblouissement, car la rétine est dans un état d'hypersensibilité, et un éblouissement même faible déprimerait la sensibilité au point de rendre les objets invisibles. Les phares d'automobiles ordinaires et les unités d'éclairage visibles à moins de 30° au-dessus de l'horizon doivent être soigneusement évités.

C'est dans la classe *b* que rentrent la plus grande partie des cas pratiques : lecture, écriture, éclairage des salles d'écoles, théâtres et ateliers. Les contrastes sont accusés et l'observation des détails fins n'est pas nécessaire.

Les problèmes difficiles à résoudre dans ces cas consistent à assurer le rapport correct de la lumière diffuse et de la lumière directe et à donner la bonne direction à chacune d'elles. Pour assurer une vision confortable et aiguë, il faut qu'il n'existe ni lumières trop fortes, ni ombres denses, mais que les détails à observer présentent un contraste suffisant sans être pour cela trop accentué. L'éclairage indirect, s'il fait bien disparaître les ombres et les lumières trop fortes, supprime presque complètement les contrastes, principalement sur les surfaces brillantes ou inégales. Il recouvre les premières d'un léger voile de lumière réfléchie, tandis que les surfaces inégales deviennent moins visibles par suppression des ombres.

En plein air, par temps clair, la lumière diffusée par le ciel contribue pour 16 à 40 p. 100 à la lumière totale tombant sur une surface horizontale ou verticale. Pour une bonne vision moyenne, la proportion idéale est sans doute voisine de 30 p. 100 de lumière diffuse.

Si l'on observe un paysage par un jour clair à travers un verre jaune ou vert, il paraît beaucoup plus éclatant et plus net. On explique ce fait en disant que le verre jaune supprime la brume pourpre. Mais, en plus, il élimine la lumière diffuse du ciel dans toutes les ombres, car ces ombres sont éclairées par la lumière bleue, tout en laissant presque inaffectée la lumière solaire directement réfléchie, parce que le bleu ne constitue qu'une faible partie de la luminosité de cette dernière. Par suite, les ombres sont approfondies et les contrastes partout augmentés, produisant ainsi un effet d'éclaircissement. C'est l'inverse qui se passe si l'on regarde à travers un verre bleu.

Tandis que la diminution de clarté par l'absorption due à un verre jaune peut produire l'apparence d'une clarté renforcée, l'addition de lumière peut au contraire donner la sensation de clarté diminuée. Si on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ajoute un éclairage diffus peu élevé dans une pièce éclairée par des lampes placées assez haut et envoyant une lumière directe, la sensation produite est celle d'une diminution de clarté, par suite de l'atténuation des ombres et de la décroissance générale des contrastes.

Il est facile de répartir les foyers lumineux de façon à obtenir une proportion convenable entre la lumière directe et la lumière diffuse. Ensuite, il faut chercher à donner à la lumière une direction adaptée aux services à rendre. Dans les galeries d'art, par exemple, les surfaces brillantes que l'on regarde sont planes et presque verticales : un éclairage à grand angle est donc indiqué. Au contraire, dans les ateliers mécaniques, les surfaces à considérer sont surtout des cylindres horizontaux, et l'éclairage doit être à angle faible et très diffus.

Pour l'éclairage des rues, on conserve encore dans bien des villes la coutume de laisser le dispositif éclairant en pleine vue et de permettre à une fraction importante de la lumière de s'échapper vers le haut. Or la présence d'une source lumineuse éclatante dans le champ de vision diminue énormément la sensibilité visuelle, de sorte que le dispositif habituel est loin d'être satisfaisant. La figure 548 est particulièrement instructive à cet égard. Elle représente, à gauche, la rue Mathurin-Moreau, à Paris, éclairée par des appareils trilampes analogues à ceux de la figure 545 munis de réflecteirs scientifiquement étudiés, qui renvoient la lumière vers le sol et assurent un éclairage uniforme de la chaussée sans que les foyers soient apparents à l'œil et puissent l'éblouir, tandis qu'à droite de la photographie on retrouve l'aspect ordinaire de l'éclairage irrationnel, qui est encore la règle même dans les grandes villes.

Enfin, lorsque l'on doit observer d'une façon critique les détails les plus fins (classe *c*), seules les meilleures conditions d'éclairement empêchent la gêne visuelle et la tension oculaire. Un travail fin à l'aiguille est peut-être l'opération qui nécessite la meilleure espèce d'éclairage. L'attention se concentre sur une masse d'images brillantes et fines, formées par l'aiguille et les fibres des tissus. Si la lumière est diffuse, ces images s'élargissent, se fusionnent, et les ombres disparaissent. La vision est fatiguée par la tentative de percevoir de faibles contrastes juste à la limite du pouvoir de discrimination. Le seul éclairage approprié est celui limité presque à une direction et assez élevé. On voit alors une masse d'images cylindriques de la source et, si celle-ci est peu étendue, ces images sont nettes et contrastées.

Pour les écoles, on cherche à réaliser un éclairement aussi uniforme que possible. La figure 546 montre un réflecteur spécialement étudié à cet effet, répartissant le flux lumineux comme l'indique la courbe photométrique figure 547. L'éclat est totalement supprimé, ce qui permet aux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

yeux les plus sensibles un travail facile et prolongé sans fatigue. La figure 549 représente une salle de travail de l'École nationale d'Arts et

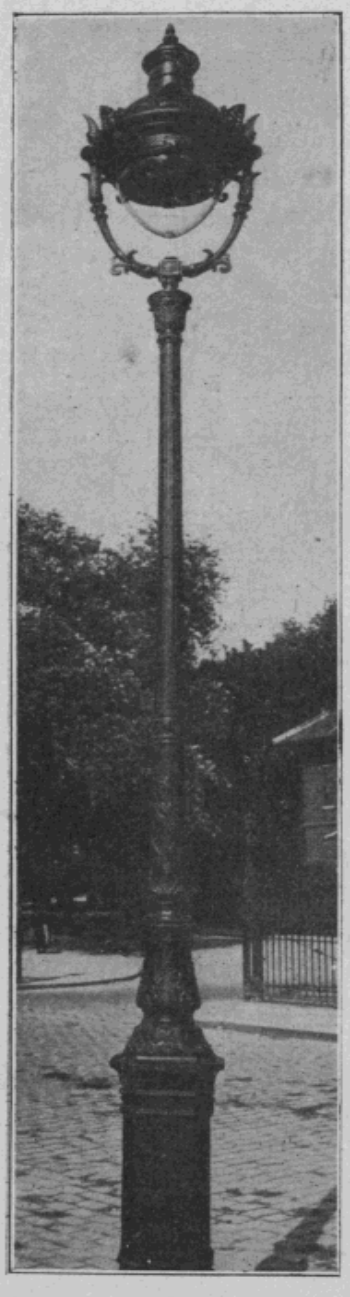


Fig. 545. — Lampe à éclairage rationnel.

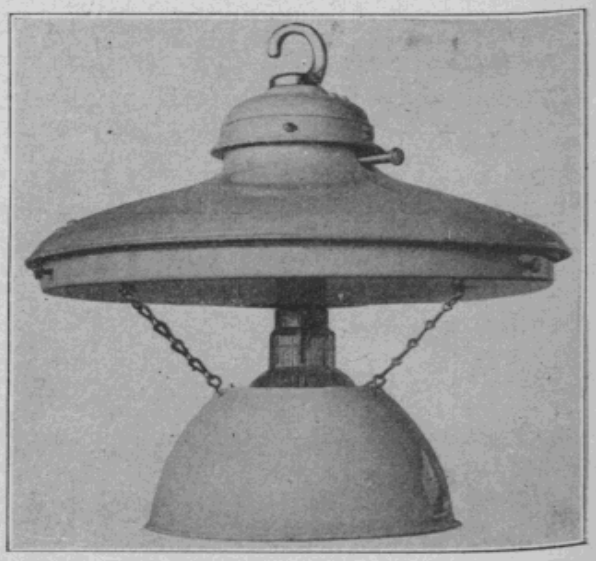


Fig. 546. — Diffuseur rationnel.

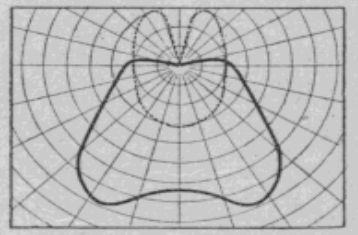


Fig. 547. — Courbe de répartition du flux lumineux du diffuseur rationnel.

Métiers de Paris, éclairée par ces diffuseurs, qui ont de plus l'avantage d'être très robustes puisqu'ils ne comportent aucune verrerie fragile pouvant retenir la poussière.

En résumé, la vision la meilleure demande une abondance de lumière venant presque d'une seule direction, comme la lumière du ciel arrivant à travers des fenêtres élevées et bien espacées. L'éclairage indirect par des sources nombreuses est très mauvais. L'éclairage semi-direct par des unités rapprochées et sur un seul côté est probablement la meilleure forme d'éclairage artificiel.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A titre d'indication seulement, nous donnons ci-dessous quelques

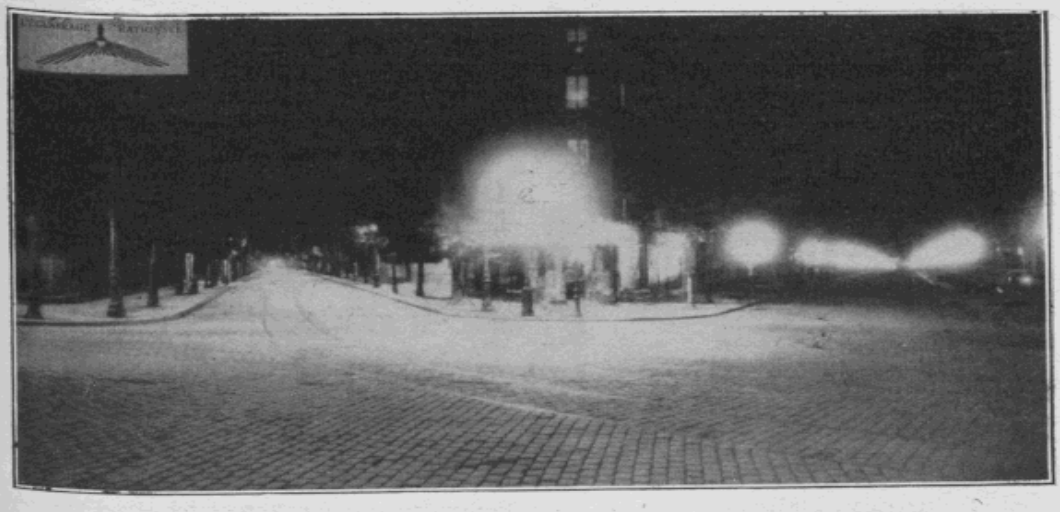


Fig. 548. — Exemple du bon et du mauvais éclairage.

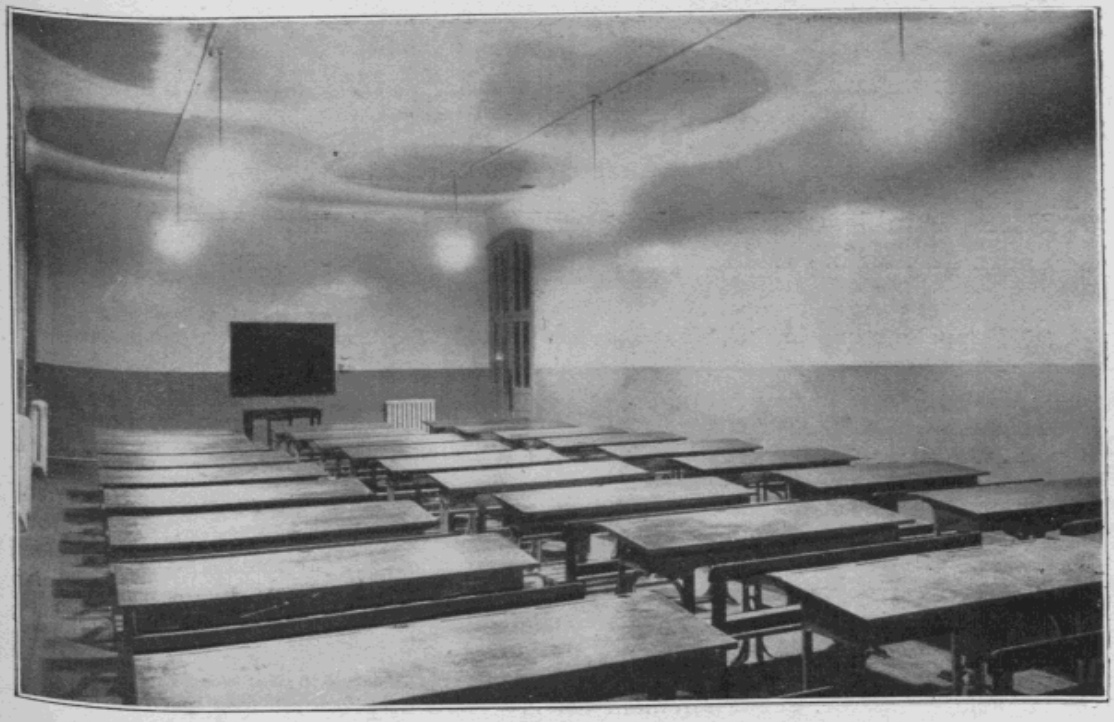


Fig. 549. — Un bon éclairage d'une salle d'étude.

chiffres qui permettront de se guider dans l'établissement d'un projet d'éclairage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Valeur réflective de diverses parois.

Plafond ou mur blancs	80 p. 100
Mur gris	50 —
Mur jaune ou rose	40 —
Peinture rouge	25-30 —
— brune	40 —
— vert clair	40-50 —
— vert foncé	15-25 —
— vert très foncé	10-15 —

Nombre de lux nécessaires par mètre carré (blancheur moyenne des parois)

Magasins	175 à 250
Appartements	35 à 50
Vestibules	10 à 20
Restaurants	50 à 60
Bureaux	60 à 80
Industries : Halls	30 à 40
Travaux fins	60 à 80
Ajustage	60 à 80
Imprimerie, textile	100 à 150
Places publiques, rues	5 à 20

La formule suivante permet de calculer le nombre de lumens (1) nécessaires pour l'éclairage d'une pièce :

Nombre de lumens = 2 fois l'éclairement nécessaire en lux × surface en m².

Enfin, le tableau suivant facilitera, connaissant le nombre de lumens, le choix du nombre des lampes à installer.

(1) Rappelons que le flux s'exprime en *lumens*. C'est une constante bien définie pour chaque source, tandis que l'*intensité* lumineuse varie avec la direction. Supposons qu'une source émette une bougie décimale dans toutes les directions et plaçons-la au centre d'une sphère creuse de 1 mètre de rayon. Toute surface d'un mètre carré découpée sur cette sphère reçoit, par définition, une quantité de lumière égale à un *lumen*.

Comme la surface totale de cette sphère est 12m²,57, toute source lumineuse émettant une bougie dans toutes les direction émet au total 12,57 lumens. Il est important de déterminer la quantité de lumens reçue réellement sur les surfaces éclairées, ou l'*éclairement* de ces surfaces. L'unité correspondante est le *lux*, ou éclairement produit par une bougie décimale sur une surface de 1 mètre carré placée à 1 mètre de la source et perpendiculairement aux rayons lumineux.

L'éclairement diminue extrêmement vite quand grandit la distance entre la source et la surface éclairée. Cet éclairement est inversement proportionnel au carré de la distance entre la source et l'objet.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Valeur approximative en lumens des lampes intensives.

Type de lampe en watts.	*Valeur en lumens.*	
	110-125 volts.	*220-250 volts.*
25	180	150
45	400	300
75	800	600
100	1 200	1 000
200	2 900	2 400
300	4 500	3 000
500	8 000	7 200
1 000	19 000	16 500

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXIV

APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ
LES MOTEURS

Réversibilité des génératrices. — Moteurs à courant continu. — Généralités. — Calage des balais. — Force contre-électromotrice. — Conditions au démarrage. — Rendement. — Vitesse de rotation. — Puissance. — Caractéristiques. — Moteurs série. — Moteurs shunt. — Moteurs compound. — Caractéristiques de chacun d'eux. — Moteurs à courant alternatif. — Moteurs synchrones. — Principe de fonctionnement. — Accrochage. — Indicateurs de phases. — Moteurs asynchrones. — Moteurs d'induction. — Champs tournants. — Moteurs à cage d'écureuil. — Moteurs à enroulement. — Moteurs à collecteurs. — Moteurs série, moteurs universels. — Moteurs à répulsion. — Moteurs Deri. — Moteurs Latour.

Les principes généraux de l'induction montrent que les dynamos génératrices à courant continu que nous avons étudiées précédemment sont des appareils réversibles Lorsqu'on leur fournit du travail, elles fonctionnent comme générateurs d'énergie électrique ; si, au contraire, on leur fournit de l'énergie électrique, elles se mettent en mouvement et produisent du travail mécanique. En d'autres termes, une dynamo transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, et inversement. Dans le premier cas, c'est une ***génératrice*** ; dans le second cas, un ***moteur***.

Il n'y a pas de différence, au point de vue de la construction, entre une dynamo et un moteur à courant continu, et les divers types de dynamos que nous avons décrits précédemment peuvent être également utilisés comme moteurs. Nous aurons donc des moteurs série, des moteurs en dérivation et des moteurs compound.

* * *

Avant de les examiner en détail, il est nécessaire de faire quelques remarques générales. Tout d'abord, conformément à la loi de Lenz, si on envoie du courant par les balais dans une dynamo, l'induit se met à tourner, mais, pour un même sens de circulation du courant dans la machine, le sens de rotation de l'induit est, dans le fonctionnement en moteur, l'inverse de celui dans le fonctionnement en génératrice. C'est dire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que, si l'on veut conserver le même sens de rotation, il faut que le courant ou le flux inducteur soient inversés, mais pas les deux simultanément.

* * *

Supposons que ce soit le sens du courant qui soit inversé. La variation du courant dans chacune des bobines en commutation se produira donc en sens inverse du sens correspondant au fonctionnement en génératrice, et, par suite, dans un moteur en charge, les balais doivent être décalés ***en arrière*** du sens de rotation, tandis que c'était l'inverse dans les génératrices.

Il en résulte que, dans les moteurs destinés à tourner indifféremment dans un sens ou dans l'autre, comme les moteurs de traction ou ceux des appareils de levage, par exemple, les constructeurs doivent étudier les caractéristiques de façon à ce qu'ils puissent fonctionner sans décalage des balais, ceux-ci étant disposés au voisinage de la ligne neutre. Par la sursaturation des inducteurs et l'emploi de pôles auxiliaires, comme dans les génératrices, on arrive à avoir une marche sans étincelle dans les deux sens.

* * *

Enfin, lorsqu'un moteur tourne, chacun des conducteurs actifs de l'induit coupe le flux magnétique des inducteurs et, par suite, devient le siège d'une force électromotrice induite (comme dans le cas de la génératrice) dont le sens est tel qu'elle tend à s'opposer à la circulation du courant agissant. Cette force a reçu le nom de ***force contre-électromotrice***. C'est la force électromotrice que le moteur fournirait si on le considérait comme générateur tournant à la même vitesse et dans le même flux.

Si V est la différence de potentiel constante appliquée aux bornes du moteur, si e est la force contre-électromotrice induite, de signe opposé, et qui est toujours inférieure à V en valeur absolue, sans quoi il ne passerait pas de courant dans le moteur et celui-ci ne pourrait plus tourner, le courant I qui passe dans le moteur dont la résistance est r ohms est donné par :

$$V = e + Ir ;$$
$$I = \frac{V - e}{r}.$$

Comme la résistance du moteur est toujours très faible, il faut que V et e aient sensiblement la même valeur, afin que le courant I n'atteigne pas des intensités exagérées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, au moment du démarrage du moteur, il n'y a pas de force contre-électromotrice, puisque le moteur est au repos, et par suite la résistance r intervient seule pour limiter l'intensité du courant qui atteindrait alors des valeurs dangereuses pour la machine dont les isolants fondraient sous l'influence de la chaleur dégagée par effet Joule dans les bobinages. C'est pourquoi il faut toujours prévoir un ***rhéostat de démarrage*** calculé de telle façon qu'à l'arrêt l'intensité du courant ne dépasse pas une certaine valeur. On démarre le moteur en diminuant progressivement la résistance du rhéostat jusqu'à ce que, le moteur ayant atteint sa vitesse de régime, la force contre-électromotrice équilibre à peu près la tension appliquée. A ce moment, on retire le rhéostat du circuit.

* * *

La puissance électrique absorbée par le moteur est VI. Or, une partie est dissipée sous forme de chaleur dans les bobinages et a pour expression I^2r, de sorte que la puissance électrique réellement transformée en puissance mécanique, déduction faite des pertes par frottement, ventilation, hystérésis dans le fer, et par courants de Foucault dans le fer et le cuivre, est seulement eI. Le rendement ***théorique*** est donc $\frac{e}{V}$; le rendement ***industriel*** est plus faible. Il atteint, à pleine charge, 0,9 environ.

* * *

La ***vitesse de rotation*** à pleine charge a une valeur telle que la force contre-électromotrice équilibre sensiblement la tension appliquée ; le calcul montre très simplement que cette vitesse est à peu près proportionnelle à la tension appliquée aux balais et inversement proportionnelle à l'intensité du flux des inducteurs.

* * *

Enfin, la ***puissance mécanique*** du moteur peut s'exprimer en fonction du couple moteur et de la vitesse de rotation, le couple C étant égal au produit de la force tangentielle F qui s'exerce par exemple sur une poulie de rayon R. On a :

$$P = 2\pi nC$$

si le moteur fait n tours par seconde.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(Remarquons que, pour un moteur donné, la valeur du couple C est constante pour une vitesse donnée, puisque, si R, rayon de la poulie, augmente, l'effort F diminue proportionnellement.)

On montre facilement que le couple moteur est sensiblement proportionnel au produit du flux par le courant dans l'induit.

* * *

Ces quelques définitions sont indispensables pour comparer les divers types de moteurs à courant continu. En effet, comme ceux-ci, par suite même des conditions variées de leur emploi, ont en pratique une infinité de régimes de fonctionnement, on est conduit à établir pour chacun d'eux les ***courbes caractéristiques*** qui représentent graphiquement les relations qui existent entre les divers éléments : courant, couple, vitesse.

Ces courbes diffèrent suivant les modes d'excitation des moteurs, ce qui fait que, suivant les buts à atteindre, l'un ou l'autre mode est préférable.

* * *

Examinons maintenant les ***caractéristiques des moteurs à excitation série,*** identiques aux génératrices à excitation en série.

De même que celles-ci n'ont qu'un seul sens de rotation possible, celui tel que le courant produit augmente l'aimantation rémanente des inducteurs, de même le moteur série n'a qu'un seul sens de rotation qui est *inverse* du sens de rotation de la génératrice. Rien ne sert de permuter les bornes, car, le courant changeant simultanément de sens dans l'induit et dans l'inducteur, le sens de rotation reste le même. Si on veut le changer, il faut utiliser un *inverseur* de courant placé entre l'inducteur et l'induit, qui permet de changer le sens du courant dans l'induit seulement.

Dans les moteurs série, la vitesse de rotation diminue quand le couple résistant, que l'on appelle la *charge*, augmente, et à vide elle est très grande : le moteur s'emballe.

Le couple moteur au démarrage possède une grande valeur et diminue lorsque la vitesse augmente, ce qui fait que le moteur série est utilisé dans les applications qui exigent à certains moments des efforts considérables (tramways, grues, pompes, etc.). Par contre, pour les usages industriels les plus courants : commande des machines-outils, des métiers à tisser, etc., les variations trop grandes de sa vitesse avec la charge font qu'il est peu employé dans ces applications.

Les formes générales des caractéristiques du moteur série sont représentées figure 550.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

La propriété fondamentale des moteurs ***à excitation shunt*** ou dérivation est que leur vitesse de rotation varie très peu lorsque la charge varie. Comme pour les dynamos série, les moteurs shunt n'ont qu'un sens de rotation, et il est facile de montrer que ce sens est le même que celui de la même machine fonctionnant comme génératrice.

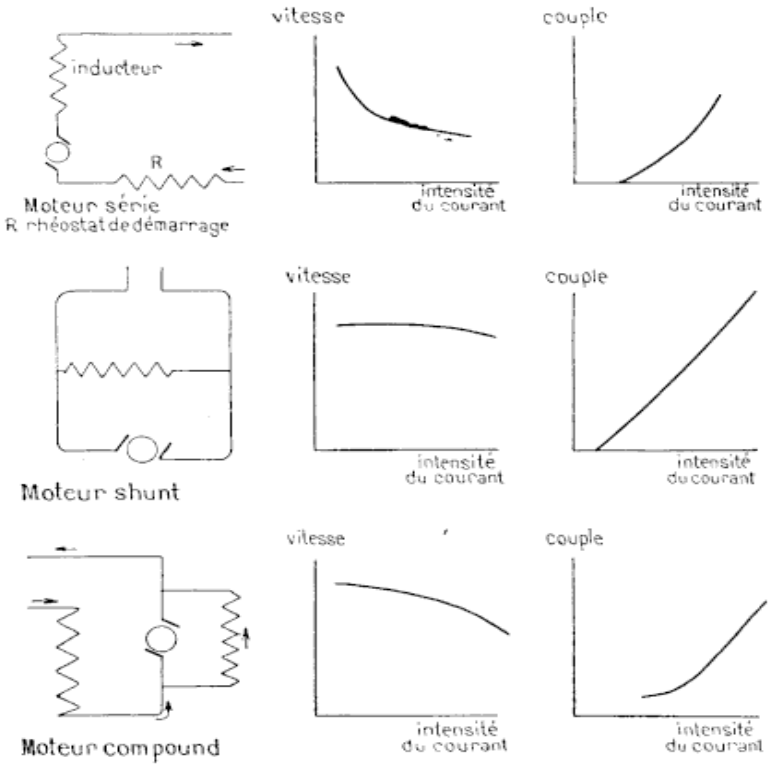


Fig. 550. — Caractéristiques des divers moteurs à courant continu.

Le couple moteur est à peu près proportionnel à l'intensité du courant dans l'induit. Si l'induit d'un moteur shunt tourne à une vitesse supérieure à sa vitesse de marche normale, il fonctionne comme générateur et restitue du courant à la ligne qui l'alimente. Cette propriété est utilisée dans certaines applications, en particulier la traction sur les lignes de montagne. Dans les descentes, les moteurs fonctionnent en générateurs, en *récupérant* de l'énergie empruntée à la force vive du train qui se trouve ainsi partiellement freiné.

Les caractéristiques du moteur shunt sont représentées figure 550.

* * *

Enfin, le moteur ***compound*** peut être ***à excitation différentielle***, les flux magnétiques produits par les deux enroulements (série et dérivation) sont de sens contraire ; il suffit pour cela d'employer une génératrice compound comme moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand le moteur est peu chargé, l'excitation en dérivation l'emporte nettement sur l'excitation série ; mais, si l'on fait circuler un fort courant dans le moteur, il passe entièrement dans l'excitation série et il peut arriver que le flux qui en résulte l'emporte, changeant le sens du flux total et par suite celui de rotation. Aussi ce moteur est-il peu employé, bien que, si les enroulements sont bien calculés, il puisse, dans de grandes limites, avoir une vitesse absolument constante.

Le ***moteur compound*** peut également être ***à excitation additionnelle***. Dans ce cas, les deux enroulements d'excitation sont faits en sens inverse, de sorte que leurs actions s'ajoutent. On a ainsi un moteur dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des moteurs shunt et des moteurs série. La figure 550 montre l'allure des caractéristiques de ce moteur.

* * *

Nous venons de voir que les moteurs à courant continu sont très analogues aux générateurs de courant continu. Pour les ***moteurs à courant alternatif***, il y a une plus grande variété de réalisations possibles. On peut distinguer trois types principaux :

1° ***Moteurs synchrones***, dont la vitesse est rigoureusement constante et indépendante de la charge et qui ne peuvent démarrer seuls.

2° ***Moteurs asynchrones***, dont la vitesse dépend de la charge et qui sont généralement employés avec les courants polyphasés.

3° ***Moteurs à collecteur***, employés avec le courant alternatif simple, dit courant monophasé.

Nous allons dire quelques mots de chacune de ces classes de moteurs.

* * *

De même que la dynamo à courant continu, l'alternateur monophasé est une machine réversible qui peut fonctionner comme génératrice ou comme moteur, si on l'alimente avec un courant de fréquence et de tension convenables, et à condition qu'on ait communiqué par un moyen quelconque au rotor du moteur une vitesse de rotation égale à celle du rotor du générateur. Pour cette raison, on appelle ces moteurs des ***moteurs synchrones***. Disons quelques mots de leur fonctionnement.

Soient deux alternateurs monophasés identiques A et A′ (fig. 551), dans lesquels on suppose que les inducteurs NS, N′S′ sont mobiles. Les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

connexions sont celles de la figure. A est le générateur et A' le moteur. NS et N'S' tournent avec la même vitesse et sont dans la même position relative par rapport aux bobines BB', B_1B_1'. Dans ces conditions, on voit que, lorsque l'interrupteur I est fermé, les deux forces électromotrices induites dans les deux machines ont même fréquence, mais sont en opposition de phase. Contrairement à ce qui se passe dans le moteur à courant continu, la force électromotrice induite n'agit pas comme force contre-électromotrice et n'est pas forcément inférieure à la tension d'alimentation.

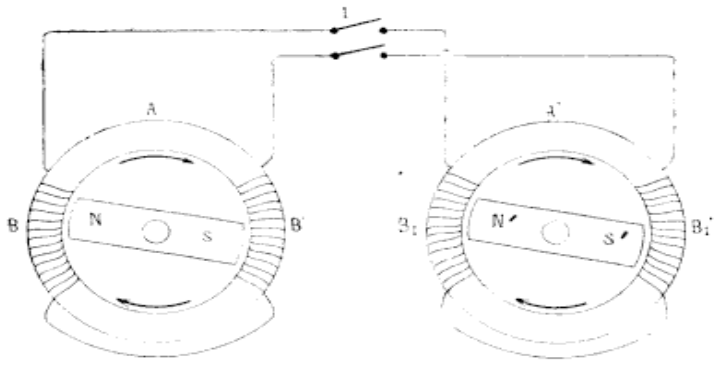


Fig. 551. — Principe du fonctionnement des moteurs synchrones.

Quand les conditions de lancement indiquées ci-dessus sont réalisées, on dit que le moteur est *accroché*, et il peut alors fournir du travail mécanique. En effet, quand, dans le générateur, les pôles N, S passent par la ligne neutre, le courant s'annule et change de sens ; simultanément ou presque les pôles N', S' du moteur passent également par la ligne neutre, le courant s'inverse, ainsi que l'effet des bobines B_1, B_1'. C'est-à-dire que les efforts exercés restent de même sens, et par suite le moteur produit un couple mécanique.

Supposons que l'on augmente l'effort demandé au moteur ; celui-ci tend à diminuer de vitesse, par conséquent N'S' sera en retard dans sa rotation sur NS, l'intensité du courant absorbé augmentera. Si la charge est encore plus forte, N'S' sera de plus en plus en retard sur NS, jusqu'au moment où il aura perdu un quart de tour. A ce moment, la discordance sera maximum, le moteur ralentira brusquement et s'arrêtera : on dit qu'il est *décroché*, et le courant atteint alors une valeur très élevée.

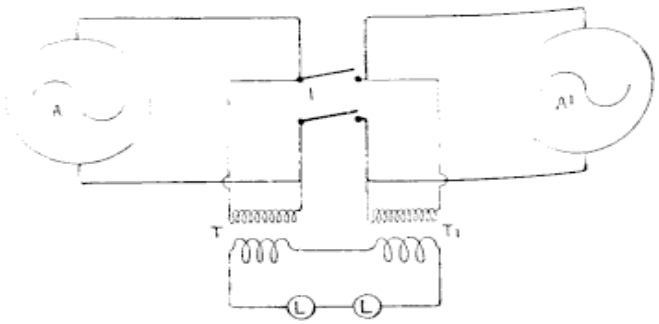


Fig. 552. — Schéma d'un indicateur de phase.

Pour le démarrage des moteurs synchrones, on est conduit à employer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un moteur auxiliaire que l'on retire du circuit quand la vitesse de synchronisme du moteur et du courant est atteinte. Pour juger lorsque ce résultat est atteint, on se sert de *lampes* ou d'*indicateurs de phase* analogues à ceux utilisés pour le couplage des alternateurs. La figure 552 montre un dispositif schématique très simple : deux petits transformateurs T, T_1 ont leurs primaires branchés sur le circuit de l'alternateur A et du moteur A_1, les secondaires sont en série et alimentent les lampes L, L. La fréquence de la force électromotrice induite dans le moteur A_1 va en augmentant avec sa vitesse de rotation. Comme la tension à laquelle sont soumises les lampes L, L est la résultante des deux forces électromotrices induites dans les transformateurs, tant que celles-ci sont de fréquences inégales, leur résultante présente des battements, car à certains moments elles s'ajoutent et à d'autres elles se détruisent partiellement. Il en résultera que les lampes auront des alternatives d'éclat et d'extinction. Quand les forces électromotrices ont même fréquence et sont opposées en phase, les lampes s'éteignent; on ferme l'interupteur I ; le moteur est *accroché* et on peut lui appliquer progressivement la charge.

Ce que nous venons de dire s'applique également aux ***moteurs synchrones polyphasés***, qui sont des alternateurs polyphasés. On voit que ces moteurs ne démarrent pas d'eux-mêmes, il faut les lancer préalablement. Ils ont une vitesse de rotation constante et indépendante de la charge, ce qui fait qu'on les emploie dans certains cas particuliers : commande des métiers à tisser, machines-outils, etc. Ils sont très robustes, n'ayant ni balais ni collecteur, et ils peuvent supporter des tensions élevées. Malheureusement, si la charge dépasse une valeur maxima, brusquement ils s'arrêtent, le courant dans l'induit devient très intense et peut abîmer la machine.

* * *

Par opposition avec les moteurs précédents qui tournent à vitesse constante, il existe des ***moteurs asynchrones***, c'est-à-dire des moteurs dont la vitesse n'est pas constante et varie avec la charge. Ces moteurs peuvent être classés en deux catégories : les ***moteurs d'induction*** et les ***moteurs à collecteurs.***

Les moteurs d'induction fonctionnent grâce à la propriété qu'ont les courants alternatifs polyphasés de produire des ***champs magnétiques tournants.*** Ils sont donc en principe construits pour être alimentés par des courants polyphasés ; certains artifices cependant permettent de construire des moteurs d'induction pour courant monophasé, mais alors leur couple de démarrage est très faible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Indiquons brièvement ce que l'on entend par *champ tournant*. Nous raisonnerons sur les courants diphasés, les plus simples des courants alternatifs polyphasés. On sait que ce sont des courants de même fréquence, même intensité maxima, mais *décalés* l'un par rapport à l'autre d'une demi-période. Si on les représente graphiquement, on obtient la figure 553.

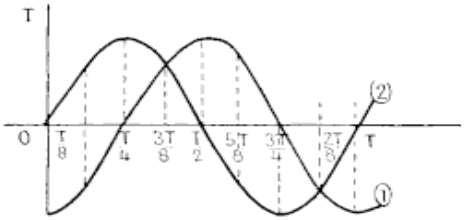


Fig. 553. — Courants diphasés.

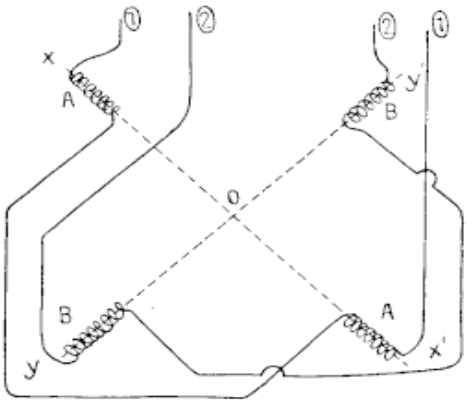


Fig. 554. — Production d'un champ tournant par courant diphasé.

Supposons que l'on place deux paires de bobines identiques en croix AA, BB, comme l'indique la figure 554 et que chaque paire soit alimentée par une des phases du courant diphasé. Chaque groupe de bobines produit au centre O du système un champ magnétique proportionnel à l'intensité du courant qui le parcourt et, si on cherche la résultante des deux champs ainsi produits qui se composent comme des forces, on voit facilement,

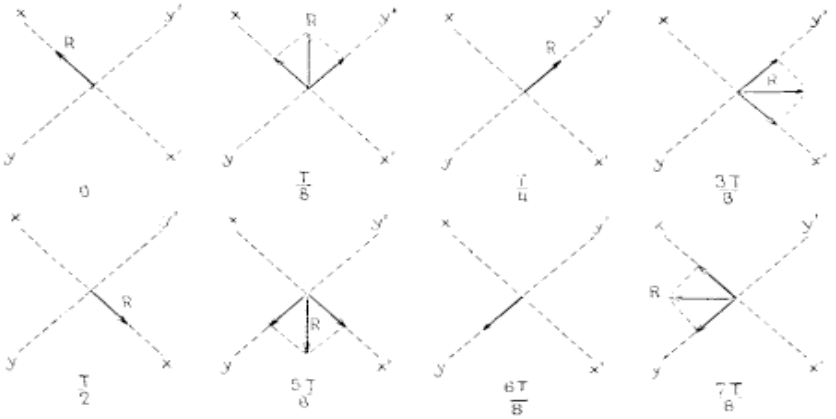


Fig. 555. — Représentation graphique du champ tournant.

par la construction graphique (fig. 555), que le champ résultant est un champ tournant de même périodicité que le courant. Le calcul montre également que sa valeur absolue est constante et égale à la valeur maxima de l'un des champs alternatifs générateurs.

Si, au lieu de deux paires de bobines, on prend trois bobines disposées à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

120° l'une de l'autre (A, B, C, fig. 556), et que chacune d'elles soit alimentée par une des phases d'un courant alternatif triphasé, on trouverait de même que cet ensemble crée en son centre O un champ tournant faisant encore un tour par période, mais dont l'intensité, constante d'ailleurs, est les $\frac{3}{2}$ de l'intensité maxima de l'un des champs alternatifs générateurs.

Supposons maintenant que nous placions dans l'espace compris entre les bobines une masse métallique susceptible de tourner autour d'un axe perpendiculaire au plan des bobines et passant par O. Comme ce corps conducteur est traversé par des lignes de force magnétiques en mouvement (champ tournant), tout se passe comme si on le déplaçait dans un champ magnétique uniforme. C'est-à-dire, d'après les lois fondamentales de l'électrodynamique, que ce conducteur sera le siège de courants induits (d'où le nom de moteurs à induction donné aux machines de ce système).

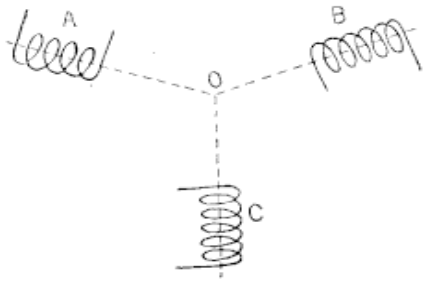


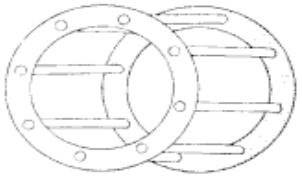
Fig. 556. — Champ tournant par courant triphasé.

Mais alors, puisque le corps conducteur est parcouru par des courants, ceux-ci engendrent à leur tour des champs magnétiques qui tendent, d'après la loi de Lenz, à s'opposer à la cause qui les produit, c'est-à-dire à diminuer la rotation relative du flux, ce qui se trouve réalisé par la rotation dans le même sens de la masse métallique.

Ainsi donc, bien qu'il n'existe aucune liaison entre les deux organes : bobine et pièce centrale, celle-ci se met à tourner avec une vitesse de rotation qui est inférieure à celle du champ tournant. On appelle *glissement* la différence de ces deux vitesses. Le glissement ne peut être nul, sans quoi, le champ et l'induit tournant avec la même vitesse, il n'y aurait plus de variation de flux dans ce dernier et par suite plus de courants induits.

Tel est le principe des moteurs à induction. L'organe fixe, générateur du champ tournant, est établi comme l'induit d'un alternateur. A l'intérieur, on place un rotor ou induit qui peut être constitué de deux façons différentes : en cage d'écureuil ou à enroulement.

* * *


Fig. 557. — Rotor à cage d'écureuil.

Le rotor ***en cage d'écureuil*** (fig. 557) est composé d'une série de barres de cuivre disposées suivant les génératrices d'un cylindre. Ces barres sont fixées à deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couronnes de cuivre qui les mettent en court-circuit. Grâce à ce dispositif, les courants de Foucault (courants induits), au lieu de se refermer dans la masse du rotor, sont dirigés suivant ses génératrices, ce qui augmente leur efficacité. Celle-ci est encore accrue en remplissant l'intérieur de la cage ainsi constituée par une masse métallique formée de disques de tôle empilés dans lesquels sont noyées les barres de cuivre. L'ensemble a alors l'aspect de la figure 558.

Le moteur à cage d'écureuil ne présente donc ni balais ni collecteur, puisque son rotor ne reçoit pas de courant, mais il a l'inconvénient, au démarrage, lorsque la vitesse est faible, d'être traversé par des courants induits très intenses. En effet, ces courants sont d'autant plus forts que la différence des vitesses entre les champs inducteur et induit est plus grande, ce qui se produit au démarrage, puisque le champ inducteur tourne à sa vitesse normale, l'induit ayant une vitesse nulle. Il en résulte une réaction très énergique sur l'inducteur, et par suite sur la ligne ; aussi les compagnies de secteurs n'acceptent-elles que des moteurs à cage d'écureuil de petite puissance sur leur réseau.

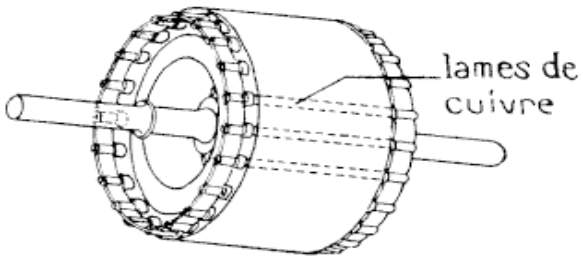


Fig. 558. — Vue d un rotor à cage d'écureuil.

* * *

Le rotor ***à enroulement*** est toujours constitué par un cylindre de rondelles de tôle empilées portant des encoches dans lesquelles sont

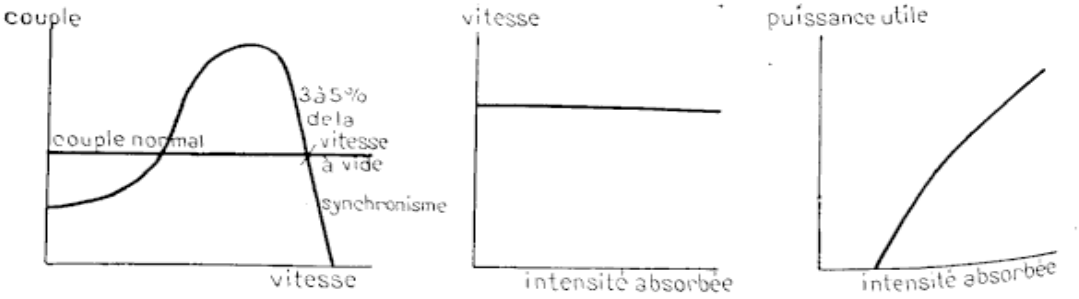


Fig. 559. — Caractéristiques des moteurs asynchrones.

logés les conducteurs de cuivre, mais ceux-ci sont soigneusement isolés du fer et le circuit bobiné ainsi réalisé peut ou bien être fermé sur lui-même (rotor en court-circuit), ou bien aboutir à des bagues de contact

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

servant lors du démarrage et que l'on court-circuite ensuite entre elles.

Afin de limiter le courant absorbé au démarrage et d'améliorer le couple moteur, on introduit généralement des résistances dans le rotor des moteurs asynchrones.

Si un moteur asynchrone se trouve entraîné mécaniquement à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, on voit qu'il fonctionne alors automatiquement en générateur et renvoie du courant dans la ligne ; c'est pourquoi on l'emploie dans certaines applications spéciales, comme la traction électrique des chemins de fer de montagne.

La figure 559 montre la forme des caractéristiques des moteurs asynchrones. Ajoutons encore que le calcul montre que le couple d'un moteur d'induction est proportionnel au carré de la tension d'alimentation aux bornes, de sorte qu'il est nécessaire d'avoir une tension d'alimentation aussi constante que possible, puisque, si elle varie de 10 p. 100, le couple moteur tombe à 81 p. 100 de sa valeur normale.

* * *

Nous allons dire quelques mots pour terminer des ***moteurs à collecteurs***.

Commençons par les ***moteurs série monophasés***. Ce sont des moteurs série à courant continu, dont tout le fer (induit et inducteur) est feuilleté. Alimentés par du courant alternatif, au lieu de courant continu, ils sont encore capables de fonctionner. Voici comment on peut s'en rendre compte facilement.

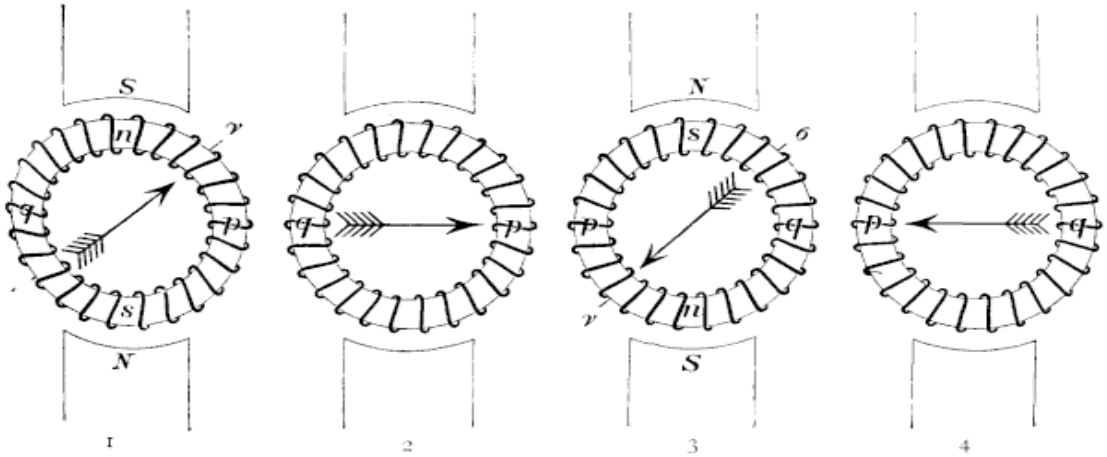


Fig. 560.

Supposons un anneau Gramme muni de son enroulement et tournant vers la droite. Les courants circulant dans l'anneau ont pour effet de produire, d'après la règle d'Ampère, des pôles magnétiques dans le fer de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'anneau en p et q, tandis que les pôles engendrés par les inducteurs se trouvent en n et s. La résultante de ces deux actions est de former des pôles en v et z et de donner à l'axe magnétique la position indiquée sur la figure. C'est le phénomène du décalage des balais de la zone neutre dans le sens de la rotation dont nous avons parlé précédemment.

Mais si les deux électro-aimants N et S ne sont plus alimentés par du courant continu, mais par du courant alternatif, les pôles n et s auront des intensités qui ne seront plus constantes, et même changeront périodiquement de sens ; au moment du renversement du courant dans le circuit des électro-aimants par exemple, la composante magnétique de leur action est nulle : la position de l'axe magnétique sera celle indiquée sur la figure 560, 2. Quand les pôles se seront inversés et que l'intensité du courant alternatif sera maxima, l'axe magnétique sera par exemple dans la position de la figure 560, 3. Au moment de l'inversion des pôles, à la seconde demi-période du courant, sa position sera celle de la figure 560, 4. Par suite, tout se passe comme si on avait encore ici un champ tournant ; mais on voit qu'il est nécessaire de *lancer* le rotor par un artifice spécial, et qu'ensuite sa vitesse augmente jusqu'au voisinage du synchronisme.

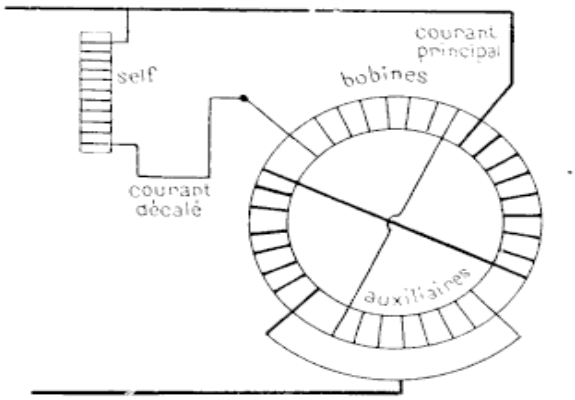


Fig. 561. — Dispositif de démarrage pour moteur monophasé.

Le dispositif de démarrage le plus employé consiste à munir le stator de deux bobinages, l'un en communication directe avec la ligne, c'est l'enroulement principal, l'autre en dérivation sur le premier, c'est l'enroulement auxiliaire dans le circuit duquel on place une bobine de self-induction ou un condensateur, de façon à décaler le courant dans ce circuit par rapport au courant principal. On a alors deux courants qui ne sont plus en synchronisme et produisent une sorte de champ tournant diphasé qui entraîne le rotor et produit le démarrage. Quand celui-ci est effectué, on isole le circuit auxiliaire (fig. 561).

Ajoutons que ces moteurs, lorsqu'ils atteignent une certaine puissance, sont très lourds et nécessitent, pour éviter les étincelles aux balais, de prévoir des enroulements compensateurs et des pôles de commutation. Les ***moteurs*** dits ***universels***, toujours de petite puissance, sont simple-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment des moteurs série fonctionnant à la même tension d'alimentation, sur courant continu ou sur courant alternatif.

* * *

Dans les ***moteurs à répulsion*** imaginés en 1887 par Thomson, le courant n'est plus amené à l'induit par les balais : il y est engendré par induction statique. A part cela, ils sont très analogues comme construction aux moteurs série.

L'induit a la forme d'un rotor d'un moteur à courant continu à deux balais distants de 180°, mais *en court-circuit*. La figure 562 permet de comprendre le fonctionnement de ce moteur. Dans la position représentée, les balais B et B′, étant calés sur la ligne neutre, seront toujours au même potentiel ; il ne circule donc pas de courant dans l'induit. Inclinons maintenant les balais dans la position B_1B_1' par exemple, les parties de l'anneau sous chaque pôle ont pour effet de faire tourner l'induit de manière à amener les bobines perpendiculairement sous les masses polaires. Comme les balais restent toujours à la même place, l'induit tourne indéfiniment.

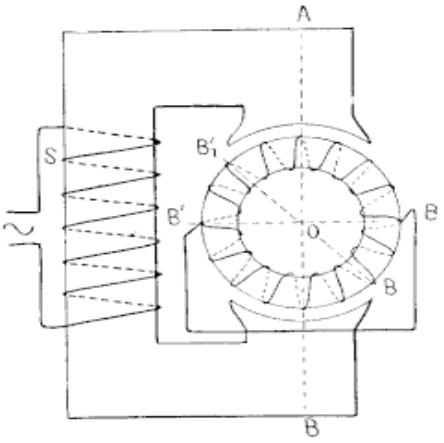


Fig. 562. — Moteur à répulsion.

Au démarrage, le courant et le couple sont maxima, puisque, en marche normale, le courant circulant dans l'induit crée une force électromotrice secondaire qui vient diminuer le courant, et par suite le couple, quand la vitesse augmente.

Pour un courant donné, le meilleur couple de démarrage est obtenu pour un angle de calage des balais voisin de 22°, et on peut, en faisant varier cet angle, modifier la vitesse du moteur. En résumé, pour démarrer et régler la vitesse, il suffit d'agir sur l'angle de calage des balais.

De nombreux moteurs à répulsion ont été imaginés. Nous en citerons seulement deux.

Les ***moteurs Deri***, dans lesquels il y a deux paires de balais réunis en court-circuit deux à deux comme l'indique la figure 563 ; les balais C et D sont seuls mobiles et servent au réglage. Ces moteurs ont une meilleure commutation que les moteurs à répulsion ordinaires.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les ***moteurs Latour*** comportent également deux paires de balais, l'une, AB, en court-circuit, l'autre, CD, calée à 90° de la première et en série

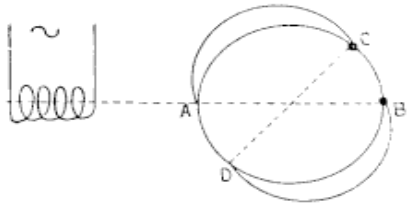


Fig. 563. — Moteur Deri.

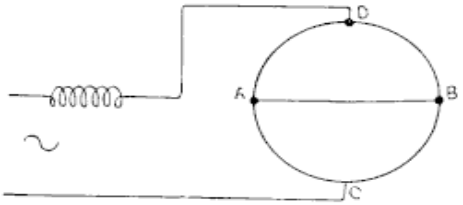


Fig. 564. — Moteur Latour.

avec le circuit principal. L'avantage de ce moteur est d'avoir ses balais fixes, et il participe à la fois du moteur seul et du moteur à répulsion.

Enfin, sous le nom de ***moteurs asynchrones synchronisés***, on a cherché à réaliser des appareils dont le fonctionnement normal se rapproche de celui du moteur synchrone, tandis qu'au démarrage ils se comportent comme un moteur asynchrone. Leur étude sortirait du cadre de ce chapitre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXV

LA TRACTION ÉLECTRIQUE

Avantages de la traction électrique. — Le problème de l'électrification des chemins de fer. — Les systèmes en présence : traction par courant alternatif triphasé ; par courant alternatif monophasé ; par courant continu. — Avantages et inconvénients de chaque système. — La captation du courant. — Alimentation par fil aérien : mode de suspension et d'isolement. — Dispositif de prise du courant : trolley, archet. — Alimentation par caniveau. — Dispositif de prise du courant. — Alimentation par troisième rail. — Suspension caténaire. — Les moteurs de traction. — Les locomotives électriques. — Liaison des moteurs aux châssis. — Les systèmes de transmission de la puissance motrice. — Les organes de régulation. — Les controllers. — La traction par unités multiples. — Le freinage des trains électriques. — Freinage électromagnétique. — La traction par accumulateurs. — La propulsion électrique des navires. — Le halage électrique et magnétique sur les rivières et canaux. — Organes auxiliaires de manœuvre : les cabestans électriques.

Les avantages que présente la traction électrique comparée à la traction à vapeur sont si nombreux et, pourrait-on dire, si évidents qu'il suffit de les énoncer rapidement pour se rendre compte du progrès que l'électricité permet de réaliser dans ce domaine.

La suppression de la fumée assure tout d'abord à la traction électrique la supériorité sur tous les autres modes de traction au point de vue hygiène et confort. Mais elle permet également d'augmenter considérablement la capacité des gares terminus, surtout lorsque les rames comprennent plusieurs automotrices, en libérant les voies qu'il fallait réserver pour la manœuvre des locomotives.

Grâce à la traction électrique, l'accélération au démarrage peut atteindre des valeurs impossibles à obtenir avec la traction à vapeur, ce qui est particulièrement avantageux lorsque les arrêts sont nombreux, comme sur une ligne de banlieue ou un réseau métropolitain. Tandis que les locomotives ne peuvent communiquer aux trains qu'une accélération de $0^m,30$ à $0^m,40$ par seconde, on arrive à Paris, sur le Nord-Sud, à une accélération au démarrage de $0^m,57$ et sur le Métropolitain de $0^m,75$.

La souplesse de marche, la capacité plus grande du trafic, le franchissement de rampes plus fortes et plus longues que celles que peut gravir une locomotive à vapeur, le couple moteur plus uniforme sont des avantages sur lesquels il est inutile d'insister.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une autre qualité des locomotives électriques est leur poids moindre à égalité de puissance, puisqu'une locomotive à vapeur de 1 800 chevaux type Atlantic pèse 145 tonnes, dont 55 tonnes adhérentes seulement, tandis qu'une automotrice électrique de 2 200 chevaux n'atteint qu'un poids de 85 tonnes, dont 60 tonnes adhérentes. De plus, il n'y a pas de limite à la puissance d'une locomotive électrique, tandis que, pour la traction à vapeur, le foyer ne pouvant dépasser certaines dimensions détermine par cela même la quantité de vapeur maxima qu'il sera possible de produire.

Enfin, à toutes ces supériorités, la traction électrique ajoute celle de permettre une économie notable de combustible, et c'est sans doute le plus gros argument en sa faveur.

Les grandes centrales modernes, brûlant des charbons de toutes qualités, équipées avec tous les perfectionnements apportés dans ces dernières années, aussi bien à la production de la vapeur qu'à son utilisation, ont permis d'abaisser la consommation intrinsèque du charbon jusqu'au voisinage de la limite théorique ; de telles stations présentent évidemment, au point de vue rendement thermique, une supériorité énorme sur les locomotives à vapeur les plus perfectionnées, et cette supériorité est devenue telle que, même en tenant compte de toutes les pertes dues à la transformation de l'énergie et à son transport le long des voies ferrées, il n'y a aucun doute, d'après les résultats déjà acquis, que la substitution de locomotives électriques aux locomotives à vapeur permettra de diminuer de près des deux tiers la consommation totale de charbon.

Si on tient compte en plus des autres moyens de production de l'énergie électrique, en particulier par usines hydrauliques, il y a là un supplément d'économie qui, dans les pays bien dotés comme la France en richesses hydrauliques, est loin d'être négligeable.

Il ne faut pas d'ailleurs attacher à ce dernier facteur une importance primordiale.

Du fait de l'électrification d'une section quelconque d'un réseau, et par la simple substitution, pour l'utilisation des combustibles, d'une station centrale moderne aux locomotives à vapeur actuelles, la dépense de charbon se trouve déjà réduite au tiers ; l'emploi de l'énergie hydraulique ne peut donc intervenir que pour réduire, ou dans certains cas faire disparaître, ce dernier tiers. Cet emploi donnera bien lieu à un supplément d'économie, mais l'économie principale résultera de l'électrification proprement dite, quelle que soit la source d'énergie utilisée.

Il en résulte, par voie de conséquence, que les sections dont l'électrification serait le plus profitable à ce point de vue spécial ne sont pas seulement, comme on serait tenté de le croire, celles pour lesquelles seraient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

utilisables des puissances hydrauliques, mais aussi et surtout celles dont le trafic kilométrique est considérable et donne lieu à une consommation kilométrique de charbon élevée (Paris-Orléans, Paris-Dijon, Paris-Creil, par exemple).

Enfin, la traction électrique nécessite un personnel moins nombreux, effectuant un travail moins pénible, que la traction à vapeur.

Bien que le premier chemin de fer électrique date de 1879 et que, depuis cette date, tramways, métropolitains, sections de chemins de fer électrifiés, se soient multipliés, le problème général est loin d'être résolu d'une façon définitive.

Si, dans les villes et leurs alentours, pour des lignes de faible longueur les solutions actuelles sont très satisfaisantes, il ne faut pas croire qu'il suffise de les amplifier pour résoudre le problème de la traction électrique sur les grands réseaux. En effet, dans la plupart des cas, l'alimentation de courant continu à 500 ou 750 volts par trolley ou caniveau est très simple : la consommation d'énergie par les automotrices est relativement faible, et, bien qu'il y ait, au bout de la ligne, une chute de potentiel, elle n'est pas très importante. Cependant, pour certaines lignes très longues, comme celle qui va de Grenoble à Chapareillan (45 kilomètres), la chute de potentiel serait trop grande en fin de ligne, et il a fallu alimenter le trolley en plusieurs points par des *feeders*. Les réseaux métropolitains consomment plus d'énergie que les tramways, mais ils ont un développement moindre, et l'alimentation par troisième rail à 600 et même 1 200 volts est très suffisante.

Le problème est tout autre lorsque l'on passe à l'électrification des chemins de fer. Ici, les automotrices ont des puissances considérables, variant de 2 500 à 5 000 et même 6 000 chevaux ; un grand nombre de trains sortent de la gare terminus et y entrent, surtout lorsque, comme c'est le cas pour Paris, le réseau de banlieue a un service très chargé. Par conséquent, la consommation d'énergie électrique est véritablement énorme et est de plus sujette à de très forts à-coups qui dépendent des incidents de marche des trains (démarrage, arrêts, passage des rampes, etc.). Il faut donc créer des usines génératrices très puissantes, 100 000 ou 200 000 chevaux, ce qui, à l'heure actuelle, ne présente pas de grandes difficultés techniques, usines dont le grand nombre des trains qu'elles alimentent assure du reste l'uniformité du débit. Mais, lorsque l'on passe aux électrifications de vastes régions, comme par exemple celle des chemins de fer du Midi, de Paris-Orléans, de Paris-Lyon-Méditerranée, dont le programme comporte plus de 8 000 kilomètres de lignes à électrifier, soit près du cinquième de la longueur totale du réseau français, la distribution du courant sur de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grandes distances complique singulièrement le problème. Trois systèmes se trouvent en présence : courant alternatif triphasé, courant alternatif monophasé, courant continu. Actuellement, chacun d'eux a ses partisans et ses ennemis, mais il semble bien que le courant continu soit le système qui, dans un avenir prochain, sera uniquement employé. Nous allons résumer rapidement les arguments qui sont présentés de part et d'autre.

Traction par courant alternatif triphasé. — Elle nécessite deux fils de phase assez voisins pour pouvoir être attaqués par des trolleys ordinaires ou des archets, et un troisième conducteur qui est constitué par la voie. L'obligation d'avoir deux conducteurs aériens rapprochés limite la tension d'alimentation, qui est en général de 3 000 volts et ne dépasse pas 6 000. Particulièrement dans les tunnels, les conditions atmosphériques qui y existent et les dimensions restreintes de la place dont on dispose pour installer le système d'alimentation rendent le problème très délicat.

Les moteurs de traction sont par contre très robustes ; ce sont des moteurs d'induction asynchrones ; mais ils ont un gros inconvénient : ils manquent de souplesse, et leur vitesse, obligée de se trouver toujours au voisinage de la vitesse de synchronisme, convient mal pour une exploitation de traction. On utilise bien divers artifices pour modifier leur vitesse : couplage en tandem de deux moteurs, variation du nombre des pôles des enroulements, etc., mais ce sont plutôt des expédients peu satisfaisants au point de vue rendement et surtout au point de vue de la récupération du courant lorsque le train, sur une pente descendante, progresse uniquement sous l'action de la pesanteur.

Enfin, le courant alternatif produit, dans les lignes télégraphiques et téléphoniques qui longent la voie, des perturbations désastreuses. Dans certains cas, on a pu allumer des lampes à incandescence, grâce au courant développé par induction dans les lignes télégraphiques longeant une voie électrifiée. On conçoit que les appareils télégraphiques et téléphoniques ne puissent résister dans ces conditions.

On a proposé d'abaisser la fréquence du courant à 25 et même 16,6 périodes par seconde, afin de diminuer la résistance apparente des enroulements des moteurs, mais on ne peut alors utiliser le courant alternatif des secteurs ; il faut construire des usines spéciales, dont le courant ne peut être employé qu'à la traction.

Traction par courant alternatif monophasé. — L'inconvénient des deux fils de prise de courant disparaît ici, puisqu'il suffit d'un seul fil aérien pour amener l'énergie électrique, le retour se faisant par la terre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et les rails. Aussi peut-on opérer sous des tensions élevées, 10 000 ou 20 000 volts, la locomotive portant un transformateur qui abaisse la tension à la valeur d'utilisation et permet de plus de faire varier le voltage très simplement aux bornes des moteurs.

Malheureusement, le moteur monophasé normal ne possède pour ainsi dire aucun couple moteur au démarrage, car, ainsi que l'a montré M. Leblanc, le champ alternatif de l'inducteur se décompose en deux champs tournants égaux, mais dirigés en sens inverse, dont les actions s'annulent sur l'induit. Cette absence de couple moteur au démarrage étant inacceptable, on se sert alors de moteurs à courant continu qui peuvent fonctionner également sur l'alternatif monophasé, puisque le sens du courant change simultanément dans l'inducteur et dans l'induit. On a alors des moteurs de traction monophasés dits *à collecteurs*, mais ils sont plus délicats que les moteurs continus et leur rendement inférieur.

Traction par courant continu. — Ici, la difficulté ne réside plus dans l'appareillage électrique des moteurs, mais bien dans le mode de transport de l'énergie le long de la voie.

Tandis qu'il est très facile, avec les courants alternatifs triphasés ou monophasés, d'effectuer l'alimentation à haute tension, le transformateur statique placé sur l'automotrice permettant d'une façon très simple et très avantageuse de ramener la tension aux valeurs normales d'utilisation, il n'en est pas de même pour le courant continu. Transformer le courant continu d'alimentation à haut voltage en courant continu d'utilisation à bas voltage est une opération délicate et coûteuse, par suite du rendement médiocre des appareils de conversion.

Aussi de nombreux systèmes ont-ils été essayés. La solution à laquelle on est arrivé finalement, et qui donne toute satisfaction, consiste à réaliser le transport par courant alternatif de haut voltage, et à le transformer dans les sous-stations en courant continu de bas voltage (500 à 3 000 volts). Cette opération est très facile, grâce aux nombreux moyens dont on dispose pour l'effectuer : transformateurs rotatifs, redresseurs à vapeur de mercure, commutatrices, etc., que nous avons étudiés précédemment en détail (chapitre XIX). En résumé, chaque mode de traction a ses avantages et ses inconvénients, mais il semble que la traction par courant continu soit celle qui doive, dans l'avenir, supplanter les autres ; aussi l'étudierons-nous avec quelque détail.

Au début de la traction électrique, entre 1894 et 1906, le courant triphasé triomphe avec le moteur asynchrone normal (électrification du Simplon, de la Valteline, etc.) ; sous l'influence des électriciens allemands, partisans convaincus du monophasé, entre 1906 et 1909, le nombre des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

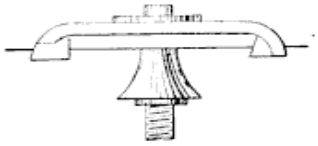
voies électrifiées en monophasé avec les moteurs à collecteur augmente considérablement (lignes du Tessin, d'Oberammergau, essais du chemin de fer du Midi). Depuis cette date, le courant continu est de plus en plus en faveur (Société des transports en commun de la région parisienne, Chemins de fer nogentais, tramways de Nice, etc.).

Dans les pages qui suivent nous allons examiner rapidement les installations de prise de courant, puis les moteurs et finalement les dispositifs mécaniques actionnant les automotrices et les locomotives électriques.

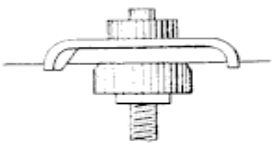
* * *

Le ***problème de la captation*** du courant comprend deux parties distinctes : la ligne distribuant l'énergie électrique le long de la voie, d'une part, et les organes solidaires du train, d'autre part.

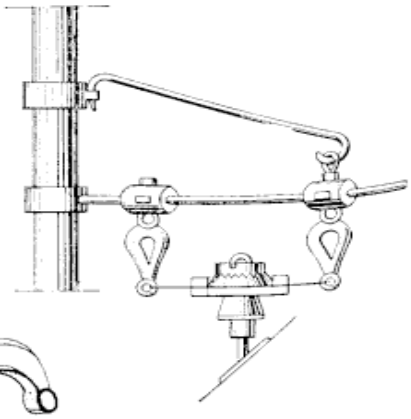
Pour les tramways et les lignes de chemins de fer à voie étroite, on réalise l'alimentation soit par fil aérien, soit par caniveau. Pour les chemins de fer, le troisième rail (traction continue ou monophasée) est le système de distribution le plus simple ; mais, lorsque la tension d'alimentation dépasse 1 200 volts et la vitesse du train 100 kilomètres à l'heure, on est obligé de renoncer au système du troisième rail, par suite de la difficulté de maintenir



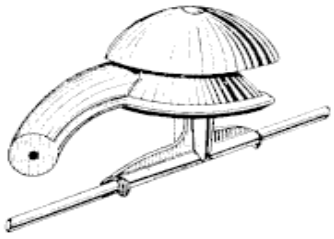
Suspension élastique sur console par clochette isolante.



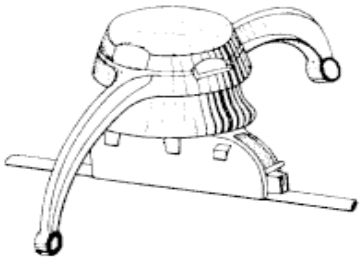
Suspension élastique à tube console avec clochette isolante.



Suspension élastique sur console.



Isolateur pour courbes.



Isolateur à deux branches.

Fig. 565. — Divers modes de suspension des fils aériens.

l'isolement et d'appuyer d'une façon satisfaisante l'organe de prise de courant sur le rail conducteur ; on revient alors à la ligne aérienne à suspension caténaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les fils conducteurs aériens ont un diamètre de 8mm,2 en général (jauge anglaise n° 0) et sont soit en bronze phosphoreux ou siliceux afin de leur conférer une grande résistance à la traction, soit en cuivre dur ayant une conductibilité de 0,98 environ par rapport à l'étalon Matthiessen.

Le problème de la suspension du fil conducteur a fourni aux constructeurs l'occasion de déployer leur ingéniosité, et les systèmes proposés sont variés à l'infini. En général, on se sert de clochettes montées sur un tube console en porte à faux sur le poteau qui soutient la ligne.

Le montage de la clochette sur le tube console peut être soit rigide, soit élastique, soit enfin réalisé par fils transversaux. La suspension rigide est peu employée, par suite de son manque de souplesse. Au contraire, la suspension élastique permet la réalisation de grandes vitesses sans déraillement des perches. La figure 565 donne quelques types de clochettes.

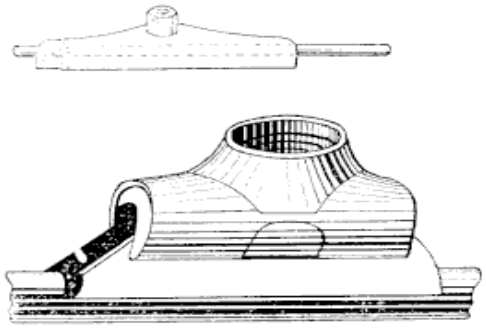


Fig. 566. — Oreilles pour fils aériens.

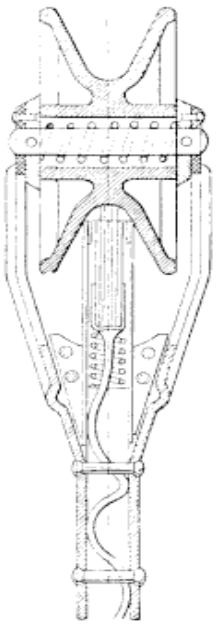


Fig. 567.— Tête de trolley, système Fives-Lille.

Enfin, au lieu de suspendre la ligne à des appuis rigides, on peut l'accrocher à un réseau de fils d'acier tendus, dont les extrémités sont attachées à des crochets scellés dans des murs, des poteaux, des maisons, etc. Si ce système est très économique, il donne naissance à des polygones articulés si enchevêtrés que les places et les rues dans les parties en courbe semblent recouvertes d'une véritable toile d'araignée absolument inesthétique ; aussi les municipalités des grandes villes tendent de plus en plus à en proscrire l'emploi. La figure 565 montre un type d'isolateur employé dans ce cas.

Le fil conducteur est fixé à l'isolateur par l'intermédiaire d'une *oreille* de façon très variable (fig. 566).

La ***prise de courant*** s'effectue soit par *trolley*, soit par *archet*.

Le ***trolley*** se compose d'une *tête* (fig. 567) montée de façon à rester parallèle au fil conducteur dans toutes les positions, d'une *perche* en tube d'acier et d'une *base* comprenant un pivot sur lequel tourne un fût supportant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la perche et la prise proprement dite. Des ressorts de rappel tendent à appuyer constamment la tête contre le fil de travail. Grâce aux deux mouvements de la base et de la tête du trolley, on peut désaxer notablement le fil de ligne, ce qui est un gros avantage.

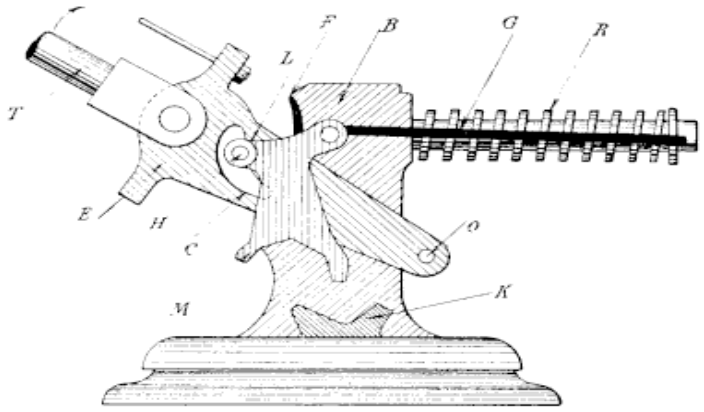


Fig. 568.— Base de trolley Delachaux (S. T. C. R. P.).

Nous décrirons sommairement, à titre d'exemple, la base du trolley employée sur les tramways de Paris (fig. 568). La perche du trolley T est montée sur une fourche E pivotant autour d'un axe O, solidaire de la base B. Un fort ressort à boudin R agit, par l'intermédiaire de deux tirants G et de deux bielles à béquille M, sur un axe H qui peut se déplacer dans une fenêtre C que porte la fourche E. Cette fenêtre comporte un logement d'accrochage L dans lequel vient se loger, en service normal, l'axe H. Enfin les bielles à béquille M peuvent buter sur les pièces K en forme de V qui se trouvent sur le plateau de base.

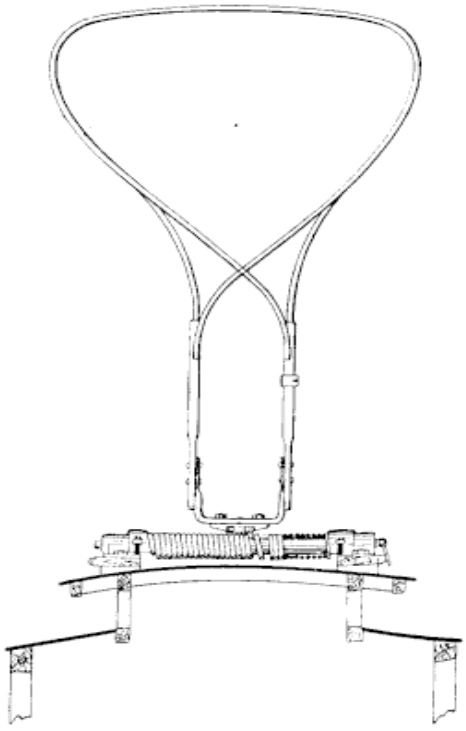


Fig. 569. — Prise de courant par archet.

La figure représente la position normale de fonctionnement, et on comprend immédiatement le mode d'action du ressort à boudin. Lorsque la roulette du trolley quitte le fil, la perche, sollicitée par le ressort, s'élève jusqu'à ce que l'axe de roulement H, rencontrant brusquement la partie F de la base B, se dégage de son logement L. L'axe de roulement se déplace alors librement dans l'encoche C et l'action du ressort R est supprimée. Sous l'influence de son poids, la perche s'abaisse donc jusqu'à ce que les béquilles de M viennent buter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur les pièces K. Pour produire le réenclenchement du trolley, il suffit de tirer sur la corde qui est à l'extrémité de la perche jusqu'à amener celle-ci dans la position horizontale. Par cette manœuvre, on force l'axe H à venir se placer de nouveau dans son logement L, et l'action du ressort agit sur la perche qui remonte et est prête à la mise en place de la roulette sur le fil.

L'***archet***, assez peu utilisé en France, comporte un polygone très léger monté sur un cadre fixé sur le toit de la voiture (fig. 569). Des ressorts de rappel très doux appuient légèrement l'archet contre la ligne. Un des avantages de ce système est la simplification du montage de la ligne conductrice en courbe, puisque celle-ci peut glisser sur toute la longueur de l'archet. Mais, par contre, on ne peut désaxer le fil conducteur dans d'aussi grandes limites latérales qu'avec le système à perche, et les vibration de l'archet dues à ses grandes dimensions et à son faible poids provoquent des étincelles qui détériorent l'installation.

La barre de frottement de l'archet est en aluminium, et la partie frottante en alliage doux antifriction coulé dans une rainure.

* * *

Dans certains parcours des tramways, il est impossible, pour des raisons d'esthétique, de distribuer le courant par fils aériens. On a alors recours

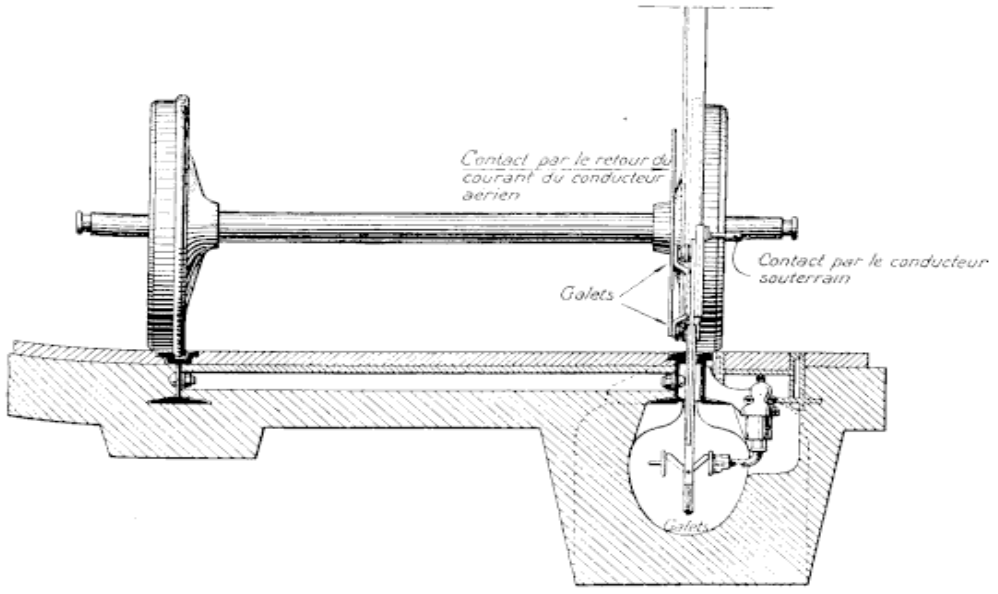


Fig. 570. — Caniveau latéral.

au système du ***caniveau***, dont le seul inconvénient est son prix d'établissement très élevé et son installation assez longue et délicate.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le système à caniveau consiste en l'aménagement d'une conduite souterraine possédant une ouverture continue à sa partie supérieure et dans laquelle sont déposés des conducteurs de contact sur lesquels frotte une prise de courant de forme spéciale solidaire de la voiture motrice et qui sert à alimenter les moteurs en courant.

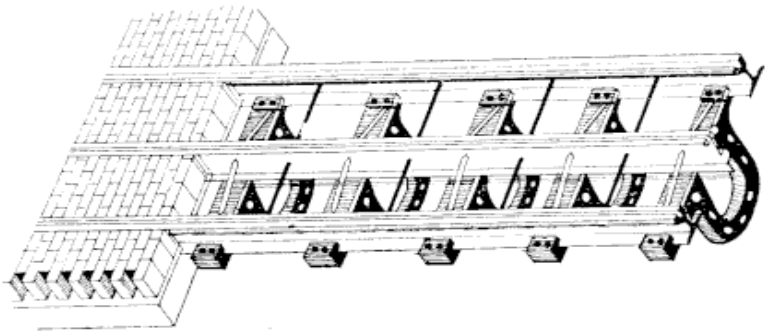


Fig. 571. — Caniveau axial.

Le caniveau peut être *latéral*, l'un des rails de roulement des voitures servant d'amorce au caniveau où se déplace la prise de courant (fig. 570), ou *axial*, ce qui est le cas le plus général, étant alors constituée par une ossature métallique superficielle située à égale distance des deux rails (fig. 571).

Pour résister aux efforts souvent très considérables qui se développent

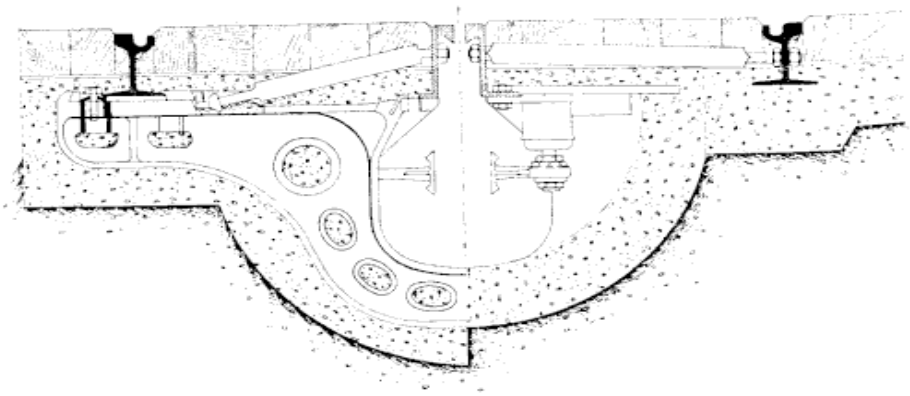


Fig. 572. — Coupe d'un caniveau axial.

dans le sous-sol des grandes villes, les caniveaux doivent être établis d'une manière extraordinairement solide et résistante. A Paris, par exemple, ils comportent des chaises en fonte, placées tous les 1m,30 et pesant 160 kilogrammes (fig. 572). Contre ces chaises, lors de la construction du caniveau, on dispose des moules en tôle à l'intérieur desquels on coule du béton de manière à constituer un caniveau continu. Sur les chaises sont fixés au centre les rails de rainure, et sur les bras les rails de roulement.

L'écartement des premiers est maintenu par deux tirants ancrés sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la partie supérieure des chaises. Dans le pavage en bois, dont les réactions de poussée sont très fortes, on intercale, au milieu de chaque intervalle des chaises, des tirants supplémentaires prenant appui sur l'âme des rails de roulement. Les conducteurs actifs (positif et négatif dans le cas du courant continu, fil de ligne et fil de retour dans le cas du courant monophasé) sont de larges fers en T dont l'une des branches est serrée dans un boulon surmonté d'un isolateur qu'un deuxième système de boulons relie aux parois du caniveau.

L'emploi de deux conducteurs s'est imposé, car tous les essais de retour par la terre ou les rails de roulement ont donné des résultats déplorables dans les tractions par caniveau, un court-circuit permanent pouvant s'établir à l'intérieur des caniveaux entre les fils conducteurs et l'ossature métallique du caniveau.

La prise de courant s'effectue par l'aide d'une prise plate dite « soc de charrue », qui descend et s'insère entre les fers plats. Elle porte des palettes que des ressorts de rappel tendent à écarter du soc et à maintenir au contact des conducteurs électriques. Les dispositifs mécaniques varient d'ailleurs avec chaque constructeur. La figure 573 montre le dispositif Thomson-Houston.

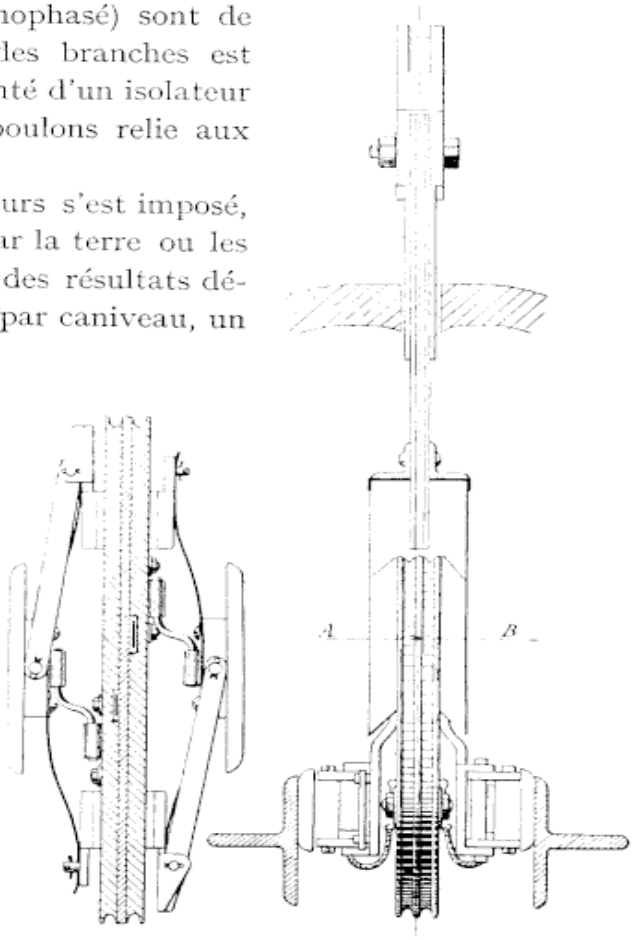


Fig. 573. — Prise de courant souterraine.

* * *

Lorsque la voie sur laquelle circulent les trains est interdite aux piétons et aux voitures, on peut disposer le conducteur d'amenée du courant près du sol ; c'est l'***alimentation par troisième rail*** (chemins de fer, métropolitains). Le retour du courant s'effectue par les rails de roulement, dont les divers tronçons sont reliés les uns aux autres de façon à réaliser

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un conducteur électrique dont la résistance ne soit pas trop considérable (elle atteint 10 à 12 fois celle du cuivre).

Quant au troisième rail, il est constitué par un acier spécial au manganèse (carbone, 0,2 p. 100 ; manganèse, 0,4 p. 100 ; phosphore, 0,1 p. 100 ; soufre, 0,05 p. 100 environ), de façon à diminuer sa résistance électrique. D'après Grard, les résistances kilométriques des rails (joints compris) sont approximativement les suivantes :

Poids en kilogr. par mètre.	*Résistance du troisième rail.*	*Résistance des deux rails de roulement.*
—	—	—
25	0,046	0,032
30	0,038	0,027
35	0,033	0,023
40	0,028	0,020
45	0,026	0,018
50	0,023	0,016

La question de résistance électrique n'est pas la seule à envisager. L'isolement électrique du troisième rail est difficile à réaliser, car souvent les isolateurs se brisent. Il faut aux joints ménager des espaces suffisants pour permettre sa libre dilatation. On laisse généralement aussi une certaine latitude de déplacement vertical, afin de suivre les modifications de hauteur de la voie au passage des trains.

Enfin, la forme même du rail a dû être l'objet de nombreux essais. Il doit pouvoir être recouvert d'une gaine protectrice isolante aux endroits

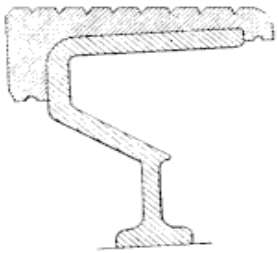


Fig. 574. — Coupe du rail de prise de courant avec plateau de protection en basalte fondu (banlieue Ouest).

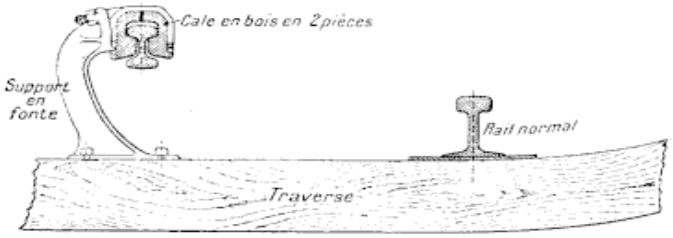


Fig. 575. — Support du troisième rail, New-York Central.

de passage du personnel. Il faut de plus le protéger contre le verglas qui, en le recouvrant de quelques millimètres de glace, interrompt complètement le contact électrique. Sous la pression du frotteur de prise de courant, la couche de glace est rompue en certains endroits seulement ; il se produit alors des arcs qui peuvent provoquer l'incendie des supports (cet accident fut fréquent sur les lignes aériennes du Métropolitain de Paris, et on ne put y

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

remédier qu'en disposant sur les voitures des racleurs mécaniques précédant dans la marche du train le contact des frotteurs de prise de courant).

La figure 574 donne la forme du rail de prise de courant adoptée sur les chemins de fer de l'Ouest pour l'électrification des lignes de la banlieue parisienne. Le contact des frotteurs a donc lieu, dans cet exemple, sur la partie inférieure du rail parfaitement protégée. La figure 575 montre un autre dispositif fort en usage en Amérique.

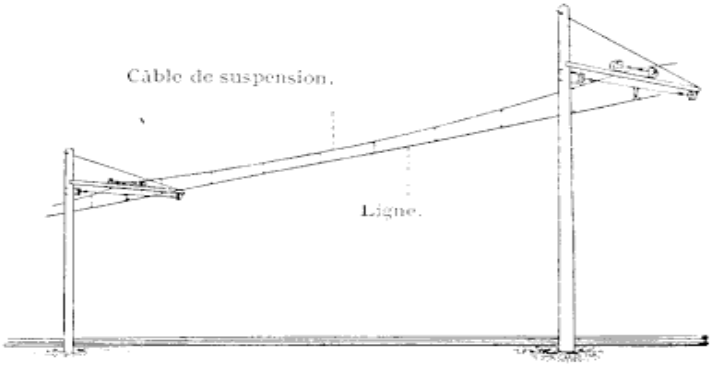


Fig. 576. — Suspension caténaire simple.

* * *

Aux très grandes vitesses, ou lorsque la ligne électrifiée a de nombreux croisements de routes en passage à niveau, ou encore quand l'enchevêtrement des voies est considérable, comme aux abords des grandes villes et dans les gares de triage, il est évident que le troisième rail n'est plus la solution idéale. On revient alors à la prise aérienne, mais modifiée afin de

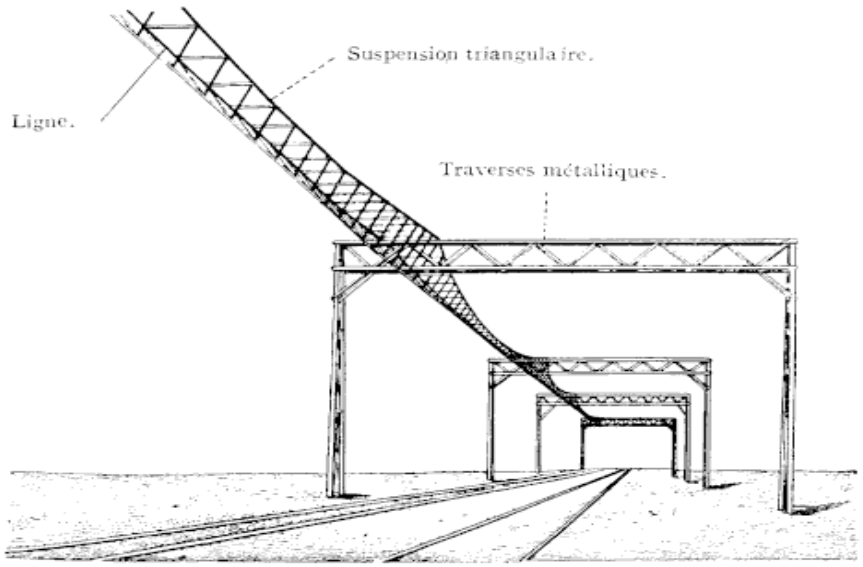


Fig. 577. — Suspension caténaire triangulée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'adapter aux conditions beaucoup plus sévères de l'exploitation des chemins de fer.

Afin de ne pas multiplier les pylônes de suspension et d'éviter que le fil conducteur, sous son poids, ne prenne la forme d'une chaînette, on rend le fil horizontal dans chaque portée en le suspendant, à la manière du tablier des ponts suspendus, par des fils verticaux fixés à un ou deux câbles d'acier eux-mêmes tendus entre les supports de la ligne. C'est ce qu'on

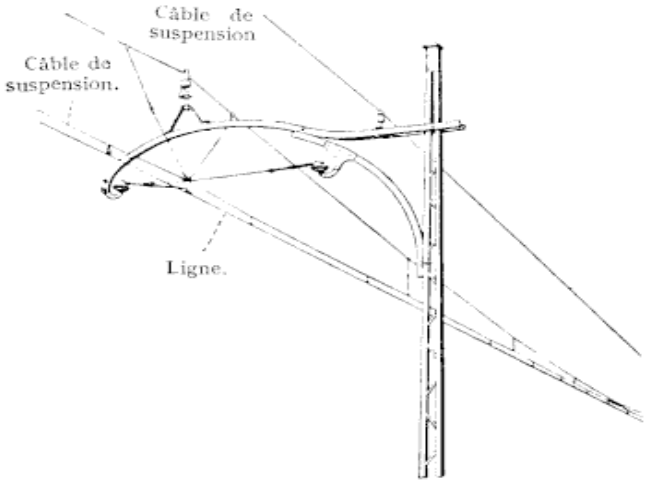


Fig. 578. — Suspension caténaire double.

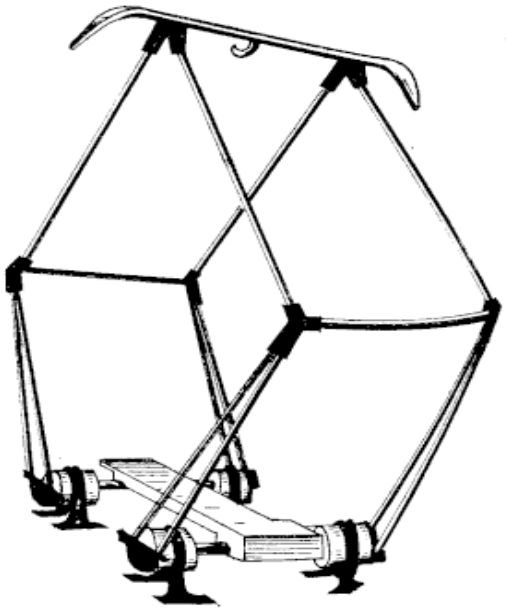


Fig. 579. — Pantographe Westinghouse

appelle la ***suspension caténaire***, qui peut être simple (fig. 576) ou double (fig. 578). De plus, le fil de contact n'est pas rigoureusement parallèle à l'axe de la voie ferrée, afin de ne pas user au même point l'archet de prise de courant.

Sur les sections très chargées en trafic, on est forcé de construire de véritables charpentes afin de supporter le conducteur aérien de section suffisante pour laisser passer les intensités de plusieurs milliers d'ampères que consomment les locomotives électriques de 1 800 à 2 000 chevaux.

La figure 577 montre le dispositif employé par les chemins de fer d'Orléans pour les sections à gros trafic de leur réseau.

Quant au système de prise, l'archet est remplacé par un dispositif pantographique analogue à celui représenté figure 579.

* * *

Les ***moteurs de traction*** fonctionnent sur les mêmes principes que les moteurs ordinaires, mais les conditions spéciales à satisfaire imposent dans leur réalisation un certain nombre de modifications.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les automotrices et les tramways, le faible encombrement dont on dispose ne permet pas de donner beaucoup d'aisance aux moteurs. Les carcasses de moteur doivent être, ainsi que les organes de transmission, enfermées aussi hermétiquement que possible.

Les enroulements sont extrêmement simples, la question de robustesse

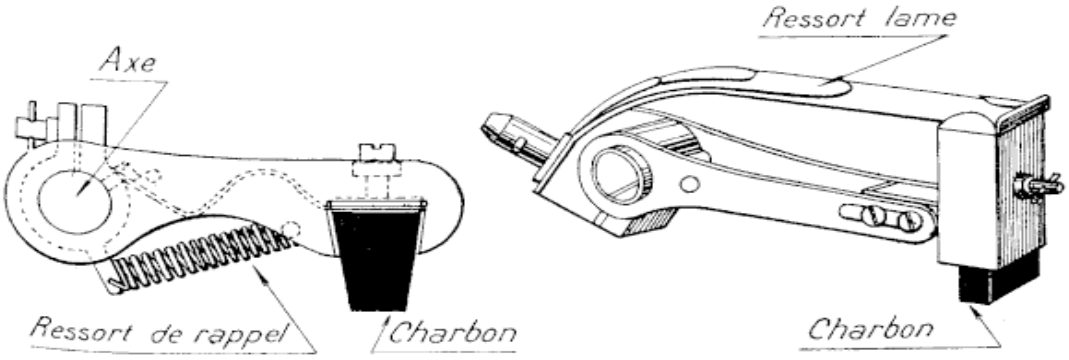


Fig. 580. — Balais de moteur de traction.

étant primordiale. Les balais, par suite des vibrations du châssis, ont une tendance à quitter les lames des collecteurs, d'où production d'arcs nocifs

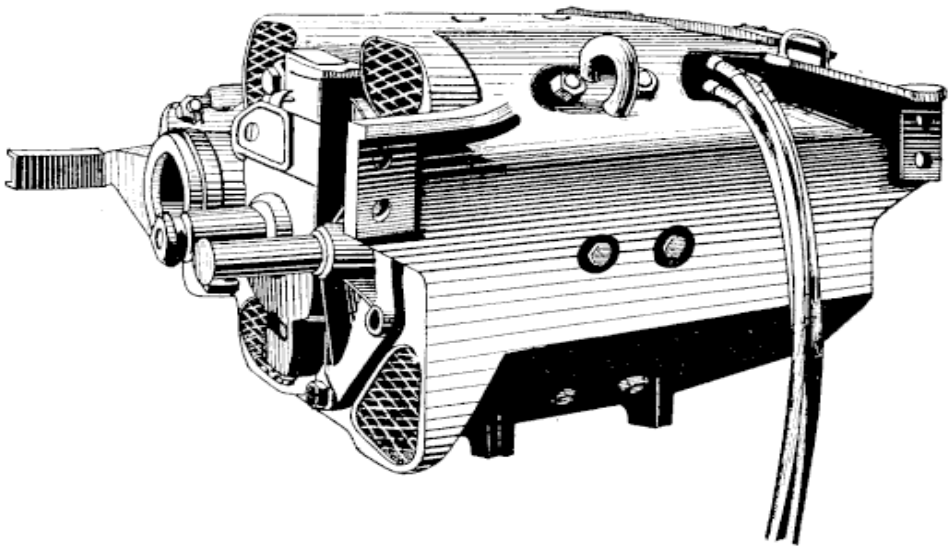


Fig. 581. — Moteur de traction T.-H. 560 A. V. (vue côté pignon).

qui les détériorent. Actuellement, les porte-balais comprennent une gaine de cuivre renfermant le charbon pressé sur le collecteur par un ressort. L'inertie, réduite à celle du charbon, est alors minime (fig. 580).

Nous avons vu, en parlant des moteurs à courant continu, que les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

balais, par suite du champ magnétique induit, ne doivent pas être calés suivant la ligne neutre théorique. Comme c'est le flux induit qui déter-

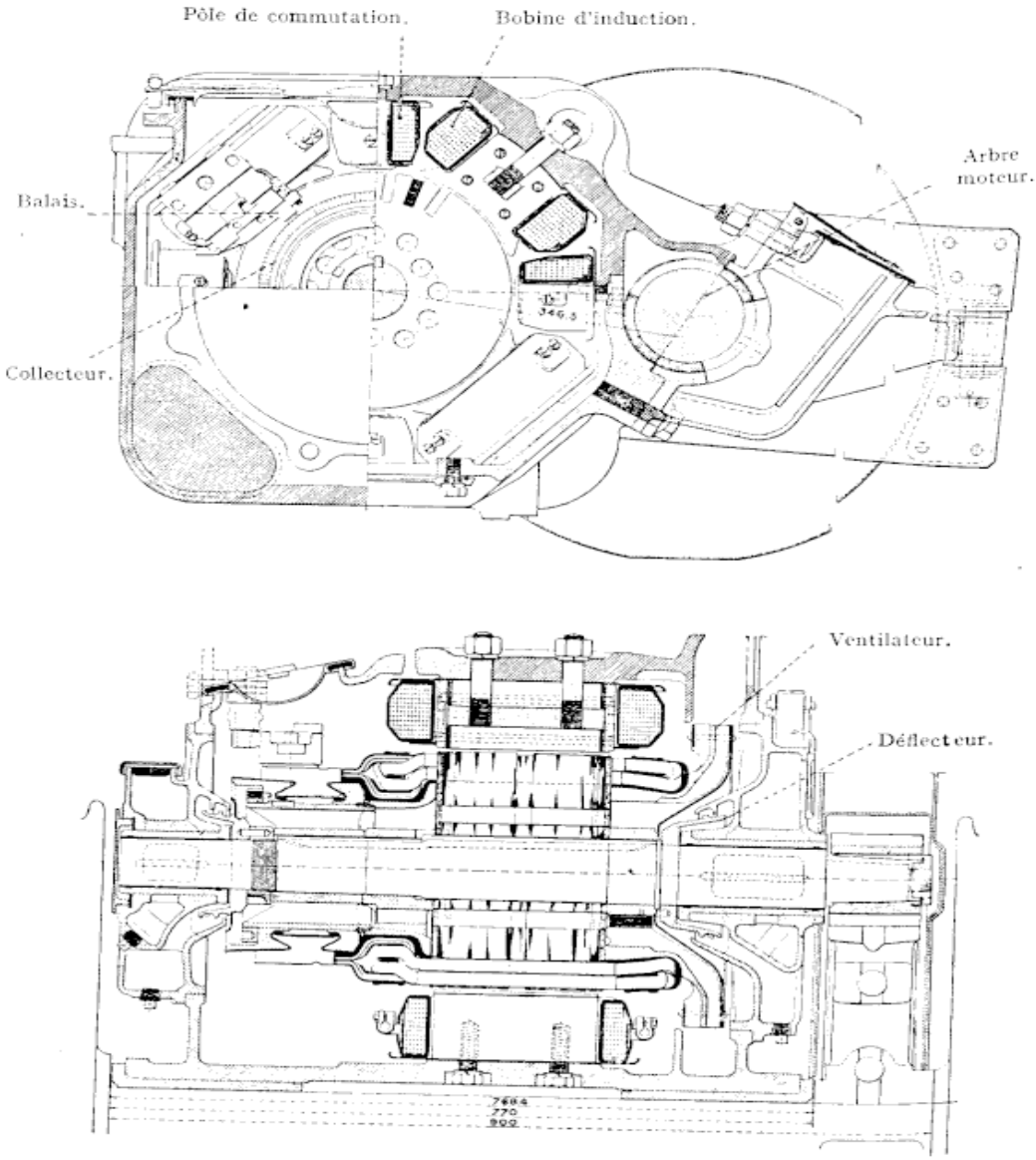


Fig. 582. — Coupe transversale et coupe longitudinale d'un moteur T.-H. 560.

mine le décalage des balais, celui-ci augmente avec l'intensité absorbée par le moteur, c'est-à-dire qu'il augmente avec la charge.

Dans les moteurs de traction, où la charge varie d'une manière continue depuis le démarrage du train, on ne peut modifier le calage des balais. On a alors recours à des pôles auxiliaires dits ***pôles de commutation***, dans les enroulements desquels circule le courant induit. Ces pôles sont massifs,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'inverse des pôles principaux. Le même artifice est applicable aux moteurs monophasés à collecteurs.

Nous donnerons, à titre d'exemple, quelques indications sur le moteur Thomson-Houston TH 560, d'une puissance de 40 chevaux (600 volts, 59 ampères, 710 tours à la minute). La figure 581 donne la vue d'ensemble et la figure 582 les coupes transversale et longitudinale.

La carcasse est en acier coulé magnétique et fondue d'une seule pièce. Les paliers du moteur sont solidement fixés à chaque extrémité de la carcasse par des vis rendues indesserrables. Une large porte permet la visite du collecteur. Le fil conducteur des bobines inductrices et de commutation est de section rectangulaire afin qu'elles ne soient pas désorganisées par les trépidations, et elles sont spécialement protégées contre l'humidité. Des flasques-ressorts assurent leur immobilisation par rapport aux masses polaires et compensent les contractions que peut subir à la longue l'isolant extérieur.

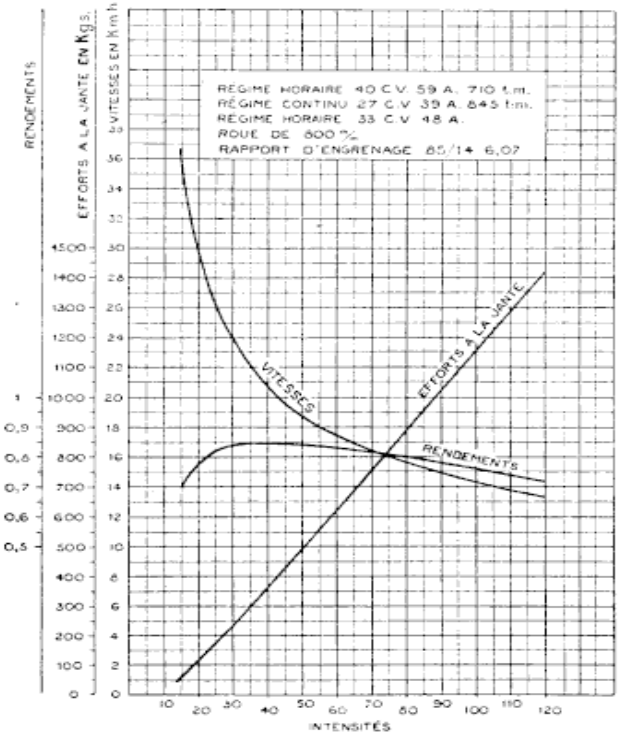


Fig. 583. — Courbes caractéristiques sous 600 volts du moteur T.-H. 560. Roues de 800 millimètres. — Réduction : 85/14.

Régime horaire 40 CV pour moteur auto-ventilé.
Régime continu 27 CV pour moteur auto-ventilé.
Régime horaire 33 CV pour moteur fermé.

L'induit porte un ventilateur centrifuge, qui assure la circulation de l'air dans le moteur. A chaque extrémité de l'induit se trouvent des déflecteurs d'huile portant une double gorge circulaire dont les bords viennent se placer de part et d'autre des bords d'une double gorge circulaire venue de fonderie avec le palier. Ces déflecteurs ont pour but de recueillir l'huile de graissage qui coule des paliers et de la rejeter par la force centrifuge dans des gouttières qui la ramènent à un réservoir inférieur dont la vidange est très facile. Le moteur entraîne un arbre par l'intermédiaire d'un engrenage dont le rapport des dents permet de réduire la vitesse dans le rapport de $\frac{85}{14}$, ou $\frac{80}{19}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les courbes caractéristiques de ce moteur sont dessinées dans le graphique figure 583 aux différents régimes.

* * *

Dans les ***locomotives électriques***, où la place n'est plus si limitée pour l'installation des moteurs, ceux-ci se rapprochent beaucoup des moteurs ordinaires. Aussi nous ne dirons que quelques mots des avantages généraux des divers systèmes.

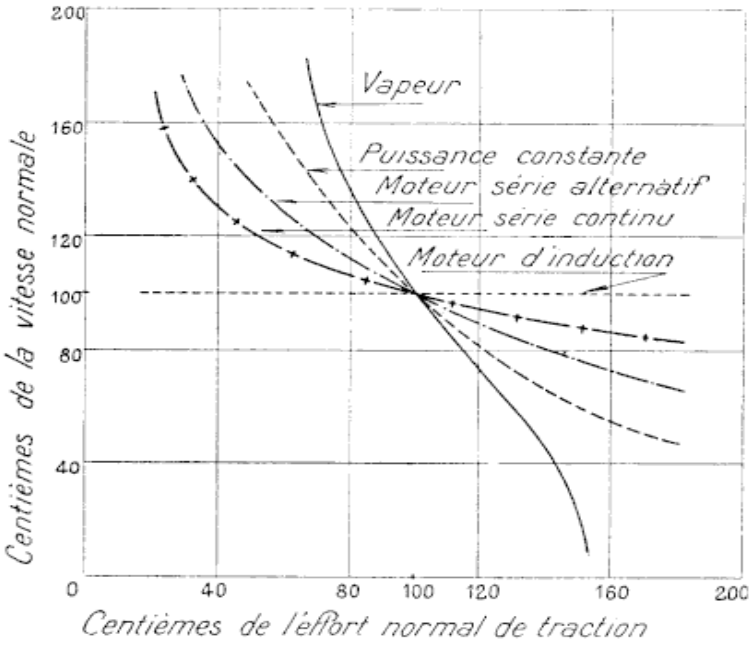


Fig. 584. — Comparaison des divers systèmes de traction.

Le moteur série est employé universellement sur les lignes à courant continu. Un de ses plus grands avantages est de développer un effort de traction d'autant plus grand que sa vitesse diminue davantage. Avec la locomotive à vapeur, quand l'effort à développer augmente trop, la vitesse diminue très rapidement jusqu'à devenir nulle, tandis qu'avec la locomotive électrique, la vitesse tend vers une limite inférieure et l'effort de traction peut atteindre un maximum beaucoup plus élevé.

Le moteur série à courant alternatif fonctionne d'une manière analogue, mais ne peut développer un couple de démarrage aussi grand que le moteur à courant continu.

Avec le moteur d'induction, à vitesse constante, le couple de démarrage est très puissant, mais, la vitesse restant constante, la puissance augmente avec l'effort de traction, ce qui fait que l'on est obligé de prévoir des moteurs d'une puissance supérieure à celle indispensable en moyenne.

La figure 584 groupe les caractéristiques générales des diverses locomotives électriques et à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un des problèmes les plus délicats de l'équipement de traction élec-

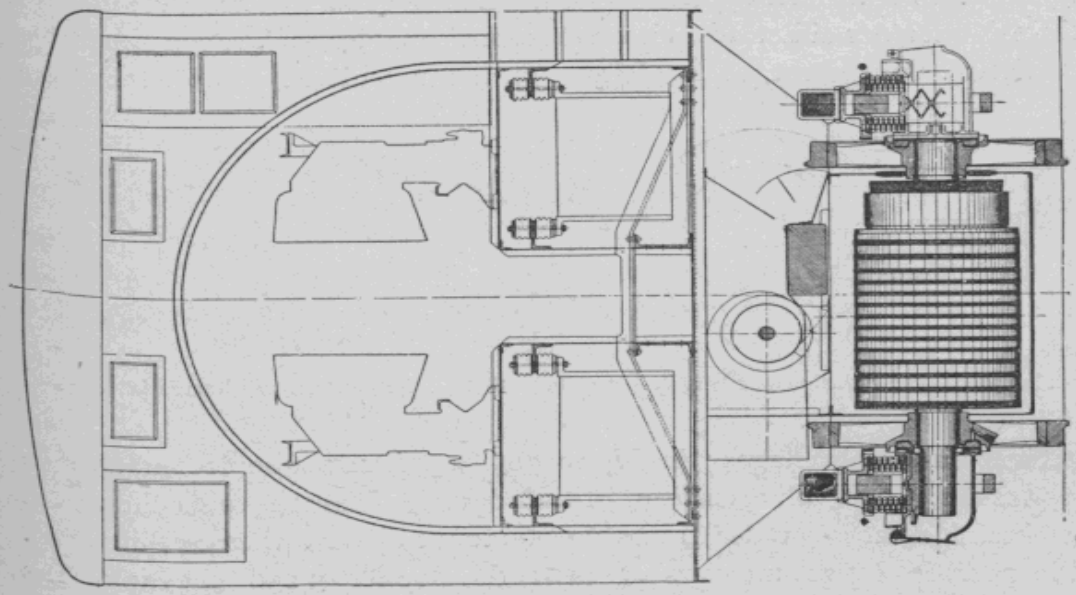


Fig. 586. — Section par l'axe d'un des douze essieux moteurs de la locomotive sans engrenage.

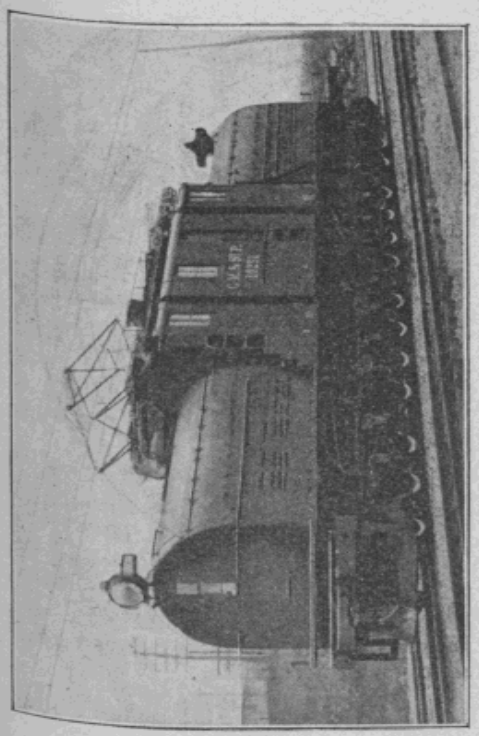


Fig. 585. — Locomotive de 265 tonnes courant continu 3 000 volts sans engrenage (*gearless*). Puissance maxima, 3 250 chevaux.

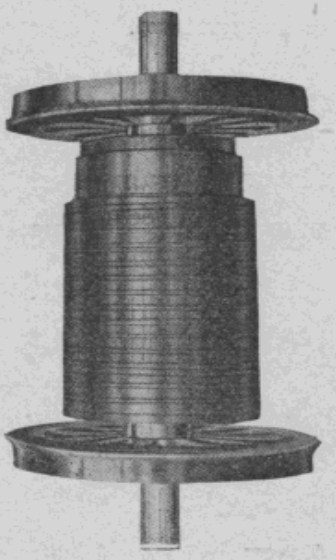


Fig. 587. — Armature et roues d'une locomotive sans engrenage.

trique est la ***liaison du moteur au châssis*** et la transmission de l'énergie mécanique aux roues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'idée la plus simple serait de caler directement les roues sur l'arbre du moteur et de transformer celui-ci en essieu. Mais cette solution s'est heurtée dès le début à des difficultés mécaniques considérables, malgré son apparente simplicité. Cependant, en Amérique, on a construit de nombreuses loco-

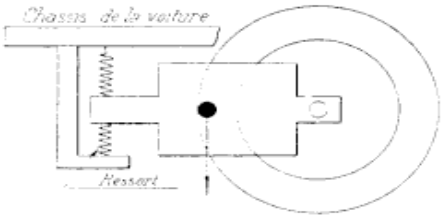


Fig. 588. — Suspension par le nez.

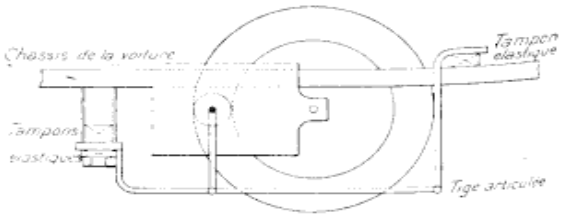


Fig. 589. — Suspension par barres latérales inférieures.

motives sans engrenages ; la figure 585 représente une locomotive de 265 tonnes, 3 000 volts continu, utilisée dans les Montagnes Rocheuses et destinée à remorquer des trains de 960 tonnes (douze wagons Pulmann). Elle possède douze moteurs et peut développer 3 250 chevaux. Les figures 586 et 587 donnent la coupe par l'un des douze axes moteurs et la vue de l'essieu muni de son armature.

A part ces cas exceptionnels, on emploie, surtout pour les tramways, des moteurs à réduction

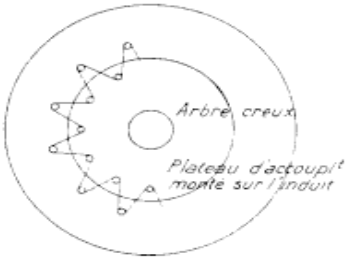


Fig. 590. — Principe de l'entraînement élastique de l'essieu par le moteur.

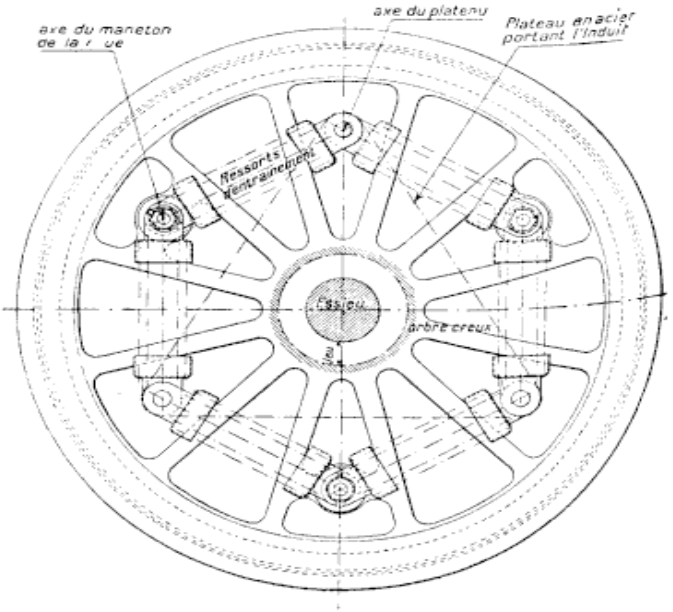


Fig. 591. — Entraînement élastique des locomotives de la ligne des Invalides à Versailles.

de vitesse, mais alors une complication se présente : comment suspendre le moteur au châssis de la voiture pour que, malgré les vibrations des essieux et du châssis et leurs mouvements relatifs par suite des irrégu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

larités de la voie, la transmission se fasse sans à-coups et sans que le train d'engrenages soit soumis à des efforts anormaux ?

Parmi les nombreux systèmes de suspension proposés, nous ne citerons que les principaux. Une suspension très employée est celle dite « *par le nez* » (fig. 588). Elle consiste en une patte venue de fonte avec la carcasse dans laquelle s'engage un boulon relié au châssis. Ce boulon sert de guide à un ressort fixé au châssis et à la patte (ou nez) du moteur.

Une autre suspension est dite par *barres latérales*. La figure 589 en donne le principe : un système articulé repose sur le châssis par des tampons élastiques et, vers son milieu, supporte le poids du moteur par l'intermédiaire d'une bielle verticale passant par le centre de gravité du moteur.

* * *

L'entraînement de l'arbre moteur par la dynamo, quel que soit le système de suspension, doit se faire d'une façon élastique, sans quoi, au démarrage ou lors des changements brusques de régime de marche, les engrenages seraient infailliblement détériorés. On réalise la liaison par l'intermédiaire de plateaux d'accouplement de systèmes divers. Les figures 590 et 591 montrent deux types d'entraînement de l'essieu par le moteur.

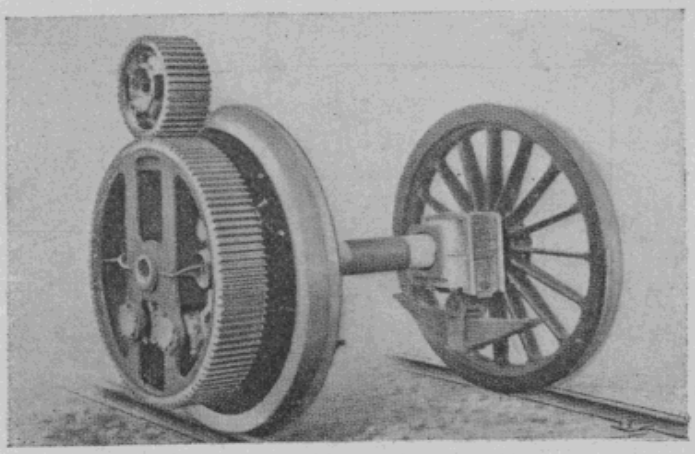


Fig. 592. — Disposition de la commande individuelle unilatérale d'un essieu moteur par un engrenage réducteur de vitesse (chemins de fer suisses).

Au lieu de commander les roues motrices par train d'engrenages, on utilise également le système classique de la machine à vapeur, bielle-manivelle, et ici encore les réalisations pratiques sont extrêmement nombreuses. Bien qu'en faveur en Amérique, en Allemagne et en Suisse, les locomotives à bielles ont donné lieu à des mécomptes et à des ruptures de pièces partout où elles ont été employées.

Les moteurs électriques sont en général à axe horizontal, attaquant les roues motrices par l'intermédiaire d'un train d'engrenages (fig. 592). Dans certaines locomotives récentes de grande vitesse, les moteurs sont à axe vertical, couplés par deux et attaquent l'arbre creux au moyen d'engre-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nages coniques. Tel est le cas des locomotives à grande vitesse de la Compagnie du Midi, qui remorquent un train de 300 tonnes à 130 kilomètres à l'heure. La disposition verticale des moteurs permet d'avoir un centre de gravité situé assez haut (1m,87) au-dessus de la voie, ce qui assure une bonne stabilité de route. De plus, les moteurs tournant en sens inverse créent sur les engrenages coniques de l'arbre creux des réactions horizon-

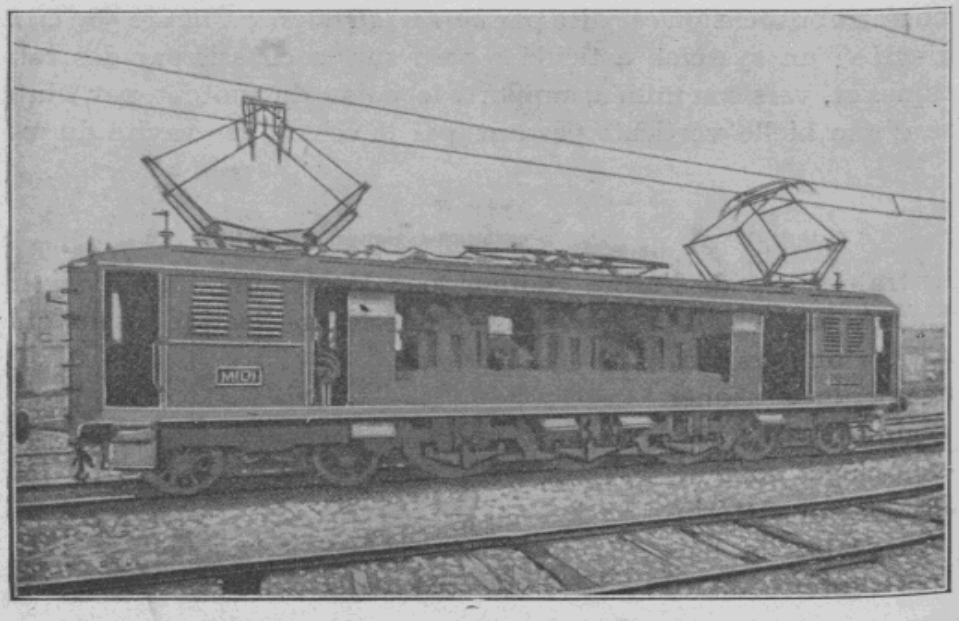


Fig. 593. — Vue de la locomotive type 2C2 des chemins de fer du Midi, paroi latérale enlevée.

tales égales et de sens contraire, de sorte que cet arbre creux est en équilibre et n'a pas besoin de butée latérale.

La figure 593 montre la vue d'ensemble de cette locomotive (panneaux latéraux enlevés), et les figures 594 et 595 les vues de détail de l'ensemble des moteurs, permettant de saisir leur mode d'action.

L'aspect extérieur des locomotives électriques dont nous donnons quelques types dans les figures 597 et 598 montre combien leurs dispositions intérieures sont variées. Aussi serait-il impossible d'indiquer, même succinctement, les diverses combinaisons auxquelles se sont livrés les ingénieurs de façon à utiliser au mieux la place relativement restreinte dont ils disposent pour installer les moteurs et les organes de commande. On comprend également immédiatement que, pour la locomotive électrique, on en est encore, malgré les résultats satisfaisants obtenus, à la période de tâtonnement, et la forme « standard » n'est pas encore trouvée. Chaque fois qu'une nouvelle ligne ou un nouveau réseau est électrifié, on crée un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nouveau type de locomotive électrique... supérieure aux types existants et en général radicalement différente quant à la disposition intérieure et aux organes mécaniques.

* * *

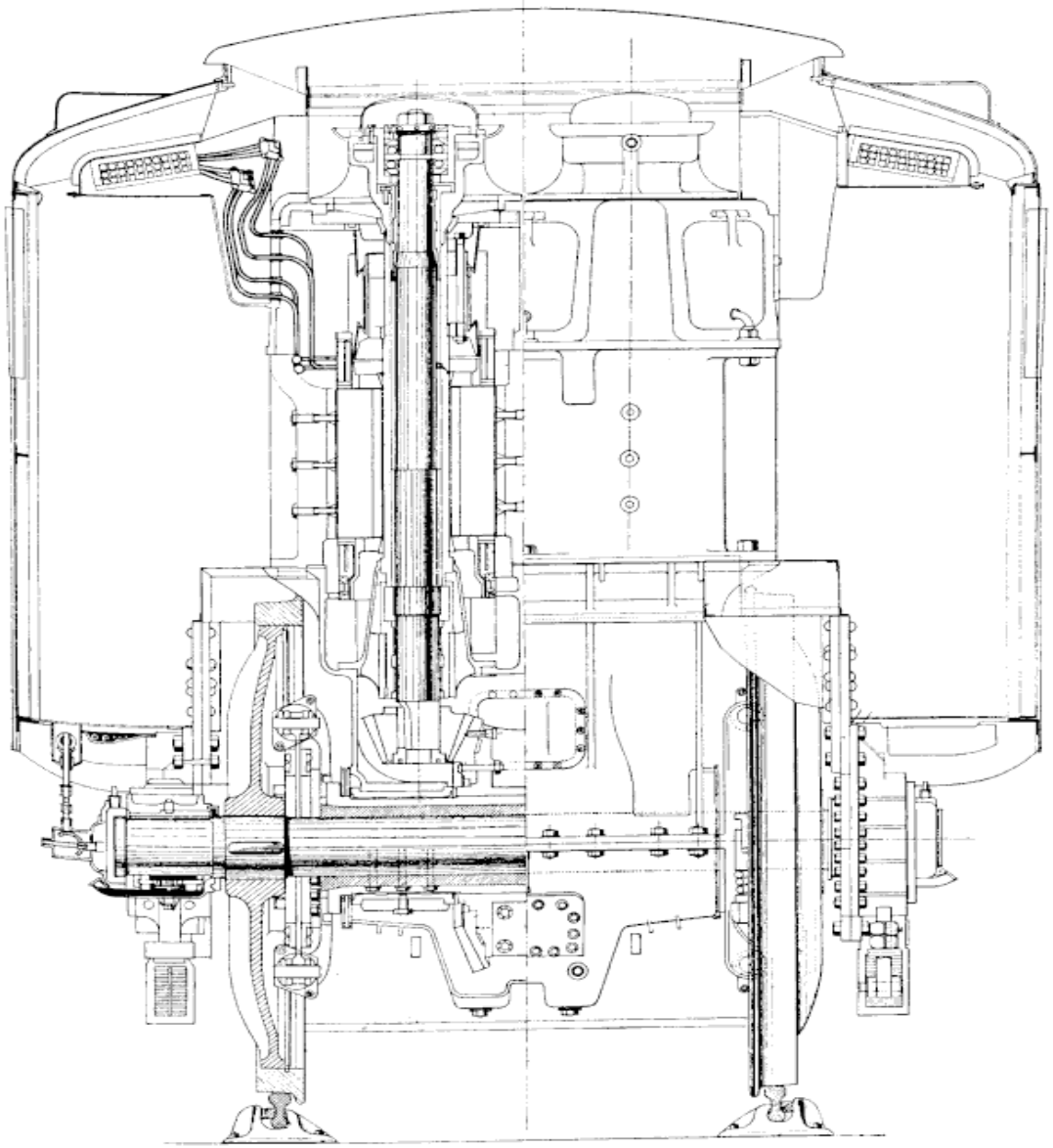


Fig. 594. — Coupe suivant l'axe d'un des moteurs doubles de la locomotive des chemins de fer du Midi.

A côté des locomotives destinées au service des lignes de chemin de fer, on utilise de plus en plus à l'intérieur des usines, des mines, des carrières, etc., des locomotives industrielles remorquant les matériaux à de petites dis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

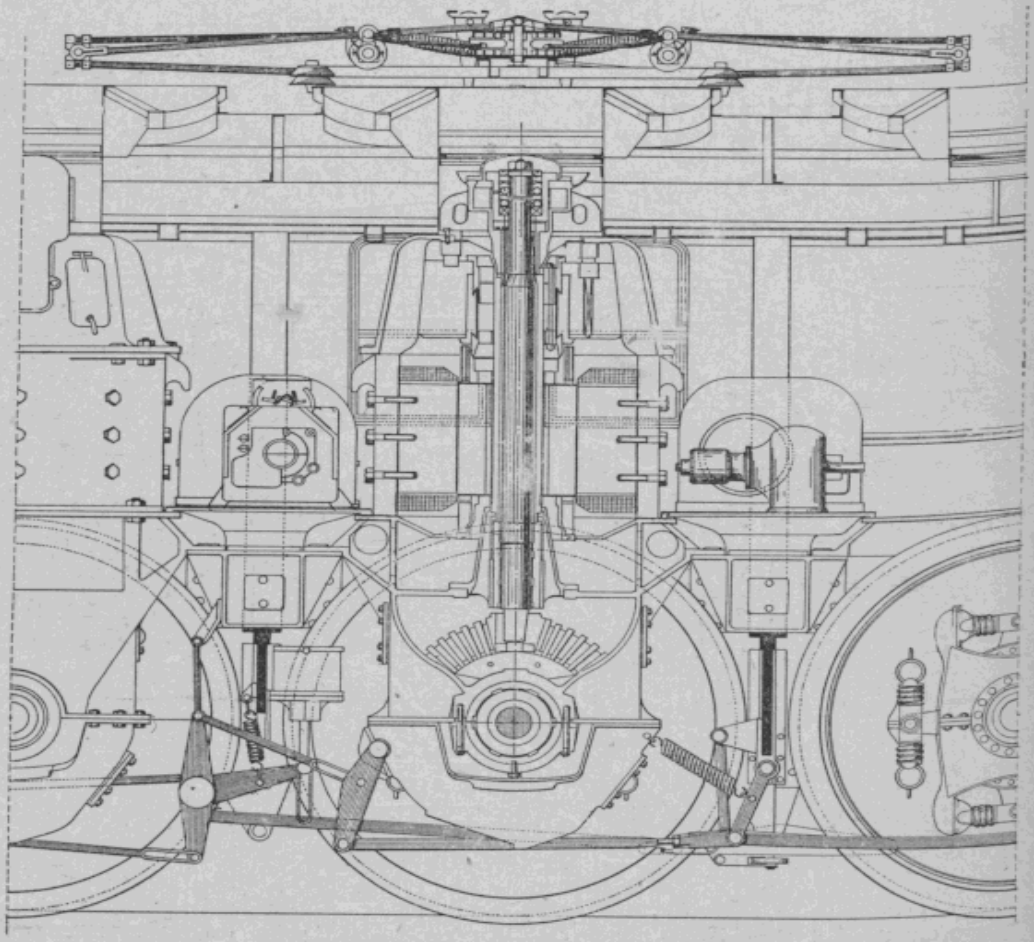


Fig. 595. — Vue de détail de l'ensemble des moteurs.

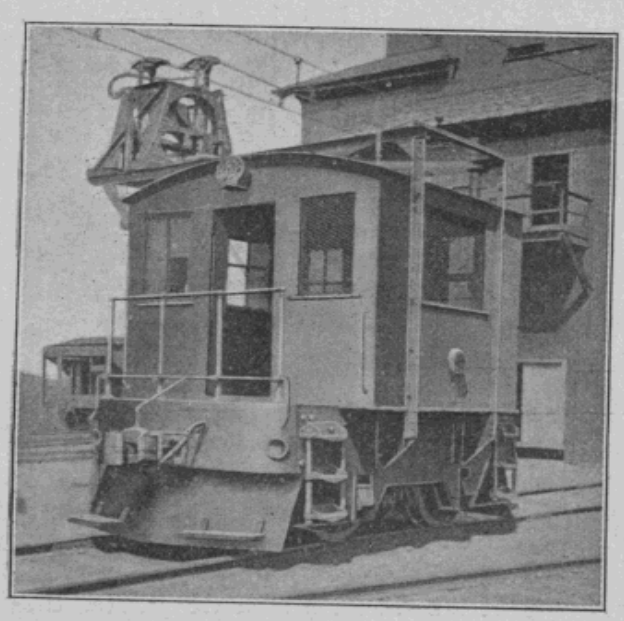


Fig. 596. — Locomotive d'usine de 25 tonnes.

tances. Leurs dispositions sont également très variées, mais leurs organes essentiels sont analogues à ceux des locomotives de réseau (fig. 596, 599, 600).

* * *

Un organe extrêmement important de toute locomotive électrique est le ***controller***, qui permet au mécanicien de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 598. — Locomotive de 100 tonnes, 600 volts, courant continu, moteur 300 chevaux (G. E. C°).

Fig. 600. — Locomotive d'usine de 15 tonnes.

Fig. 597. — Locomotive de l'État suisse, trois moteurs, 700 chevaux.

Fig. 599. — Type de locomotive de mines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

faire varier à volonté la vitesse du train en agissant sur le régime électrique des moteurs.

C'est un cylindre vertical isolant que l'on peut faire tourner autour de son axe, au moyen d'une manette. Il porte sur sa longueur des bagues ou portions de bagues en cuivre qui viennent frotter contre des plots de connexion, ou encore des doigts métalliques s'engageant dans des mâchoires fixes.

La figure 601 donne un exemple schématique simple d'un controller pour moteur série. Le cylindre mobile porte onze bagues numérotées de 1 à 11, qui sont développées sur la figure. Elles frottent contre les plots fixes A, R_1, R_2, R_3, R_4, S_1, S_2, S_3, C, D, B, reliés aux rhéostats de démarrage, de réglage, au moteur et à la ligne en A et B.

Lorsque le cylindre est tourné de façon que les plots se trouvent sur la ligne I, le courant arrive par 1, va en 2, passe par le rhéostat de démarrage, par l'excitation, arrive à la bague 8 par le plot S_3, passe à la bague 9 et au moteur par le plot C et enfin retourne à la ligne par le plot D, les bagues 10 et 11 et le plot B.

Au fur et à mesure que l'on tourne le cylindre (lignes II, III), on diminue la résistance de démarrage, et, quand on est dans la position IV, elle se trouve éliminée : le moteur est en court-circuit sur la ligne.

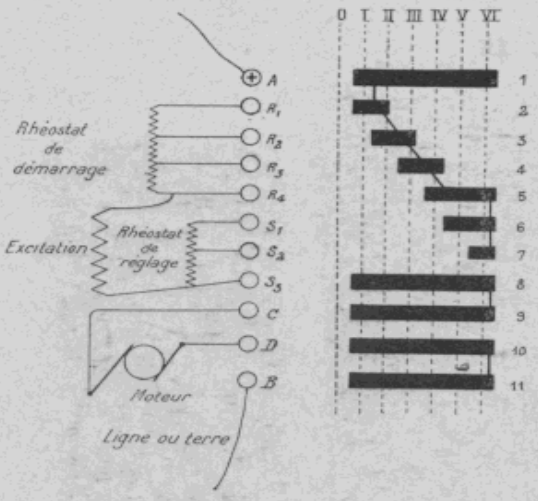


Fig. 601. — Schéma d'un contrôleur de tramway.

Dans la position V, le moteur est toujours en court-circuit, mais on a introduit une résistance de réglage en dérivation sur l'excitation, ce qui augmente la vitesse. On diminue cette résistance en passant à la position VI.

Pour changer le sens de marche, on renverse le courant seulement dans l'induit, au moyen d'un commutateur manœuvré par une seconde manette placée sur le controller et qu'on ne peut actionner que lorsque l'on a interrompu complètement le courant.

Lorsqu'il y a deux moteurs série-parallèle, la disposition est un peu plus compliquée. La figure 602 permet de suivre facilement les diverses combinaisons que peut effectuer le wattman.

La figure 603 montre la vue d'un controller de tramway. Les quatre plots supérieurs correspondent à l'inverseur de courant, les plots inférieurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux positions diverses du controller proprement dit. Ajoutons que, pour éviter la formation des arcs lorsque les bagues quittent les plots, des

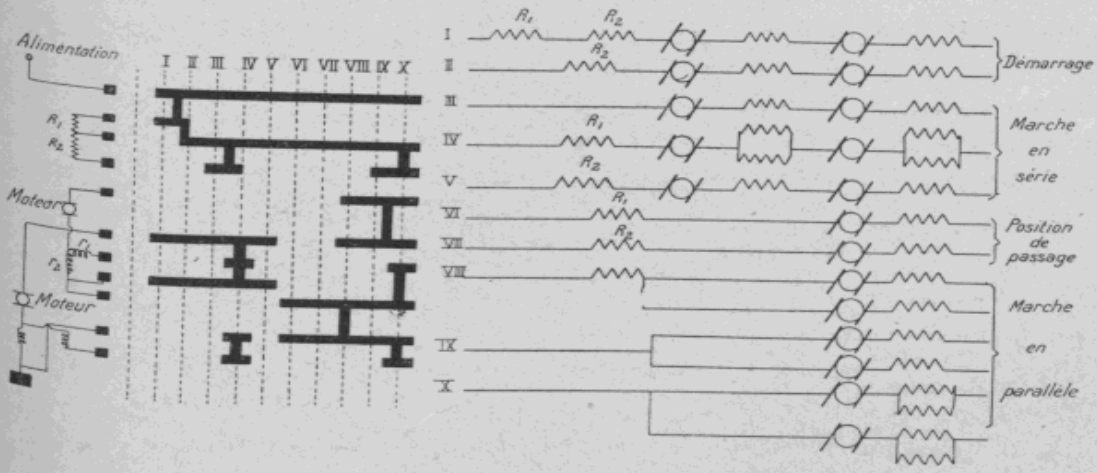


Fig. 602. — Contrôleur série-parallèle pour deux moteurs de traction.

électro-aimants, quel'on aperçoit sur la partie gauche de la figure, assurent le soufflage magnétique des arcs qui pourraient s'amorcer.

* * *

Le problème se complique encore lorsque, au lieu d'avoir une seule voiture motrice munie d'un ou, plus fréquemment, de deux moteurs, on a une rame comprenant deux ou plusieurs voitures motrices, comme les métropolitains ou certains trains destinés à être sectionnés au cours du parcours. Pour ce mode de traction

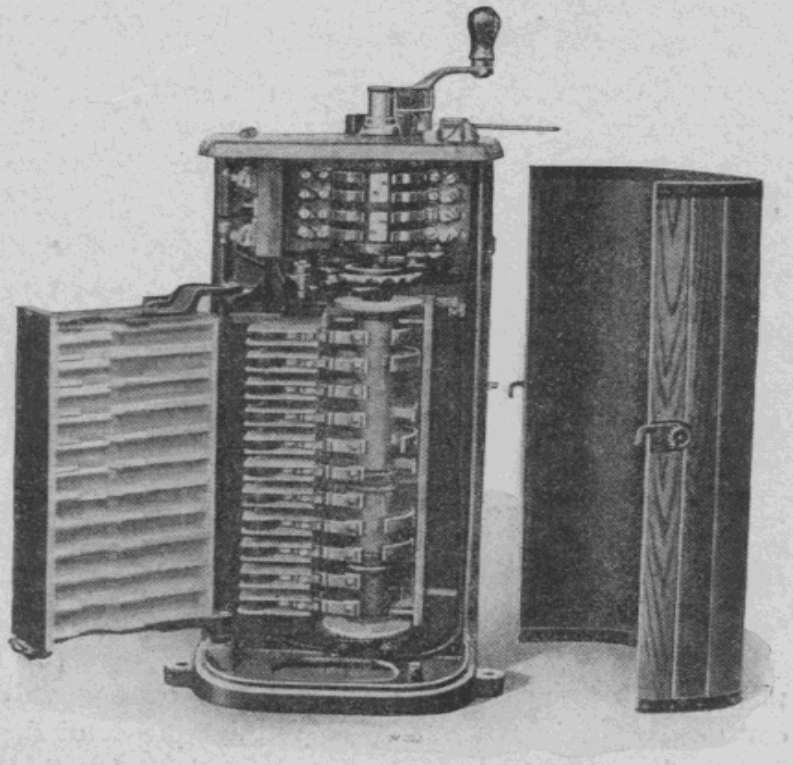


Fig. 603. — Vue d'un controller de tramway Thomson-Houston.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dit ***par unités multipes***, la commande et la régulation des moteurs sont des problèmes dont les diverses solutions qui ont été proposées sont extrêmement délicates et compliquées. Aussi n'en dirons-nous que quelques mots très généraux.

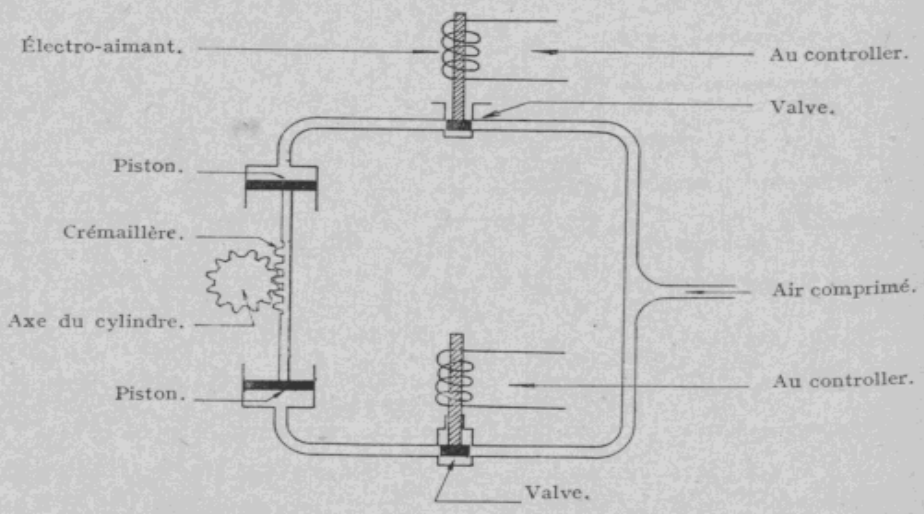


Fig. 604. — Schéma de la commande électro-pneumatique.

Tout d'abord, les puissances mises en jeu ne permettent plus d'effectuer les connexions à l'intérieur même du controller. On ne peut évidemment pas construire cet appareil de façon à couper sans danger des courants de

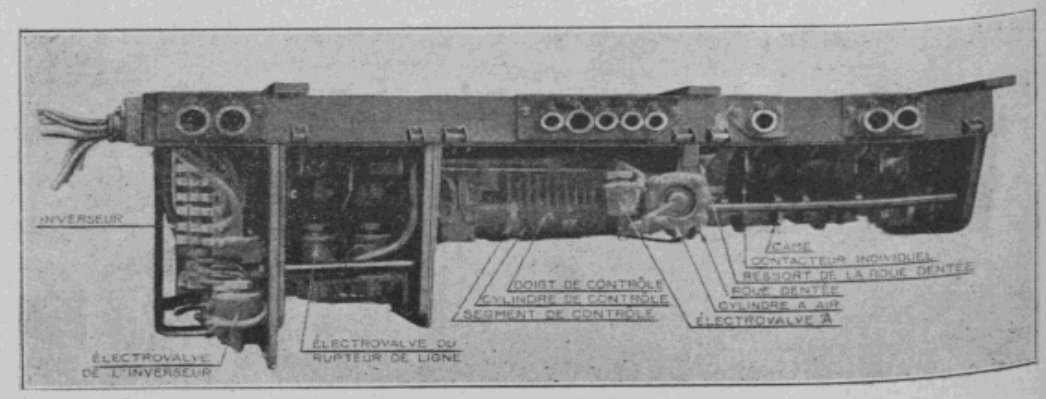


Fig. 605. — Ensemble d'un controller électro-pneumatique P. C. (Thomson-Houston).

plusieurs centaines d'ampères sous 500 ou 600 volts. Le controller de commande est beaucoup plus réduit que celui des tramways, car il sert seulement à envoyer un courant dans des électro-aimants disposés dans une autre partie de la voiture et qui, eux, actionnent les interrupteurs généralement plongés dans des bains d'huile.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'un des premiers systèmes est le ***système Sprague***. Il comprend un circuit de commande réunissant toutes les voitures motrices ; dans chaque voiture se trouve un équipement analogue à celui d'une voiture isolée ordinaire et un circuit de relais actionnant des électro-aimants. Il suffit d'un câble à cinq conducteurs reliant les diverses voitures pour commander toutes les manœuvres nécessaires.

Dans les ***systèmes pneumatiques*** (Westinghouse, P. C., Thomson-Houston), les contacteurs réalisant les différentes combinaisons électriques des moteurs sont montés sur un axe portant une roue dentée sur laquelle embraye une crémaillère solidaire de la tige d'un piston se déplaçant dans un cylindre sous l'action de l'air comprimé distribué par une conduite spéciale.

Dans ces conditions, le manipulateur de commande ne travaille que sur une ligne à faible voltage, 10 à 15 volts fournis par une batterie d'accumulateurs, et le courant qu'il envoie ne sert qu'à actionner des électro-aimants ouvrant ou fermant les valves de la conduite d'air comprimé.

La figure 604 montre le principe du fonctionnement et la figure 605 représente un contrôleur électro-pneumatique Thomson-Houston, les différents organes (inverseur, controller, interrupteur de ligne) étant montés sur un axe mû par l'intermédiaire d'une crémaillère actionnée par l'air comprimé.

* * *

Le freinage des trains remorqués par locomotives électriques est assuré par le même système que dans les trains à traction à vapeur (système Westinghouse par exemple). Mais, dans certains cas, on réalise également un freinage auxiliaire à l'aide des moteurs eux-mêmes fonctionnant alors, non plus comme moteurs, mais comme générateurs. En effet, si on laisse l'excitation des inducteurs, en coupant l'alimentation du courant des induits, les dynamos, tournant sous l'action de la marche du train, débiteront alors un courant, produit au prix d'un travail qui freinera le

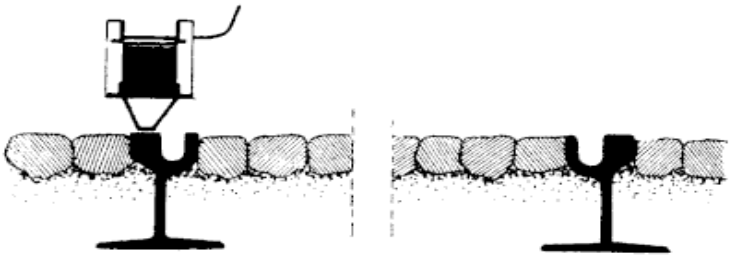


Fig. 606. — Schéma du fonctionnement d'un frein électromagnétique à patins.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

train. On sait en effet qu'en court-circuitant un moteur lancé, on l'arrête immédiatement. Le courant ainsi produit peut être renvoyé dans le circuit d'alimentation, et on obtient ainsi une ***récupération*** qui est loin d'être négligeable, surtout lorsqu'il s'agit de lignes de montagne (fig. 604).

Pour les tramways, aux systèmes de freinage ordinaire, et au freinage électrique, on adjoint en plus le ***freinage électromagnétique***, rendu obligatoire par les règlements d'administration publique lorsque la ligne présente des parties ayant des pentes supérieures à 6 centimètres par mètre.

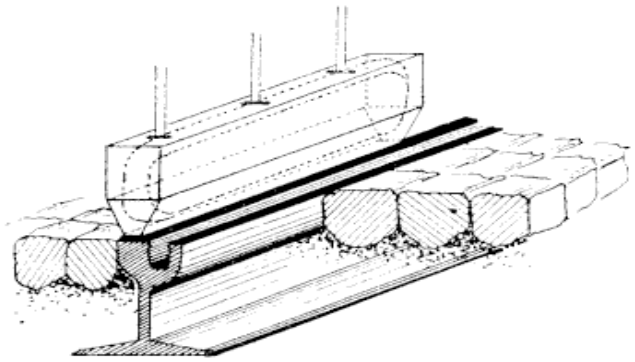


Fig. 607. — Frein électromagnétique.

Les patins électromagnétiques, que des électro-aimants alimentés par le courant des moteurs tournant en génératrices appliquent sur les rails pendant la descente, présentent le gros avantage d'augmenter l'adhérence de la voiture en même temps qu'ils produisent le freinage. La figure 606 montre un patin à une bobine qui, pour une intensité de 25 ampères, exerce un effort vertical de 4 tonnes sur le rail. On voit donc que ce système de freinage est extrêmement puissant.

* * *

Dans ce qui précède, nous avons parlé uniquement de la traction par courant fourni aux moteurs par une ligne de distribution d'énergie. Il nous reste à dire quelques mots de la ***traction par accumulateurs.***

Bien que les automobiles électriques aient été abandonnées lors du développement des moteurs à explosion, il semble que, tout au moins dans certains cas particuliers, les accumulateurs actuels, grâce à leurs perfectionnements, puissent soutenir avantageusement la comparaison avec les automobiles ordinaires.

Si l'automobile électrique ne peut concurrencer la voiture de tourisme à moteur à explosion, par suite de son rayon d'action limité (150 kilomètres environ), par contre, elle présente des avantages indiscutables lorsqu'il s'agit d'assurer un service de ville, de livraisons, par exemple, le trajet journalier n'excédant pas, dans ces conditions, une centaine de kilomètres.

En effet, l'automobile électrique est le véhicule idéal au point de vue

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

construction. Supposons qu'à une automobile ordinaire on enlève tout ce qui constitue un mécanisme délicat, le moteur avec ses pistons, soupapes, bougies, etc. ; le carburateur, le système d'allumage, le ventilateur, le radiateur, les pompes à huile et à eau, les réservoirs d'eau et d'essence, le changement de vitesse et la transmission avec toutes leurs complications, ne laissant finalement subsister que la batterie d'accumulateurs, le démarreur électrique et son bouton de commande, nous avons les éléments essentiels d'une automobile électrique.

Chacun de ces organes fondamentaux a été l'objet d'études si poussées dans d'autres branches de l'industrie électrique et est arrivé à un si haut degré de perfectionnement et de sécurité qu'il est facile de comprendre que l'automobile électrique est infiniment plus parfaite, plus « au point », ue l'automobile ordinaire. Le *controller* qui remplace le changement de vitesse a fait ses preuves sur les tramways et locomotives électriques ; les moteurs sont analogues à ceux que l'on utilise en traction ordinaire, et les batteries d'accumulateurs sont maintenant bien étudiées : le poids mort est réduit ; la capacité par kilogramme de plaques est satisfaisante, les connexions, couvercles et bouchons de bacs assurent une étanchéité parfaite. Enfin, les divers systèmes de transformation du courant pour la charge des batteries suppriment tout ce que ce problème pouvait avoir de compliqué il y a quelques années.

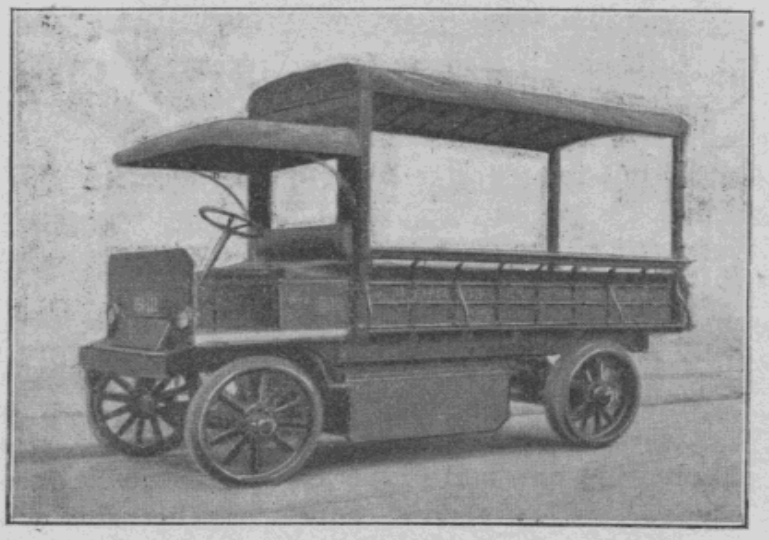


Fig. 608. — Un camion électrique. On remarque sous le châssis la caisse d'accumulateurs amovible.

Les avantages de l'automobile électrique sont nombreux, et nous les signalerons rapidement. Facilité de mise en marche par toutes les températures ; risques d'incendie extrêmement réduits ; souplesse de marche et de manœuvre supérieures à celles des automobiles ordinaires ; durée plus grande des pneumatiques ; durée incomparablement plus longue de la voiture, par suite de l'extrême simplicité et de la robustesse de son mécanisme, frais d'entretien et de réparation minimes ; enfin, économie appré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ciable sur la puissance motrice, et cela même en des pays comme l'Amérique, où cependant le prix de l'essence est très peu élevé. L'économie que présente la traction par accumulateurs est au moins de 25 à 30 p. 100 sur la traction automobile ordinaire.

Chose remarquable : c'est en Amérique, pays d'élection de l'automobile, centre principal de production du pétrole et de l'essence, que l'automobile électrique s'est développée au maximum. C'est ainsi qu'à New-York, tous les grands magasins emploient exclusivement des automobiles électriques pour leurs livraisons à l'intérieur de la ville; il en est de même des laitiers, des boulangers (Cushman, 150 voitures ; Ward Baking, 200 voitures) et des entreprises de transport (American Railway Express, 324 voitures). La figure 608 représente une voiture de livraison à accumulateurs, et la figure 609 une automobile de tourisme.

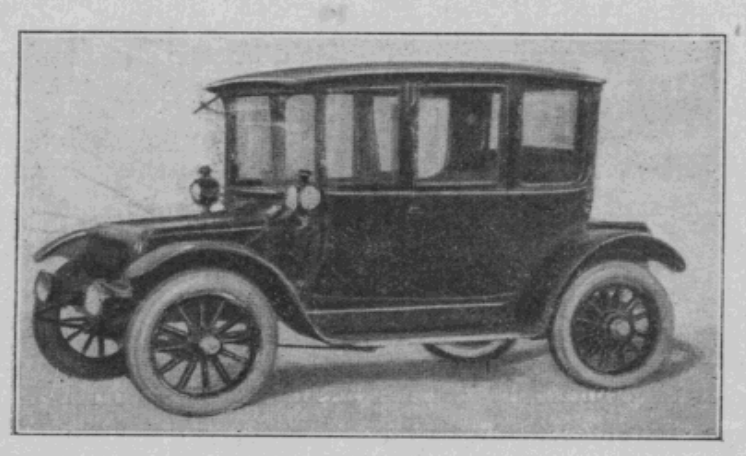


Fig. 609. — Vue d'une voiture électrique de tourisme.

Le controller, très simple et très robuste, est manœuvré par un levier qui remplace le levier de changement de vitesse des automobiles ordinaires, et les connexions électriques qu'il permet d'établir sont, puisqu'il n'y a en général qu'un seul moteur, les mêmes que celles que nous avons, décrites à titre d'exemple, page 601.

* * *

L'électricité a été également appliquée à la ***propulsion des navires***. La marine de guerre américaine possède des croiseurs et des cuirassés (type *New-Mexico*) dans lesquels les hélices sont actionnées par des moteurs électriques auxquels le courant est fourni par une véritable centrale électrique installée à bord. Un certain nombre de cargos et de bateaux à passagers sont également mus par l'électricité.

L'économie est notable sur les systèmes à vapeur et l'encombrement moindre, puisque l'on supprime les machines auxiliaires génératrices d'électricité qu'il faut toujours installer à bord pour l'éclairage, les pompes, les treuils, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En général, l'énergie électrique est produite dans la chambre des machines par une génératrice accouplée directement à une turbine à vapeur ; dans la cale arrière, se trouve le moteur actionnant l'hélice. Un controller installé au poste de manœuvre du commandant permet d'agir sur le régime électrique de ce moteur (moteur synchrone ou moteur d'induction).

La figure 610 montre une des dispositions de machines adoptée sur les cargos. La figure 611 représente le turbo-générateur du paquebot *Cuba*, et les figures 612 et 613 la vue et la coupe d'un moteur d'induction pour propulsion marine.

* * *

Un cas particulier de traction électrique est le ***halage électrique*** sur les rivières et les canaux.

On emploie à cet effet des tracteurs spéciaux, dont la figure 614 montre un type,

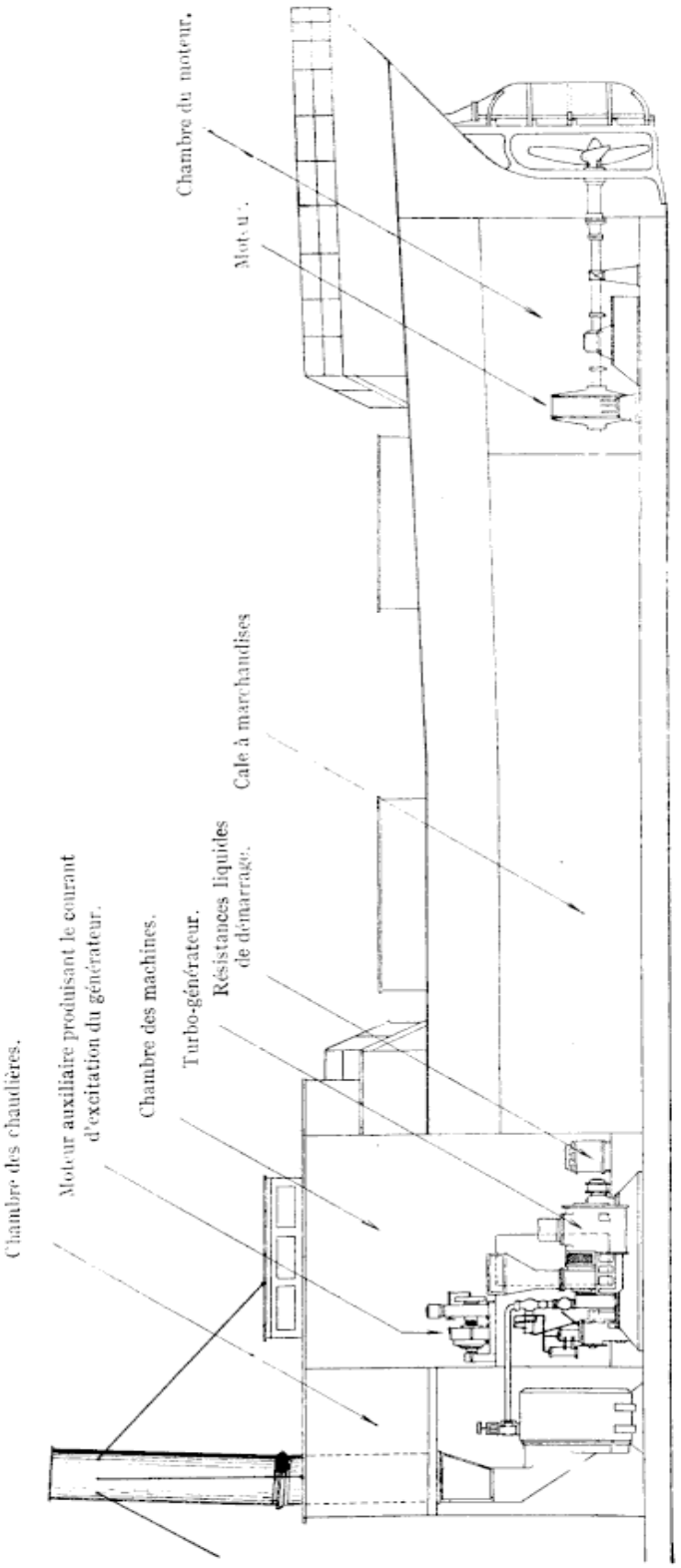


Fig. 610. — Disposition de la machinerie dans un cargo mû par un moteur électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui circulent sur des rails disposés sur le chemin de halage du canal. Afin d'augmenter l'adhérence, les deux essieux sont couplés par bielle et manivelle. La prise de courant s'effectue par trolley. Le poids mort est intentionnellement assez élevé, et un double engrenage permet de réduire

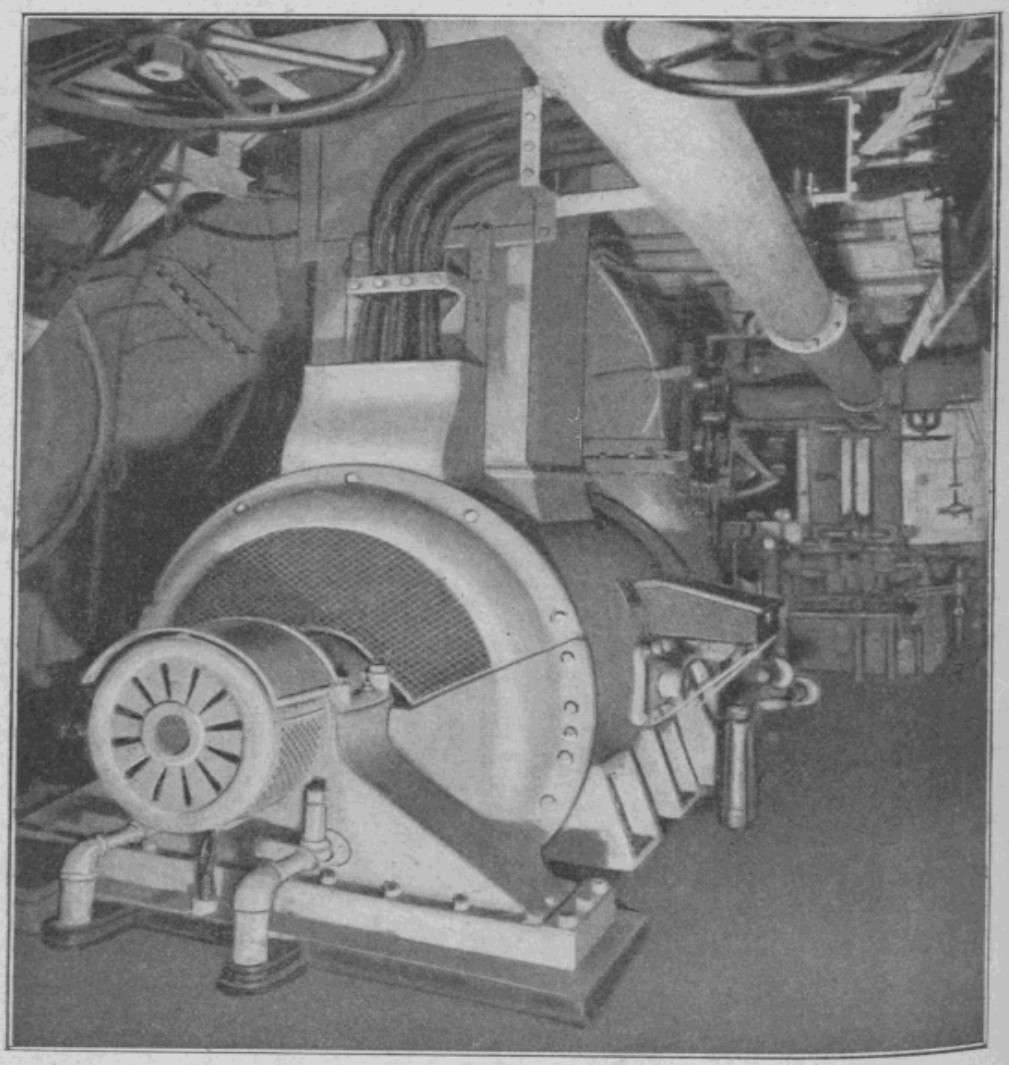


Fig. 611.— Salle des machines du *Cuba*, côté du générateur.

la vitesse à la valeur très faible imposée dans cette application. Aux écluses du canal de Panama, la manœuvre des navires s'effectue à l'aide de tracteurs électriques beaucoup plus puissants, étant donné le tonnage des navires à écluser.

* * *

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

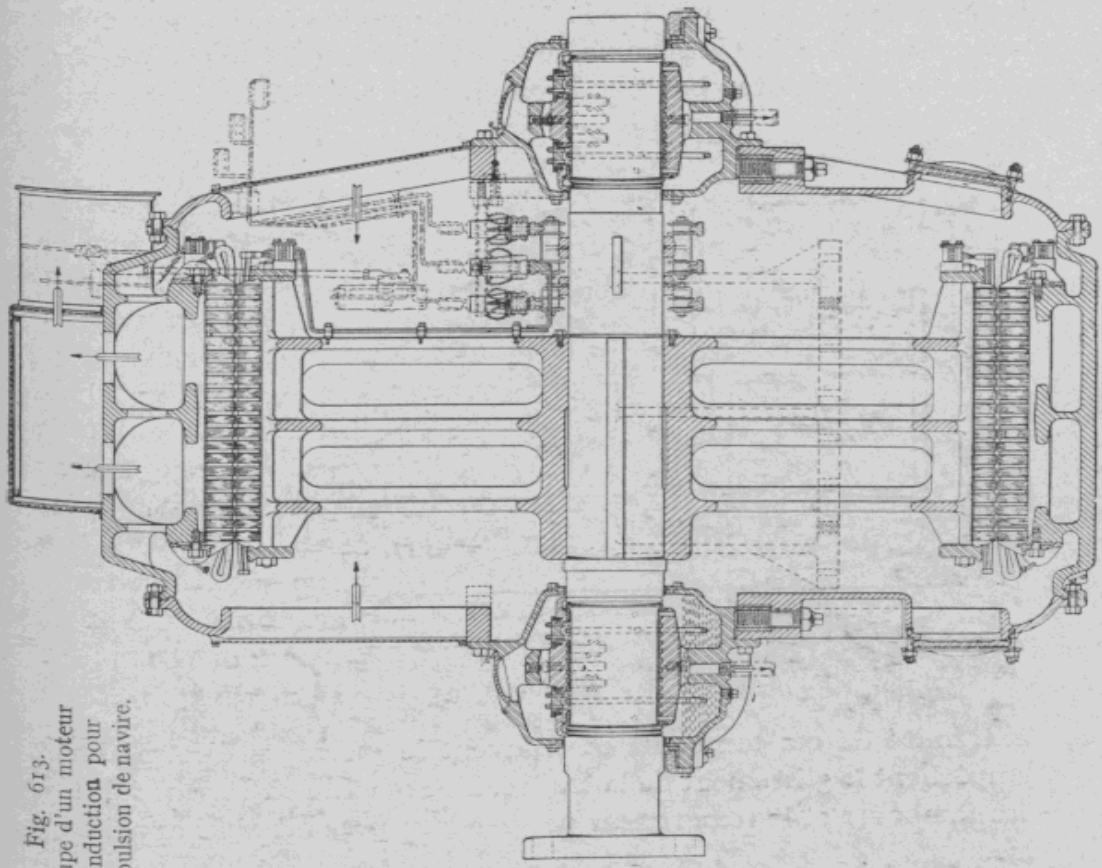


Fig. 613.
Coupe d'un moteur d'induction pour propulsion de navire.

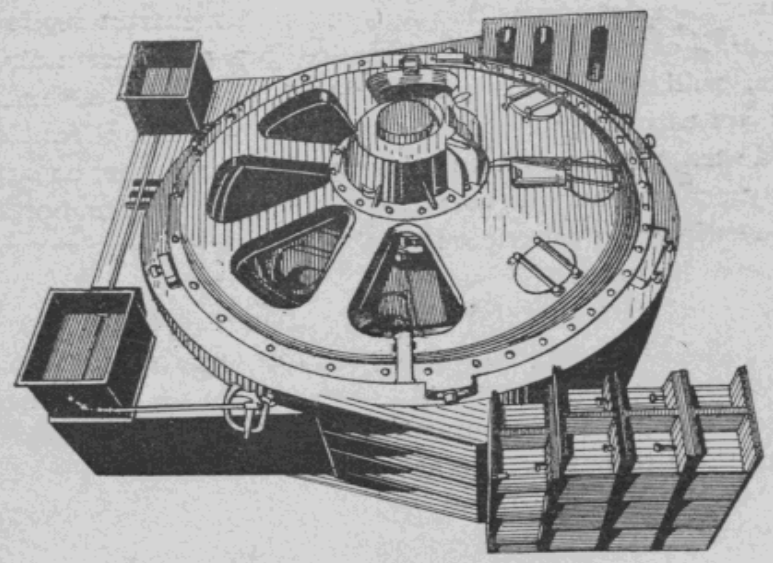


Fig. 612. — Moteur marin d'induction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans quelques cas, on réalise le ***halage magnétique*** (entre Paris et Rouen en particulier). Une chaîne de fer est disposée au fond de la rivière et s'enroule sur deux tambours de grand rayon montés sur le remorqueur.

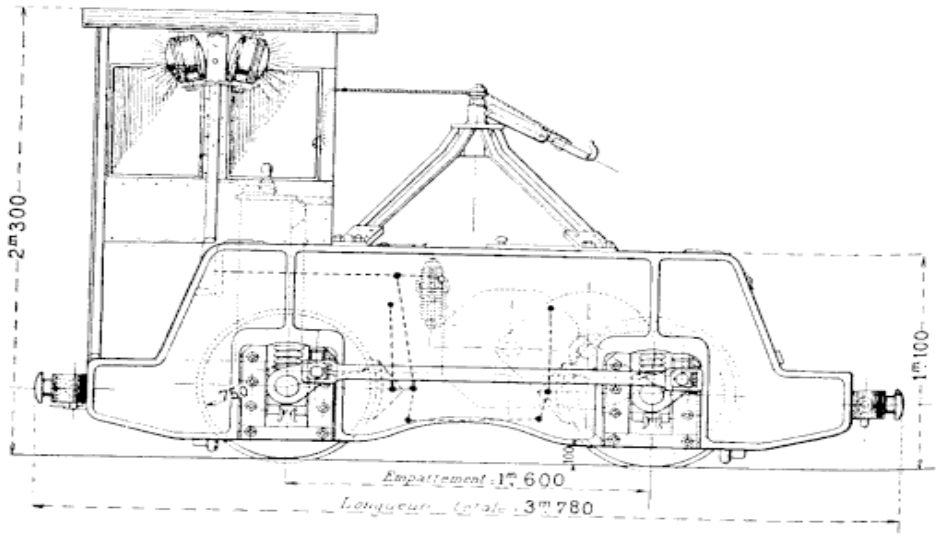


Fig. 614.

A l'extrémité de ces tambours se trouvent de puissants électro-aimants qui empêchent le glissement de la chaîne. Une machine à vapeur fait tourner les tambours et le remorqueur progresse en prenant ainsi appui sur la chaîne.

* * *

Les ***cabestans électriques*** qui, dans les gares de chemin de fer, servent à la manœuvre des rames de wagons, constituent un mode de traction très spécial, il est vrai, mais dont nous dirons quelques mots, car on peut considérer qu'il rentre dans le cadre de ce chapitre.

En général, on estime que, pour le tirage des wagons, il faut compter sur un effort de traction de 10 à 12 kilogrammes par tonne, en supposant que la manœuvre se fasse sur une voie droite, en palier, avec un bon matériel roulant ; cette estimation est encore valable avec une légère rampe et des courbes de grand diamètre.

Le cabestan dont être protégé absolument contre toute introduction de poussière, d'eau, etc. ; le moteur doit avoir un très fort couple au démarrage et un faible encombrement.

On se sert soit de moteurs à courant continu (type compound), soit de moteurs à courant alternatif (type asynchrone à rotor bobiné avec résistances intercalées dans le rotor). Les vitesses périphériques sont d'environ $1^{m},50$ à vide et $0^{m},60$ en régime normal pour une poupée de 30 centimètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de diamètre ; l'effort au calage est voisin de 1 000 kilogrammes et de 500 kilogrammes en régime normal pour les types ordinaires usuels. La consommation d'électricité est d'environ 6 kilowatts en service normal et peut

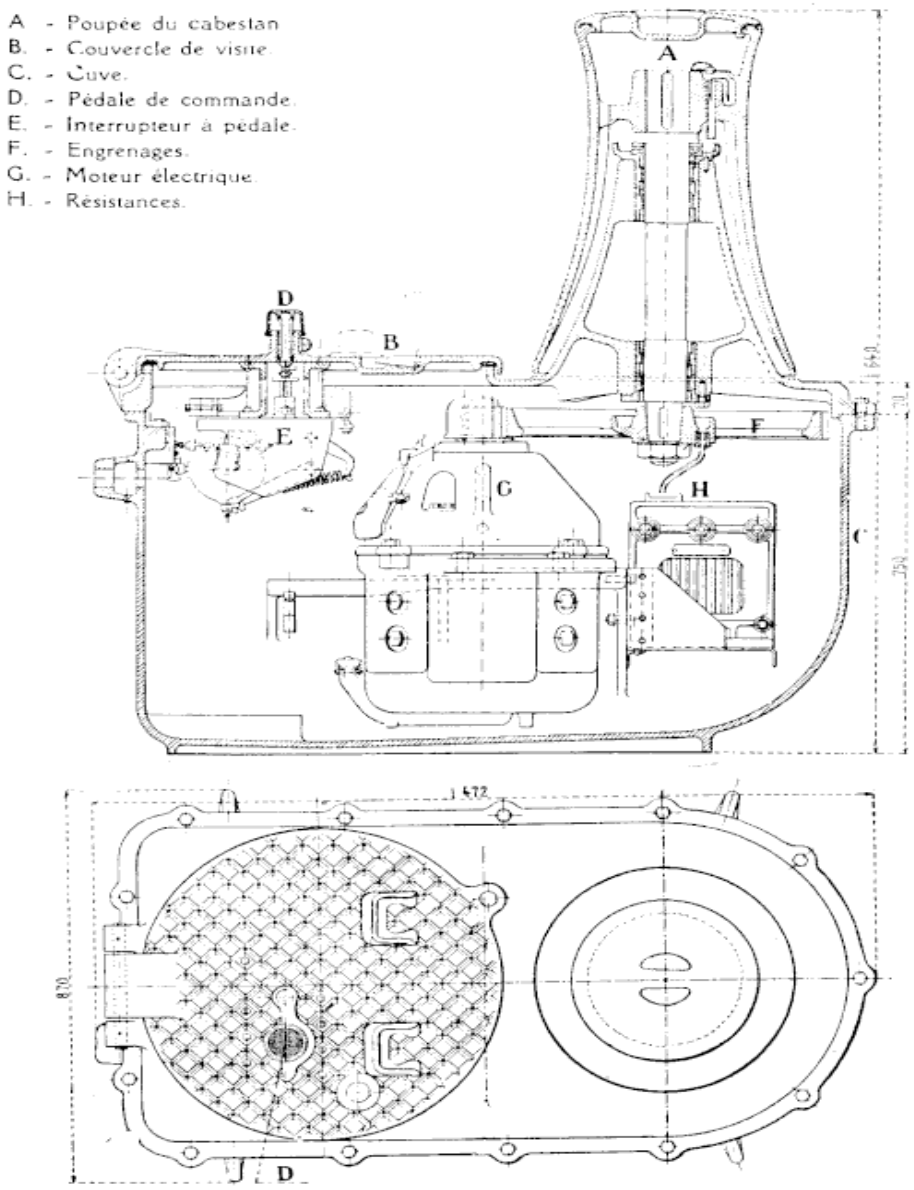


Fig. 615. — Coupe et plan d'un cabestan électrique Thomson-Houston.

s'élever à 15 kilowatts au moment du calage. La figure 615 montre la coupe d'un cabestan électrique Thomson-Houston actionné par un moteur à courant continu et permet de se rendre facilement compte du mode de construction et de fonctionnement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXVI

APPLICATIONS THERMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Divers modes de transformation de l'énergie électrique en chaleur. — Effet Joule. — Diverses compositions des résistances. — Arc électrique. — Divers types de fours électriques. — Effets d'induction. — Applications domestiques. — Fer électrique, réchauds, appareils à ébullition, radiateurs. — Prix de revient du chauffage électrique des appartements, de la cuisine, des bains. — Les appareils à accumulation. — La tarification de l'énergie électrique pour les applications domestiques. — Conditions de réception imposées pour les divers appareils. — Applications dans les laboratoires. — Étuves. — Fours et moufles électriques. — Fours électriques à vide. — Applications industrielles. — Fours à recuire. — Four Gin à résistance. — Construction des appareils à résistance. — Coefficient de profil. — Coefficient de montage. — Exemples. — Les fours à arc. — Fours Stassano, Héroult, Girod, Keller. — Fours pour la fixation de l'azote. — Conditions à remplir. — Fours Kowalski et Moscicky, Paulig, Birkeland et Eyde. — Les fours à induction. — Fours Kjellin, Röchling-Rödenhauser, Gin, Saladin. — Les fours à haute fréquence de North, up. — La soudure électrique par arc. — Caractéristiques pratiques, résultats. — La soudure électrique par résistance, par rapprochement, par points, continue. — Rendement. — Fours à souder électriques.

Les procédés de ***transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique*** sont en très petit nombre : on a recours soit directement à l'effet Joule, ce qui est le cas le plus fréquent, soit aux courants induits de Foucault, soit enfin à l'arc électrique. Dans le premier cas, c'est le passage du courant à travers une résistance qui produit l'échauffement. Il faut que la résistance soit toujours placée très près du corps à chauffer, pour que sa température propre ne soit pas beaucoup plus élevée que celle du corps à chauffer, ceci afin de ménager la durée des appareils.

Lorsque l'on utilise les courants de Foucault, le corps à chauffer peut parfois constituer tout ou partie du circuit résistant. S'il s'agit de l'arc électrique, le corps à chauffer peut, dans certaines conditions, jouer le rôle d'une des électrodes, mais ces cas favorables sont assez rares.

Une des grosses difficultés pratiques provient de la tension assez élevée (110 ou 220 volts) sous laquelle est fournie ordinairement l'énergie électrique, ce qui impose une section assez faible du système chauffant et augmente sa fragilité lorsque l'on cherche à obtenir des températures de 500° et plus. Nous allons passer en revue les différents systèmes de chauffage proposés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Pour la transformation de l'énergie électrique par effet Joule, le véritable problème réside dans la constitution des résistances de chauffage.

Celles-ci peuvent être *non métalliques*, par exemple consister en un fil de charbon analogue à celui des lampes à incandescence, comme dans les lampes de chauffage pour appartements, mais, ici, l'ampoule n'est pas complètement vide et renferme un gaz neutre ou un hydrocarbure qui dérive par convection une partie de la chaleur dégagée et diminue d'autant l'éclat lumineux de la résistance. L'ampoule est de plus fortement dépolie pour augmenter le pouvoir émissif de l'appareil.

On peut également employer le charbon sous forme de cylindres ou de plaques sans enveloppe protectrice, s'il s'agit de dégager la chaleur dans un milieu réducteur ou inerte (certaines industries chimiques), ou lorsque le charbon est un des éléments de la réaction (fabrication du sulfure de carbone, cémentation du fer, etc.); on peut également l'utiliser dans d'autres cas en le recouvrant d'une couche épaisse d'un produit réfractaire ou même de charbon en poudre qui évite l'oxydation de l'âme centrale conductrice.

Mais ce sont surtout les *métaux* ou leurs *alliages* auxquels on a recours dans la plupart des applications courantes. Les métaux purs ont l'inconvénient d'augmenter considérablement de résistance avec la température. Les plus couramment utilisés sont le platine, le fer et le nickel. Le platine a un prix tel qu'il est réservé pour les appareils de laboratoire, et il a de plus le défaut de se laisser trop facilement attaquer par les produits siliceux dont on se sert presque toujours pour les supports; le fer s'oxyde; quant au nickel, son coefficient de température est trop élevé (sa résistance à 100° dépasse de 60 p. 100 celle qui correspond à 0°).

Aussi s'adresse-t-on aux alliages, dont l'emploi présente moins de difficultés en raison de leur plus grande résistivité et de la faible valeur de leur coefficient de température. Mais ils supportent des températures moins élevées que les métaux purs, par suite de leur composition hétérogène. Sous l'influence de la chaleur, leur structure interne se modifie, il peut se produire des cristallisations locales; enfin, certains constituants, les plus volatils, distillent peu à peu, laissant la masse poreuse : dans tous les cas, il en résulte finalement la rupture de la résistance. Certains alliages ferro-nickels, en particulier ceux préparés par la Société des aciéries d'Imphy et baptisés R. N. C., peuvent supporter, suivant leur numéro d'ordre, des températures de régime allant jusqu'à 1 200° en service nor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mal ; des alliages moins bien étudiés, au contraire, au bout de quelques heures de fonctionnement à cette température, sont mis hors d'usage.

Les résistances métalliques sont employées soit à l'air libre, si la température n'est pas trop élevée, soit à l'intérieur d'appareils aussi clos que possible pour éviter l'oxydation trop rapide, soit enrobées dans une couche d'émail protecteur.

On utilise également des agglomérés de poudre conductrice et de poudre isolante, le but que l'on cherche à atteindre étant de diminuer la conductibilité de la matière conductrice par dilution dans une masse isolante. C'est ce qui est réalisé dans les résistances « métallo-céramiques ».

Ces résistances sont constituées par des poudres de métaux (fer, nickel, chrome, etc.) et d'argiles réfractaires agglomérées sous forte pression et cuites à une température très élevée (1 200° à 1 500°) (Pouvillé). On peut ainsi absorber des puissances élevées sous un faible volume. Dans d'autres systèmes (Heræus), on imprègne des baguettes poreuses, constituées par des mélanges de silicates, avec des solutions de sels de métaux de la mine du platine, avec du chlorure d'ammonium ou d'autres sels ammoniacaux. En réduisant ces sels par la chaleur, le métal est libéré et tapisse l'intérieur des cavités du support qui est ainsi rendu conducteur. Enfin, certains constructeurs compriment des poudres formées de mélange de grains de charbon de différentes grosseurs, de silicates, de graphites, etc., et obtiennent ainsi ce que l'on appelle des « cartouches de chauffage ».

On voit donc que les solutions que l'on peut envisager sont très variées ; les conditions auxquelles il faut satisfaire sont nombreuses : inoxydabilité de la résistance ; résistance spécifique suffisamment grande pour ne pas nécessiter une trop grande longueur ou une trop faible section, ce qui rendrait les appareils encombrants ou peu puissants ; résistance mécanique à chaud élevée ; constance de la structure physique et chimique sous l'influence de la chaleur, etc. Ajoutons qu'elles ne sont qu'approximativement remplies par les différents systèmes de résistances actuelles

* * *

Le ***chauffage électrique par arc*** n'est guère employé que dans l'industrie, et même la grosse industrie métallurgique, si on en excepte quelques applications mécaniques telles que la soudure électrique, la soudure autogène électrique, etc. Dans les fours électriques à arc, le courant est consommé soit pour produire de la chaleur purement et simplement, soit au contraire pour provoquer en même temps une action électrolytique. Nous traiterons ce dernier cas dans le chapitre sur l'électro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métallurgie ; nous ne donnerons ici que le principe des divers fours à arc. L'arc peut jaillir entre deux électrodes au-dessus de la matière à chauffer ou entre deux séries d'électrodes en parallèle (fig. 616, 1) (exemple : four Stassano), ou entre une électrode et la matière fondue (fig. 616, 2) (type : four Girod), ou enfin entre deux électrodes assez éloignées l'une de l'autre (fig. 616, 3) (type : four Héroult). Ces fours ne conviennent pas pour la réduction des minerais ; ils sont, au contraire, très pratiques pour l'affinage d'un bain métallique, la masse fondue étant facilement accessible.

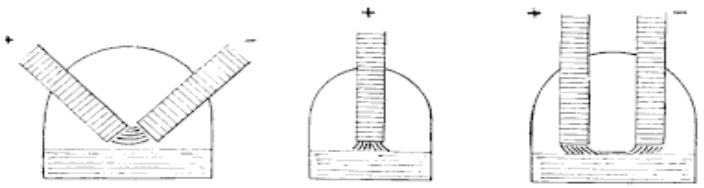


Fig. 616. — Divers types de fours électriques.

* * *

Il en est de même pour les fours ***à induction*** utilisant les courants de Foucault développés dans la masse conductrice à chauffer. Ce sont au fond des transformateurs dont le primaire est alimenté par de la haute tension et dont le secondaire, qui ne comporte qu'une spire, est formé par le métal même contenu dans le creuset qui a la forme d'un canal circulaire creusé dans un bloc de matière réfractaire. Le secondaire, constamment fermé sur lui-même, est traversé par un courant très intense (exemple : four Kjellin, four Röchling-Rodenhauser).

Ce mode de chauffage nécessite l'emploi du courant alternatif, et les appareils doivent avoir un certain volume, ce qui fait qu'il a surtout été appliqué dans les appareils industriels ou de laboratoires importants.

* * *

Nous venons de caractériser rapidement les principaux modes de transformation pratique de l'énergie électrique en énergie calorifique. Il nous reste à décrire les ***appareils*** proposés pour chaque application. Nous passerons successivement en revue les applications domestiques, les applications de laboratoire et enfin les applications industrielles.

Les ***applications domestiques*** de l'électricité sont innombrables et tendent de plus en plus à se généraliser, tout au moins celles dans lesquelles la consommation d'énergie de l'appareil ne dépasse pas 200 à 300 watts, ce qui permet de brancher directement les appareils sur les canalisations existant déjà pour l'éclairage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le ***fer électrique*** semble avoir le plus de faveur parmi tous les appareils électriques. Il est toujours constitué, comme l'indique la figure 617, par une masse de fonte servant à lui donner du poids et en même temps jouant le rôle de volant de chaleur, chauffée par une résistance extra-plate, le tout enfermé dans l'enveloppe extérieure nickelée. La résistance est constituée par un ruban de ferro-nickel enroulé sur une lame de mica dentelée sur les bords et ayant la forme du fer. Deux autres lames minces de mica fixées par des agrafes recouvrent la résistance et l'isolent de la plaque de fonte et de l'enveloppe extérieure. La consommation d'électricité est comprise entre 200 et 300 watts pour un fer de dimensions moyennes (pesant 1kg,5).

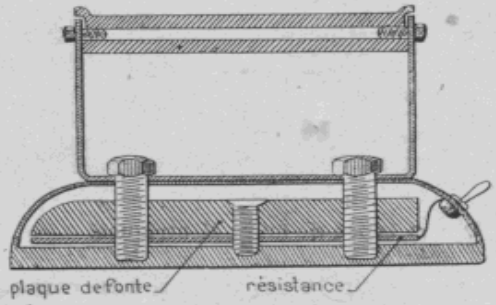
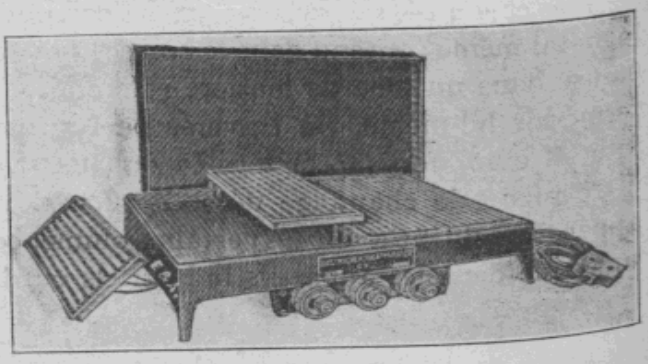


Fig. 617. — Fer à repasser électrique.

Les ***réchauds***, chauffe-plats, chauffe-fer à friser, théières, cafetières, bouilloires, etc., sont constitués d'une façon analogue, la résistance étant soit unique, soit formée de plusieurs tronçons qui peuvent être accouplés de manière à donner plusieurs allures de chauffe (fig. 618). La figure 619 montre schématiquement comment peut s'effectuer le changement de régime à l'aide d'une fiche à trois prises.


Fig. 618. — Plaque chauffante ordinaire.

Le système de fils comprend d'abord un circuit commençant en *a* et finissant en *b*, et ensuite un autre circuit formé de deux fils en parallèle commençant en *c* et finissant en *d*. Si on place la fiche triple dans la position 1, le courant parcourt un seul circuit *ab*, et l'échauffement est faible; dans la position 2, le courant parcourt deux circuits *bc*, et l'échauffement est moyen; enfin, dans la position 3, le courant passe dans toutes les résistances, et par suite on réalise l'allure maxima.

Pour les ***appareils à ébullition*** de l'eau, on peut admettre les consommations suivantes, qui varient suivant les dimensions des appareils :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Contenance.	*Temps d'ébullition.*	*Intensité sous la tension de 110 volts.*
25 centilitres.	10 minutes.	1,5 ampère.
50 —	15 —	2,5 ampères.
1 litre.	15 —	5 —

D'une façon approximative, on peut dire qu'un courant de 1 ampère sous 110 volts porte un litre d'eau à l'ébullition en une heure.

Les résistances formant les éléments chauffants de ces appareils sont

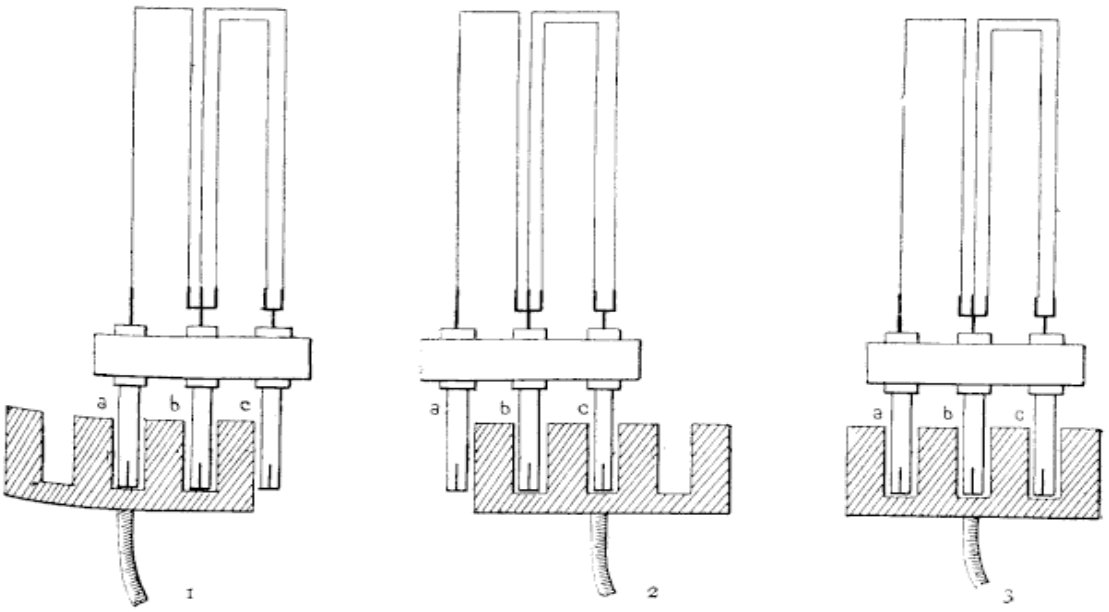


Fig. 619. — Schéma d'une prise à trois allures de chauffe.

construites soit comme celles des fers électriques décrits plus haut, soit en fils enroulés en spirale et tendus sur des supports isolants en matière réfractaire. En effet, lorsque l'on veut non plus seulement chauffer vers 100°, mais obtenir une température suffisante pour préparer des grillades, par exemple, il faut que les éléments résistants soient portés au rouge sombre et, dans ces conditions, le simple isolement au mica ne serait plus efficace. De plus, on supprime la masse métallique formant accumulateur calorifique, ou on l'éloigne de la résistance.

Il nous a semblé inutile d'entrer dans de plus longues explications au sujet de tous ces appareils très répandus à l'heure actuelle et dont les multiples réalisations ne diffèrent suivant les constructeurs que par des détails secondaires... et la forme extérieure.

Les ***radiateurs électriques*** méritent quelques développements. Ils peuvent être soit constitués par de grosses lampes chauffantes à fila-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment de charbon (fig. 620), soit par des résistances disposées dans une enveloppe métallique ajourée pour laisser circuler l'air (radiateurs obscurs), soit enfin par un corps de chauffe incandescent et visible placé au foyer d'un réflecteur dont la surface revêt la forme d'un paraboloïde de façon à diriger le faisceau calorifique par réflexion dans une direction bien déterminée (fig. 621). La dernière modification de ces radiateurs paraboliques

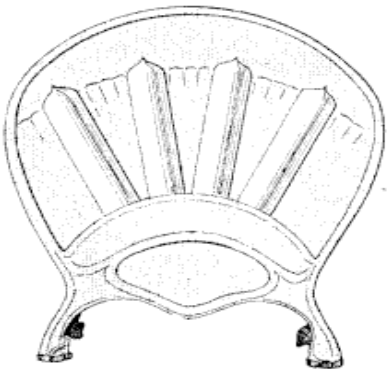


Fig. 620. — Radiateur lumineux.

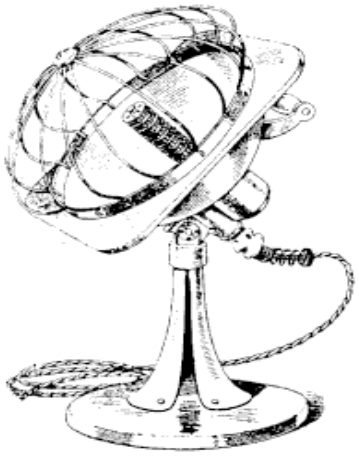


Fig. 621. — Radiateur parabolique.

a été le remplacement des éléments chauffants incandescents visibles par des résistances disposées à l'intérieur d'une cavité métallique et agissant surtout par *convection*, tandis que dans les modèles primitifs c'était la *radiation* qui intervenait. L'enveloppe de la résistance, qui n'est plus portée à l'incandescence, est soit en tôle, soit en aluminium, ajouré ou non. Grâce à elle, l'oxydation des éléments chauffants, à l'abri de l'air libre, est très réduite et leur cristallisation résultant d'un brusque refroidissement est évitée, puisque la température de l'élément ne diminue que lentement après la rupture du courant.

* * *

Un facteur très important à considérer est le ***prix de revient*** des diverses opérations de chauffage que l'on cherche à réaliser électriquement. Disons-le tout de suite : la comparaison avec les autres procédés de chauffage est désastreuse pour l'électricité, et ce n'est que dans des cas très particuliers, dont nous citerons quelques exemples, qu'elle peut se justifier.

Tout d'abord, considérons le ***chauffage des appartements***. Il correspond, dans nos climats tempérés, à une puissance comprise entre 2 et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3 watts par mètre cube et par degré de différence de température à maintenir avec l'extérieur.

Si nous prenons une pièce de 4 mètres sur 5 mètres et 3 mètres de haut (60 mètres cubes), lorsque la température extérieure sera 0° et que l'on voudra élever par chauffage électrique la température intérieure à 18°, il faudra consommer une puissance de 2,16 à 3,5 kilowatts. Remarquons d'ailleurs qu'il n'y a aucune amélioration à espérer au point de vue du rendement, qui est intégral, puisque toute l'énergie électrique consommée dans l'appareil est transformée en chaleur.

Les divers appareils ne peuvent que différer par la capacité calorifique du corps de chauffage, leur forme extérieure et la ventilation des radiations. Dans tous les cas, quand le régime est atteint, un hectowatt-heure dégagera 86,3 calories.

Aussi, le chauffage électrique permanent des appartements est-il ruineux, mais il ne laisse pas toutefois d'être intéressant dans certains cas particuliers : lorsqu'il s'agit, par exemple, de chauffer une chambre à coucher pendant un temps assez court, soit au moment du lever, soit à celui du coucher ; pour le médecin dans son cabinet de consultation, lorsque les malades se déshabillent pour l'auscultation et l'examen, le radiateur électrique, surtout à faisceau dirigé (radiateur parabolique), est extrêmement utile ; pour le cabinet de toilette, parce qu'il n'a besoin d'être chauffé que pendant peu de temps, le chauffage électrique convient bien, surtout qu'en général cette pièce est de petites dimensions, dépourvue de cheminée et que le chauffage ordinaire y est presque impossible.

La ***cuisine électrique*** est aussi une grosse consommatrice d'électricité, et par cela même d'un prix de revient prohibitif. Le moindre four, servant à la cuisson d'un poulet ou d'un rôti d'un kilogramme, consomme déjà 1 kilowatt. On admet normalement une dépense de 4 à 5 hectowatts-heure par kilogramme de viande à rôtir. Aussi les applications ne pourront-elles guère se développer en France, tout au moins dans les régions qui ne disposent pas de l'électricité à un très bas prix.

D'autre part, la dépense d'énergie n'est pas le seul facteur à considérer ; il y a également le genre de cuisine. La cuisine allemande ou américaine comprend beaucoup moins de rôtis et de roux que la cuisine française. Les appareils doivent alors servir principalement à la cuisine à l'étuve, à la confection de viandes bouillies (irish stew, Boston beans, pies, puddings, etc.). Par conséquent, la température à atteindre est moins élevée et les résistances de chauffage durent plus longtemps. Les grils, rôtissoires, fours que réclame la cuisine française consomment beaucoup plus et sont plus fragiles. C'est d'ailleurs pour la même raison que les récipients en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

verre pour la cuisson des aliments, qui ont assez de faveur en Amérique et en Allemagne, ne pourront jamais trouver qu'un débouché limité en France.

Le ***chauffe-bain électrique*** est également extrêmement coûteux. Un simple calcul permet de s'en rendre compte immédiatement : une grande calorie équivaut à 1,16 watt-heure. Par suite, pour élever 150 litres d'eau (bain moyen) de 10° à 40°, il faut dépasser *théoriquement* 52 kilowatts. Pratiquement, il faut pouvoir disposer, dans les meilleures conditions, pour avoir un bain en une demi-heure, d'une puissance de 12 à 15 kilowatts. On construit actuellement des appareils qui, en absorbant 1 kilowatt, élèvent en sept ou huit heures la température de 100 litres d'eau de 10° à 90°. D'autres, qui absorbent seulement 300 watts, pendant le même temps portent 30 litres d'eau à 75°. Ces deux exemples montrent bien que les chauffe-bains électriques ne sont pas près de remplacer les autres appareils actuels. Ils sont cependant intéressants à un autre point de vue, car ils reposent sur un principe tout différent de celui des appareils de chauffage que nous avons décrits jusqu'à présent et que l'on peut appeler appareils à chauffage *instantané* ; c'est de réaliser la chauffe par *accumulation* des calories nécessaires pendant une longue période antérieure à celle d'emploi.

A ceci, deux avantages immédiats : d'abord, mise en jeu d'une puissance instantanée beaucoup plus faible, ce qui ne rend pas nécessaire l'installation de canalisations spéciales, et ensuite, possibilité d'obtenir des secteurs de meilleures conditions, en consommant le courant en dehors des heures de « pointe », la nuit par exemple.

* * *

Les appareils de ***chauffage par accumulation*** commencent seulement à se répandre en France, car il faut faire comprendre tout d'abord leur avantage au consommateur. En Suisse, le chauffage direct avait pris un tel développement que les producteurs d'énergie électrique s'émurent de l'augmentation de la consommation de courant qu'il entraînait aux heures de la journée où se produisait, en même temps, la consommation pour l'industrie et l'éclairage, d'où nécessité d'augmenter encore la puissance des usines, cette puissance restant, en grande partie, inutilisée pendant le reste de la journée et pendant tout l'été. Cette situation a amené, dans certains cantons, la prohibition du chauffage direct. Seul le chauffage par accumulation de chaleur y reste pratiqué, ce qui a eu pour résultat de permettre de réaliser, dans une ville suisse, une courbe de consommation journalière sans pointe notable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le principe des appareils est très simple : ils emmagasinent dans des matières réfractaires la chaleur dégagée par une résistance électrique chauffée par le passage du courant. La charge de l'appareil a lieu pendant la nuit. Dans le cas d'un calorifère de ce type, il suffit, le jour venu, d'ouvrir l'appareil au passage d'un courant d'air qui s'échauffe et se répand dans les pièces. Les progrès réalisés par les constructeurs permettent, avec des appareils mettant en œuvre une puissance de 2 kilowatts au maximum, de chauffer une salle de 60 mètres cubes.

C'est surtout pour le *chauffage de l'eau* qu'il semble que l'accumulation puisse rendre le plus de services. Nous avons vu plus haut que le chauffe-bain

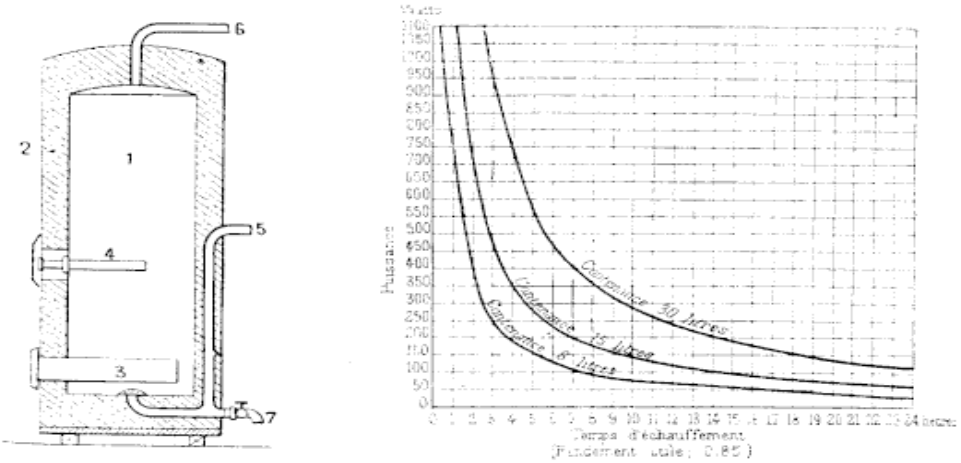


Fig. 622. — Chauffe-eau à accumulation.

instantané est pratiquement irréalisable. L'accumulation, au contraire, fournit une autre solution très intéressante du problème.

Supposons que nous veuillons porter 10 litres d'eau de 13°,5 à 100° C. ; il faut fournir à cette masse 865 calories, quantité d'énergie représentée par un kilowatt-heure. Or, ce kilowatt-heure peut être fourni de différentes façons : soit en maintenant une puissance d'un kilowatt pendant une heure, soit de 200 watts pendant cinq heures, soit encore de 100 watts pendant dix heures. Dans le premier cas, il faudra que nous disposions d'un compteur de 10 ampères, c'est-à-dire d'une puissance inusitée dans l'habitation ; dans les deux autres cas, le compteur habituel de 3 ou 5 ampères sera, au contraire, amplement suffisant.

Naturellement, il faut que le récipient contenant l'eau soit soigneusement calorifugé. Parmi les types les plus pratiques, il faut citer les appareils dont la capacité varie de 5 à 50 litres (fig. 622). Ils sont d'un faible encombrement et peuvent être fixés aux murs. La durée de chauffage

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut varier de six à vingt-quatre heures. Lorsque la durée de chauffage est de six heures, les appareils sont dits « à chauffage accéléré ». Ils permettent alors d'obtenir une très grande quantité d'eau avec un réservoir de faible capacité, puisqu'ils peuvent donner, dans la journée, trois à quatre fois la valeur de leur contenu. Ainsi, un réservoir de 15 litres pourra donner, dans les vingt-quatre heures, 45 litres d'eau à 90°, par exemple : 15 litres à 8 heures du matin ; 15 litres à 14 heures et 15 litres à 20 heures.

Mais ces appareils, étant d'une consommation irrégulière, ne peuvent bénéficier d'une tarification spéciale.

Au contraire, lorsque l'appareil est construit de façon à porter à 97° son contenu d'eau en vingt-quatre heures seulement, la consommation devient insignifiante et n'apporte aucun trouble dans l'installation électrique. De plus, restant sous tension d'une façon continue, ils peuvent bénéficier d'un tarif de faveur.

Ajoutons qu'il n'y a pas intérêt à porter l'eau à une température trop élevée, car on augmente alors considérablement les pertes par rayonnement de l'appareil ; une température de 45° est très suffisante dans la plupart des cas.

* * *

Le problème de l'emploi de l'électricité pour les grosses applications domestiques (chauffage, cuisine, bains, etc.) est donc surtout une question de ***tarification de l'énergie électrique***, et il ne semble pas que l'on soit encore arrivé à une solution satisfaisante, si l'on considère la diversité de celles proposées.

A Paris, pour faciliter le développement des applications domestiques de l'électricité autres que l'éclairage, on a mis en vigueur un tarif dégressif, qui évite les frais d'établissement d'un circuit et d'un compteur spéciaux pour les appareils.

A Lyon, le principe est différent : c'est la période de la journée pendant laquelle on consomme le courant qui détermine le tarif. Si le courant est en permanence à la disposition des abonnés, ceux-ci payent le tarif plein ; s'ils chauffent leur habitation avec interruption aux heures de pointe (le courant étant coupé automatiquement), ils bénéficient d'un tarif très réduit ; enfin, si le chauffage est interrompu de 5 heures à 20 heures (c'est-à-dire utilisation de nuit, chauffage par accumulation), le courant étant coupé automatiquement, le tarif est encore plus réduit.

A Strasbourg, où des compteurs à double tarif sont en service, le système est un peu plus compliqué, mais distingue, comme à Lyon, les cas

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

où les appareils fonctionnent d'une façon continue, ou avec interruption aux pointes, ou uniquement pendant la nuit.

Enfin, signalons la solution de M. Allain-Launay, qui permet, grâce à un système de commande à distance électromagnétique très ingénieuse, d'enclencher directement de l'usine, à des heures déterminées, le mécanisme change-tarif contenu dans le compteur.

* * *

Pour les « ***petits serviteurs de la maison*** », plaques chauffantes, étuves, toasters, bains-marie, bouillottes, aspirateurs électriques, fers à repasser, à friser, tissus et tapis chauffants, ventilateurs, séchoirs, cafetières, etc., le problème est tout autre. Ici, la consommation du courant n'est plus le facteur principal, car tous ces appareils n'ont qu'une très faible consommation et ne fonctionnent que peu d'heures par jour. Ils sont des auxiliaires infiniment précieux, et il est étrange que leur emploi ne se développe pas plus vite en France. En Amérique, leur nombre est considérable, ainsi que le montrent les quelques chiffres suivants :

A Chicago, dont la population est de 2 700 000 habitants, au nombre desquels on compte 743 000 abonnés de l'électricité, les appareils électriques d'usage domestique (désignés sous le nom très justifié de « petits serviteurs de la maison ») qui ont été vendus, de 1917 à 1921, par la Commonwealth Edison Cy, s'élevait au chiffre de 250 000. Ce total imposant comporte plus de 125 000 fers à repasser et plus de 30 000 appareils de nettoyage par le vide.

Un pareil développement n'est pas spécial à la ville de Chicago, et dans nombre de cités américaines importantes, il est fréquent de compter dix appareils électriques différents par foyer.

Dans la région parisienne, un relevé récent montre que, sur 100 abonnés, deux possèdent un fer à repasser, deux une bouillotte, et, sur 1 000 abonnés visités, il n'y en a que trois possédant un aspirateur de poussières. L'hésitation vient très souvent de la difficulté de choisir entre des appareils de type et de prix très différents. Souvent aussi, des appareils bon marché donnent des mécomptes, sont rapidement mis hors d'usage, ou ne donnent pas les résultats espérés. Afin de permettre au lecteur d'apprécier la valeur des appareils qu'on peut lui proposer, nous donnons ci-dessous quelques-unes des conditions auxquelles ils doivent satisfaire suivant leur destination.

Ces conditions sont celles imposées par les laboratoires de la « Société pour le développement des applications de l'électricité » aux appareils sur lesquels elle appose, après essai, sa marque de garantie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fer à repasser. — La poignée doit rester suffisamment froide ; sa partie inférieure, au moment où la semelle atteint 250°, ne doit pas dépasser 50°.

Le fil chauffant devra être enroulé sur mica et l'isolement sera fait au mica.

La durée d'échauffement d'un fer, c'est-à-dire le temps nécessaire pour porter la semelle du fer de la température ambiante, 15°, à la température de repassage, soit 250°, devra être au plus égale à douze minutes ; à cet instant, la température de la pointe devra être au moins égale à celle de la semelle et, si possible, la dépasser d'environ 20° ; cette température sera mesurée au moyen d'un couple thermo-électrique ; la partie de la semelle où se fera la prise de température sera située sur l'axe du fer, à égale distance du nez et de l'arrière. La température de la pointe sera prise sur l'axe du fer, à un centimètre de l'extrémité.

L'essai sera fait avec le fer suspendu dans une position normale.

Le fer, ayant été préalablement porté à la température de 250°, sera placé sur le calorimètre à circulation d'eau, laissé sous tension et simultanément refroidi pendant une minute, au moyen d'un courant d'eau à la température ambiante représentant un débit à l'heure de :

10	litres	pour	un fer	d'un poids inférieur à 1 kilogramme.
25	—	—	—	compris entre 1 et 2 kilogrammes.
50	—	—	—	supérieur à 2 kilogrammes.

On mesurera ensuite le temps nécessaire pour que la semelle soit à nouveau portée à 250° ; ce temps ne doit pas être supérieur à huit minutes.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 800°.

Le fer sera soumis pendant deux cents heures au régime alterné suivant :

Mise sous tension d'une durée de dix minutes suivie d'une interruption de trente minutes.

L'appareil, après cette épreuve, doit encore satisfaire aux conditions précédemment indiquées.

Chauffe-plats, tables chauffantes. — L'appareil sera muni de pieds d'isolement calorifiques, tels que la température de la partie de l'appareil qui, en fonctionnement normal, est en contact avec la table ne dépasse pas 50°.

Au bout de dix minutes de mise sous tension, la partie utile de l'appareil doit être portée à une température minimum de 90°.

La température maxima limite de la partie utile de chauffe sera de 140°, afin d'éviter toute oxydation ou brunissage de l'appareil.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 500°.

Les plaques seront soumises pendant deux cents heures au régime alterné suivant :

Mise sous tension d'une durée de dix minutes suivie d'une interruption de trente minutes.

L'appareil, après cette épreuve, doit encore satisfaire aux conditions précédemment indiquées.

Radiateurs obscurs. — L'appareil ne devra comporter aucune partie combustible. Il sera muni de pieds d'isolement calorifique de façon que la partie de l'appareil qui, en fonctionnement normal, est en contact immédiat avec le parquet ne dépasse pas 50°. S'il est garni de poignées, celles-ci doivent, en tout temps, être froides à la main. La température des parties accessibles à la main ne devra pas dépasser 100° dans une ambiance à 15°.

Les appareils d'une puissance supérieure à 1 000 watts devront avoir deux ou plusieurs allures de chauffe. Les circuits d'une puissance de plus de 550 watts doivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être commandés par un interrupteur ou commutateur à enclenchement et rupture brusques.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 800°, mais la température de la paroi qui cède de la chaleur à l'air ne doit pas dépasser 350°.

Le radiateur sera soumis pendant deux cents heures au régime alterné suivant :

Mise sous tension d'une durée de cinq minutes suivie d'une interruption de dix minutes.

L'appareil, après cette épreuve, doit encore satisfaire aux conditions précédemment indiquées.

Radiateurs paraboliques. — La calotte devra être polie très soigneusement afin d'avoir un très grand pouvoir réflecteur ; elle doit être montée sur rotule ou genou pour permettre d'orienter l'axe de l'appareil suivant n'importe quelle direction.

L'appareil devra être muni d'une poignée à la partie supérieure.

Le radiateur étant à sa température de régime, sa puissance d'échauffement sera déterminée au moyen d'un thermomètre à mercure, fixé sur une planchette, dont le réservoir noirci sera disposé perpendiculairement à l'axe du paraboloïde et à une distance de 1 mètre du corps de chauffe. Le thermomètre devra accuser, dix minutes après avoir été mis en place, par centaine de watts consommés, une élévation de température de 3° sur la température ambiante amenée à 15°. Au bout de ces dix mêmes minutes, l'élévation de température constatée devra être pour tous les appareils de 10° au minimum.

L'indice de rendement sera déterminé de la façon suivante :

L'appareil étant à sa température de régime, une toile mouillée, formant un carré de 65 centimètres de côté, sera pesée, puis disposée perpendiculairement à l'axe à $0^m,60$ de l'extrémité du corps de chauffe, l'axe de l'appareil passant par le centre de la toile. Au bout de dix minutes, cette toile sera à nouveau pesée pour relever le poids d'eau évaporée.

L'indice de rendement sera donné par le rapport suivant :

$$\frac{\text{Calories absorbées par l'eau évaporée}}{\text{Calories correspondant à l'énergie fournie}}.$$

Ce nombre ne devra pas être inférieur à 0,25.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 1 000°. La méthode pour la détermination de cette température sera spécifiée dans une annexe au présent règlement.

Le radiateur sera soumis pendant deux cents heures au régime alterné suivant :

Mise sous tension d'une durée de cinq minutes suivie d'une interruption de dix minutes.

L'appareil, après cette épreuve, doit encore satisfaire aux conditions précédemment indiquées.

Réchauds à cuire et fourneaux électriques. — L'appareil sera muni de pieds d'isolement calorifique tels que la température limite à laquelle est portée la partie de l'appareil qui, en fonctionnement normal, est en contact avec la table ne dépasse pas 50°.

Les appareils d'une puissance supérieure à 550 watts doivent posséder deux ou plusieurs allures de chauffe. Ils seront de préférence munis d'un commutateur à indications ; une des directions du commutateur doit permettre de couper le courant. Les circuits d'une puissance supérieure à 550 watts seront commandés par un interrupteur à enclenchement et rupture brusques.

Le rendement utile sera déterminé de la façon suivante :

Premier essai. — *Appareil à froid.* — L'appareil étant à la température extérieure

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 15°, une casserole en aluminium poli, d'un diamètre sensiblement égal à celui de la partie utile de l'appareil, d'une hauteur de 6 centimètres et contenant une hauteur de 5 centimètres d'eau, munie d'un couvercle, sera posée sur l'appareil.

On mettra l'appareil sous tension jusqu'à ce que l'eau soit portée à une température de 96°. Le courant étant interrompu, on notera l'élévation de température de l'eau, l'énergie fournie sera mesurée par un compteur.

Le rendement utile sera donné par le rapport suivant :

$$\frac{\text{Calories absorbées par l'eau}}{\text{Calories correspondant à l'énergie fournie}}.$$

Deuxième essai. — Appareil en régime. — On procédera à cet essai en suivant le processus précédent, mais on partira de l'appareil en régime de marche.

Le rendement utile sera donné en prenant la moyenne arithmétique des deux indices précédents.

La valeur obtenue ne doit pas être inférieure à 0.45.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 800°.

Les appareils fonctionnant sous 220 volts doivent avoir un corps de chauffe constitué par deux éléments chauffants superposés.

L'essai de durée sera fait pendant deux cents heures au régime alterné suivant : mise sous tension d'une durée de quinze minutes suivie d'une interruption de trente minutes.

Durant cet essai, il sera projeté de temps en temps de l'eau sur l'appareil.

L'appareil, après cette épreuve, doit encore satisfaire aux conditions précédemment indiquées. De plus, pour les appareils à feu nu, il sera fait une mesure de puissance afin de déceler si les spires ne sont pas venues en court-circuit. Aucune augmentation de puissance instantanée ne sera tolérée.

Tissus chauffants. — L'élément chauffant devra être constitué par des fils auto-régulateurs ; l'appareil pourra être muni d'un dispositif complémentaire, régulateur de température, coupant le courant lorsque la température du tissu dépasse une valeur fixée.

L'appareil étant posé à plat sur une table, la température ambiante étant de 15°, on posera un thermomètre sur le dessus du tissu ; le réservoir du thermomètre étant protégé contre le refroidissement extérieur par un tampon de ouate de 4 centimètres carrés, la température limite indiquée par ce thermomètre devra être inférieure à 70° en n'importe quel point du tissu.

La puissance absorbée doit être inférieure à 7 watts par décimètre carré de surface.

Le tissu sera placé pendant quinze minutes dans une étuve à 80° à atmosphère de vapeur saturée. Après ce temps, le tissu sera posé à plat successivement sur ses deux faces, sur une plaque métallique ; l'isolement entre la partie sous tension et la plaque métallique devra être d'au moins 50 000 ohms.

Stérilisation à air sec pour instruments de chirurgie. — Lorsque la boîte est vide, l'appareil doit pouvoir atteindre en vingt-cinq minutes la température de 150°. La température limite à l'intérieur du stérilisateur ne doit en aucun cas dépasser 180°.

L'élément chauffant sera disposé de telle sorte que la paroi intérieure de l'appareil fermant la chambre de chauffe ne puisse prendre une température qui détruirait le poli de cette paroi, ou la brunirait. De plus, cette chambre de chauffe devra pouvoir s'ouvrir facilement pour permettre le remplacement aisé de l'élément chauffant.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une tem-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pérature supérieure à 400°. La méthode pour la détermination de cette température sera spécifiée dans une annexe au présent règlement.

Fer à souder à résistance. — La durée d'échauffement du fer, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le fer atteigne la température de travail, sera déterminée de la façon suivante :

Une goutte d'étain ayant été placée sur la partie utile de la panne (tranche), l'appareil sera mis sous tension : on notera le temps qui s'écoule entre la mise sous tension et la fusion de la goutte d'étain.

Cette durée ne devra pas être supérieure à huit minutes.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 1 000°.

L'appareil sera soumis pendant deux cents heures au régime alterné suivant :

Mise sous tension d'une durée de dix minutes suivie d'une interruption de vingt minutes.

L'appareil, après cette épreuve, doit encore satisfaire aux conditions précédemment indiquées.

Fours de cuisine. — La température des parois extérieures ne devra pas être supérieure à 70°. L'appareil devra être muni de pieds d'isolement calorifique tels que la température limite à laquelle est portée la partie de l'appareil qui, en fonctionnement normal, est en contact avec la table ne dépasse pas 50°.

La projection de liquide ou la chute d'un objet quelconque sur la plaque chauffante ou sur le corps de chauffe de la sole ne doit pas mettre l'appareil à la terre ; de plus, la sole ne doit pas être à feu nu.

L'appareil doit posséder deux ou plusieurs allures de chauffe. Les circuits d'une puissance supérieure à 500 watts seront commandés par un interrupteur ou un commutateur à enclenchement et rupture brusques. Cet interrupteur ou commutateur doit être cuirassé de façon que toutes les parties fragiles soient protégées efficacement contre tout choc.

Le four à vide devra pouvoir atteindre une température de 250° au bout de trente minutes. (La température sera mesurée au moyen d'un couple-thermo-électrique.)

Isolement calorifique. — Le four sera mis sous tension jusqu'à ce que sa température atteigne 200° ; cette température sera mesurée à l'aide d'un couple thermo-électrique dont l'une des soudures sera au centre du four. L'appareil sera ensuite abandonné au refroidissement ; lorsque la température ne sera plus que de 150°, on introduira une masse d'eau à 95° égale au dixième du volume intérieur du four. Le récipient employé ne devra avoir qu'une contenance légèrement supérieure à la masse d'eau introduite ; il sera posé sur un trépied en fil de fer de manière à laisser un intervalle de 2 centimètres entre le fond du récipient et la sole du four. La température de l'eau sera relevée au moment de l'introduction du récipient et une heure après. La chute de température observée ne devra pas dépasser 30°.

La densité de courant admise devra être telle que le fil ne soit pas porté à une température supérieure à 800°.

* * *

Dans les ***laboratoires***, l'électricité a rendu de grands services et, dans certains cas, ne peut être concurrencée par le gaz, tant au point de vue de la sécurité qu'à celui de la régularité et de la commodité d'emploi.

Quoique l'électricité puisse être appliquée à tous les appareils chauffés habituellement par le gaz, il est préférable, au point de vue du rendement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de la régularité de fonctionnement, de construire spécialement les appareils en vue du chauffage électrique.

Pour les étuves et les fours, la construction exige une double enveloppe dans laquelle est logée la résistance de chauffage appliquée directement contre la paroi intérieure et distribuée régulièrement sur elle. On assure ainsi une bonne répartition de la chaleur, ce qui permet, dans la plupart des cas, de supprimer les enveloppes liquides formant bain-marie qui ont justement pour but, dans les appareils chauffés au gaz, de répartir uniformément l'apport de chaleur qui n'a lieu que par une surface très réduite.

Les ***étuves*** de laboratoire se prêtent particulièrement bien au chauffage électrique ; avec plusieurs allures de chauffage et un rhéostat extérieur, on peut assurer le service courant, jusqu'à des températures de 350°.

Lorsqu'il s'agit de recherches spéciales, on se sert d'étuves dont la variation de température est comprise entre des limites plus étroites. La régulation se fait beaucoup plus facilement, beaucoup plus sûrement et beaucoup plus exactement que dans les appareils chauffés au gaz. Un thermomètre à contact réglable, ou une bi-lame se déformant sous l'action de la chaleur, ou encore une simple tige d'un alliage très dilatable, permettent facilement de rompre le courant lorsque la température a atteint la valeur désirée. Pratiquement, on peut maintenir très facilement la température constante à un dixième de degré près jusqu'à 70 à 80°.

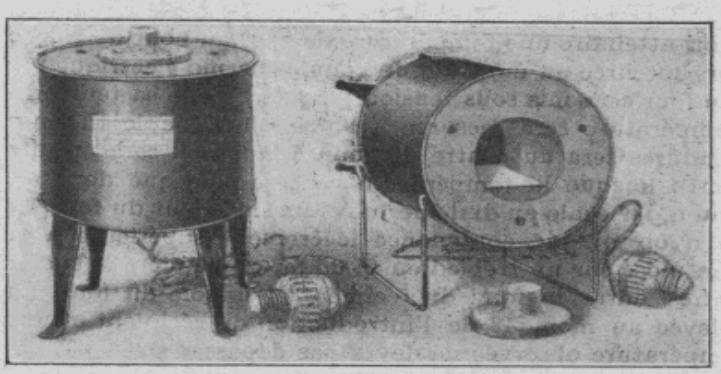


Fig. 623.— Creuset vertical et moufle horizontal de laboratoire.

Comme aspect extérieur, ces appareils sont identiques aux appareils ordinaires chauffés au gaz.

Les ***fours et moufles électriques*** méritent une description un peu plus détaillée.

Ils sont tous du type à résistance et affectent soit la forme de creusets, soit la forme tubulaire (fig. 623), le four pouvant, dans certains cas, s'ouvrir en deux parties (fig. 624).

Lorsque l'on alimente ces appareils par du courant à 110 ou 220 volts, il faut évidemment employer pour la constitution de la spirale chauffante un fil long et fin, c'est-à-dire très résistant, qui limite l'intensité du courant qui peut circuler dans le four à une valeur telle que l'on n'ait pas à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

craindre la fusion du fil. On peut au contraire équiper ces fours avec un fil court et gros lorsque l'on dispose du courant alternatif dont on abaisse la tension à l'aide d'un transformateur aux environs de 15 à 20 volts (fig. 638). On peut facilement arriver à réaliser une température de 1 100° à 1 200° dans la chambre du four. Les figures 625 et 626 montrent les éléments constitutifs d'un four et d'un moufle.

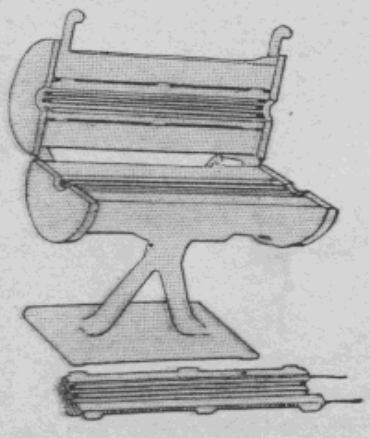


Fig. 624. — Four électrique ouvrant.

* * *

Les ***fours électriques à vide***, dont on a souvent besoin dans les recherches de laboratoire, sont constitués par un élément chauffant enfermé dans une enceinte dans laquelle on peut faire le vide, cet élément chauffant entourant entièrement l'objet à chauffer. Suivant les cas, c'est une spirale de graphite pour les petits fours, ou un ensemble de quatre grilles obtenues en sciant des plaques de graphite. Les figures 627 et 628 montrent la section de deux types de four Arsem

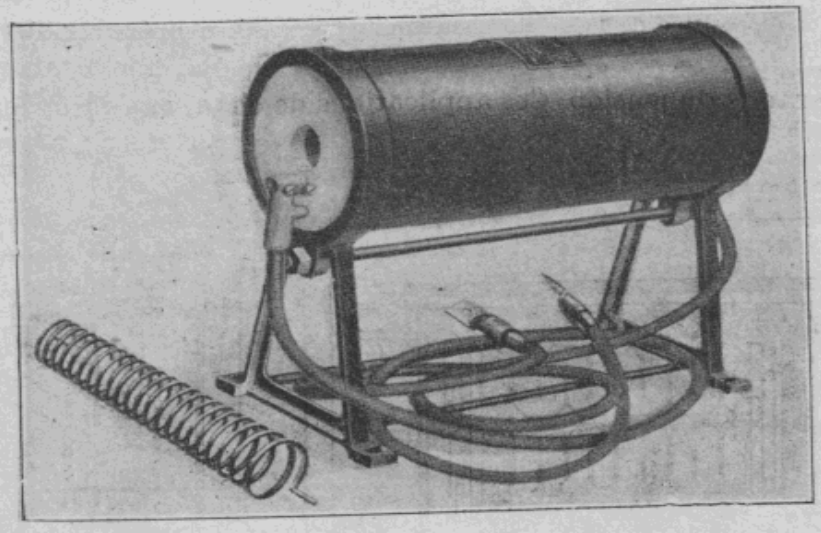


Fig. 625. — Four à résistance de laboratoire.

dans lesquels on peut réaliser des températures de 3 100° dans un espace de 75 centimètres cubes (type vertical) ou de 1 700° dans un volume de 5 litres (four rectangulaire). Les caractéristiques électriques de ces fours sont les suivantes :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	Four vertical.	*Four rectangulaire*
Énergie maxima	15 kilowatts.	40 kilowatts.
Intensité maxima	250 ampères.	570 ampères.
Voltage maximum	60 volts.	70 volts.

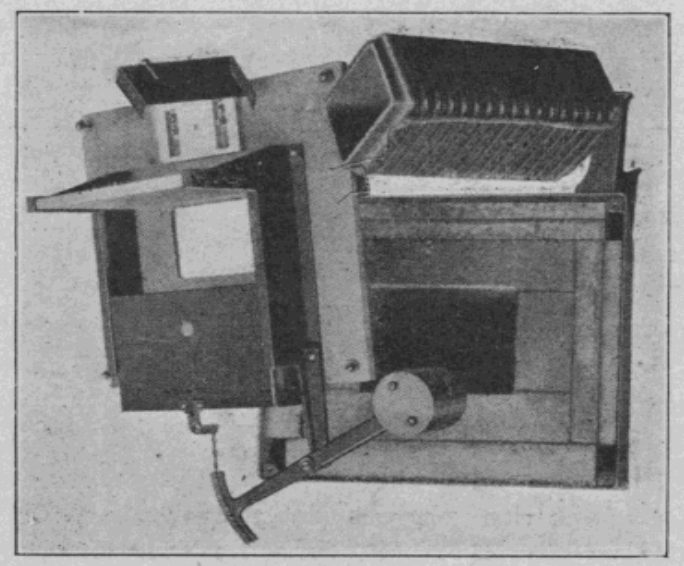


Fig. 626. — Four à moufle à résistance démonté, montrant la disposition de l'élément chauffant.

L'isolant calorifique qui entoure l'âme du four est constitué par de la poudre de charbon.

* * *

Dans l'***industrie***, on utilise les fours électriques soit pour fondre des métaux précieux, soit pour affiner des aciers spéciaux, soit pour recuire des pièces demandant un traitement thermique particulièrement délicat, soit enfin pour préparer directement le fer ou la fonte dans des fours de grande dimension. Ces applications de chauffage électrique sont,

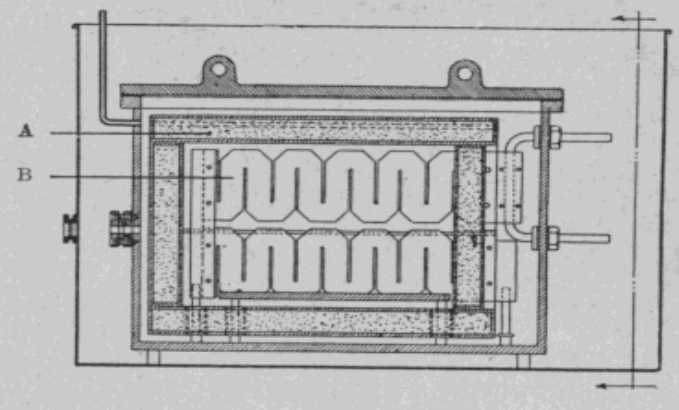


Fig. 627. — Section verticale d'un four à vide.
A, isolant calorifique; B, lames de charbon découpées formant résistance de chauffage.

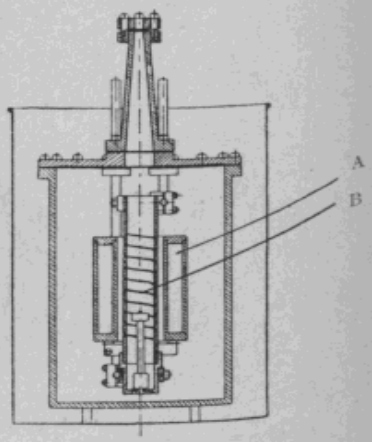


Fig. 628. — Four à vide.
A, isolant calorifique; B, spirale de charbon chauffante.

sauf la dernière, réalisées à l'aide d'appareils dérivant directement des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appareils de laboratoire que nous venons de voir. Ils n'en diffèrent que par les dimensions et l'importance du courant consommé.

Les figures 629 et 631 montrent des types industriels de fours à recuire, et la figure 632 les éléments de chauffage. Le four est alimenté par du courant alternatif, et un transformateur visible sur le côté de la figure permet

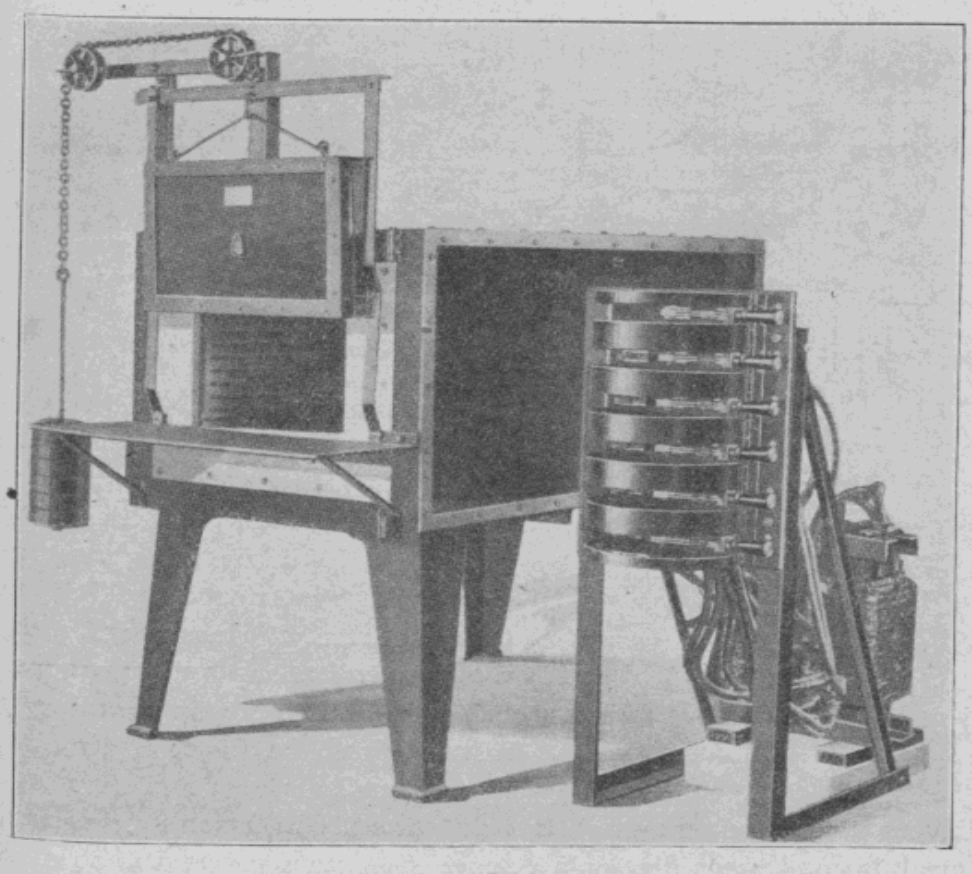


Fig. 629. — Four industriel à recuire.

de faire varier de voltage dans le circuit du four, de façon à obtenir différentes températures de régime.

Dans d'autres cas, les éléments chauffants, au lieu d'être métalliques, sont constitués par des plaques de charbon très minces empilées les unes sur les autres (fig. 630). Pour ces fours, on emploie encore le courant alternatif à bas voltage (20 à 30 volts). Ajoutons d'ailleurs que l'on construit sur le même principe des appareils de laboratoire. Un dispositif particulier à ce modèle de four est destiné à assurer le bon contact des diverses plaques de charbon qui constituent le circuit chauffant. Des vis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de pression transmettent leur effort à deux longues électrodes de graphite qui appuient sur les plaques chauffantes et permettent de compenser leur usure en cours de fonctionnement. La figure 630 montre la disposition d'ensemble d'un four à recuire les mèches, permettant d'atteindre des températures de 1 300°.

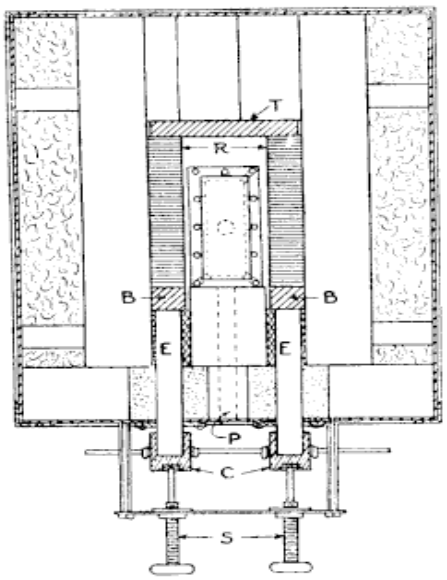


Fig. 630. — Four à résistance de charbon.

P, logement du pyromètre; R, plaques de charbon formant résistance de chauffage; E, électrodes; S, vis de pression assurant le contact entre les éléments de charbon; C, bornes d'arrivée et de départ du courant; B, T, plaques de charbon servant à établir les connexions électriques.

Reposant sur le même principe que les appareils précédents, le four Gin à résistance pour la fusion du fer et de l'acier s'en distingue cependant par sa disposition originale. Il est constitué en principe par un canal replié plusieurs fois sur lui-même, rempli de fonte ou d'acier en fusion et qui constitue le conducteur chauffant. Naturellement, cet énorme conducteur porté à haute température est renfermé dans un bloc de matière réfractaire et une circulation d'eau en maintient les extrémités par lesquelles arrive le courant à une température inférieure à celle de fusion du métal. Les sections terminales sont d'ailleurs beaucoup plus grandes que la section moyenne du canal pour la même raison. La figure 633 montre les plans d'un four de ce système.

Divers perfectionnements apportés par M. Gin à son four permettent de produire 20 tonnes d'acier à l'heure dans un four de 10 000 chevaux (7 360 kilowatts). Nous ne décrirons pas ces modifications, qui sortiraient du cadre de cet ouvrage.

* * *

Il est très difficile d'énoncer des règles permettant de ***construire*** à coup sûr un ***appareil de chauffage à résistance***. En effet, suivant le mode de calorifugation de l'appareil, suivant la vitesse avec laquelle la chaleur est utilisée, il faut, pour maintenir le régime de marche, faire passer un courant plus ou moins intense, c'est-à-dire utiliser une longueur plus ou moins grande de résistance chauffante.

Nous donnons ci-dessous quelques indications relatives aux alliages

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

RNC, qui permettent de calculer les caractéristiques d'un élément chauffant.

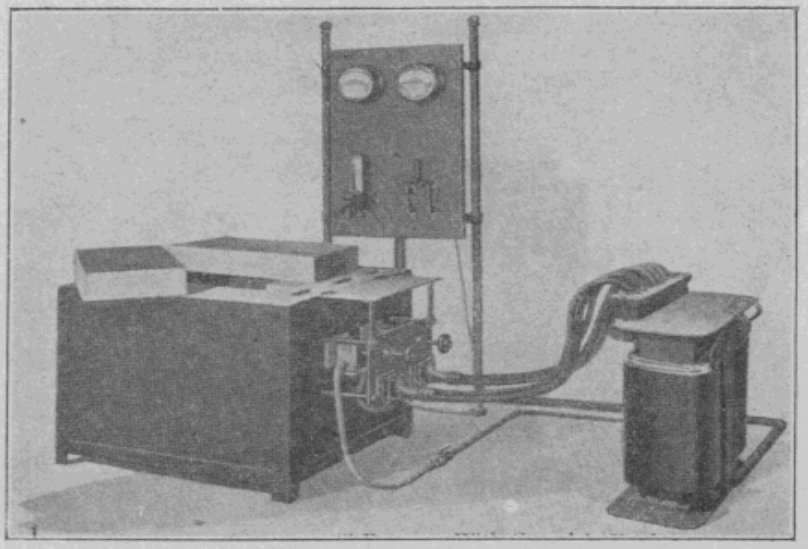


Fig. 631. — Four électrique à recuire à basse tension.

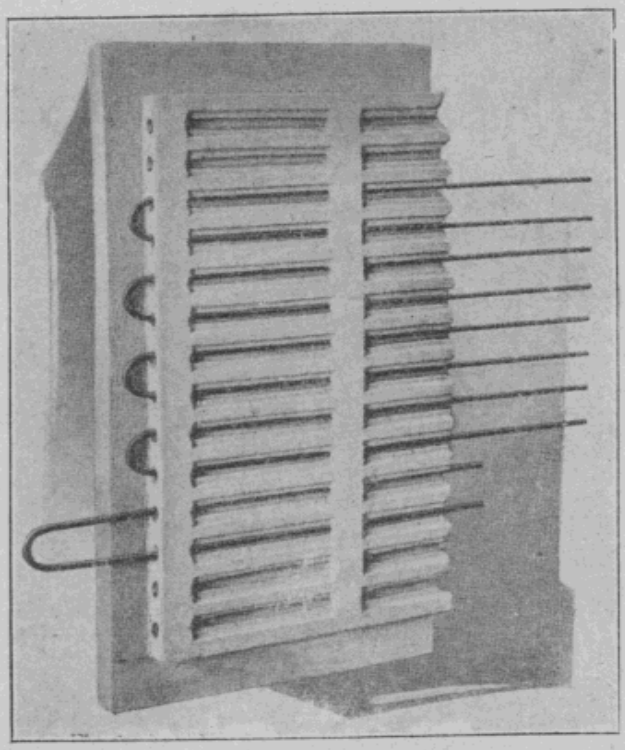


Fig. 632. — Résistances « en épingle à cheveux » pour les fours de grande puissance.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

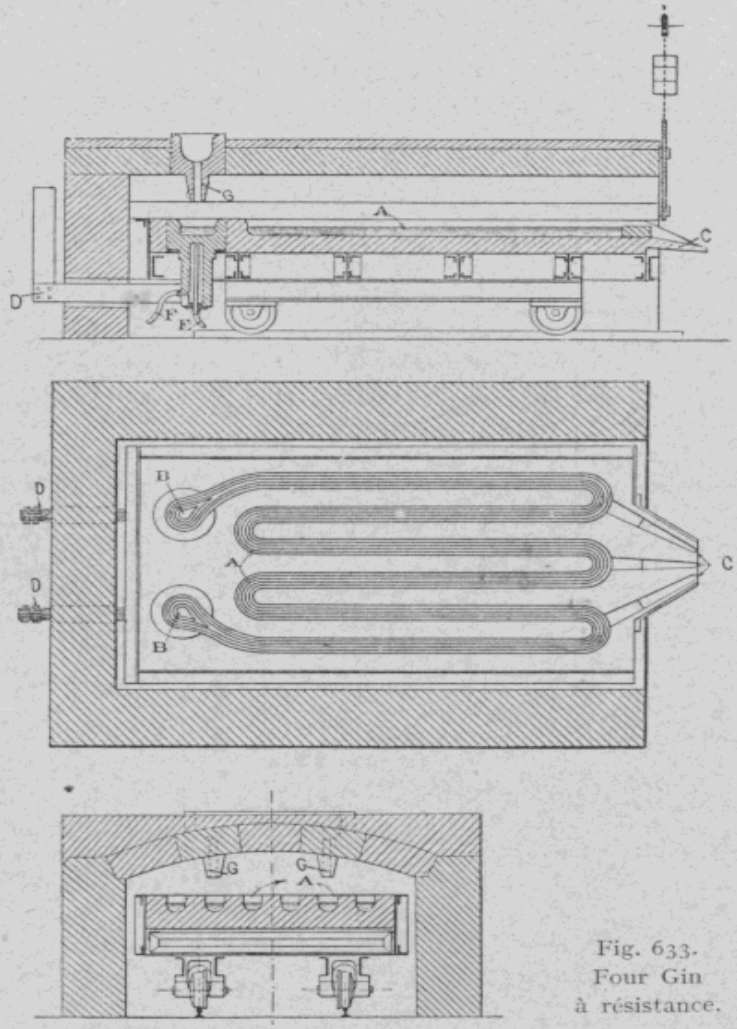


Fig. 633.
Four Gin
à résistance.

	RNC 1	RNC 2	RNC 3
Résistivité à 15° en microhms-centimètre	100 ± 4	103 ± 5	96 ± 4
Coefficient de température moyen entre 0 et 800°	0,3 à 0,35.10^{-3}	0,2 à 0,3.10^{-3}	0,20 à 0,15.10^{-3}
Densité	8,05	8,25	8,45
Point de fusion	1 450°	1 450°	1 475°
Température limite d'emploi	600 — 700°	900 — 1 000°	1 100 — 1 200°
Applications	Rhéostats. Chauffage aux températures moyennes. Applications domestiques.	Radiateurs. Chauffage aux températures élevées. Appareils de mesure.	Radiateurs lumineux. Chauffage aux températures très élevées. Résistances de mesure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La table suivante donne, pour différentes températures et différents diamètres, la résistance de longueurs de 100 mètres des trois alliages RNC.

Diamètres. mm.		*Résistances en ohms par 100 mètres.* 100°	200°	300°	500°	800°	1 000°	1 200°
0,25	RNC1	2 120	2 210	2 280	2 400	»	»	»
	RNC2	2 150	2 205	2 270	2 370	2 460	2 500	»
	RNC3	1 995	2 030	2 060	2 110	2 150	2 180	2 200
0,5	RNC1	530	555	590	600	»	»	»
	RNC2	540	550	595	590	615	620	»
	RNC3	500	505	515	525	540	545	550
1	RNC1	132	138	140	149	»	»	»
	RNC2	134	137	141	147	153	155	»
	RNC3	124	126	128	131	134	136	137
1,5	RNC1	59,5	62,1	63,6	67,1	»	»	»
	RNC2	59,7	61,3	63,2	66	68,2	69,3	»
	RNC3	55,3	56,4	57,3	58,5	59,7	60,4	61,1
2	RNC1	33,1	34,9	35,6	37,4	»	»	»
	RNC2	33,5	34,4	35,3	36,9	38,4	38,8	»
	RNC3	31	31,4	31,7	32,8	33,5	34	34,3
2,5	RNC1	21,2	22,1	22,6	23,9	»	»	»
	RNC2	21,4	22	22,7	23,6	24,6	24,8	»
	RNC3	19,9	20,3	20,5	21	21,4	21,7	21,9
3	RNC1	14,8	15,4	15,8	16,7	»	»	»
	RNC2	14,9	15,3	15,7	16,3	16,9	17,2	»
	RNC3	13,8	14,1	14,2	14,6	14,9	15,1	15,2
4	RNC1	8,2	8,7	8,9	9,4	»	»	»
	RNC2	8,4	8,6	8,8	9,3	9,6	9,7	»
	RNC3	7,8	7,9	8	8,2	8,4	8,5	8,6

En construisant, à l'aide de la table, d'une part les courbes donnant pour un même diamètre la résistance en fonction de la température et, d'autre part, les courbes donnant pour une même température la résistance en fonction du diamètre, il est facile d'avoir toutes les valeurs pour les températures et les diamètres ne figurant pas dans la table.

Dans le tableau suivant, nous donnons, en fonction du diamètre et de la température désirée, l'intensité du courant qui doit traverser la résistance,celle-ci étant supposée constituée par un fil circulaire tendu horizontalement dans l'air calme, à la température ambiante. Cette table s'applique aux trois variétés de RNC. Nous verrons ensuite comment de ce cas théorique, on peut déterminer approximativement les dimensions d'une résistance montée dans un appareil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Diamètres en mm.	*Intensités en ampères pour obtenir des températures de:*						
mm.	100°	200°	300°	500°	800°	1 000°	1 200°
0,5	1,25	1,95	2,62	3,62	5,45	7,20	9,07
0,75	2,12	3,28	4,40	6,34	9,60	12,40	15,57
1	3,15	4,70	6,35	9,30	14,40	18,40	22,60
1,5.....	5,30	8	10,9	16,1	25,6	32,7	39,9
2	7,8	11,9	16,1	24	37,9	48,7	60,2
2,5	10,65	16,4	22,1	32,5	51,4	67	84
3	14	21,2	28,5	42,1	66	87,5	107,7
4	22	32,2	43,1	63,5	99	131,4	107,5
5	32,2	46,2	62,2	91,6	138,2	189,2	245

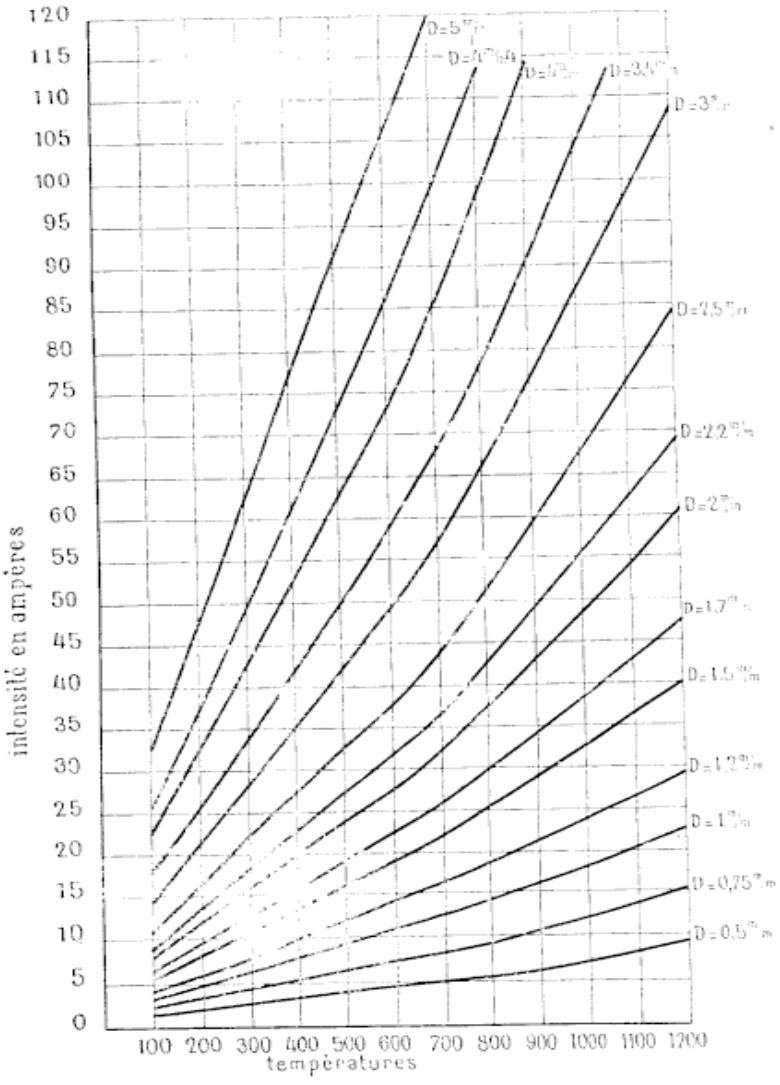


Fig. 634. — Courbes des résistances, RNC.

Les figures 634 et 635 complètent ce tableau en permettant d'interpoler pour les températures et les diamètres de fils ne figurant pas dans la table.

Par exemple, supposons que nous désirions avoir un fil de résistance devant consommer 275 watts sous 110 volts, sa température ne devant pas dépasser 200°. L'intensité qui le parcourt est de 2,5 ampères. La figure 634 donne comme diamètre $0^{mm},6$ environ. Connaissant, d'après les tables, la résistance d'un fil de $0^{mm},6$ de diamètre à la température de 200°, égale à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

385 ohms par 100 mètres, on en déduit que la longueur du fil à utiliser est de 11,45 mètres.

Considérons maintenant le cas d'un conducteur chauffant, fil ou ruban, monté d'une façon quelconque. La table des intensités n'est plus directement applicable, et l'on doit auparavant ramener le cas étudié au

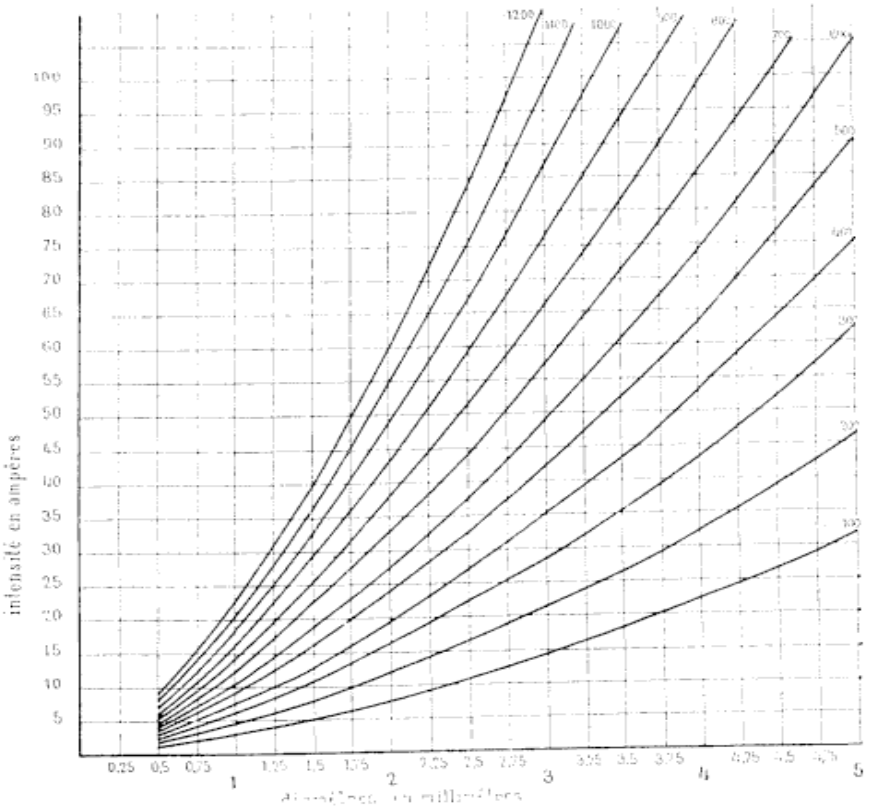


Fig. 635. — Courbes des résistances RNC.

cas théorique par l'emploi de deux coefficients de conversion appelés *coefficient de profil* et *coefficient de montage*.

Le ***coefficient de profil*** p intervient seulement lorsqu'on utilise des bandes et rubans à la place de fils ronds.

Les bandes et rubans offrant à section égale plus de surface au refroidissement que les fils ronds, l'intensité I′, nécessaire pour porter un ruban tendu horizontalement dans l'air calme à une température T, est supérieure à l'intensité I, donnée par la table, et nécessaire pour porter à cette température T un fil rond de même section que le ruban considéré.

Il faut donc multiplier cette intensité I par un coefficient de profil p, pour obtenir I′.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$I' \text{ (ruban)} = p \times I \text{ (fil)}.$$

Ce coefficient p varie avec le rapport de la largeur à l'épaisseur du ruban considéré :

TABLE DES COEFFICIENTS DE PROFIL.

Largeur / Épaisseur	2	3	4	5	7	10	15	27 et au-dessus
p	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50

Exemple : un ruban de 10/100 sur 130/100 a une section de $0^{mm2},126$ équivalente à celle du fil de 40/100. Tendu dans l'air calme, il sera porté à 700° par un courant de 5,1 ampères, car l'on a :

$$\frac{\text{Largeur}}{\text{Épaisseur}} = 13 \quad p = 1,43 \quad I = 3,55 \text{ ampères.}$$

$$\text{d'où } I' = 3,55 \times 1,43 = 5,1 \text{ ampères.}$$

Le ***coefficient de montage*** m est destiné à tenir compte du mode de refroidissement de l'appareil, qui diffère toujours, mais dans une mesure variable, de l'état type envisagé dans la table des intensités : dans la plupart des appareils de chauffage, le refroidissement est ralenti du fait du rapprochement mutuel des fils (boudins, toiles chauffantes) ou de l'isolement calorifuge (moufles, fours) ; dans quelques cas particuliers, il peut au contraire être accéléré (chauffe-eau à élément immergé).

Donc, pour obtenir dans le fil ou le ruban une température de régime T fixée à l'avance, on doit considérer dans la table des intensités la température

$$T' = T \times m,$$

m étant le coefficient de montage.

Ce coefficient n'est supérieur à l'unité que dans le cas très particulier du refroidissement accéléré ; nous n'étudierons pas ici ce cas, qui n'est pas le plus fréquent dans la pratique.

Lorsque le refroidissement est au contraire retardé, m est inférieur à l'unité et varie suivant le type d'appareil ; on peut adopter à cet égard les règles approximatives qui sont résumées dans le tableau suivant :

Type de construction.	m'
Appareils non calorifugés (résistances ou toiles chauffantes, nues et sans support, dans l'air calme)	0,8

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Appareils faiblement calorifugés (radiateurs enroulés sur un support réfractaire chauffant dans l'air calme) ..... 0,6 à 0,7
Appareils moyennement calorifugés (fils entre deux couches isolantes : fer à repasser, table chauffante, etc.)..... 0,5
Appareils fortement calorifugés (fours à moufle, avec enveloppe d'épaisseur trois à cinq fois la plus grande dimension de l'enceinte chauffante). 0,3 à 0,4

Nous donnons ci-dessous quelques exemples de calcul pratique correspondant aux différentes valeurs de m (1).

1° Soit à calculer un rhéostat de 22 ampères sous 110 volts, fonctionnant à 500°.

On prend du fil RNC 1, on a :

$$T' = T \times 0,8 = 500 \times 0,8 = 400°.$$

Pour 400° et 22,5 ampères, le tableau des intensités indique un fil de $2^{mm},2$ de diamètre, dont la résistance est de 31 ohms par 100 mètres à 500°. Le rhéostat devant avoir une résistance de $\frac{110}{22} = 5$ ohms, la longueur du fil sera de $16^{m},10$.

2° Calcul d'un radiateur de 880 watts, 220 volts, 4 ampères, fonctionnant à 800°.

On prend du fil RNC 2 ; on a :

$$T' = T \times 0,6 \text{ à } 0,7 = 480 \text{ à } 560°.$$

La table donne pour 550° environ et 4 ampères un diamètre de fil de $0^{mm},5$ dont la résistance à 800° est de 615 ohms par 100 mètres. Le radiateur devant avoir une résistance de $\frac{220}{4} = 55$ ohms, il faudra prendre une longueur de fil de 9 mètres environ.

3° Calcul d'un fer à repasser 220 watts 110 volts, 2 ampères, fonctionnant à 800°.

On prend du fil RNC 2. On a :

$$T' = T \times 0,5 = 400°.$$

La table donne pour 400° et 1,98 ampère le fil de $0^{mm},35$ de diamètre, dont la résistance à 800° est de 1 250 ohms par 100 mètres. Comme la résistance du fer doit être de $\frac{110}{2} = 55$ ohms, il faudra prendre une longueur de fil égale à $4^{m},4$.

(1) Ces exemples, ainsi que les renseignements relatifs aux alliages RNC, sont extraits d'une notice remarquablement établie par la Société de Decazeville, Fourchambault, Commentry.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons maintenant que l'on désire employer du ruban au lieu de fil, ce ruban étant défini par son rapport $\frac{\text{largeur}}{\text{épaisseur}}$ égal à 5.

Dans ce cas, on a toujours :

$$T' = 800 \times 0,5 = 400°$$

mais, au lieu de chercher dans la table des intensités $I' = 2$, on prend $I'' = \frac{2}{1,3} = 1,54$ ampère, correspondant au fil de même section que le ruban cherché.

On trouve approximativement le fil de diamètre $0^{mm},28$ dont la section est de $0^{mm2},0615$. Ainsi, le ruban est défini par sa section et le rapport $\frac{\text{largeur}}{\text{épaisseur}}$, ce qui est suffisant.

Pour calculer la longueur à utiliser, la table des résistances donne, pour un fil de 28/100 à 800°, une résistance de 1 955 ohms par 100 mètres : donc $2^{m},9$ de ce fil ou du ruban équivalent présenteront la résistance demandée de $\frac{110}{2} = 55$ ohms.

4° Enfin, calculons un four à moufle de 60 × 100 millimètres, longueur 500 millimètres, pour traitement de petites pièces de 400 à 1 000°. Dimensions extérieures de la carcasse 600 × 700 millimètres, longueur 800 millimètres, intensité prévue : 25 ampères sous 110 volts. On prend du fil RNC 3. On a :

$$T' = T \times 0,3 \text{ à } 0,4.$$

soit en moyenne 350°.

La table donne, pour 350° et 25 ampères, le fil de $2^{mm},5$ de diamètre, dont la résistance est de 0,22 ohm par mètre ; sous 110 volts, on peut donc placer :

$$\frac{110}{25 \times 0,22} = 20 \text{ mètres de fil.}$$

La longueur d'une spire étant de 40 centimètres environ, on aura 50 spires à écartement normal de 1 centimètre. Un rhéostat en série permettra de faire varier la température du moufle (intensité variant de 10 à 15 ampères quand la température passe de 400 à 1 000°).

Remarquons que les calculs précédents ne sont qu'une approximation, par suite de l'impossibilité d'évaluer exactement *a priori* le régime

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de rayonnement, mais ils permettent de réduire au minimum les tâtonnements expérimentaux.

Passons maintenant aux applications du chauffage électrique dans la grande industrie, principalement la métallurgie.

* * *

Les ***fours à arc*** extrêmement nombreux sont les plus anciens, puisque Davy, dès 1808, s'en était servi pour électrolyser les chlorures alcalins, mais c'est depuis 1884, sous l'influence des travaux de Clerc, Minet, Héroult, puis Acheson et Moissan, que le four électrique industriel s'est développé. Nous ne décrirons pas son évolution, ni ses multiples formes, qui relèvent beaucoup plus d'un traité d'électrométallurgie que d'un traité d'électricité. Nous avons déjà indiqué précédemment quelles étaient les principales catégories dans lesquelles on pouvait les ranger. Nous nous contenterons ici, afin de donner au lecteur un aperçu de la réalisation industrielle de ces appareils, de décrire succinctement les plus caractéristiques d'entre eux.

Le ***four Stassano***, analogue au four de laboratoire de Moissan, utilise, comme source calorifique, un arc jaillissant au-dessus de la matière à chauffer. Afin de pouvoir agir sur une masse considérable, et assurer un brassage convenable de la masse pâteuse, Stassano imagina de faire tourner le four autour d'un axe oblique par rapport à la verticale, de manière que la masse en fusion fût constamment brassée par l'effet de la rotation du four (fig. 636).

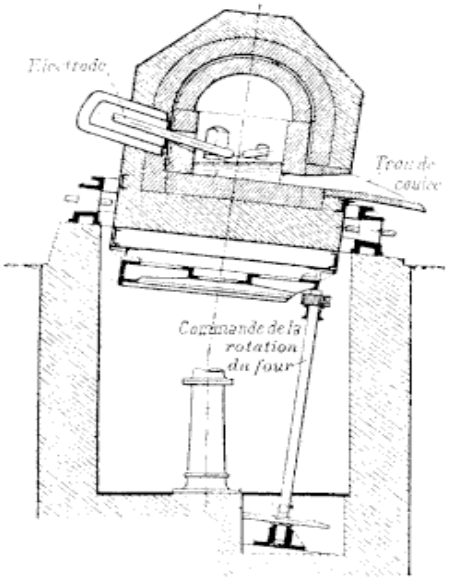


Fig. 636. — Four Stassano.

Le four électrique est formé d'un cylindre surmonté d'une calotte reposant, à l'aide de rouleaux, sur un rail dont le plan est incliné par rapport à l'horizontale d'un angle de 7° environ. Ce four est pourvu de quatre charbons électrodes de 15 centimètres de diamètre et $1^m,5$ de long, de porte-charbons refroidis par un courant d'eau continu et de cylindres hydrauliques pour la manœuvre des tiges des porte-charbons. Il comporte deux orifices de coulée, l'un pour le métal, l'autre pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les scories. La consommation des électrodes est de 10 à 12 kilogrammes par tonne produite et le revêtement intérieur en magnésie dure au moins quarante jours.

La connexion avec le générateur d'électricité se fait par l'intermédiaire de bras métalliques fixés à la calotte et pourvus de balais qui recueillent le courant.

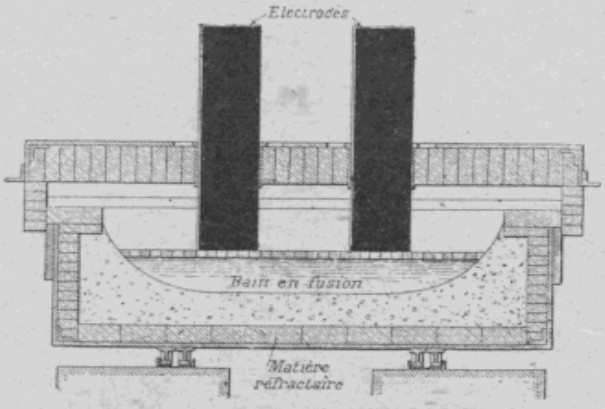


Fig. 637. — Four Héroult.

La dépense d'énergie dans le four de Stassano varie entre 1 000 et 1 200 kilowatts-heure par tonne d'acier produit.

Le ***four Héroul*** type, installé à La Praz, est constitué par un creuset oscillant (fig. 637), dans lequel pénètrent deux électrodes en charbon qui traversent la voûte. Le courant alternatif ou continu de 3 000 ampères sous 110 volts entre par l'une des électrodes, traverse une couche de laitier, et ressort par l'autre électrode. Dans ce four, l'effet Joule se produit en partie dans le laitier, c'est donc un four à résistance superficielle ; le métal est chauffé par la surface supérieure du bain et surtout par les arcs qui jaillissent entre les électrodes et la surface du métal. Le creuset est composé de dolomie broyée et damée sur la sole en briques de dolomie.

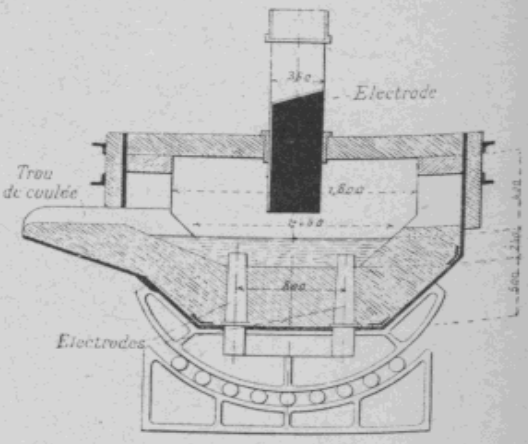


Fig. 638. — Four Girod.

Les électrodes sont portées par des potences à crémaillères et mues à la main, ou par un moteur. Ce sont des prismes carrés de 370 millimètres de côté et de $1^{m},70$ de long.

Sur le devant du four se trouve la porte de coulée ; le chargement et le décrassage du four se font par deux portes latérales.

L'usine de La Praz peut fabriquer annuellement 3 000 tonnes d'acier dans ce four Héroult de 500 HP alimenté par du courant alternatif.

Le ***four Girod*** (fig. 638) est constitué par un creuset circulaire ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

elliptique dans lequel se trouve un bain de métal de 25 à 30 centimètres. Une ou plusieurs électrodes mobiles amènent le courant à la surface du bain. Des pièces polaires, noyées dans la sole réfractaire du four et réparties sur sa périphérie, mettent le bain en communication avec l'autre pôle du circuit électrique. Une circulation d'eau refroidit les électrodes. Ces fours consomment 5 000 ampères sous 60 volts pour un four de 2 tonnes analogue à celui dont les dimensions sont données sur la figure 638.

Les fours précédents servent à préparer les alliages spéciaux, les « ferros », dont le rôle est si important dans la mécanique moderne : acier au manganèse, aciers au titane, aciers chromés, etc.

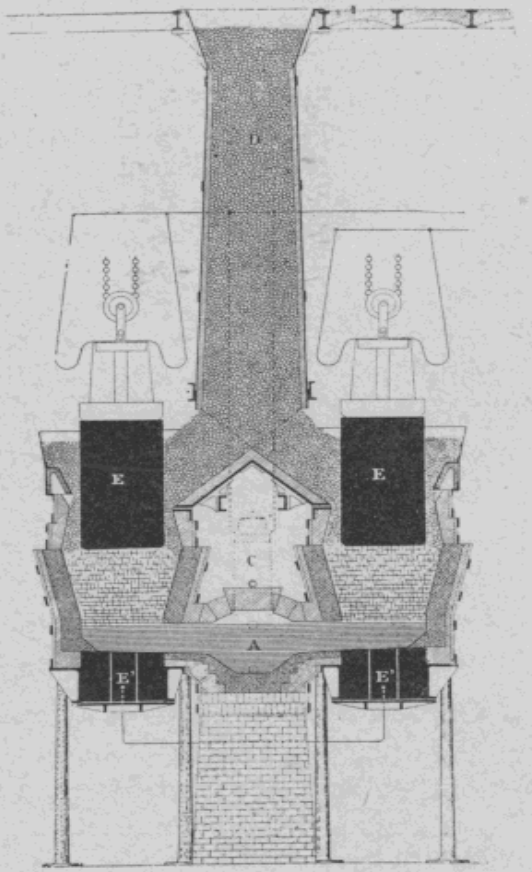


Fig. 639. — Four électrique Keller à pluralité d'électrodes.

Il nous faut maintenant dire un mot des fours électriques destinés non plus à l'affinage de l'acier ou à la préparation des aciers spéciaux, mais bien à la ***production directe de la fonte*** à partir du minerai lui-même.

Dans le haut fourneau ordinaire, le charbon sert d'une part à porter la masse à une certaine température, d'autre part à réagir chimiquement sur le minerai. Il est évident que l'électricité ne pourra remplacer le charbon que dans le premier rôle, et qu'il faudra toujours alimenter le haut fourneau en charbon pour la réduction du minerai.

La figure 639 montre le schéma du four Keller. Deux chemises en fer à section carrée recouvertes intérieurement de matières réfractaires forment deux cuves reliées à leur partie inférieure par un canal latéral. Sur la sole de chaque four se trouve un bloc de charbon E′, E′ en communication avec l'extérieur du four par des barres de cuivre. Les électrodes de charbon E, E ont environ 1 mètre de côté pour un four de 100 tonnes par jour et leur durée est de dix jours environ. Le four consomme 1 000 HP,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le courant atteignant 12 000 ampères sous 60 volts environ. Le chargement s'effectue par la trémie D.

Avant de passer à l'étude des fours à induction, il est une dernière application du four à arc qui doit être mentionnée : c'est la ***fixation de l'azote atmosphérique***. L'importance de cette question justifie quelques développements.

A haute température, l'azote et l'oxygène se combinent pour donner l'oxyde azotique AzO, qui, en présence d'eau et d'air en excès, se transforme en acide azoteux et en acide azotique d'après les équations classiques :

$$AzO + O = AzO^2$$
$$2\,AzO^2 + H^2O = AzO^3H + AzO^2H$$
$$2\,AzO^2H = AzO^2 + AzO + H^2O.$$

Mais la réaction initiale est une réaction réversible et limitée, comme le montrent les nombres suivants, et extrêmement sensible à l'influence de la température.

Température d'expérience.	*P. 100 d'AzO formé en volume.*
1 811°	0,37
2 033°	0,64
2 195°	0,97
3 200°	5

On voit donc que plus la température à laquelle on opère est élevée plus la réaction est complète. D'autre part, si, ayant opéré à 3 200°, et atteint la limite correspondante 5 p. 100, on refroidit lentement le mélange à 2 200°, d'après la réaction :

$$\frac{1}{2}\,Az^2 + \frac{1}{2}\,O^2 \rightleftharpoons AzO$$

qui est réversible, l'équilibre s'établira à cette température aux environs de 1 p. 100 d'AzO en volume ; durant ce refroidissement de 1 000°, on aura perdu 80 p. 100 de ce qui aura été produit à 3 200°. C'est ce qui constitue le phénomène de la *rétrogradation*.

De même que les équilibres sont d'autant plus rapidement établis que la température est plus élevée, de même aussi la rétrogradation se produit beaucoup plus facilement aux températures élevées qu'aux températures basses. Ceci est, d'ailleurs, une conséquence du phénomène général de réversibilité.

D'où l'on conclut que les températures les plus dangereuses pour la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rétrogradation sont les plus voisines de la température de réaction. De là, la nécessité de refroidir aussi brusquement que possible les gaz qui ont été portés à haute température, pour les ramener dans le temps le plus court à des températures auxquelles la vitesse de rétrogradation soit pratiquement nulle ; dans le cas de la combustion de l'azote, cette condition se réalise d'autant plus facilement qu'au-dessous de 600° le gaz AzO se combine peu à peu avec l'oxygène en excès pour former des vapeurs nitreuses AzO^2 qui échappent au phénomène de la rétrogradation.

L'arc électrique fournit la solution idéale pour le chauffage du mélange gazeux à haute température. La difficulté du problème est de retirer ce mélange aussi rapidement que possible de la région de réaction et de le refroidir brusquement, afin d'éviter la rétrogradation.

Pratiquement, on a cherché à atteindre ce résultat, au début, en entraînant rapidement les gaz hors de la région où ils ont subi l'action de l'arc, et, plus récemment, en ayant recours à des dispositifs électriques ou mécaniques destinés ou bien à soumettre les arcs à des allumages et extinctions successives (plusieurs milliers de fois par seconde), ou bien à faire jaillir l'arc électrique dans des régions différentes de l'espace ; dans tous ces cas, la zone gazeuse, portée instantanément par l'arc à une température très élevée, se refroidit instantanément aussi dans la masse d'air environnante, et les effets de la rétrogradation sont, sinon supprimés, du moins considérablement atténués.



En résumé, au point de vue électrochimique, les considérations fondamentales qui régissent la combustion de l'azote atmosphérique sont les suivantes :

1° Travail à température élevée, pour augmenter le rendement et la rapidité de la réaction ;

2° Refroidissement instantané des gaz, pour éviter la rétrogradation.

Les dispositifs proposés pour arriver à ces résultats sont très nombreux. Nous n'en indiquerons que quelques-uns.

Dans le système ***Kowalski et Mosciski***, un arc à 3 000 volts est mis en rotation continue par un champ magnétique.

L'arc est produit entre la paroi interne *a* (fig. 640) d'une électrode cylindrique en cuivre et la paroi externe *b* d'une autre électrode cylindrique coaxiale. Celle-ci est refroidie par une circulation d'eau intérieure. L'arc s'amorce au bourrelet *k*, monte entre les électrodes et est mis en rotation par le champ magnétique produit par la bobine *h* plongée dans un bain d'huile qui assure l'isolement des appareils, ainsi que le refroidissement de l'électrode *a*, l'huile étant elle-même refroidie par le serpentin à eau *r*. L'air arrive par *e* dans l'espace annulaire compris entre les électrodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et les gaz provenant de la réaction s'échappent par une conduite en poterie g. En fermant la partie inférieure de cette conduite par une plaque de mica n et disposant au-dessous un miroir incliné à 45°, on peut voir l'arc tourner entre les électrodes.

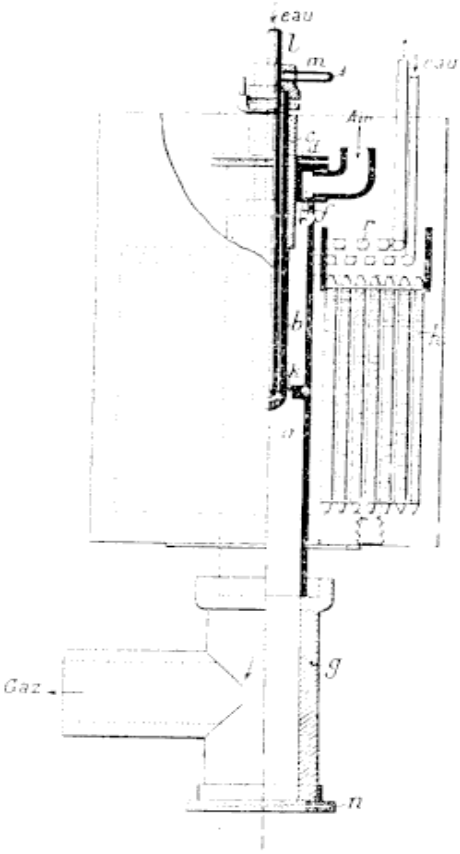


Fig. 640. — Four Mosciski.

Dans le ***procédé Pauling,*** l'arc éclate entre des électrodes E, E′ recourbées dans un plan vertical comme les cornes d'un parafoudre (fig. 641). Ces électrodes sont en fer, creuses et refroidies par circulation d'eau. Le courant alternatif est fourni à un voltage de 4 000 volts. Sous l'action d'un violent courant d'air sortant d'une tuyère T parallèlement à la flamme de l'arc, celle-ci s'allonge et s'étale jusqu'au sommet du creuset. L'arc consomme de 200 à 400 kilowatts et son allumage est obtenu à l'aide de deux petites électrodes auxiliaires mobiles b, b

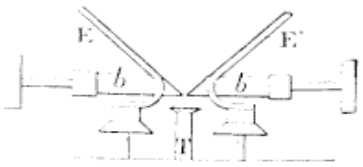


Fig. 641. — Arc système Pauling.

en forme de couteau, dont on peut rapprocher les extrémités au début de la mise en marche.

Le ***procédé Birkeland et Eyde*** s'appuie sur un principe différent. On sait depuis Plücker que les champs magnétiques exercent une influence sur l'étincelle électrique.

Lorsqu'on produit un arc dans un champ magnétique, et dans une direction normale au champ, et que cet arc est à faible tension, il s'éteint. La force soufflante d'un champ magnétique vis-à-vis d'un arc de basse tension est bien connue, et utilisée dans les coupe-circuits de grande intensité.

Si la tension de l'arc s'élève, grâce à la force électromotrice plus élevée, l'arc s'établit, malgré le champ qui exerce sur lui une réaction centrifuge, et se noue suivant un arc de cercle constamment tendu par le champ et qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

se déplace continuellement vers la périphérie (fig. 642 et 643). Notre œil ne saisissant pas les effets successifs très rapprochés, les étincelles consécutives forment pour lui un demi-disque animé de mouvement si le courant est

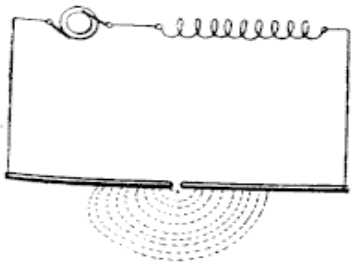


Fig. 642. — Demi-disque lumineux produit par un courant continu soufflé.

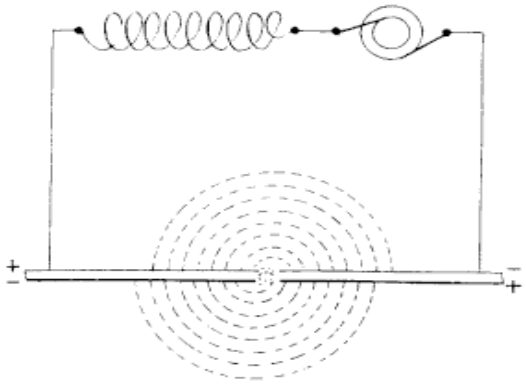


Fig. 643. — Disque lumineux produit par un courant alternatif soufflé.

continu ; l'arc est repoussé dans une direction constante dans ce cas ; il suffit de renverser le sens du courant de l'arc pour obtenir le demi-disque symétrique.

Par conséquent, si on alimente une ligne d'étincelles par un courant alternatif, on obtient, par juxtaposition, un disque entier.

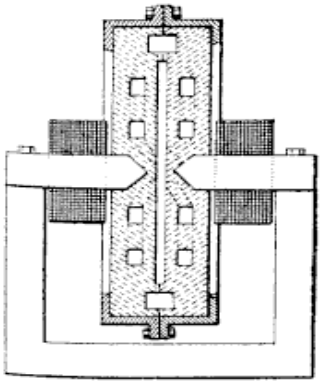


Fig. 644. — Schéma du four Birkeland.

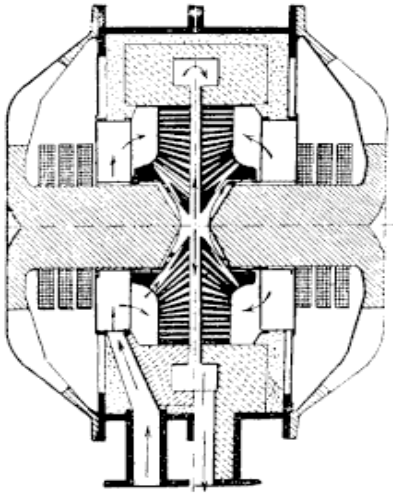


Fig. 645. — Four Birkeland.

Les figures 644 et 645 donnent une coupe schématique des fours employés. On y voit la chambre à flamme, sorte de boîte circulaire aplatie, verticale, de 10 centimètres d'épaisseur et 2 mètres de diamètre ; on y voit également

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les électro-aimants produisant le champ magnétique et les canaux par lesquels arrive l'air et s'échappent les gaz ; les électrodes, non représentées, sont espacées de quelques millimètres seulement et disposées horizontalement, perpendiculairement au plan de la figure ; elles sont en cuivre et refroidies intérieurement par un courant d'eau.

Nous ne dirons rien de la partie chimique du procédé de fixation de l'azote. Notre but a été seulement de montrer quelles applications considérables l'arc électrique a permis de réaliser.

* * *

Les ***fours à induction*** reposent sur un principe tout différent de celui des appareils que nous avons décrits jusqu'à présent. On sait que, lorsqu'une masse métallique conductrice forme l'armature intérieure d'un solénoïde, si celui-ci est parcouru par du courant alternatif, par suite des courants de Foucault développés dans la masse conductrice, celle-ci s'échauffe progressivement.

Tandis que dans les fours à résistance la chaleur se transmet par conduction des éléments chauffants à la masse à travailler, la chaleur est ici engendrée au sein même du creuset. Il en résulte qu'il n'y a théoriquement aucune limite supérieure à la température que l'on peut réaliser, tandis que, dans les fours à résistance, on ne peut dépasser la température de fusion des éléments chauffants.

Le premier four industriel à induction fut breveté en 1900 par Kjellin. On peut le considérer comme un transformateur dans lequel le circuit secondaire se trouverait constitué par une spire unique formée par le métal solide ou fondu contenu dans un canal circulaire.

Ce four a été perfectionné par ***Röchling et Rodenhauser***. Le four que ces ingénieurs ont réalisé peut être assimilé à la juxtaposition de deux fours Kjellin. La partie commune des deux circuits secondaires élargie et droite sert de chambre d'affinage.

Les inventeurs se sont rapprochés le plus possible, dans la construction, de la forme du four Martin. C'est ainsi que leur four présente pour les opérations métallurgiques, non plus une simple rigole, comme dans les fours à induction ordinaire, mais un foyer analogue au foyer du four Siemens-Martin, ce qui constitue un de ses principaux avantages. Il est destiné à la production d'acier doux homogène de qualité au moins égale au meilleur acier suédois et se prête tout particulièrement à l'affinage.

La combinaison des deux chauffes par induction et résistance a été

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

obtenue en faisant alimenter par l'enroulement primaire du transformateur deux groupes de circuits induits, dont l'un est formé par le circuit fermé du canal de fusion et l'autre par un enroulement de cuivre travaillant à basse tension et à très haute intensité. Cet enroulement chauffe, par résistance, une partie de la charge par l'intermédiaire de deux couches de revêtement bonnes conductrices de la chaleur et de composition telle qu'elle n'influe pas sur la pureté de l'acier. La figure 646 donne le principe du ***four Röchling-Rodenhauser***.

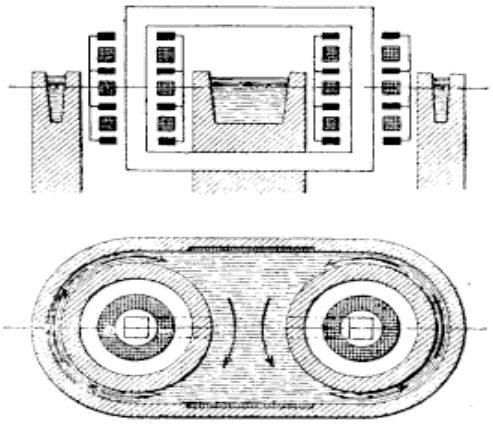


Fig. 646. — Four Röchling-Rodenhauser.

Mais, dans ces modèles de fours, il est difficile, par suite de la faible conductibilité et de la lenteur de diffusion des corps fondus, de réaliser une répartition uniforme du chauffage et des réactions. On obtient un effet thermique notablement plus parfait par une circulation continue des matières fondues qui renouvelle sans cesse les surfaces de contact avec les corps réagissants.

Dans le ***four Gin***, cette circulation est réalisée en constituant le creuset par une suite de canaux découverts (fig. 647 et 648) dont le fond est incliné dans le sens longitudinal et en réunissant ces canaux par des conduits

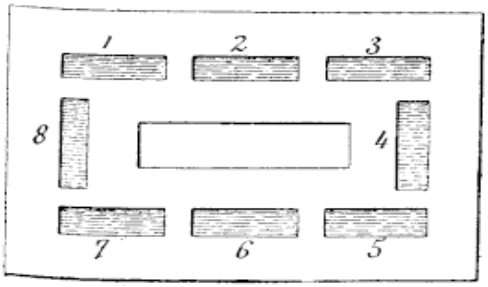


Fig. 647. — Four d'induction Gin. Coupe horizontale.

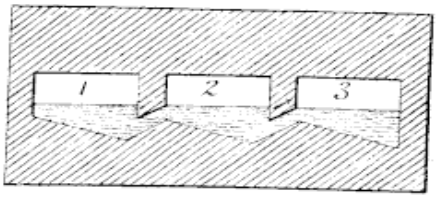


Fig. 648. — Four d'induction Gin. Coupe verticale de la canalisation.

complètement remplis par le métal fondu qui mettent en communication l'extrémité profonde de chaque canal avec l'origine moins profonde du canal suivant.

Par suite de l'échauffement dans les tubes de communication, il s'établit une circulation à laquelle prend part toute la masse fondue.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans un autre type, dû à M. ***Saladin***, on donne une grande résistance au circuit métallique fondu, en le constituant par un tube de faible section, ne contenant qu'une très petite portion du métal fondu et communiquant, par ses deux extrémités placées à des niveaux différents, avec un bassin ou creuset de grande dimension contenant la majeure partie du métal fondu.

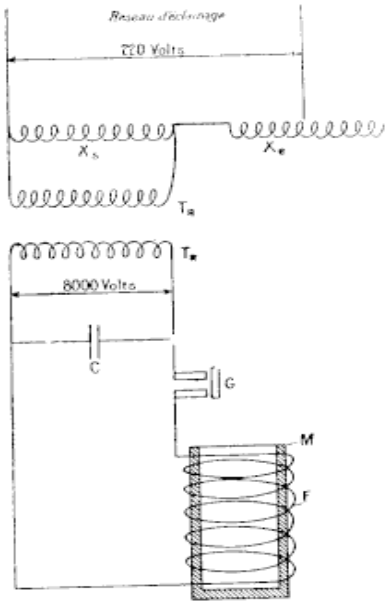


Fig. 649. — Montage électrique du four d'induction à haute fréquence.

En raison de l'échauffement, une circulation très active du métal s'établit dans le tube : le métal du bassin entre continuellement par l'orifice supérieur de ce tube pour en sortir et revenir au bassin par l'orifice inférieur.

* * *

Un perfectionnement très important a été réalisé récemment grâce aux travaux de Northrup et, bien que les fours construits jusqu'à présent n'aient pas une capacité de plusieurs tonnes comme les fours précédents, on peut prévoir que dans quelques années leur développement sera comparable à celui des autres fours à induction. Au lieu d'utiliser des courants alternatifs de basse fréquence, ***Northrup*** se sert de courants à haute fréquence.

Par l'***emploi de courants de haute fréquence***, il devient inutile d'utiliser aucune partie en fer, ni aucun enroulement en contact avec le primaire du transformateur. Northrup emploie, pour des puissances allant jusqu'à 100 kilowatts, des courants de fréquence environ 20 000 par seconde, produits par la décharge d'une batterie de condensateurs.

La figure 649 donne le schéma de l'installation électrique. Le courant du secteur à 110 ou 220 volts est élevé par un transformateur Tr, Tr′ à une tension de 8 000 volts environ. Ce courant charge une batterie de condensateurs C dont la capacité est d'environ 0,07 microfarad par 1,5 kilowatt. Un dispositif de rupture G permet de décharger ces condensateurs dans une bobine d'induction F de 60 à 80 tours enroulée autour du creuset à chauffer M.

Malgré ce petit nombre de tours, les effets d'induction dans la masse renfermée dans le creuset et produits par les courants oscillatoires de la décharge sont si intenses que la fusion d'une masse de 15 kilogrammes de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cuivre est obtenue en vingt-deux minutes avec une dépense de 1 kilowatt par 2 kilogrammes. Il est à remarquer, de plus, que les parois du creuset seules sont chauffées par la masse en fusion et que la bobine d'induction est facilement maintenue à la température ordinaire par un courant d'eau par exemple.

Une série de résistances X*e* réglables permettent de limiter l'intensité dans le primaire du transformateur, et des résistances X*s* montées en shunt sur le primaire du transformateur font varier le facteur de puissance de façon à l'amener à être égal à 1.

Le système de décharge G mérite une mention spéciale. Il ne comporte aucune partie mobile et est formé de deux ou trois électrodes de graphite (trois électrodes lorsqu'on opère sur deux ou trois phases du courant) au-dessus d'un bain de mercure renfermé dans une enveloppe en fonte et dont le niveau peut varier par déplacement d'un réservoir extérieur mobile. Un autre réservoir permet de verser, à raison de 15 gouttes environ par minute, de l'alcool dans ce disjoncteur qui fonctionne ainsi beaucoup mieux, car la surface du mercure reste propre.

Les températures réalisées dans le four sont voisines de 2 500°, puisque l'on a pu fondre du molybdène dans ces appareils.

Nous donnons ci-dessous quelques résultats obtenus avec un four électrique de 1l,5 de capacité du creuset.

Métal.	*Charge.*	*Temps de fusion.*	*Kg. fondus par kw.-h.*
	Kg.	Minutes.	
Acier	13,5	54	0,75
Cuivre	15	22	2
Laiton	13	20	2,5
Or	30	15	7
Argent	12	14	4
Aluminium	4	14	4
Nickel	12	48	0,73
Zinc	12	6	6
Étain	12	2,5	15
Plomb	18	2,5	25

La figure 650 donne la coupe d'un creuset spécialement établi pour la fusion des métaux.

Lorsque l'on désire fondre des matières non conductrices, on emploie le dispositif représenté par la figure 651. La substance à fondre est enfermée dans un tube de quartz fermé aux deux extrémités, de façon à éviter l'entrée des gaz, et en particulier de l'acide carbonique, dans le creuset. La chaleur est dégagée dans un cylindre de graphite dans lequel on intro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duit le tube de quartz. On peut élever la température jusqu'à celle de ramollissement du quartz. Si l'on ne désire pas dépasser 1 125°, on remplace le tube de graphite par un cylindre de nickel et, comme il n'y a plus à craindre l'action de l'atmosphère gazeuse, on peut ne pas boucher le creuset.

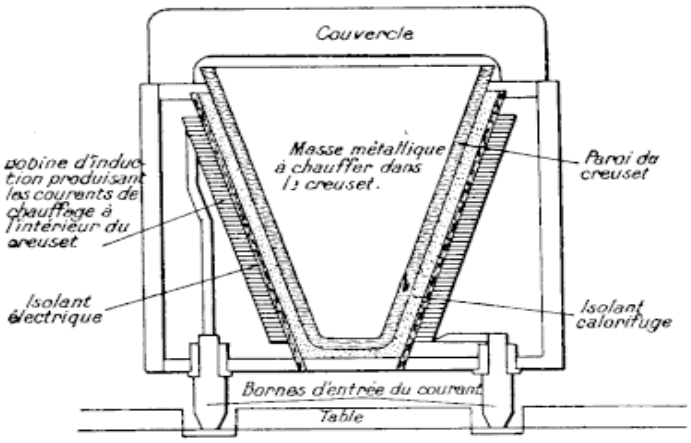


Fig. 650. — Coupe d'un creuset pour fusion de métaux par induction.

Actuellement, ces fours d'induction à haute fréquence n'ont pas encore été réalisés pour des capacités industrielles.

* * *

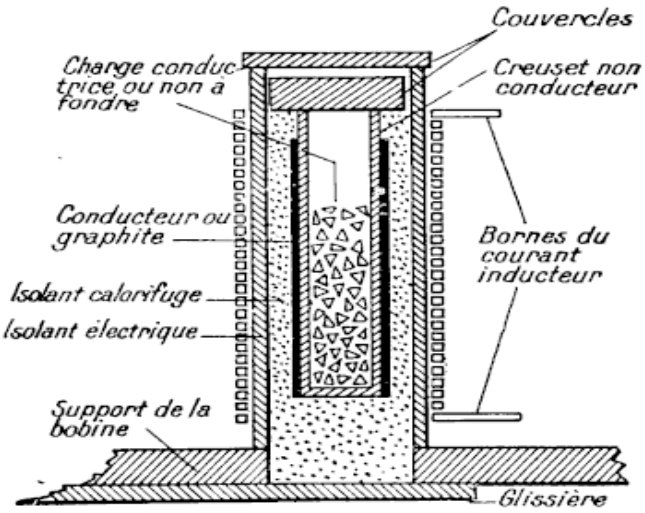


Fig. 651. — Coupe d'un four pour fusion des matières non conductrices de l'électricité.

La ***soudure électrique*** est une application de l'énergie calorifique d'origine électrique qui mérite quelques développements. On peut distinguer deux méthodes différentes : la soudure électrique *par arc* et la soudure électrique *par résistance*. Dans le premier procédé, la chaleur est produite par un arc jaillissant entre une électrode et l'objet à travailler qui est réuni à l'une des bornes du circuit électrique, dont la seconde borne est en relation avec l'électrode. Quand celle-ci, d'abord mise au contact du métal à souder, est écartée à une distance convenable, il se forme un arc qui fond une petite portion du métal et dans cette goutte liquide, sorte de creuset en miniature, on ajoute le métal d'apport qui se liquéfie également.

Le dégagement de chaleur est limité à un très petit espace, et ne se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diffuse pas dans tout l'objet, de sorte que les dilatations ou contractions sont très petites. En pratique, on se sert soit d'une électrode métallique, fil ou barre, montée dans un support convenable, soit d'une tige de charbon.

La chaleur de l'arc, en fondant une certaine quantité du métal de la pièce sur laquelle on travaille, fond également l'électrode, et les globules liquides vont se déposer sur la soudure, même si celle-ci est verticale. On obtient, au prix d'une dépense d'énergie relativement faible, une soudure plus régulière et de meilleure apparence que lorsqu'on emploie l'électrode de charbon.

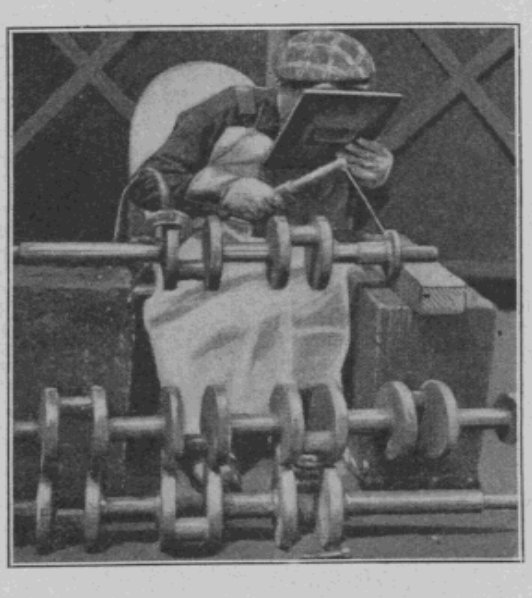


Fig. 652. — Réparation d'arbres à vilebrequin. Apport de métal par soudure électrique à arc.

Celle-ci sera donc réservée aux travaux plus grossiers dans lesquels la bonne apparence est négligeable (soudure de bâtis, bouchage de trous, etc.) ou lorsque la pièce doit être ultérieurement usinée. Comme on peut employer des courants plus intenses, on peut déposer de grandes quantités de métal, fourni par une tige auxiliaire tenue à la main et dont l'extrémité est placée au sein de l'arc électrique.

Lorsqu'il s'agit de couper une plaque métallique, ou d'enlever un excès de métal, on se sert de l'électrode de charbon que l'on maintient en un point donné jusqu'à ce que le métal, complètement liquéfié, s'écoule de lui-même.

Naturellement, le dépôt de métal dans ce procédé est de l'acier de coulée, puisqu'il ne subit aucun traitement thermique ultérieur ; il aura la structure cristalline grossière de l'acier non recuit.

Le voltage nécessaire pour alimenter un arc de soudure est faible, variant de 16 à 20 volts suivant les opérateurs ; aussi emploie-t-on en général des génératrices de courant continu donnant au maximum 60 à 75 volts aux bornes. Ce sont en général des groupes moteur-générateur dans le circuit d'utilisation desquels on intercale des résistances qui limitent l'intensité maxima du courant qui peut traverser l'arc, de façon à régler celui-ci suivant la nature du travail à exécuter. Un disjoncteur automatique, qui coupe le courant lorsque l'ouvrier laisse trop longtemps l'électrode au contact de la pièce à travailler, complète la protection de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'installation. La figure 653 montre la vue d'une installation portative de 400 ampères.

Il est difficile de donner des nombres exacts d'ampérage, vitesse d'opé-

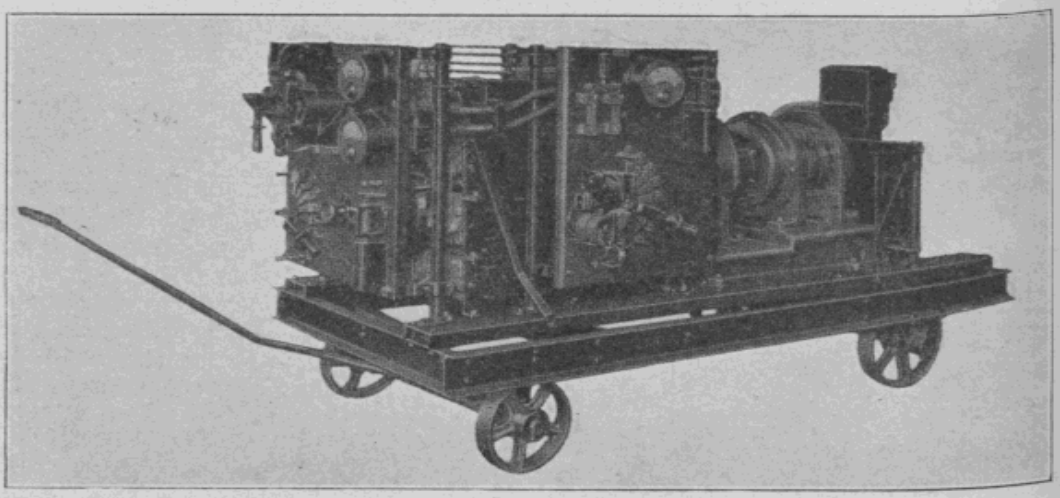


Fig. 653. — Installation portative de soudure électrique.

ration, etc., puisque ces facteurs dépendent beaucoup de l'habileté de l'ouvrier ; mais, en moyenne, on peut tabler sur les résultats suivants :

Électrode métallique.

Intensité	Travail moyen	25 à 125 ampères.
	Travail important	jusqu'à 225 ampères.
Longueur de l'arc		3 millimètres environ.

Diamètre de l'électrode.	*Ampérage.*	*Épaisseur de la plaque à travailler.*
$1^{mm},5$	25-50	jusqu'à $4^{mm},8$.
$2^{mm},5$	50- 90	jusqu'à $6^{mm},5$.
3 millimètres.	80-150	3 à 10 millimètres.
4 —	125-200	6 millimètres et au-dessus.
5 —	175-225	10 millimètres et au-dessus.

Les vitesses de soudure sont les suivantes pour les diverses épaisseurs de plaques :

$1^{mm},5$	6 mètres à l'heure.
3 millimètres.	5 —
8 —	3 —
10 —	2 —
$12^{mm},5$	$1^{m},25$ à l'heure.
20 millimètres.	$0^{m},60$ —
25 —	$0^{m},45$ —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si on compare avec la soudure oxy-acétylénique, on constate un avantage marqué en faveur de la soudure électrique, d'autant plus notable que l'épaisseur est plus grande.

Électrodes de charbon.

Intensités	Travail moyen	250 à 550 ampères.
	Travail important ou coupe moyenne	400 à 600 —
	Très gros travail ou coupage	600 à 1 000 —
Longueur de l'arc		25 à 30 millimètres.

Les intensités maxima que peuvent supporter les électrodes de graphite sont les suivantes, en fonction de leur diamètre :

Diamètre.	*Ampérage maximum.*
6 millimètres.	100 ampères.
12 —	300 —
18 —	500 —
25 —	1 000 —

Les quantités de métal que l'on peut fondre et déposer sur une surface plate à l'aide de l'électrode de charbon sont approximativement les suivantes :

Intensité.	*Poids fondu et déposé par heure.*
200	700 grammes.
300	1 300 —
400	2 000 —
500	2 750 —

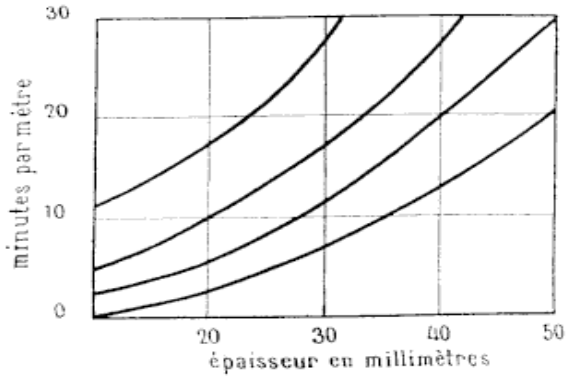


Fig. 654. — Variations de la vitesse de coupe.

Quant à la vitesse de coupe, elle varie, comme l'indique la figure 654, en fonction de l'intensité et de l'épaisseur à couper.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La soudure électrique ***par résistance*** s'appuie sur un principe tout différent : un courant très intense, pouvant atteindre plusieurs milliers d'ampères, mais sous très faible voltage, traverse les deux pièces à souder au point où l'on veut opérer leur jonction. Le dégagement de chaleur consécutif au passage du courant fait fondre le métal et, sous l'influence d'une pression convenable, les deux parties à souder adhèrent parfaitement.

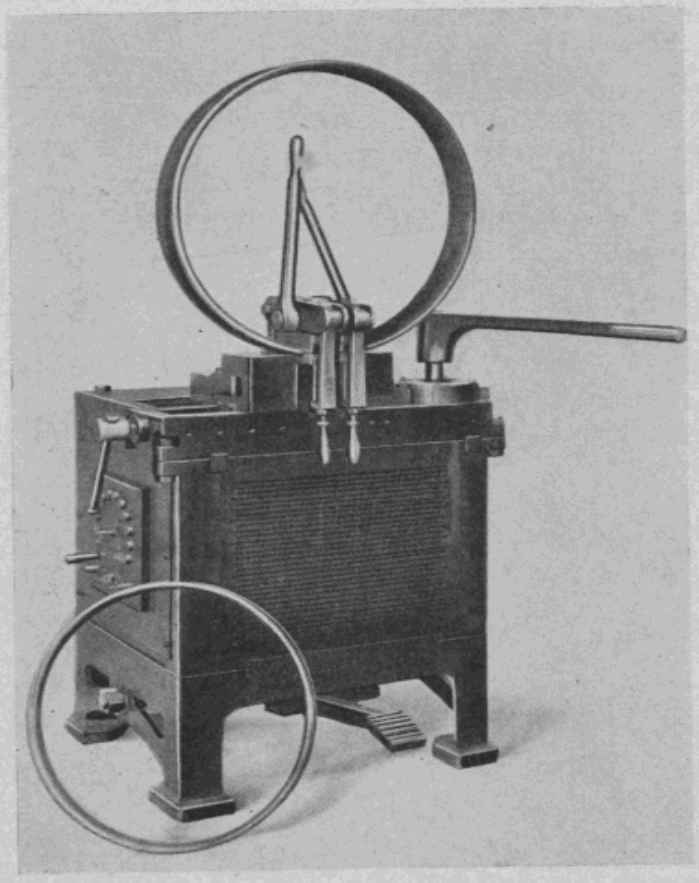


Fig. 655. — Machine à souder par rapprochement.

On peut opérer de trois façons différentes :

1° ***Par rapprochement*** ou bout à bout. Les pièces à souder sont placées dans une mâchoire en cuivre rouge qui peut être serrée à l'aide d'un levier. On appuie ensuite sur une pédale qui envoie le courant alternatif du réseau dans un transformateur placé dans le bâti de la machine. Le secondaire débite un courant très intense sur un petit voltage (2 à 4 volts) et le métal est chauffé à l'endroit où il est serré dans la machine (fig. 655). Un levier ou un cabestan comprime le métal de façon à assurer l'adhérence parfaite des pièces.

L'opération est extrêmement rapide et économique, comme le montrent les chiffres suivants :

Section en mm² *(acier doux).*	*Durée en secondes.*	*Consommation en kilowatts par 100 soudures.*
—	—	—
50	2,9	0,27
100	5,6	0,87
250	14	4,6
400	67	10,2
1 000		59

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Dans la ***soudure par points***, qui remplace avantageusement le rivage ou le sertissage des tôles, les plaques à réunir sont disposées entre

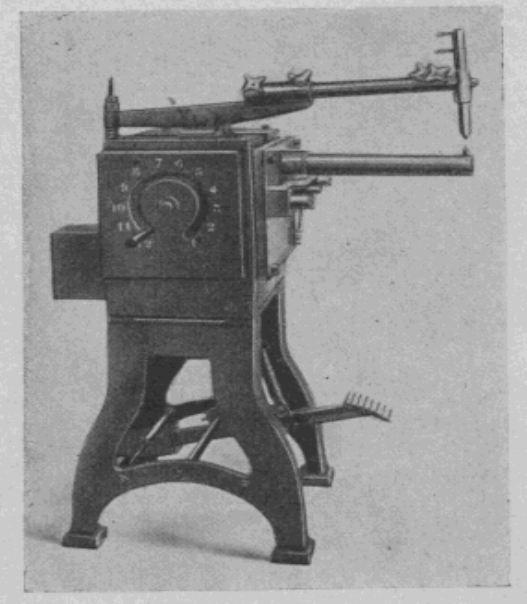


Fig. 656. — Machine à souder par points.

deux électrodes en pointes (fig. 656). En agissant sur une pédale, on abaisse l'électrode supérieure et on produit la compression tout en fermant le circuit électrique. La rapidité de ce procédé, qui supprime le perçage des trous et le matage des rivets, ressort clairement des nombres ci-dessous :

Épaisseur totale en mm. (acier doux).	*Durée en secondes.*	*Consommation en kilowatts par 100 points.*
1	0,6	0,07
2	1	0,14
4	1,8	0,25
6	2,6	0,61
8	3,4	0,99
10	4,2	1,48
12	5	2,06

4° Enfin, dans la ***soudure continue***, les deux tôles à réunir sont pressées entre deux galets servant d'électrodes (fig. 657).

Le rendement moyen est le suivant :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Épaisseur en mm.	*Vitesse en mètres par minute (soudure à la main).*	*Consommation en kilowatts par mètre.*
1	1,4	0,05
2	0,7	0,14
3	0,4	0,33

En employant des machines automatiques, la vitesse est considérablement augmentée.

Les applications de la soudure électrique par résistance sont extrêmement nombreuses : fabrication des leviers d'automobile, fixation des manches des ustensiles des batteries de cuisine, confection des fûts métalliques, soudure des jantes d'automobiles, etc.

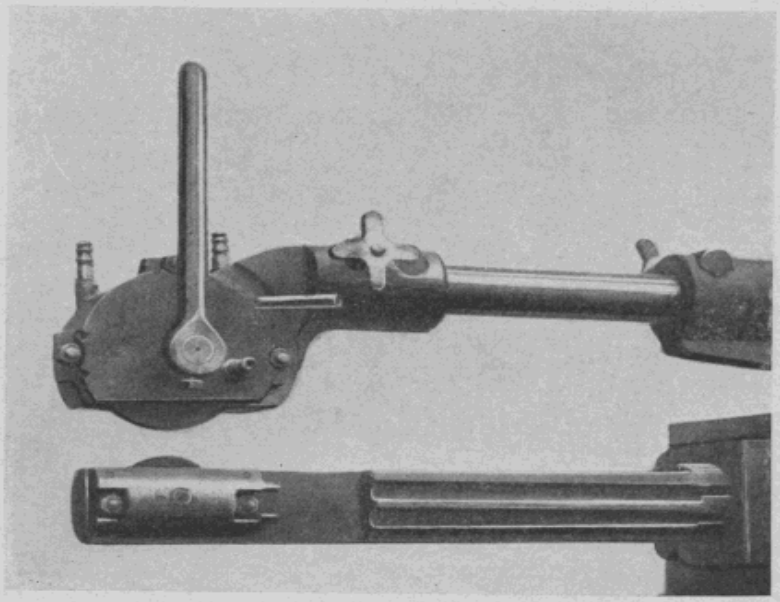


Fig. 657. — Machine à souder continue.

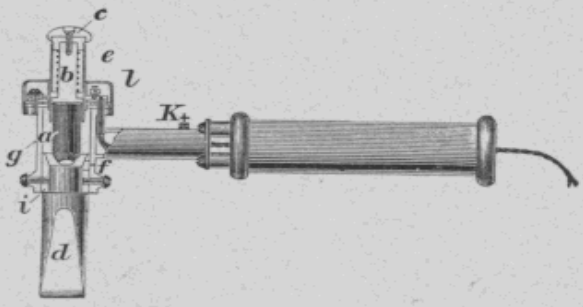


Fig. 658. — Fer à souder à arc.

* * *

Pour les petits travaux de soudure, on peut également se servir de ***fers à souder*** chauffés électriquement, soit par une résistance entourant la tête du fer, soit par un arc qui jaillit entre cette tête et une électrode, comme dans l'appareil représenté figure 658.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le fer est branché directement sur le courant du secteur. La pointe du fer qui sert à souder, *d*, forme l'électrode positive, et un charbon *a* l'électrode négative. Quand on appuie sur le bouton *c*, les deux électrodes sont amenées au contact, et en laissant le ressort antagoniste qu'il renferme le ramener en arrière, le charbon est écarté de 1 millimètre environ de l'électrode de cuivre et l'arc se forme. On l'observe par une petite fente qui permet de suivre la combustion de l'électrode de charbon. Quand la distance entre les deux électrodes augmente, l'arc s'éteint, mais il suffit de pousser de nouveau le bouton *c* pour le réamorcer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXVII

APPLICATIONS CHIMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Généralités. — Les actions chimiques produites par l'énergie électrique : électrolyse, actions calorifiques. — Avantages des procédés électrochimiques. — Applications de l'électrolyse aqueuse. — Électrolyse des chlorures alcalins. — Produits obtenus. — Méthodes de préparation de la soude : au mercure ; avec diaphragme ; avec circulation. — Appareils Kastner-Kellner, Solvay, Outhenin-Chalandre, Griesheim-Elektron, Hargroves, Bird, Townsend. — Préparation des hypochlorites. — Procédé Hermite. — Préparation des chlorates. — Électrométallurgie du cuivre. — Raffinage. — Principe de la précipitation des diverses impuretés. — Procédé Elmore. — Procédé Cowper Coles. — Extraction des métaux de leurs minerais. — Électrométallurgie de l'or et de l'argent. — Rappel de la métallurgie de l'or. — Procédé Siemens et Halske. — Affinage et récupération de l'or. — Électrozincage. — Cuivrage. — Nickelage. — Appareil Delval et Pascalis. — Argenture. — Dorure. — Galvanoplastie. — Électrométallurgie de l'aluminium.

Généralités. — Le courant électrique peut agir de différentes façons au point de vue électrochimique :

1° On peut utiliser l'action dissociatrice du courant, l'*électrolyse*, soit pour séparer les corps mélangés dans une même solution, soit pour amener des réactions secondaires d'ordre chimique entre ces corps (industries du chlore, de la soude, des hypochlorites, raffinage du cuivre, électrométallurgie de l'or, de l'argent, fabrication des matières colorantes organiques, de l'indigo, etc.).

2° On peut utiliser l'effet Joule, la chaleur dégagée par le courant, pour porter à une haute température les corps en présence. Dans ce cas, l'électricité est employée seulement comme agent calorifique et substituée au charbon (préparation des corps simples, des carbures, électrosidérurgie) (voir plus loin).

3° Enfin, on peut chercher à employer simultanément l'effet Joule du courant et son pouvoir dissociateur (préparation de l'aluminium et du magnésium).

L'électrochimie a bouleversé complètement l'économie industrielle. Par exemple, en 1900, l'électrosidérurgie était à l'état embryonnaire et semblait devoir rester confinée dans les laboratoires. Aujourd'hui, la majeure partie des ferros est produite au four électrique, et, depuis quelques années, il est utilisé industriellement pour la préparation de l'acier et même de la fonte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par contre, les préparations électrolytiques de l'oxygène, très prospères il y a vingt ans, ont complètement disparu devant le procédé de liquéfaction de l'air de G. Claude.

L'aluminium produit en trop grande quantité a amené vers 1900 une crise qui a influé notablement sur l'évolution et l'orientation de toute une partie de l'électrochimie.

Il est intéressant de rechercher les raisons d'ordre général qui ont provoqué un essor si rapide de certaines industries électrochimiques. On peut dire que l'usine électrochimique se distingue :

1° Par une mise en œuvre plus simple des matières plus directement utilisées ;

2° Par l'absence à peu près complète de sous-produits, d'où résulte une économie de main-d'œuvre ;

3° Par un meilleur rendement.

Sur les deux premiers points, il n'est pas d'exemple plus typique que la fabrication du chlorate de potasse par voie électrolytique. A des réactions secondaires près, de peu d'importance, l'opération se réduit à la fixation de l'oxygène de l'eau sur le chlorure de potassium

$$KCl + 3\,H^2O = ClO^3K + 3\,H^2.$$

Dans les anciens procédés, purement chimiques, les cinq sixièmes du chlore de KCl étaient inemployés.

On utilisait l'action du chlore sur la potasse suivant la réaction :

$$6\,Cl + 6\,KOH = 5\,KCl + ClO^3K + 3\,H^2O.$$

Le nombre des industries chimiques dans lesquelles les sous-produits peuvent rentrer dans la fabrication sans une complication extrême de la main-d'œuvre est très restreint.

Sur le troisième point, on peut dire qu'une opération chimique a un rendement le plus souvent extrêmement faible. Prenons comme exemple la réduction d'un oxyde métallique par le charbon. Pour chaque atome de carbone qui brûle aux dépens de l'oxygène de l'oxyde, le rendement est évidemment de 100 p. 100. Mais, pour provoquer la réaction, il a été nécessaire de chauffer le mélange pour l'amener à une température convenable : il a fallu dépenser une quantité de charbon supplémentaire. De plus, le mélange est placé dans des récipients que l'on chauffe de l'extérieur ; la chaleur est donc très mal utilisée.

Par exemple, d'après les données thermochimiques, pour la réduction de l'oxyde de zinc, il faut fournir 1 300 grandes calories par kilogramme de zinc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans la pratique, on compte sur une consommation de 10 kilogrammes de charbon par kilogrammes de zinc produit. En admettant pour le charbon un pouvoir calorifique de 7 500 calories au kilogramme en moyenne, on trouve que la quantité de chaleur réellement fournie est 56 fois plus grande que la quantité théorique : le rendement ressort à 1,8 p. 100. C'est faible, et l'on conçoit que l'on ait cherché à produire l'énergie nécessaire à la réaction par un autre procédé que la combustion du charbon à l'extérieur. C'est précisément ce que l'on demande au four électrique. Dans des expériences faites en 1903, à l'usine électrochimique de Crampagna (Ariège), pour la réduction de l'oxyde de zinc, le calcul de l'énergie consommée conduit à un rendement de l'ordre de 30 p. 100.

En métallurgie, l'emploi du four électrique présente les avantages suivants :

1° La température est plus élevée que dans les fours industriels. Les réactions y seront par suite plus complètes et, en raison même de l'élévation de la température, il sera possible de produire des réactions nouvelles et d'utiliser des réducteurs nouveaux.

2° La source de chaleur est intérieure ; le rendement sera, par suite, meilleur. De plus, pour les réactions se produisant à très haute température, on évitera la détérioration rapide des récipients.

3° La température très élevée permet, dans les opérations métallurgiques, la formation de scories fondues, faciles à séparer du métal. La possibilité de refroidir les parois autorise des compositions de scories, acides, basiques, ou fluorées, très corrosives, qu'on ne peut admettre dans les fours métallurgiques ordinaires.

4° Le réglage de la température est plus facile par une simple manœuvre électrique. On pourra ainsi surchauffer, à un moment donné, pour une addition ou une coulée.

5° Enfin, l'atmosphère n'est pas oxydante.

L'étude des applications du courant électrique à la chimie mériterait des développements incompatibles avec le cadre forcément très limité du présent volume ; aussi ne pourrons-nous citer que quelques exemples particulièrement typiques et présentant une grande importance industrielle.

* * *

Nous commencerons par dire quelques mots des applications de l'***électrolyse aqueuse***, dans laquelle les corps à décomposer sont mis en solution dans l'eau. L'exemple le plus caractéristique est celui de l'électrolyse des chlorures alcalins, tant par la place qu'elle occupe dans l'industrie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chimique que par la variété des produits qu'elle permet d'obtenir et qui constitue la meilleure illustration de la souplesse d'action du courant électrique.

Le tableau suivant montre les divers produits que l'on peut produire suivant les conditions expérimentales dans lesquelles on se place.

ÉLECTROLYSE PAR VOIE HUMIDE	Sans diaphragme.	Cathode solide	A chaud.	Chlorates.
			A froid..	Hypochlorites.
		Cathode liquide.	Alcalis et chlore.	
	Avec diaphragme.	Utilisation directe des produits.		Alcalis et chlore.
		— indirecte	—	Hypochlorites.
ÉLECTROLYSE PAR FUSION IGNÉE	Avec cathode solide.			Métaux, sodium, lithium.
	— liquide.			Alliages, alcalis et chlore.

Cette variété de produits constitue même une des difficultés du problème, car il faut empêcher les deux corps libérés, chlore et soude, par exemple, de se recombiner.

En effet, l'électrolyse du chlorure de sodium donne lieu à des réactions secondaires dont nous allons dire quelques mots.

Sous l'influence du courant, les ions Na et Cl se séparent.

Puis, le sodium se trouvant au contact de la solution et par suite en présence d'eau, donne la réaction :

$$Na + H^2O = NaOH + H.$$

Supposons que les compartiments anodique et cathodique ne soient pas séparés.

Le chlore, au contact de la soude, donnera du chlorate, si la solution est concentrée et chaude, suivant la réaction :

$$6\,Cl + 6\,NaOH = 5\,NaCl + ClO^3Na + 3\,H^2O,$$

et de l'hypochlorite si la solution est étendue et froide, suivant la réaction :

$$2\,Cl + 2\,NaOH = NaCl + ClONa + H^2O.$$

En réalité, on aura les deux réactions à la fois. De plus, le chlorate et l'hypochlorite au contact de l'hydrogène provenant de l'action du sodium sur l'eau sont partiellement réduits, tout au moins l'hypochlorite.

Si l'on ajoute une petite quantité d'alcali, les débuts de l'électrolyse sont les mêmes ; mais, à mesure que la quantité d'alcali augmente, la teneur limite en hypochlorite diminue, de même que la réduction. Par contre, le dégagement d'oxygène augmente par suite de l'électrolyse secondaire de l'eau. Avec 5 p. 100 d'alcali, on ne constate plus la formation d'hypochlorite et la réduction tombe à zéro.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'élévation de température agit à la façon des alcalis ; mais on peut toujours constater (lorsqu'il n'y a pas d'alcali) la présence de l'hypochlorite.

L'augmentation de la densité de courant favorise d'une façon générale le dégagement d'oxygène et augmente la différence de potentiel aux bornes ; à la cathode pourtant, elle diminue la réduction.

En résumé, l'étude des réactions successives montre :

1° Que l'on peut obtenir des hypochlorites et chlorates par électrolyse directe des chlorures alcalins, dans des appareils sans diaphragme ;

2° Que l'on ne peut obtenir par électrolyse directe que des hypochlorites à teneur excessivement faible ;

3° Que le chlorate se fait aussi bien à froid qu'à chaud, mais que l'on a tout intérêt à le fabriquer vers 60° à 80°.

Il faut donc séparer le chlore et la soude au fur et à mesure de leur production.

Un grand nombre de dispositifs ont été proposés pour résoudre cette question. Nous n'indiquerons que ceux effectivement exploités.

* * *

On peut distinguer trois méthodes de ***préparation électrolytique de la soude :***

1° La méthode au mercure.
2° La méthode avec diaphragme.
3° La méthode avec circulation.

La ***méthode au mercure*** consiste à amalgamer le sodium au moment de sa libération à la cathode, puis à décomposer l'amalgame produit à l'abri du liquide anodique, soit dans le bac électrolytique même, soit dans un décomposeur spécial. L'amalgame alcalin ne se décompose, en effet, à température ordinaire, au contact de l'eau, avec une vitesse appréciable, que s'il est mis en contact avec un métal étranger : fer, cuivre, platine... ; dans ces conditions, alors, le dégagement d'hydrogène corrollaire de la réaction :

$$Na + H^2O = NaOH + H$$

se produit abondamment.

L'inattaquabilité de l'amalgame à la cathode ne provient donc pas du potentiel cathodique de la surface mercurielle, mais de la force électromotrice élevée que nécessite l'hydrogène pour se dégager du mercure ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aussi y a-t-il parfois libération d'hydrogène sur la surface mercurielle que traverse le courant. L'amalgame de potassium se décompose plus facilement que celui du sodium.

Cette décomposition est obtenue en mettant l'amalgame en court-circuit avec un autre métal, le fer en général, soit dans l'électrolyseur lui-même qui est alors cloisonné en deux compartiments, l'un d'amalgamation, l'autre de désamalgamation, entre lesquels le mercure circule automatiquement (système *Kellner*), soit dans un décomposeur spécial où le mercure est conduit mécaniquement (système *Solvay*)

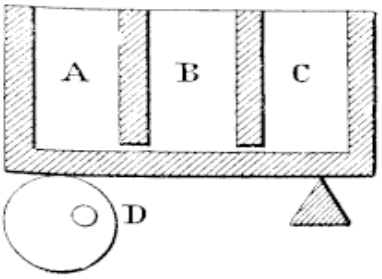


Fig. 659. — Schéma de l'appareil Kastner-Kellner.

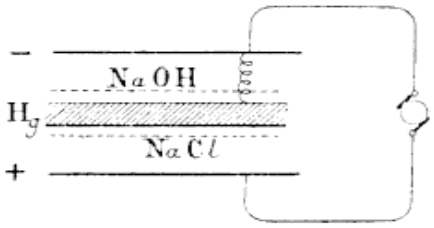


Fig. 660. — Principe du fonctionnement de l'appareil Kastner-Kellner.

Procédé Kastner-Kellner. — La cuve est divisée en trois compartiments (fig. 659), un négatif B, deux positifs A et C agissant à tour de rôle. Une came D permet de donner à la cuve un léger mouvement de balancement et, pendant que le mercure régénéré passe de B en A par exemple, l'amalgame formé en C passe dans le compartiment B.

Le principe du procédé est représenté schématiquement par la figure 660.

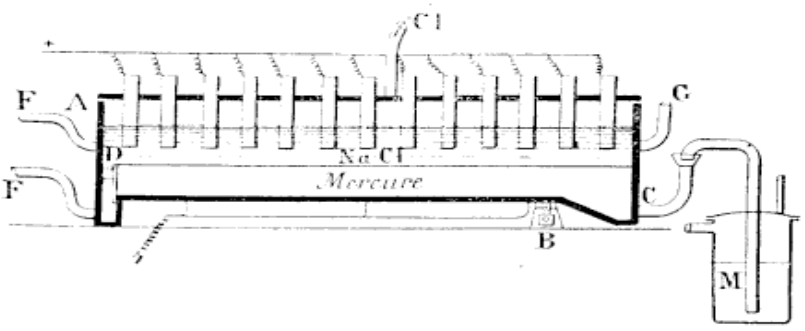


Fig. 661. — Schéma de l'appareil Solvay.

Procédé Solvay. — Les bacs ne sont pas cloisonnés, mais le mercure, aussi bien que le liquide d'électrolyse, circule continuellement dans le même sens. On évite ainsi la formation de chlorure mercureux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le chlore dissous et l'appauvrissement en sel de la surface liquide contiguë à la cathode.

L'appareil se compose (fig. 661) d'une simple cuve rectangulaire A dont la surface, aussi grande que l'on veut, permet une production considérable. Le fond est toujours couvert de mercure qui arrive par C, le trop plein est en D et le mercure s'échappe par le tube inférieur F. La saumure circule en sens inverse, entre par le tube supérieur F et sort en G. Le système anodique est formé de charbons disposés en quinconce. Un monte-jus M ramène dans l'appareil le mercure régénéré.

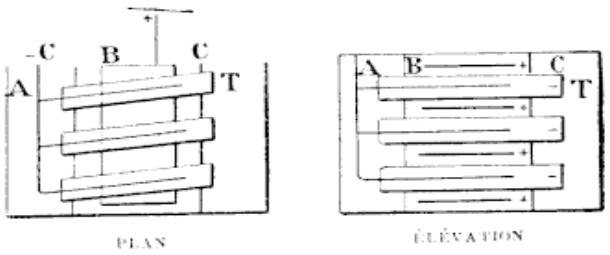


Fig. 662. — Schéma de l'appareil Outhenin-Chalandre.

La tension de décomposition du NaCl entre mercure et charbon étant de 3,2 volts au lieu de 2,2 volts entre charbon et fer, par exemple, la substitution du mercure au fer dans ces procédés provoque une élévation de la force électromotrice nécessaire dans chaque bac. C'est un inconvénient qui est compensé par la diminution de distance liquide entre les pôles actifs et la suppression de la résistance du diaphragme.

* * *

Dans le ***procédé au diaphragme***, on essaye d'empêcher les produits formés à l'une des électrodes de réagir sur ceux formés à l'électrode contraire. De nombreux systèmes ont été proposés. Nous citerons seulement le principe de quelques-uns.

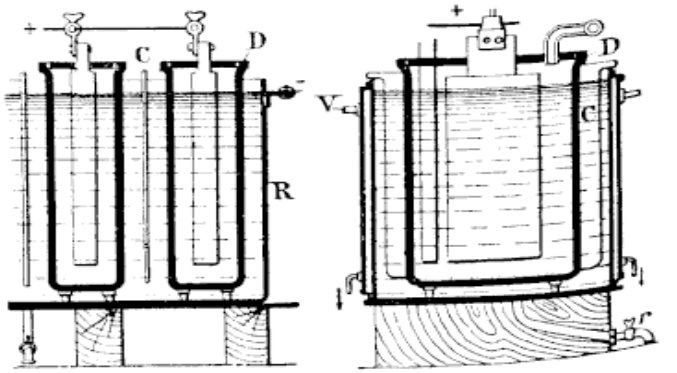


Fig. 663. — Schéma de l'appareil Griesheim-Elektron.

Procédé Outhenin-Chalandre. — Les diaphragmes sont disposés dans l'électrolyseur comme les tubes d'une chaudière (fig. 662). Le compartiment cathodique est formé des chambres A et C de l'appareil et de l'intérieur des tubes T. Le compartiment cathodique est formé de la chambre B extérieure aux tubes T.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Procédé Griesheim-Elektron. — L'appareil est formé d'une série de cuves poreuses en ciment D, montées en quantité dans un vase cathode R (fig. 663).

Les compartiments sont alimentés séparément et les parois sont portées par la vapeur à la température de 90° environ.

Procédé Hargreaves-Bird. — La cathode est formée d'une toile métallique et on fait filtrer au travers le liquide venant de l'anode.

L'électrolyseur se compose d'une cuve contenant deux diaphragmes spéciaux B, B entre lesquels arrive la solution à électrolyser ; dans cette solution plongeant les anodes A, en charbon. Tout contre le diaphragme B sont les cathodes en toile de cuivre (fig. 664).

Lorsque la soude se forme à la cathode, elle est entraînée par la vapeur d'eau que l'on envoie dans la cellule cathodique ; de plus, on fait passer un courant d'anhydride carbonique qui donne du bicarbonate.

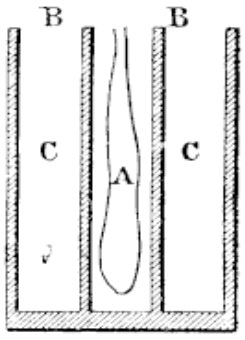


Fig. 664. — Schéma de l'appareil Hargreaves-Bird.

Procédé Townsend. — C'est un procédé analogue au procédé Hargreaves-Bird, mais l'originalité consiste à soustraire le liquide circulant à toute action nuisible, soit du courant, soit résultant du mélange avec les liquides voisins, dès qu'il a subi l'enrichissement cathodique. A cet effet, il passe automatiquement dans un récipient contenant de l'huile minérale.

L'appareil se compose d'un bâti parallélépipédique très aplati en ciment armé, dont les deux faces les plus rapprochées portent des plaques de fer criblées servant de cathodes ; à celles-ci, vers l'extérieur, se trouvent juxtaposés les réservoirs d'huile, tandis que vers l'intérieur un diaphragme d'amiante poreux tapissé d'hydrate de fer (*Birkeland*) retient le liquide anodique, au sein duquel baignent, dans le plan médian de la cuve, des prismes de graphite constituant les électrodes. Une pression hydrostatique fait filtrer à travers le diaphragme et la cathode le liquide qui suinte en gouttelettes dans la couche d'huile isolante.

* * *

Enfin, le ***procédé par circulation*** se rattache directement au précédent, mais la cloison poreuse est éliminée. L'anode se trouve enfermée dans une cloche en fonte ouverte vers le bas et dont la surface interne est électriquement isolée ; la face externe joue l'office de cathode (fig. 665).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'alcali descend par suite de sa densité et forme une couche plus lourde au fond du bac ; cette couche tend à être transportée à l'anode par le courant.

La vitesse de progression de cette couche est fonction de la force électromotrice dépensée par centimètre de liquide, entre les électrodes, pour le transport du courant.

Pour combattre cette tendance, on fait avancer à l'intérieur de la cloche un courant liquide de saumure fraîche qui se dirige en sens inverse de la couche alcaline. Une quantité de liquide caustifié, égale à celle qui entre à l'anode, s'écoule du compartiment cathodique par un trop-plein. Pour que le contre-courant liquide puisse produire son effet, il faut évidemment

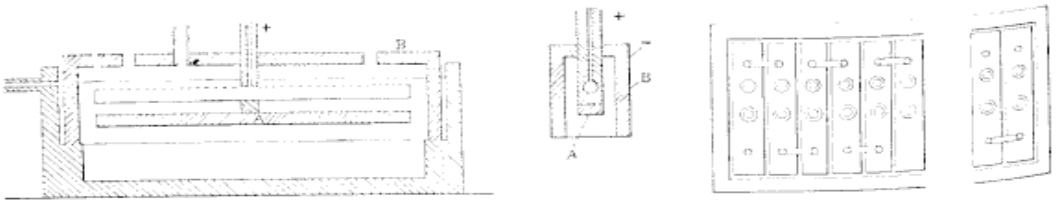


Fig. 665. — Schéma du procédé à cloche. Le liquide arrive doucement au-dessus de l'anode A et passe sous le bord inférieur de la cloche B.

que le mélange des liquides soit évité, ce qui nécessite que le mode de distribution du liquide neuf dans la cloche soit particulièrement bien étudié et réglé. Afin d'écarter les pertes que pourrait provoquer le déréglage d'une cloche de grande dimension, on emploie une série de petites cloches réparties dans un grand bac.

* * *

Parmi les ***composés du chlore*** que l'on peut préparer par voie électrolytique, il en est de très importants au point de vue industriel. Ce sont :

1° L'hypochlorite de soude ou eau de Javel, mélange d'hypochlorite de sodium et de chlorure de sodium ;

2° Le chlorure de chaux, dont la composition est :

$$2\,Ca\begin{cases}Cl\\OH\end{cases} + Ca\begin{cases}OCl\\OH\end{cases} + 2\,H^2O.$$

Il serait formé, par suite, de deux molécules d'un oxychlorure de formule $Ca\begin{cases}Cl\\OH\end{cases}$ et d'une molécule d'hypochlorite $Ca\begin{cases}OCl\\OH\end{cases}$;

3° Les chlorates de sodium et de potassium employés pour la fabrication des explosifs et la production d'oxygène ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4° Les perchlorates de sodium et potassium.

L'un des procédés les plus simples de préparation des hypochlorites est le ***procédé Hermite***. Le liquide employé est une solution comprenant 50 kilogrammes de chlorure de sodium, 5 kilogrammes de chlorure de magnésium pour 1 000 litres d'eau.

L'appareil consiste en une cuve en fonte galvanisée, ayant à la partie inférieure un tube perforé d'un certain nombre de trous et munie d'un robinet en zinc. La dissolution entre dans l'électrolyseur par ce tube. Le haut de la boîte en fonte galvanisée est muni d'un rebord formant canal. Le mouvement du liquide est continuel et se fait de bas en haut. La solution débordant dans le canal est emmenée par une tuyauterie.

Les cathodes sont formées par un certain nombre de disques en zinc, montés sur deux arbres tournant lentement.

Entre chaque paire de disques en zinc, sont placées les électrodes positives, dont la surface est constituée par de la toile de platine maintenue par un disque en ébonite, qui donne la rigidité nécessaire à l'anode.

La barre de cuivre à laquelle sont fixées les électrodes positives est en communication avec le pôle positif de la dynamo.

Les disques de zinc constituant les cathodes communiquent par la boîte en fonte avec le pôle négatif.

Si on emploie plusieurs électrolyseurs, on les monte en série. Le courant employé est de 1 000 à 1 200 ampères, et la force électromotrice de 5 volts.

Ces appareils fonctionnent dans un grand nombre de papeteries.

Pour la ***fabrication du chlorate***, on emploie deux méthodes différentes.

Dans la première, un diaphragme sépare l'alcali du chlore, et on opère un transport régulier de l'alcali formé dans la cellule à la cellule positive afin de l'amener au contact du chlore.

Dans la seconde méthode, on électrolyse le chlorure en présence d'alcali sans utiliser de diaphragme, mais il faut alors se servir d'anodes en platine (procédés Gall et Montlaur, Hurteru, Franchot et Gilles, etc.).

* * *

Comme second exemple des applications chimiques de l'énergie électrique, nous citerons l'***électro-métallurgie du cuivre***. Elle peut avoir deux buts distincts :

1° Servir à purifier le composé obtenu par une opération chimique, ce qu'on appelle *raffiner* le produit brut ;

2° Servir à extraire directement le métal de son minerai par électrolyse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le principe général du raffinage des métaux par voie électrolytique est le suivant : si, dans une cuve contenant un bain de composition convenable, on utilise comme anodes des plaques en métal que l'on veut purifier et comme cathode des plaques en même métal, mais pur, sous l'influence du courant l'anode se dissout et un dépôt métallique se fait sur la cathode.

Si on opère dans des conditions convenables de composition de bain, d'ampérage, de température, on peut obtenir un dépôt constitué par un métal pur.

Deux cas peuvent se présenter :

1° Les métaux ou corps étrangers qui constituent les impuretés sont plus électro-négatifs que le métal à déposer; alors, ils se déposent en forme de boue au fond des cuves ;

2° Les impuretés sont plus électro-positives ; elles s'accumulent dans le bain sous forme de sels.

Dans cette opération du raffinage, l'énergie consommée est extrêmement faible; en théorie, elle est nulle ; en effet, il n'y a dépense que par suite du transport des ions et des résistances à vaincre, résistance des conducteurs, polarisation, etc. Toutefois, ces résistances sont très petites, et il faut noter que le raffinage électrolytique du cuivre peut être exploité avec succès sans avoir recours aux chutes d'eau.

C'est, avec la galvanoplastie et le nickelage, la seule industrie électrolytique à laquelle on puisse attribuer de très sérieux avantages, tout au moins au point de vue de sa généralisation, c'est-à-dire de son établissement en un lieu quelconque.

Si on envisage spécialement la question du raffinage du cuivre, il est de toute nécessité de rappeler les expériences de Kiliani. C'est, en effet, sur les résultats obtenus par ce savant que reposent les méthodes de raffinage.

En classant les métaux qui se rencontrent dans le cuivre brut suivant leurs chaleurs d'oxydation, on remarque qu'ils se suivent dans cet ordre :

Manganèse, zinc, fer, étain, cadmium, cobalt, nickel, plomb, arsenic, bismuth, antimoine, cuivre, argent et or.

Les métaux qui précèdent le cuivre doivent, d'après le principe du travail maximum, passer avant lui en solution ; seuls l'or et l'argent se dissolvent après lui.

Réciproquement, si on considère les métaux dissous dans le bain, ils devront se déposer, sous l'influence du courant, suivant un ordre inverse du précédent ; c'est-à-dire que l'or et l'argent se déposeront tout d'abord, puis le cuivre et ensuite les autres métaux.

On conçoit alors aisément quel parti on peut tirer de ce fait ; mais il se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complique par suite de la présence de quelques autres impuretés, notamment des oxydes et des sulfures qui ont pris naissance dans le traitement métallurgique.

L'attaque des anodes ne se produit pas, comme on pourrait le croire, de la surface au centre. On constate, au contraire, que les parties centrales sont rouges avant que tout le cuivre de la périphérie soit entré en solution.

Les conditions à remplir pour avoir un bon dépôt sont :

1° Une circulation rapide du bain qui y détermine une agitation ;

2° Une constance aussi absolue que possible de l'acidité du bain ;

3° De même pour la teneur en cuivre du bain ;

4° Un courant dont l'intensité ne dépasse pas 30 à 40 ampères par mètre carré d'électrode.

Dans les procédés ordinaires, le gros inconvénient consiste dans le changement relativement fréquent de l'électrolyte devenu impur par suite des corps étrangers qui s'y sont dissous. On serait alors conduit à ne soumettre à l'électrolyse que les cuivres déjà purifiés, mais contenant des métaux précieux. C'est généralement ce qui se fait.

On a proposé certains perfectionnements qui permettent de changer moins fréquemment l'électrolyte. Un seul est à retenir : c'est l'insufflation d'air.

Si, dans un bain dans lequel se trouvent de l'arsenic, du nickel, du cobalt et du fer, on vient à insuffler de l'air, ces impuretés se précipitent sous forme d'arséniates.

* * *

Le dépôt électrolytique d'un métal a un aspect cristallin, et par suite une faible résistance mécanique. Il faut donc, si l'on veut obtenir un produit marchand, faire subir au dépôt une modification en cours de formation.

Elmore a cherché à préparer des tubes en cuivre de grand diamètre par électro-dépôt ; ces tubes ainsi préparés ne présentent pas de soudure et, par suite, possèdent la résistance mécanique maximum.

Le principe de l'appareil consiste à comprimer le dépôt métallique qui se forme sur un mandrin tournant.

La cathode (fig. 666) est formée d'un mandrin en acier A. Pour empêcher l'adhérence du dépôt sur ce mandrin, on le recouvre d'une mince couche de cuivre que l'on oxyde ensuite ; l'anode B, en cuivre brut, est coulée en forme d'U, de façon à régulariser le dépôt. La cathode est animée d'un mouvement de rotation, grâce aux roues dentées C et D, actionnées par la poulie E ; le courant est amené à la poulie F par le balai G. Le polis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sage est obtenu au moyen de brunissoirs en agate, montés dans un support animé d'un mouvement de va-et-vient par l'axe fileté J, tournant alternativement dans un sens et dans l'autre. Ce double mouvement est obtenu de la façon suivante : la tige K est articulée avec un levier L permettant, suivant que la pièce M est poussée à droite ou à gauche, d'embrayer ou de désembrayer les poulies O et N pouvant tourner en sens inverse l'une de l'autre au moyen d'une courroie droite et d'une courroie croisée, fixées sur le même arbre.

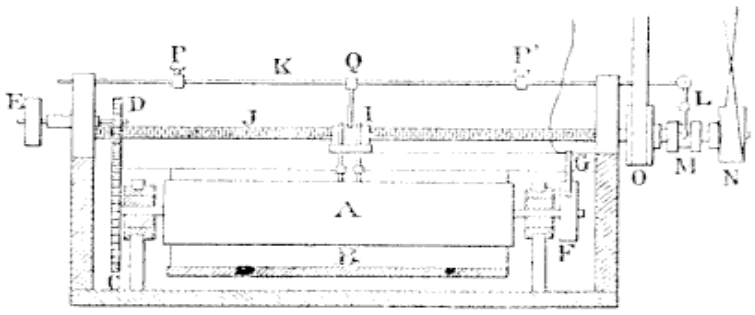


Fig. 666. — Schéma de l'appareil Elmore.

L'embrayage et le désembrayage des poulies permettant ce double mouvement est produit grâce à deux taquets P et P′ contre lesquels vient butter la pièce fixée au support des brunisseurs quand ceux-ci sont à fond de course.

On obtient par ce procédé, utilisé en France par l'usine de Dives-sur-Mer, des tubes ayant jusqu'à $2^{m},5$ de diamètre et $3^{m},5$ de long.

On peut obtenir également du cuivre en planches en coupant les cylindres suivant une génératrice, et des fils en coupant le tube en un ruban hélicoïdal que l'on tréfile ensuite.

On peut accroître la densité de courant et, par suite, la vitesse du dépôt tout en conservant au cuivre ses qualités, en augmentant la circulation de l'électrolyte ; mais la vitesse du liquide, dans ces conditions, ne peut jamais être considérable ; de plus, elle est irrégulière. On a, au contraire, une action beaucoup plus régulière et une vitesse beaucoup plus grande si, au lieu de faire circuler l'électrolyte, on fait tourner la cathode. C'est le principe du ***procédé Cowper-Coles.***

Une cuve de bois sert de récipient ; on y suspend les anodes en cuivre brut coulé en forme de gros tubes. La cathode est formée d'un cylindre axial en laiton, légèrement graissé pour éviter l'adhérence du dépôt et permettre de le détacher facilement. Si l'on veut obtenir du cuivre en ruban, on enroule en hélice, sur la surface de la cathode, un fil en substance isolante, en faisant le pas de l'hélice égal à la largeur du ruban que l'on désire. Une fois l'opération finie, on coupe le tube suivant cette hélice et on déroule le ruban après avoir recuit le métal. Pour avoir des plaques, on coupe le tube suivant une génératrice. La cathode porte à la partie supérieure un anneau en permettant la manœuvre facile et une large

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bague sur laquelle frottent les balais, reliés au pôle négatif de la source d'électricité. Le porte-balai est mobile autour d'un axe, ce qui permet d'écarter les balais pour retirer la cathode. Au bas de la cathode se trouve un plateau, à bord relevé, fait en matière isolante, qui empêche la formation du dépôt à l'extrémité inférieure où il est généralement irrégulier et couvert de nodules.

L'électrolyte est aussi en mouvement ; il est injecté dans la cuve tangentiellement aux parois, soit par une pompe, soit par l'air comprimé ; à sa sortie de l'électrolyseur, il est filtré pour en retirer les boues qu'il renferme.

L'électrolyse donne les meilleurs résultats pour la composition suivante :

Eau	74,36 p. 100 en poids.
Acide sulfurique	10,77 —
Sulfate de cuivre	14,87 —

* * *

On peut, d'une façon générale, employer deux méthodes pour ***extraire électrolytiquement les métaux de leurs minerais*** : utiliser directement le minerai comme anode soluble, mais il faut alors qu'il soit conducteur, et cette méthode n'a pas donné de bons résultats ; ou faire subir au minerai un traitement préalable pour le faire passer en solution. Le liquide obtenu est soumis à l'électrolyse et on utilise des anodes insolubles. La dépense en énergie électrique est élevée et on ne peut éviter le phénomène de polarisation qu'en faisant intervenir une réaction secondaire.

En effet, lorsque l'on électrolyse du sulfate du cuivre, on sait qu'il se sépare en deux ions :

$$SO^4Cu = SO^4 + Cu,$$

l'ion SO^4 réagira sur l'eau et donnera :

$$SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O.$$

Cet oxygène produira la polarisation que l'on ne pourra éviter qu'en faisant intervenir des corps pouvant s'emparer de cet oxygène.

Bien que l'extraction du cuivre par voie électrolytique n'ait pas donné tous les résultats que l'on pouvait attendre, nous citerons le ***procédé Siemens***.

Il est caractérisé par l'emploi du sulfate ferreux comme dépolarisant. Ce sel en effet donne avec l'ion SO^4 la réaction :

$$2\,SO^4Fe + SO^4 = (SO^4)^3Fe^2.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On évite ainsi l'action des ions SO^4 sur l'eau et par conséquent la production d'oxygène. Le procédé Siemens utilise des minerais pauvres, contenant 4 à 5 p. 100 de cuivre. Il comprend les opérations suivantes :

1° Pulvérisation du minerai dans un broyeur.

2° Attaque du minerai pulvérisé par la solution de sulfate ferrique provenant d'une opération préalable. On a la réaction :

$$(SO^4)^3Fe^2 + Cu = SO^4Cu + 2\,SO^4Fe.$$

Cette réaction a lieu dans une cuve en bois munie d'un agitateur et chauffée par un serpentin en plomb dans lequel circule la vapeur.

3° La liqueur ainsi obtenue passe à travers un filtre, qui sépare le minerai épuisé du liquide électrolytique.

4° Celui-ci se rend ensuite dans un bac qui est en surcharge dans les cuves électrolytiques. Après électrolyse, le liquide sort de la série des bains et retourne dans la cuve.

L'opération est continue ; le nombre des cuves d'électrolyse, le courant et la vitesse d'écoulement du liquide sont calculés de façon que, à la sortie des cuves, le liquide ne contienne plus de cuivre et soit à ce moment riche en sulfate ferrique. Il peut alors servir à opérer une nouvelle dissolution du minerai.

Dans ce procédé, la densité du courant atteint 120 ampères par mètre carré de cathode.

* * *

La ***métallurgie de l'or et de l'argent*** a profité des méthodes électrolytiques qui ont permis le traitement de minerais résiduaires trop pauvres pour être exploités par les procédés ordinaires. Rappelons brièvement tout d'abord les principes de l'extraction de l'or.

Le minerai est séparé des poussières qui représentent le quart du minerai et renferment le vingtième environ de l'or total. Ce minerai est broyé en présence d'une grande quantité d'eau de façon à former une boue liquide, la *pulpe*, que l'on filtre sur un tamis et que l'on déverse sur la *table d'amalgamation*. Cette dernière est constituée par une plaque de cuivre, recouverte de mercure, qui s'allie immédiatement à l'or. L'amalgame est ensuite séparé et distillé.

On retire ainsi de 60 à 70 p. 100 de l'or contenu dans le minerai.

La boue restante est traitée par le cyanure de potassium qui dissout l'or ; ce dernier est précipité soit par le zinc (procédé *Mac Arthur et Forest*), soit par le couple zinc-plomb (procédé *Betty*), soit par électrolyse (procédé *Siemens et Halske*).

Cyanuration. — La pulpe sortant de la table d'amalgamation tombe sur une *table à secousses*, qui permet de recueillir les *concentrés* formés de pyrites et de sables riches en or. Elle est ensuite envoyée dans une caisse où se fait la séparation en *tailing*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ormés de sables qui se déposent, et en boues (*slimes*) qui sont évacuées dans une autre cuve. Ces boues sont formées principalement d'argile.

Ces trois produits, de richesse très différente, sont traités chacun d'une façon spéciale.

Les *concentrés* renferment 30 grammes d'or à la tonne, quelquefois 90 et jusqu'à 210 grammes et représentent 2,5 p. 100 du minerai : les *tailings* contiennent 6 à 9 grammes et représentent 50 p. 100 du minerai ; enfin les *slimes* tiennent 15 grammes et représentent 12 à 13 p. 100 du minerai.

Les *concentrés* sont en général traités par grillage et chloruration. Les *tailings* sont lessivés dans des cuves à filtre avec des solutions de cyanure de potassium contenant de 0,05 à 0,1 p. 100 de sel ; la durée du lessivage est de six à dix jours. La dissolution de l'or est assez lente : on ne peut donc traiter ainsi que les minerais renfermant l'or en parcelles très fines ; c'est pourquoi on ne peut employer uniquement la cyanuration ; on doit toujours la faire précéder de l'amalgamation.

Pour les *slimes*, il suffit d'une solution à 0,01 p. 100 de cyanure avec laquelle on les agite pendant cinq ou six heures ; on laisse décanter pendant un temps qui varie suivant la constitution physique de ces boues, mais qui est en moyenne de huit à douze heures et, après la séparation de la boue, la solution d'or est décantée et filtrée sur un banc de sable. On répète le traitement au moins trois fois avec des solutions de plus en plus diluées.

L'or se dissout dans le cyanure grâce à une oxydation, comme l'indique la formule :

$$2\,Au + 4\,CyK + O + H^2O = 2\,KAuCy^2 + 2\,KOH.$$

Cette oxydation se fait sous l'influence de l'oxygène de l'air en solution dans l'électrolyte ; cette quantité est d'ailleurs excessivement faible, étant donnés le poids atomique considérable de l'or et la faible quantité de ce métal à faire entrer en solution.

La différence de grosseur des grains de métal explique la différence de temps nécessaire pour la dissolution du métal contenu dans les deux sortes de produits traités.

Toutes les espèces de minerais ne peuvent être traitées par le cyanure. Il faut, en effet, qu'ils ne renferment aucune matière détruisant le cyanure de potassium ; les composés du cuivre et du zinc que l'on rencontre fréquemment avec les minerais d'or sont donc nuisibles, de même que les matières organiques.

Il faut maintenant retirer l'or de la solution cyanurée.

Dans le procédé Mac Arthur et Forest, on traite la solution de cyanure double d'or et de potassium par du zinc en frisure ou en planure. La boue obtenue, traitée par l'acide sulfurique, est débarrassée de l'excès de zinc et des métaux étrangers. Bien que très simple, ce procédé présente des inconvénients notables : les solutions traitées ne doivent pas contenir de métaux précipitant par le zinc (cuivre, plomb) qui viendraient souiller l'or ; il faut que le zinc soit pur, les métaux étrangers qu'il contient se retrouvant dans l'or ; enfin, pour que l'épuration se fasse bien, il faut que la solution soit riche en cyanure, dont une partie est détruite par le zinc, d'où perte de zinc et de cyanure ; c'est le principal inconvénient de cette méthode.

Dans le procédé Betty, on remplace le zinc par un couple plomb-zinc obtenu en plongeant rapidement la tournure de zinc dans une solution faible d'acétate de plomb.

Enfin, dans le ***procédé Siemens et Halske***, on extrait l'or par électrolyse. On emploie le plomb comme cathode, l'or y adhère fortement et il est facile de le récupérer ensuite par fusion et coupellation. Les anodes sont en fer, entourées de toiles pour retenir le bleu de Prusse formé, par suite de la production de ferrocyanure dont la teneur dans la solution ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut donc pas augmenter. Elles durent très longtemps, et le cyanure de potassium peut être en partie retiré du bleu de Prusse.

La densité de courant est d'environ 0,5 ampère par mètre carré d'électrode, avec une tension aux bornes de 2 volts.

* * *

A côté de l'extraction de l'or de son minerai, l'électrolyse permet de l'***affiner***, c'est-à-dire de le purifier par une simple électrolyse, comme dans le cas du cuivre. Il en est de même pour l'argent, et on arrive ainsi à préparer des métaux titrant 999,5 à 999,8.

On peut également par électrolyse récupérer le cuivre et les métaux précieux contenus dans les résidus de toute sorte, bijoux, galons, passementerie, etc.

Le principe de l'opération est le suivant. On emploie comme électrolyte une solution de nitrate de cuivre légèrement acide ; les métaux, sauf l'or et le platine, se dissolvent à l'anode ; l'argent est ensuite précipité par le cuivre qui se dépose à la cathode.

Le résidu anodique renferme de l'or, du platine, de l'acide stannique, de l'azotate basique d'étain, du bioxyde de plomb. On traite les boues par l'acide nitrique étendu, à l'ébullition ; puis on dissout le résidu dans l'eau régale, on sépare par filtration l'acide stannique, le chlorure de plomb et le peu d'argent à l'état de chlorure ; dans la solution, on précipite l'or par le sulfate ferreux, puis le platine par le fer ou le chlorhydrate d'ammoniaque.

La densité du courant employé est de 1,8 ampère par décimètre carré et la tension aux bornes de 2,5 à 3 volts. Le liquide employé, peu conducteur, renferme 2 à 5 p. 100 de cuivre et 0,05 à 0,4 p. 100 d'acide libre ; il s'écoule, chargé d'argent, par la partie inférieure et revient désargenté à la partie supérieure de l'électrolyseur.

Lorsqu'il sort de l'appareil, il se rend dans une série de sacs à double fond percés de trous, renfermant au centre des barres de cuivre et sur les côtés de la tournure. Le liquide cède alors l'argent, qui se trouve remplacé par une quantité équivalente de cuivre, soit environ une partie de cuivre dissoute pour une partie et demie d'argent précipitée. Le liquide sortant de ces appareils est à peu près neutre.

* * *

Les ***applications de l'électrolyse*** que nous venons de résumer ont une importance industrielle considérable, soit par le tonnage des produits

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fabriqués, soit par leur valeur commerciale ; mais il en est d'autres, plus connues, plus classiques pourrait-on dire, que l'on ne peut passer sous silence : électrozincage, cuivrage, nickelage, argenture, dorure, galvanoplastie.

L'***électrozincage***, qui tend à remplacer la galvanisation, consiste à recouvrir le fer, préalablement décapé, d'une couche de zinc électrolytique.

Le dépôt de zinc électrolytique a l'avantage particulier suivant : le zinc précipité, même en couche extrêmement mince, présente des irrégularités et des solutions de continuité aux endroits du métal où se trouvent des pailles, craquelures, etc., qui pourraient échapper à l'examen. C'est pour cette raison que l'électrozincage des tubes de chaudières marines est exigé par l'Amirauté anglaise et la Marine française pour permettre le contrôle de la qualité des pièces.

L'électrolyte employé est une solution de sulfate de zinc à 250 grammes par litre.

Dans le ***cuivrage***, une difficulté particulière se présente lorsqu'on l'applique aux métaux, fer, zinc, etc. ; elle tient à ce que ces métaux déplacent le cuivre de ses solutions sans l'intervention du courant et ne donnent, pour cette raison, aucun dépôt régulier, mais précipitent le métal à l'état de boue. Le cuivrage de la fonte avait été résolu dès 1856, par Oudry, en déposant, sur l'objet à cuivrer, un vernis protecteur rendu conducteur par une couche de plombagine ; le tout était mis dans une sorte d'immense pile Daniell, dont l'objet formait le pôle positif. Le cuivrage demandait de trois semaines à un mois ; c'est de cette façon que furent fabriqués les colonnes, candélabres et fontaines de la place de la Concorde et des Champs-Élysées. Actuellement, on revient à l'ancien procédé consistant à les enduire d'un vernis renfermant du cuivre porphyrisé auquel on donne, une fois sec, la patine voulue.

On arrive à recouvrir directement les métaux : fer, zinc, etc., d'une couche de cuivre, sans l'intermédiaire d'un enduit isolant entre le métal et le cuivre, en déposant une première couche de cuivre en bain de cyanure double de cuivre et de potassium, obtenu par addition d'une solution d'acétate de cuivre à une solution de cyanure de potassium. On obtient ainsi un dépôt adhérent, rosé, lorsque l'on opère en bain tiède, avec une densité de courant excessivement faible.

Le dépôt est parfaitement homogène ; il présente une telle adhérence que la pièce peut être chauffée au rouge, puis trempée dans l'eau, martelée à froid, emboutie, pliée, sans que le cuivre se soulève et se détériore d'aucune façon. Enfin, une tôle d'acier ainsi cuivrée possède la propriété de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne plus se tremper et, après avoir été chauffée et plongée dans l'eau, conserve la malléabilité de l'acier recuit.

L'orfèvrerie emploie également la galvanoplastie pour l'ornementation du verre, du cristal, etc. Dans ce cas, on dessine sur l'objet, au moyen d'un vernis contenant en solution du chlorure d'or ou de platine. Après dessiccation, on chauffe pour mettre le métal en liberté, puis on dépose une couche de cuivre que l'on peut ensuite recouvrir d'un autre métal, travailler, ciseler, etc. On peut également argenter les endroits à recouvrir, en opérant comme dans le cas de l'argenture des glaces.

Une autre application est le cuivrage des charbons pour l'éclairage, des balais de dynamos, etc.

Le ***nickelage*** s'applique surtout au fer, qu'il préserve de l'oxydation. Le traitement préalable de la pièce consiste, non plus en un décapage aux acides comme dans le cas du cuivre, mais en un polissage qui doit être très parfait si l'on veut un dépôt bien adhérent.

On opère souvent en cuivrant préalablement en bain de cyanure, passant ou non en bain de sulfate de cuivre et faisant enfin le nickelage.

Les bains de nickelage varient à l'infini : ils sont à base de sulfate de nickel, auquel on ajoute en général du sulfate d'ammoniaque. La principale difficulté est que, l'anode soluble se dissolvant difficilement, le bain s'enrichit en acide sulfurique, lequel donne un dépôt terne ; d'ailleurs, même avec une teneur faible en acide, le dépôt ne tarde pas à ne plus se produire. Pour éviter ces inconvénients, on ajoute au bain du citrate d'ammoniaque ou un autre sel à acide organique ; et de temps en temps on neutralise cet acide, soit par l'hydrate, soit par le carbonate de nickel.

Pour les petits objets, afin d'éviter une main-d'œuvre onéreuse, le nickelage direct s'effectue sur les objets placés en tas, mais, pour éviter le non-recouvrement par le métal aux points de contact, il faut agiter continuellement l'appareil. On a imaginé le nickelage au tonneau. Les pièces à nickeler sont placées dans un tonneau tournant autour de son axe ; ainsi soumises à un mouvement de rotation les unes sur les autres, elles sont uniformément recouvertes de métal et subissent un polissage qui permet de supprimer l'avivage définitif, de façon que, lorsqu'elles sortent de l'appareil, elles ont simplement besoin d'être rincées et séchées et peuvent être livrées immédiatement.

La figure 667 représente la disposition schématique de l'appareil Delval et Pascalis. A est le tonneau proprement dit, à neuf faces, mobile autour d'un axe. Les anodes sont en C, la cathode est fournie par les objets à nickeler E, auxquels le courant est amené par des barres D_1, D_2, D_3, communiquant chacune avec des touches d'un commutateur 1, 2, 3, etc.,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

disposé de telle façon que trois de ces touches soient en relation avec le pôle négatif de la source, les touches 1, 2, 3, dans le cas présent, communiquant avec les barres D_1, D_2, D_3. La figure montre que le tonneau continuant son mouvement de rotation, la touche 3 ne sera plus en contact la première, mais sera immédiatement remplacée par la touche 4, puis la touche 2 sera remplacée par la touche 5, et ainsi de suite. Les objets n'occupent pas exactement le fond du tonneau, car ils sont entraînés dans le mouvement de rotation.

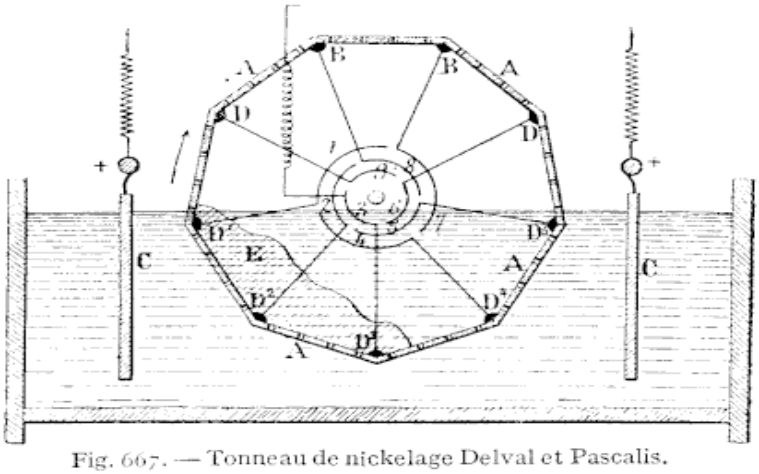


Fig. 667. — Tonneau de nickelage Delval et Pascalis.

L'***argenture*** s'opère d'une façon analogue. L'objet préparé est posé dans le bain de dépôt formé d'une solution de cyanure double d'argent et de potasse. Les anodes solubles sont en argent ; l'objet forme la cathode, à laquelle on imprime un mouvement de va-et-vient pour assurer la régularité du dépôt.

La ***dorure*** utilise des procédés semblables à ceux de l'argenture, avec cette différence que l'opération se fait à chaud, vers 60-70°, et en général avec une anode insoluble ; celle-ci est ordinairement formée d'une petite lame de platine et le courant est réglé, soit à l'aide d'un rhéostat, soit en enfonçant plus ou moins l'anode insoluble.

Suivant les conditions, on obtient de l'or vert, de l'or rouge ou de l'or jaune ; en général, on utilise des bains neufs pour faire la dorure jaune employée principalement sur argent ; la dorure verte s'obtient avec un vieux bain riche en argent et la dorure rose ou rouge avec un vieux bain riche en cuivre ; en outre, on modifie la teinte en variant la densité de courant. Enfin, on peut mélanger ces teintes par des réserves appropriées et compléter l'ornementation avec des vernis de couleur.

Dans la ***galvanoplastie***, on cherche à reproduire un objet quelconque en un métal qui est le plus souvent le cuivre.

On fait un moule de l'objet et, après avoir rendu sa surface conductrice

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'électricité, on le dispose dans un bain de sulfate de cuivre en face d'une anode de cuivre. Le courant décompose le sel, et le cuivre précipité sur le moule en reproduit tous les détails avec la plus grande fidélité. La couche de cuivre séparée du moule, quand elle est suffisamment épaisse, est une épreuve positive parfaite de l'objet

Pour confectionner le moule, s'il s'agit d'un objet à dépouille facile et de petites dimensions comme une médaille, on se sert assez souvent d'un alliage très fusible, tel l'alliage de Darcet composé de :

Bismuth	250	grammes.
Étain	125	—
Plomb	160	—
Antimoine	30	—

On fait fondre cet alliage, on le coule sur un morceau de carton à bords relevés et, quand il est sur le point de se solidifier, on applique la médaille sur sa surface. Après refroidissement, on sépare aisément le modèle du moule par de légers chocs.

Le moule obtenu est d'une extrême finesse. On le vernit ensuite sur le revers et sur les bords au moyen d'une dissolution de cire à cacheter dans l'alcool et on le frotte avec un tampon de coton légèrement imbibé d'essence de térébenthine. On le suspend ensuite par un fil conducteur dans la cuve galvanoplastique. Après un jour ou un jour et demi, lorsque la couche de cuivre déposée est suffisamment épaisse, on sépare la pièce du moule auquel elle n'adhère pas fortement, grâce au traitement à l'essence de térébenthine.

On ne peut plus employer l'alliage de Darcet pour des objets d'un certain relief. On fait alors usage de matières plastiques, presque toujours de la gutta-percha ou de la gélatine. On rend conductrice la surface de ces moules en la recouvrant d'une couche très mince de plombagine pure, bien tamisée, additionnée d'argent pulvérulent. La réussite de l'opération dépend en grande partie de la métallisation. Le moule ainsi préparé est entouré d'un fil conducteur qui doit servir à le suspendre dans le bain. De ce fil partent un certain nombre d'autres fils plus fins, dont les extrémités dénudées vont toucher la surface en plusieurs points, surtout au fond des creux, pour y porter le courant.

Les fils et toutes les parties de la gutta touchées par la plombagine, qui ne doivent pas être recouverts de cuivre, sont ensuite vernis avec soin.

Le bain, dans lequel on plonge les moules *lestés* et légèrement mouillés à l'alcool pour éviter que des bulles d'air ne restent emprisonnées à leur surface, est une solution acide de sulfate de cuivre, de composition moyenne :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Eau	1 litre.
Sulfate de cuivre surtout exempt de fer et de zinc.	250 grammes.
Acide sulfurique	40 —

Au début de l'opération, la densité du courant doit être faible et ne pas dépasser 1 ampère par décimètre carré ; elle peut être portée à 3 et même 5 ampères pour les moules sans saillies, lorsque le dépôt a acquis une certaine épaisseur.

On compte généralement vingt-quatre heures pour obtenir un dépôt de 1 millimètre d'épaisseur. La force électromotrice varie entre 0,3 et 0,6 volt.

* * *

Dans les pages qui précèdent, nous n'avons parlé que des applications de l'électrolyse en milieu aqueux, et à des températures voisines de la température ordinaire. Il nous reste maintenant à dire quelques mots des applications dans lesquelles l'action dissociatrice du courant s'exerce à haute température.

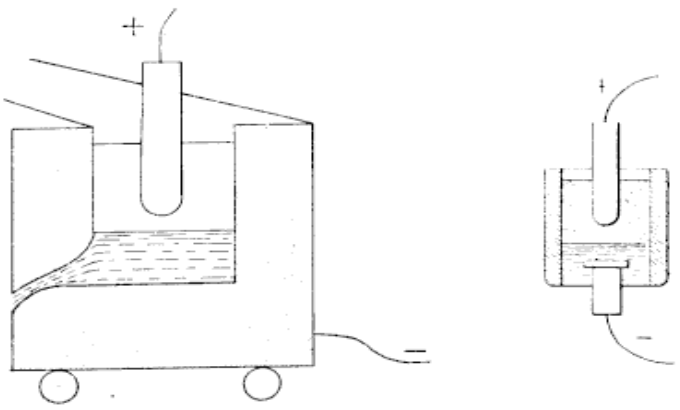


Fig. 668. — Deux formes de four Héroult.

L'exemple le plus typique est la ***préparation de l'aluminium*** par décomposition électrolytique, dans un récipient en charbon, de l'alumine en solution dans la cryolithe fondue ($Al^2F^6 3NaF$) au moyen d'un électrode en charbon (Héroult et Hall).

Ces fours, dont la figure 668 donne le principe, fonctionnent d'une façon continue pendant plusieurs mois et absorbent environ 6 000 ampères sous 20 volts.

On peut électrolyser, en solution dans un électrolyte fondu, toutes les combinaisons de l'aluminium avec les métalloïdes. Il suffit seulement que le bain électrolytique remplisse les conditions suivantes :

Avoir un point de fusion peu élevé et posséder, à l'état fondu, une fluidité convenable, une densité inférieure à celle de l'aluminium, une faible tension de volatilisation et une résistivité électrique aussi petite que possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour un électrolyte quelconque, le poids d'aluminium libéré ne dépend que de la quantité d'électricité mise en jeu ; il en résulte que l'énergie dépensée est uniquement proportionnelle à la tension de décomposition du bain. On a donc intérêt à prendre pour électrolyte le composé dont le potentiel de décharge est minimum. A ce point de vue, le sulfure d'aluminium serait préférable au chlorure et à l'oxyde. En pratique, l'oxyde a été adopté, car il est plus facile à fabriquer à l'état pur et l'opération électrolytique est continue, puisque, par des additions réglées, on maintient constante la teneur en alumine de l'électrolyte.

Le point de fusion des électrolytes employés industriellement est un peu supérieur à 700°, et l'on maintient le bain à une température aussi basse que possible, afin d'obtenir un métal pur et à peu près exempt de fer, de silicium et de carbone.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXVIII

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE

Principe du télégraphe. — Montage d'uplex différentiel. — Montage duplex en pont. — Télégraphe multiple. — Principe du répartiteur. — Télégraphe à enregistrement optique. — Alphabet Morse. — Le manipulateur. — Lecture au son. — Enregistrement des signaux. — Transmission mécanique. — Les relais : relais simples, relais polarisé. — Le télégraphe Hughes. — Le télégraphe Baudot. — Le télégraphe Pollak et Virag. — Rendement des divers systèmes. — Transmissions sous-marines. — Temps caractéristique. — Mode d'établissement du courant dans un câble sous-marin. — Le siphon recorder de Kelvin. — Inscription des signaux. — Montage électrique des câbles sous-marins. — L'isolement des câbles télégraphiques. — Les perturbations : courants telluriques. — Principe de la téléphonie. — Le téléphone Bell. — Ses perfectionnements ; microphone de Hughes, montage d'Edison. — Ordre de grandeur des phénomènes téléphoniques. — Les transmetteurs. — Microphone Ader. — Microphone à grenaille de charbon. — Microphone Solid-back. — Les récepteurs. — Récepteur Ader. — Les monophones. — Les sonneries : sonnerie ordinaire, sonnerie polarisée. — Montage des sonneries polarisées. — La magnéto d'appel. — Montage des magnétos. — Constitution d'un poste téléphonique. — Le fonctionnement des postes téléphoniques. — Les centraux. — Central à batterie locale. — Central à batterie centrale. — Les annonciateurs. — Les jacks. — Les standards. — Téléphone à batterie centrale. — Montage des postes. — Lampes d'appel. — Les multiples : multiples simples, multiples à plusieurs bureaux centraux. — Répartiteurs. — Le téléphone automatique. — Principe du fonctionnement. — La téléphonie privée. — Poste simple. — Montages divers. — La télégraphie et la téléphonie sans fil. — L'émission. — Oscillateur ouvert. — Modes d'excitation de l'antenne. — Montage Tesla. — Montage Oudin. — Ondes entretenues. — Arc chantant de Duddell. — Alternateurs de haute fréquence. — Lampe à trois électrodes. — Propagation des ondes. — Forme de l'onde à grande distance. — Les ondes courtes. — La réception. — Principe de la réception. — Syntonisation. — Détecteurs. — But de la détection. — Principaux détecteurs. — Cohéreur. — Détecteur magnétique. — Détecteur électrolytique. — Valve de Fleming. — Détecteur à cristal. — Lampe à trois électrodes. — L'amplification. — Constitution d'un poste récepteur. — Montage. — La méthode hétérodyne. — La méthode superhétérodyne. — L'avenir des transmissions sans fil.

Ce chapitre aurait pu avoir comme titre : Transmission des signaux à distance par l'électricité. Nous y traiterons rapidement ce sujet, que la transmission soit réalisée à l'aide de supports matériels, de fils conducteurs du courant électrique, ou à l'aide des ondes se propageant dans l'espace, dans ce milieu hypothétique et mystérieux que l'on désigne, pour lui donner une apparence de réalité matérielle, sous le nom d'éther électromagnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est assez curieux que, dans l'histoire de l'électricité, c'est cette application qui s'est développée la première et qui a atteint le plus rapidement un haut degré de perfectionnement, tout au moins en ce qui concerne les transmissions par fils. La raison en est simple : dans toutes les autres applications, il est nécessaire de disposer de sources d'électricité puissantes et, jusqu'à la découverte de la dynamo génératrice, les seuls générateurs connus étaient les piles. Nous avons vu que ces appareils ne peuvent débiter qu'une énergie très faible et sont d'un maniement, d'un prix de revient et d'un encombrement tels que les possibilités de leur emploi sont forcément très limitées. Ils convenaient cependant particulièrement bien pour la transmission des signaux à distance.

TÉLÉGRAPHIE

Le principe du ***télégraphe*** est extrêmement simple, on pourrait même dire intuitif : il suffit de relier électriquement les deux postes entre lesquels on veut établir une relation, le courant envoyé par le poste A dans la ligne actionnant un récepteur quelconque au poste B, et inversement. La même ligne peut d'ailleurs servir aussi bien à A pour communiquer avec B qu'à B pour communiquer avec A.

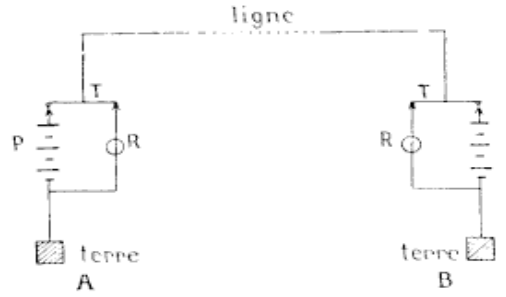


Fig. 669. — Principe du télégraphe. Montage à un fil.

On reconnut rapidement qu'au lieu de deux fils on pouvait n'en utiliser qu'un, à la condition qu'à la station A le pôle de la pile qui n'est pas relié à la ligne, et à la station B l'extrémité du fil de ligne lui-même, soient en communication avec des plaques de cuivre enfoncées dans un sol suffisamment conducteur. Tout se passe comme si la terre servait de fil de *retour*. En réalité, la terre constitue une sorte de réservoir dans lequel s'écoule toute l'électricité.

Un seul fil permet d'ailleurs les transmissions dans les deux sens ; il suffit que chaque station ait sa pile P, son transmetteur T et son récepteur R (fig. 669).

* * *

On peut même faire que les deux postes communiquent *simultanément* par le même fil. C'est ce que l'on appelle le ***montage duplex***, qui peut être réalisé de deux façons différentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le montage le plus simple, dit *différentiel*, est le suivant : Le courant émis par un poste est divisé en deux parties qui traversent *en sens inverse* les bobines du récepteur de ce poste, de façon que les actions de ces deux courants se neutralisent complètement. Dans ces conditions, le récepteur n'est pas actionné. Au contraire, sous l'influence du courant envoyé par le second poste, il entre en fonctionnement.

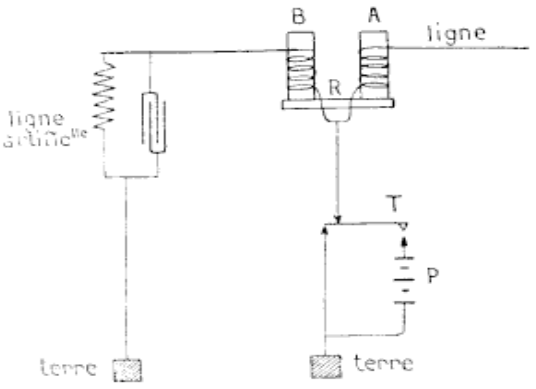


Fig. 670. — Montage différentiel.

Il faut donc, pour la réalisation pratique, que le courant qui circule dans la ligne *réelle* soit exactement équilibré par un courant parcourant une ligne *artificielle* qui lui soit en tous points électriquement comparable comme résistance, comme self-induction et comme capacité.

La figure 670 montre le principe du montage. Le courant émis par le transmetteur T se divise en deux courants, dont l'un passe dans une bobine A du récepteur R (nous supposons que c'est, par exemple, un électro-aimant) et de là dans la ligne. L'autre courant passe dans la bobine B du récepteur, enroulée en sens inverse de A, et ensuite dans la ligne artificielle. Celle-ci est constituée par des résistances, des self-inductions et des capacités variables et réglées de telle sorte que le courant circulant dans B soit identique à celui passant dans A. Comme A et B ont des actions opposées, elles s'annulent donc.

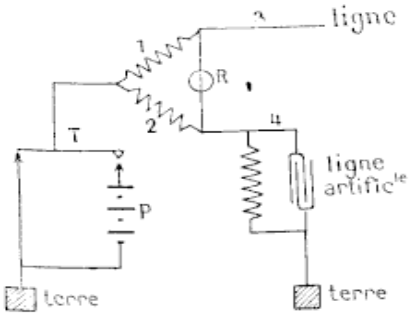


Fig. 671. — Montage en pont.

Au contraire, le courant qui arrive du poste opposé excitera l'électro-aimant, que le manipulateur du premier poste soit à la terre ou non.

Dans le second montage, dit *en pont*, on se sert des propriétés connues du pont de Wheatstone. On sait en effet que, dans un tel montage, on peut annuler le courant dans le dérivation du pont, tandis que les autres branches sont parcourues par des courants. Le récepteur sera alors monté sur la dérivation du pont dont les quatre branches sont constituées comme suit (fig. 671) : 1 et 2 sont des résistances fixes rigoureusement égales, 3 est constitué par la ligne et 4 par la ligne artificielle équivalente. Le pont est fermé par la terre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsqu'il est équilibré, un poste en cours de transmission n'envoie rien dans son récepteur ; au contraire, une partie du courant qui arrive du second poste par la ligne traverse ce récepteur.

* * *

On arrive encore à augmenter d une façon plus considérable le rendement des lignes par le ***télégraphe multiple***. Non seulement on envoie simultanément de chaque station des signaux par le même fil, mais encore on peut réunir à chaque station deux ou plusieurs appareils de façon à pouvoir envoyer en même temps deux ou plusieurs dépêches dans chacun des deux sens.

La télégraphie multiple repose sur le fait que la transmission d'un signal

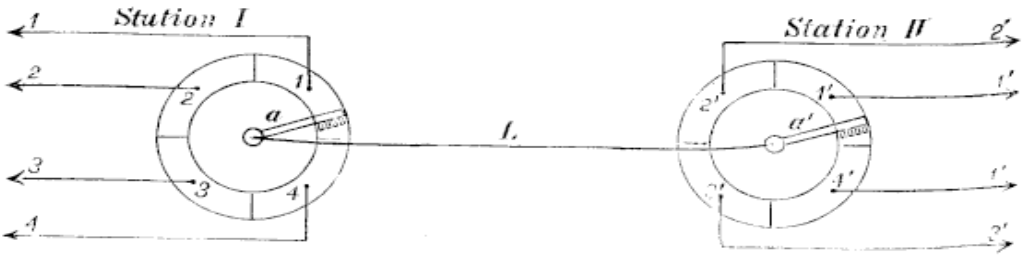


Fig. 672. — Schéma du repartiteur.

exige toujours un certain temps ; par contre, entre le moment où un signa est envoyé jusqu'au moment où le suivant est transmis, la ligne reste inutilisée. Il est donc possible, pendant cet intervalle de temps, de relier la ligne à une autre paire d'appareils transmetteur et récepteur ; ces derniers perdent également du temps entre les signes, et on peut par suite intercaler une troisième, une quatrième paire d'appareils. Il ne s'agit donc plus d'une transmission *simultanée* au sens strict du mot, mais bien de transmissions *alternées*. C'est le principe du ***télégraphe Baudot***, dont l'organe essentiel, et dont nous dirons seulement quelques mots plus loin, est le *répartiteur*.

La figure 672 montre le schéma de son fonctionnement dans le cas de quatre appareils. A chaque station se trouve un disque divisé en quatre quadrants ; chacun d'eux est réuni à un appareil télégraphique, et, suivant les besoins, au transmetteur ou au récepteur de cet appareil. Les deux quadrants de chaque disque portant le même numéro se correspondent. Sur chaque disque tourne *synchroniquement* un bras de contact a, a', ces deux bras étant reliés à la ligne L. Une fois par tour, 1 et 1′, 2′ et 2 3 et 3′, 4 et 4′ sont reliés entre eux. Par suite, une fois par tour, chacun des quatre postes de la station I est relié au poste correspondant de la station II.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Enfin, lorsqu'on veut augmenter le rendement d'une ligne, dans des cas exceptionnels il est vrai, on est conduit à supprimer les organes mécaniques, tels que leviers, ressorts, électro-aimants polarisés ou non, qui tous présentent une inertie plus ou moins grande et par suite imposent une vitesse maxima de transmission relativement petite.

On utilise alors les propriétés de ce merveilleux levier, sans inertie ni masse, que constitue un ***rayon lumineux***. A cet effet, le récepteur est constitué par deux téléphones dont la plaque vibrante porte un petit miroir sur lequel tombe un faisceau lumineux. Quand la transmission se produit, le miroir vibre, le rayon lumineux réfléchi est dévié et vient impressionner une pellicule photographique qui se déroule d'une façon uniforme. On conçoit qu'il soit possible, après développement, de lire le message d'après les sinuosités décrites par le point lumineux sur la photographie.

* * *

Nous venons de passer rapidement en revue le principe des appareils télégraphiques. Il nous reste maintenant à examiner leur réalisation pratique. Dans tous les systèmes de télégraphie, un certain courant est envoyé dans la ligne. L'idée la plus simple est d'utiliser ce courant pour actionner un électro-aimant qui attirera son armature pendant un temps plus ou moins long, l'armature laissant sur une bande de papier qui se déroule un trait plus ou moins long, la combinaison de traits longs (appelés *traits*) et courts (appelés *points*) représentant les différentes lettres de l'alphabet. C'est l'alphabet ***Morse***, que nous reproduisons ci-dessous.

a	· —	i	· ·	q	— — · —
b	— · · ·	j	· — — —	r	· — ·
c	— · — ·	k	— · —	s	· · ·
d	— · ·	l	· — · ·	t	—
e	·	m	— —	u	· · —
f	· · — ·	n	— ·	v	· · · —
g	— — ·	o	— — — —	w	· — —
h	· · · ·	p	· — — ·	x	— · · —
		y	— · — —	z	— — · ·

1	· — — — —	4	· · · · —	7	— — · · ·
2	· · — — —	5	· · · · ·	8	— — — — · ·
3	· · · — —	6	— · · · ·	9	— — — — — ·
		0	— — — — —		

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Le dispositif émetteur est extrêmement simple : c'est le ***manipulateur*** ou *clef Morse*, représenté schématiquement sur la figure 673. Quand on appuie sur la poignée isolante P, il s'établit un contact entre les pointes *t* et *b*, et le courant passe dans la ligne. Le ressort *r* ramène le levier à la position indiquée sur la figure quand on cesse d'appuyer sur P.

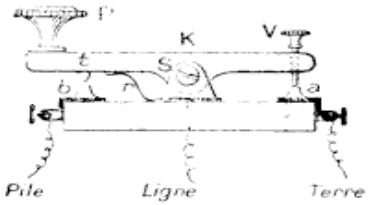


Fig. 673. — Manipulateur Morse.

Suivant que l'on appuie plus ou moins longtemps, on obtient au récepteur un *trait* ou un *point*. Un bon opérateur peut transmettre en moyenne 15 à 20 mots à la minute.

* * *

Au poste récepteur, on reçoit les signaux, soit au son, soit sur un enregistreur. Quand la réception s'effectue au ***son***, l'appareil est constitué par un simple électro-aimant dont l'armature, frappant ses butoirs sous l'attraction magnétique lorsque le courant passe, produit un bruit que l'on amplifie en plaçant l'ensemble dans une sorte de boîte de résonance. On peut arriver ainsi à « lire » environ 15 mots à la minute.

Si, au contraire, on veut conserver la trace des dépêches envoyées, on imprime les signaux sur une bande de papier. A cet effet, l'électro-aimant attire son armature qui est munie d'une molette encrée et vient appuyer sur la bande de papier qui se déroule sous l'action d'un mécanisme d'horlogerie. La figure 674 montre schématiquement le montage de l'appareil.

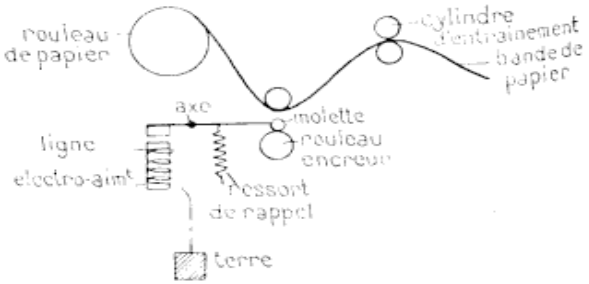


Fig. 674. — Inscription des signaux.

Donnons quelques renseignements pratiques : la bande a 14 millimètres de large et se déroule à la vitesse de $1^{m},5$ par minute ; le *point* est, par convention, trois fois moins long que le *trait*, et l'espace entre les signaux d'une même lettre est d'environ un point ; l'espace entre deux lettres est égal à trois points et celui entre deux mots égal à six points. En moyenne, la vitesse de réception est de 30 mots par minute et, en allégeant les pièces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mécaniques, on peut arriver à 80. Comme nous avons vu que, en moyenne, on ne peut transmettre que 15 à 20 mots à la minute, c'est donc vers une augmentation de la vitesse de transmission qu'ont été orientés les efforts.

On arrive ainsi à la ***transmission mécanique***, dont le principe est très simple. Les dépêches sont imprimées à l'aide d'une sorte de machine à écrire sur une bande de papier. Au lieu de caractères typographiques, ce sont des perforations qu'imprime cette machine sur la bande de papier, perforations qui correspondent soit à des traits, soit à des points. En faisant défiler ensuite la bande de papier ainsi préparée dans l'appareil transmetteur, on comprend facilement qu'il est possible, suivant les positions relatives des perforations, d'envoyer dans la ligne des signaux plus ou moins longs. Nous n'insisterons pas sur les divers systèmes proposés, qui ne se différencient que par des dispositions mécaniques plus ou moins ingénieuses.

* * *

Quel que soit le mode de transmission et de réception, il faut évidemment envoyer dans la ligne un courant assez intense pour actionner nettement les électro-aimants. On admet que l'intensité doit être voisine de 25 milliampères, ce qui, pour une ligne de 100 kilomètres ayant une résistance moyenne de 10 ohms par kilomètre, correspond à une force électromotrice d'au moins 35 volts, si on tient compte de la résistance propre des appareils.

Aussi a-t-on été conduit à utiliser des ***relais***. Ce sont des récepteurs comprenant simplement l'électro-aimant et son armature. Les mouvements de celle-ci ont pour effet, non plus d'imprimer directement sur la bande de papier, mais simplement d'ouvrir ou de fermer un circuit local comprenant le récepteur proprement dit et une pile. Dans ces conditions, l'attraction a besoin d'être beaucoup moins énergique, et il suffit d'une intensité ne dépassant pas 10 milliampères pour faire actionner le récepteur. La figure 675 montre le principe de fonctionnement : le courant de ligne arrivant dans E attire le levier O qui établit la communication entre le fil P qui va à la pile locale et le fil R qui va au récepteur.

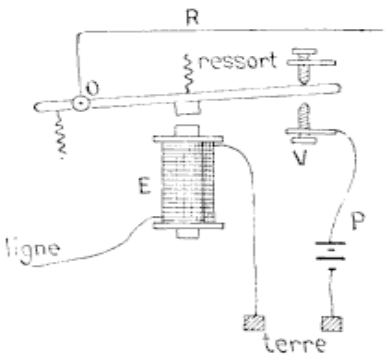


Fig. 675. — Relais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le relais est l'appareil le plus délicat de l'installation, car il doit d'une part obéir aux courants, même très faibles, qui peuvent être transmis de stations lointaines, et d'autre part il faut que son armature abandonne immédiatement le contact dès que le courant cesse, pour que les caractères de l'appareil Morse proprement dit soient nets. C'est le ressort R qui ramène le levier à sa position d'équilibre, et il faut qu'il agisse très exactement et d'une manière constamment égale lorsque l'on télégraphie rapidement. Le réglage est par suite extrêmement délicat.

On a cherché à supprimer cet inconvénient en n'employant plus de ressort : on arrive ainsi à ce que l'on appelle un ***relais polarisé***, dans lequel le courant de ligne ne sert plus à exciter l'armature du relais, mais simplement à affaiblir ou renforcer des pôles aimantés déjà existants.

La figure 676 représente un type de relais polarisé. Il est constitué par un aiment *permanent* Ab, recourbé à angle droit, son pôle sud étant par exemple en aa', son pôle nord en b. Le pôle nord porte deux noyaux de fer doux E, E′, sur lesquels sont enroulées des bobines de fil. Enfin un levier Cd en fer doux, mobile autour d'un axe vertical en aa', passe entre les deux pôles nord E, E′. Ce levier a un magnétisme sud comme le pôle auquel il est relié et se trouve normalement en équilibre entre les deux bobines nord quand il ne passe aucun courant dans celles-ci.

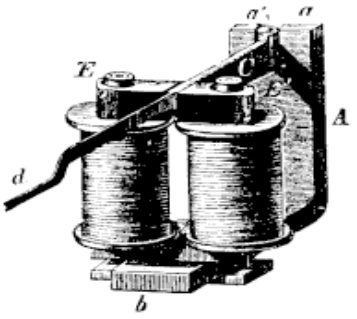


Fig. 676. — Relais polarisé.

Le courant de la ligne passe dans le primaire d'un petit transformateur dont le secondaire est relié aux pôles du relais. Il se produit donc un courant induit qui s'écoule pendant un moment autour des deux noyaux aimantés. Il renforce le magnétisme nord de l'un d'eux, E par exemple, et affaiblit celui de E′, peut-être même lui communique un magnétisme sud. Le levier Cd est donc attiré vers E et sa pointe d ferme alors le circuit local du récepteur. Quand le courant de ligne cesse, il se produit dans le secondaire du transformateur un extra-courant de rupture de sens inverse. Par conséquent, le magnétisme nord de E′ sera augmenté et celui de E diminué : le levier est donc attiré immédiatement vers E′ et le courant local est instantanément ouvert.

* * *

Malgré tous les perfectionnnements du télégraphe Morse, il n'en reste pas moins qu'il faut, à la station réceptrice transcrire en écriture ordinaire les messages enregistrés. C'est pourquoi on a cherché à construire des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appareils télégraphiques qui impriment directement les lettres. Tels sont les appareils Hughes et Baudot, dont nous allons donner le principe.

Le ***télégraphe Hughes*** est extrêmement simple en principe. L'organe principal est une petite roue, appelée *roue des types*, sur le pourtour de laquelle sont gravés en relief les lettres de l'alphabet, les chiffres et la ponctuation. Cette roue tourne d'un mouvement uniforme et les lettres sont imprégnées d'encre grasse.

Quand un signal arrive du poste éloigné, il actionne un électro-aimant polarisé qui applique vivement une bande de papier contre la lettre de la roue des types qui se trouve en face de lui. En retombant, la feuille

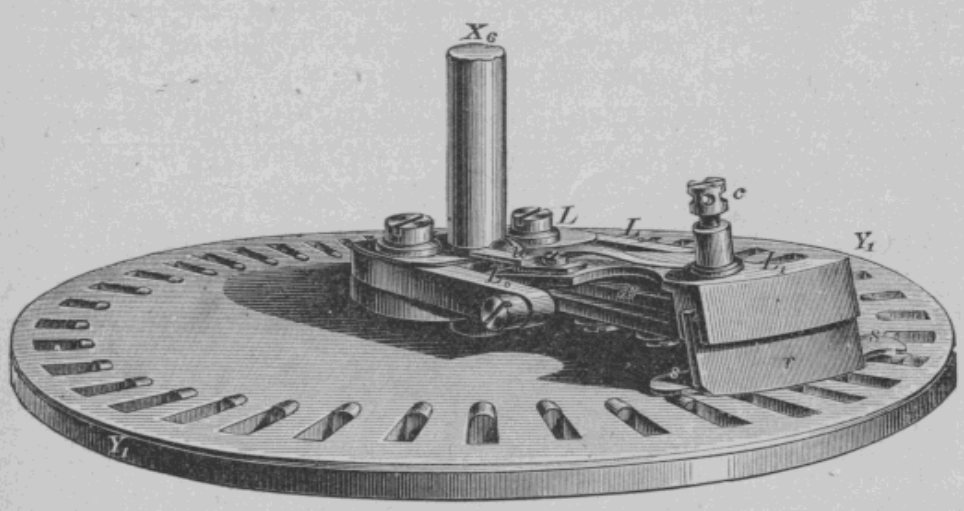


Fig. 677. — Boîte à goujons avec son chariot dans le télégraphe de Hughes.

de papier avance de l'espace d'une lettre. Pour écrire un mot, il suffit donc de faire passer le courant dans la ligne juste au moment où la roue des types est dans une position telle que la lettre que l'on veut transmettre se trouve en regard de l'électro-aimant.

Ce résultat est obtenu de la façon suivante. Au poste émetteur tourne une sorte de frotteur appelé *chariot de contact* L au-dessus d'un plateau Y percé de trous dans lesquels passent des *goujons* (fig. 677). Les goujons en temps normal, affleurent la surface et sont reliés aux touches d'un clavier, chaque touche représentant une lettre. Si on appuie sur une des touches, le goujon correspondant se soulève et soulève à son tour le frotteur, déterminant à ce moment l'envoi d'un courant dans la ligne.

Si la vitesse de rotation du frotteur est rigoureusement la même que celle de la roue des types à la station réceptrice et s'il se trouve toujours en regard du goujon d'une lettre correspondant à la même lettre de la roue des types, on conçoit que la transmission soit réalisée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous n entrerons pas dans la description des organes mécaniques qui assurent le synchronisme parfait des deux organes tournants et qui, s'ils sont très simples à comprendre lorsque l'on a l'appareil devant les yeux, sont très difficiles à décrire d'une façon satisfaisante. Disons seulement qu'ils sont assez délicats et que l'appareil est tellement fragile que deux exemplaires en sont toujours nécessaires à chaque poste.

La transmission est plus rapide qu'avec le Morse, puisqu'il suffit, pour chaque lettre, d'une seule émission de courant.

Le ***télégraphe Baudot*** repose sur un principe différent. Il y a bien encore dans cet appareil deux balais tournant synchroniquement à chaque extrémité de la ligne, mais ces balais ne passent plus qu'au-dessus de cinq contacts occupant une portion quelconque de la circonférence. Ces balais ferment donc *successivement* les cinq circuits, chacun d'eux n'étant fermé que lorsque les balais passent sur les contacts lui correspondant.

Un clavier à cinq touches permet au poste émetteur de réaliser une

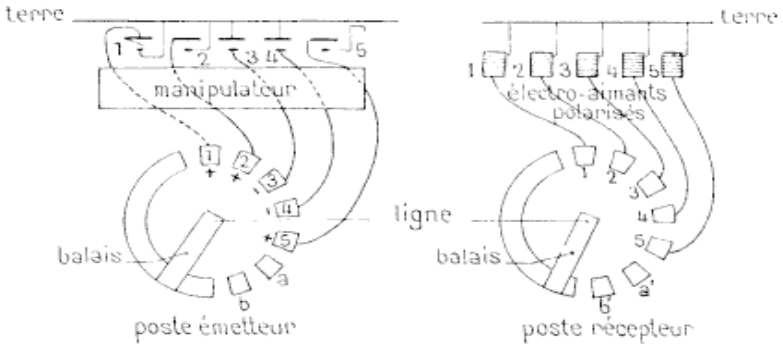


Fig. 678. — Principe du télégraphe Baudot.

combinaison de courants positifs et négatifs, chaque combinaison correspondant à un chiffre ou une lettre.

Lorsque les deux balais ferment successivement les divers circuits, les courants lancés l'un après l'autre dans la ligne actionnent successivement cinq électro-aimants polarisés dont les armatures sont attirées dans un sens ou dans l'autre.

La figure 678 représente schématiquement le fonctionnement du Baudot. Au poste émetteur, le manipulateur réalise la connexion des pôles positifs des piles 1, 2 et 5 avec les plots correspondants et celle des pôles négatifs des piles 3 et 4 avec les plots de même numéro. Quand les balais, dans leur révolution, fixeront successivement les contacts 1, 2, 3, 4, 5, les armatures des électro-aimants polarisés 1, 2, 5 seront attirées dans un certain sens et celles des électro-aimants 3 et 4 en sens inverse. On conçoit, sans qu'il

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soit besoin d'entrer dans le détail des mécanismes utilisés au poste récepteur, qu'il est possible de *traduire* en lettre la combinaison ainsi reçue et de faire imprimer cette lettre par une roue des types.

Quant au synchronisme, il est très facile à réaliser à l'aide de deux contacts supplémentaires a, b, a', b'. En effet, si le réglage est bon, les circuits ab, $a'b'$ sont fermés exactement ; mais si le balai du poste émetteur tourne plus vite que celui du poste récepteur, une partie du courant émis par b passe dans a'. Il actionnera alors un électro-aimant qui freinera l'appareil récepteur.

Enfin, remarquons que les cinq contacts n'occupent qu'une fraction de la circonférence, le quart environ, et qu'il est alors possible, pour ne pas laisser la ligne inoccupée pendant les trois quarts du temps, de relier trois ou quatre appareils (émetteurs et récepteurs) aux deux chariots et utiliser ainsi leur circonférence entière.

Enfin, nous dirons quelques mots du ***télégraphe Pollak et Virag***, dont nous avons donné le principe plus haut. La transmission se fait par deux lignes, avec retour par la terre.

Au poste transmetteur, la dépêche est traduite sur une bande de papier sous forme de perforations formant six rangées de trous de deux diamètres différents. Cette bande défile ensuite entre six bagues reliées à trois piles de force électromotrice différente et six paires de balais réunis trois par trois aux deux lignes. La bande de papier isole les bagues des balais, sauf au passage d'une perforation. On peut donc ainsi envoyer dans les lignes des courants de trois intensités différentes (suivant les contacts établis par les perforations entre les balais et les bagues) et de deux durées différentes (suivant la grandeur de ces perforations).

Au poste récepteur, chaque ligne est réunie à la membrane d'un téléphone. Le déplacement de ces membranes se traduit par une légère rotation d'un petit miroir mobile autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal.

Si on envoie un faisceau lumineux sur ce miroir, le faisceau réfléchi décrira une courbe dans l'espace, que l'on peut recueillir sur une bande de papier photographique. Cette courbe sera une lettre de l'alphabet, grâce aux combinaisons de courants envoyées du poste émetteur, de la même façon que l'on peut, en recueillant les rayons solaires sur un petit miroir tenu à la main, dessiner des lettres sur un mur à l'aide des rayons réfléchis.

* * *

Tous ces systèmes de télégraphie ont des ***rendements*** très différents qui les ont fait abandonner successivement au profit du plus rapide, au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fur et à mesure de l'accroissement des communications télégraphiques. Naturellement, le *facteur personnel* intervient lorsque la transmission est directement sous la dépendance manuelle d'un opérateur ; la plus ou moins parfaite utilisation de la ligne en employant les montages multiples influe également sur sa capacité, mais on peut donner, comme ordre de grandeur, les rendements suivants, pour les divers systèmes :

Morse	500 à 1 500	mots à l'heure.
Hughes	1 000 à 1 200	— — —
Baudot	5 000 à 6 000	— — —
Pollak Virag	30 000 à 40 000	— — —

Ces chiffres ne sont valables que pour la transmission sur des lignes relativement courtes et dont la self-induction et la capacité sont faibles, ce qui est le cas des lignes télégraphiques terrestres ; mais, lorsqu'il s'agit de transmissions par câbles sous-marins, le problème présente alors un tout autre aspect.

* * *

En effet, jusqu'ici nous avons supposé implicitement qu'à un instant donné une section quelconque du circuit était traversée par la même quantité d'électricité, en un mot que l'établissement du courant avait lieu d'une façon instantanée.

Dans les ***câbles transatlantiques***, dont la longueur et la capacité sont considérables, il n'en est plus ainsi. Quand une extrémité de la ligne est reliée à une source de potentiel, le courant ne s'établit pas instantanément dans toute la longueur de la ligne. Il ne se propage pas non plus à la manière d'un boulet de canon, mais bien plutôt comme une masse d'eau qui sortirait d'un réservoir indéfini pour remplir un tuyau sur lequel sont branchés latéralement des réservoirs auxiliaires qui doivent se remplir en même temps que le tuyau.

Si, au lieu de cette comparaison hydraulique qui forme image, nous employons le langage électrotechnique, nous dirons que le courant doit charger le condensateur constitué par le câble et le milieu marin (jouant le rôle des deux armatures) séparés par l'isolant entourant le câble (qui constitue le diélectrique) : en autres termes, une partie de l'électricité est utilisée à établir le potentiel nécessaire pour pousser le courant dans le câble.

On ne peut donc plus dire que la vitesse est celle de propagation de l'électricité de la lumière lorsque l'on a affaire à des câbles sous-marins. Cela est éga-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lement vrai pour les conducteurs ordinaires, malgré ce que l'on pourrait penser à première vue, et c'est pour cette raison que l'on ne peut parler d'une vitesse définie, de 300 000 kilomètres par seconde, que pour la propagation de l'onde électromagnétique *dans le vide*.

Par conséquent, dans un câble transatlantique, le courant se propage *lentement* et n'atteint que *progressivement* son intensité de régime. C'est ainsi que, pour le câble qui relie l'Irlande à Terre-Neuve, lorsqu'on lance le courant en Irlande, on n'a aucune trace de courant à Terre-Neuve deux dixièmes de seconde après que la communication a été établie ; au bout de quatre dixièmes de seconde, le courant n'a encore que 7 p. 100 de son intensité de régime, et ce n'est qu'au bout de trois secondes que l'on peut considérer qu'il a atteint sa valeur définitive.

Le phénomène a été étudié complètement par lord Kelvin à propos de la pose du premier câble transatlantique. Il a montré en particulier que, si l'on prend comme unité de temps, pour mesurer la durée de l'établissement du courant, une quantité a appelée temps caractéristique égale à :

$$a = 232\ 10^{-10}\ CR,$$

C étant la capacité et R la résistance du câble, toutes les courbes d'établissement du courant dans tous les câbles sont les mêmes.

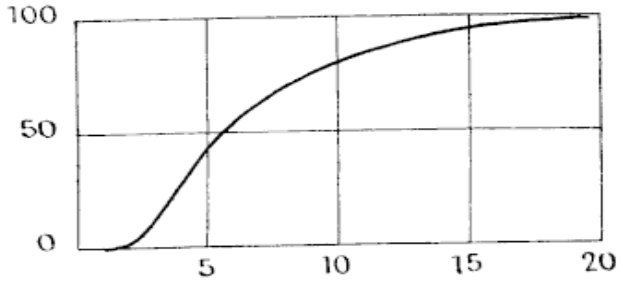


Fig. 679. — Courbe d'établissement du courant.

Ces courbes sont construites en prenant pour abscisses les temps comptés à partir de la mise de l'extrémité en communication avec la pile et pour ordonnées les intensités observées aux divers instants, l'intensité finale étant prise pour unité. La figure 679 donne l'allure de cette courbe d'établissement.

Nous donnons ci-dessous, à titre d'indication, les caractéristiques de quelques câbles sous-marins et la valeur du temps caractéristique a.

	Longueur en milles.	*Résistance totale en ohms.*	*Capacité totale en microfarads.*	*Temps a en secondes.*
Marseille-Bône	448	5 210	129	0,015
Marseille-Malte	848	9 632	238	0,05
Marseille-Alger	494	5 390	142	0,017
Câble transatlantique français	2 584	7 571	1 111	0,2
— anglais	2 423	6 898	988	0,15

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'examen de la courbe montre que la valeur normale du courant peut être considérée comme atteinte après un temps égal à 20 a. S'il est interrompu à l'origine au bout de ce temps, il mettra encore un temps 20 a pour disparaître. Si donc on veut que deux émissions de courant successives atteignent leur valeur maxima et produisent des signaux distincts n'empiétant pas les uns sur les autres, elle doivent ne pas se succéder à des intervalles de temps moindres que 40 a.

Par suite, pour les câbles transatlantiques, cette durée représente environ huit secondes, ce qui, avec le télégraphe Hughes, correspondrait à un mot environ par minute. Signalons, à titre de comparaison, que pour la ligne télégraphique terrestre Paris-Bordeaux, qui a 650 kilomètres environ (environ 360 milles), l'unité de temps est de 0,001 seconde, ce qui fait que les signaux peuvent se suivre à 0,04 seconde d'intervalle, ce qui correspond à l'envoi de 25 lettres environ par seconde avec le télégraphe Hughes. Pour résoudre le problème de la télégraphie sous-marine, il faut donc chercher une autre solution, puisque non seulement le temps d'établissement nu courant est trop long, mais encore on ne peut s'en servir pour actionder avec certitude des récepteurs électro-magnétiques.

Ceux-ci sont en effet établis pour que l'armature fonctionne quand le courant dépasse une certaine intensité et retombe quand l'intensité est devenue inférieure à une autre valeur. Il faut, pour que la marche de l'appareil soit sûre, que ces valeurs limites soient nettement dépassées et que la ligne ait le temps, après chaque signal, de reprendre l'état neutre.

Comme ces conditions sont impossibles à remplir pratiquement dans un câble transatlantique, ainsi que nous venons de le voir, on cherche alors à obtenir, non plus un courant d'intensité déterminée dans la ligne, mais une variation suffisamment brusque de l'intensité d'un sens déterminé. En un mot, une fois le courant établi dans la ligne, on cherche à provoquer des protubérances dans la courbe représentant son intensité.

Voici comment on y arrive. La courbe d'arrivée permet de se rendre compte de l'effet produit par une succession rapide de courants de même sens ou de sens contraires. Par exemple, à l'origine du câble, après avoir maintenu le courant pendant un temps na, supposons qu'on l'interrompe. Pour avoir l'effet à l'autre bout du câble, il suffit de tracer une seconde courbe, identique à la première, transportée parallèlement à elle-même de na, et de construire la courbe résultante ayant en chaque point pour ordonnée la différence des ordonnées des deux premières.

La figure 680 montre le mode de construction dans le cas où $n = 5$. La courbe I est la courbe d'établissement du courant ; la courbe II est la même courbe décalée de 5, et la courbe B est la courbe résultante.

Supposons maintenant qu'après un nouvel intervalle $n'a$, on établisse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'origine un courant négatif de même intensité. On déplacera la courbe primitive parallèlement à elle-même de $(n + n')\ a$ et on prendra la différence de ses ordonnées avec celles de la courbe B, et ainsi de suite.

On obtient ainsi des courbes dentelées plus ou moins régulières, dont les ordonnées sont tantôt positives, tantôt négatives, mais dans lesquelles l'effet de chaque émission est bien distinct, malgré qu'il soit fonction des émissions antérieures, si celles-ci se suivent à des intervalles égaux inférieurs à 20 *a*.

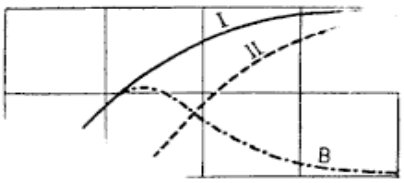


Fig. 680. — Transmission dans un câble sous-marin.

Ces émissions rapides, tantôt positives, tantôt négatives, se succédant à intervalles réguliers, donnent des effets très visibles dans un galvanomètre à miroir convenablement amorti. On voit le trait lumineux animé de mouvements saccadés vers la droite, par exemple, quand l'émission est positive, vers la gauche quand elle est négative. Peu importe la position de l'aiguille par suite de ses mouvements antérieurs, par rapport à sa position d'équilibre, puisque c'est seulement le sens du déplacement qui importe. L'alphabet adopté est l'alphabet Morse, avec cette convention que tout déplacement vers la droite correspond à un point, et tout mouvement vers la gauche à un trait.

* * *

Lord Kelvin a remplacé le galvanomètre à miroir par un instrument inscripteur tout aussi rapide et qu'il a appelé ***siphon recorder***. Cet appareil est composé d'un cadre rectangulaire très mobile *s* (fig. 681) placé dans le champ d'un électro-aimant puissant AB. Une masse de fer doux *f*, au milieu du cadre, augmente l'intensité du champ dans cet espace. Le cadre est soutenu par une double suspension bifilaire dont on peut régler la sensibilité à l'aide d'un poids.

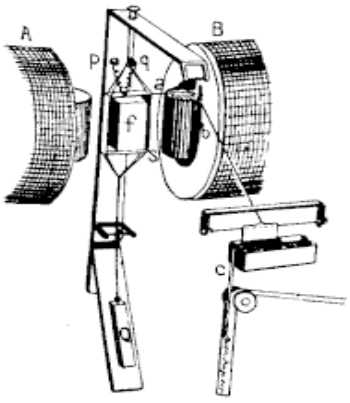


Fig. 681.
Siphon recorder.

Quand le courant passe dans le cadre, il tend à tourner dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens du courant ; ses mouvements sont très brusques et très nets, l'amortissement étant considérable. Dans ses mouvements, le cadre entraîne un tube de verre très fin, *c*, en forme de siphon (d'où le nom de l'appareil)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont une extrémité plonge dans un réservoir d'encre et dont l'autre est très voisine d'une bande de papier qui se déroule à une vitesse uniforme.

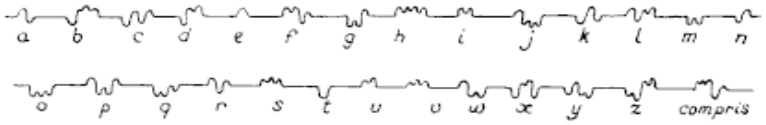


Fig. 682. — Traduction de l'alphabet par le siphon recorder.

L'encre est électrisée par une petite machine électrique et projetée sur le papier par suite de l'impulsion électrique, ceci afin d'éviter le frottement de la pointe traçante du siphon sur le papier.

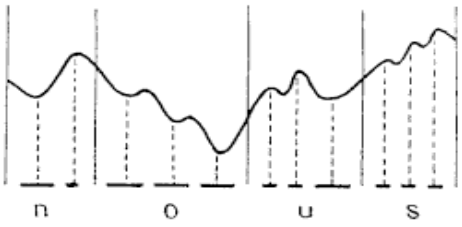


Fig. 683.
Diagramme de réception d'un message.

La figure 682 représente l'alphabet et donne une idée de la façon dont fonctionne l'appareil. La figure 683 montre comment se présente en pratique le diagramme d'enregistrement. On voit que seuls importent les sens des déviations du siphon traceur, la position initiale pour chaque signal variant d'un signal au suivant.

* * *

Dans l'***exploitation pratique des lignes sous-marines***, on envoie les signaux soit en unissant l'extrémité du câble à une pile, soit en disposant aux deux extrémités des condensateurs. Quand on porte l'armature A non reliée au câble (fig. 684) à un potentiel E (positif ou négatif, suivant le signal à envoyer), l'armature B (qui n'est pas encore chargée) est portée à un potentiel E tandis que l'armature C est au potentiel zéro, d'où force électromotrice sur la ligne, dirigée de B vers C et dont la valeur est totu d'abord égale à E. Elle provoque un courant qui charge C positivement et B négativement.

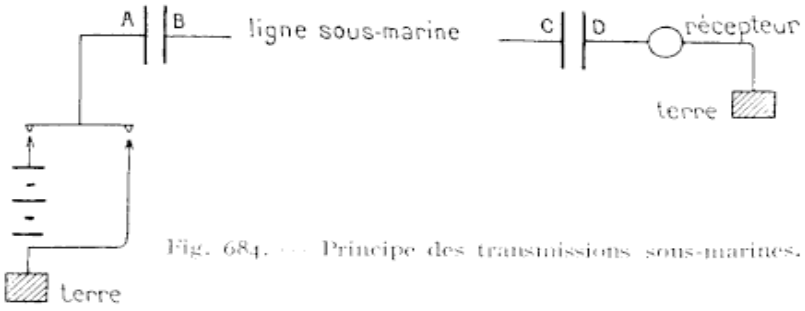


Fig. 684. — Principe des transmissions sous-marines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les transmissions télégraphiques, surtout à grande distance, sont très difficiles, qu'elles aient lieu par lignes terrestres ou par lignes sous-marines. Pour ces dernières, les ***questions d'isolement*** jouent un rôle fondamental ; aussi le câble est-il constitué par une âme conductrice formée d'un fil central de 2 millimètres de diamètre, entouré par une dizaine de fils de 1 millimètre environ de diamètre. Autour, trois ou quatre couches de gutta-percha et de caoutchouc assurent l'isolement. Le tout est protégé par deux enroulements superposés en corde de chanvre de pas inverse et par une armature de fils de fer tressés.

Le second câble transatlantique de 5 000 kilomètres pesait au total 4 400 tonnes. Comme en certains endroits la profondeur d'immersion dépassait 4 000 mètres, c'était une traction de près de deux tonnes qu'il devait supporter à sa sortie du navire, sans compter les chocs dus aux déplacements du navire sous l'action des vagues. Aussi la pose d'un câble est-elle une opération extrêmement difficile, les ruptures obligeant à des travaux de repêchage très compliqués.

Sur terre, le problème est plus simple : le fil est nu, en cuivre, en fer ou en aluminium, suivant les distances à parcourir. Mais, par contre, ces fils sont exposés aux intempéries, aux dérangements provoqués par les orages, les aurores boréales, etc., qui chargent électriquement les lignes et brouillent les transmissions.

A côté de ces dérangements accidentels, il existe un phénomène permanent, sans inconvénient au reste, qui est constitué par ce que l'on appelle les ***courants telluriques***. Voici en quoi ils consistent. On considère d'une façon générale que la surface de la terre est en tous les lieux à un potentiel bien défini, que l'on prend pour potentiel zéro. Ceci n'est pas vrai : le potentiel de la terre n'est pas le même, au même instant, en divers points, et la différence de potentiel peut atteindre un volt pour des distances de l'ordre de 100 kilomètres.

Il en résulte des courants parasites dans les lignes télégraphiques ; ce sont les courants telluriques, dont la direction et l'intensité sur une même ligne varient très rapidement. En France, par exemple, tous les matins, le potentiel terrestre décroît de 9 heures à midi, du nord-nord-est au sud-sud-ouest, l'intensité des courants telluriques étant maxima vers 10 h. 30.

Ajoutons que, de même que le potentiel de la terre varie à sa surface, il varie, comme nous l'avons vu, avec l'altitude. Il varie également avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la profondeur, ce que l'on a constaté en faisant des prises de terre à des niveaux différents d'un puits de mine, les variations pouvant avoir un sens et une valeur quelconques.

TÉLÉPHONIE

Tout comme la télégraphie, la téléphonie est extrêmement simple en théorie et les difficultés de réalisation ne sont dues qu'à des causes liées intimement à l'exploitation même des réseaux : multiplication des postes, grandes distances de transmission, interposition obligée entre les postes d'un organisme dit « central » permettant de relier à volonté deux postes quelconques, etc.

Nous nous contenterons d'exposer les principes fondamentaux de la téléphonie, de donner quelques indications sur la réalisation pratique des appareils et d'indiquer schématiquement le fonctionnement des réseaux.

* * *

C'est en 1860 que Bell, pour la première fois, réussit à transmettre la parole à distance par l'emploi de phénomènes électriques. Le ***téléphone Bell*** était une application extrêmement élégante des phénomènes d'induction.

On sait que, si l'on approche ou si l'on éloigne brusquement un aimant d'un circuit conducteur fermé, il se produit un courant induit dans ce circuit. L'explication est immédiate : l'aimant transporte avec lui dans l'espace des lignes de force magnétiques. Il en résulte un flux magnétique *variable* dans le circuit conducteur, d'où apparition dans ce circuit d'une force électromotrice d'induction. C'est le même mécanisme que celui que nous avons rencontré dans la production industrielle des courants par les machines génératrices.

De même, si on enroule une bobine de fil autour d'un aimant et que l'on approche de ce système un morceau de fer doux, comme on modifie la configuration du champ magnétique existant, un courant électrique circule dans la bobine.

Le dispositif de Bell était le suivant : à chaque station A, B (fig. 685, 1), une bobine de fil s'enroule autour d'un aimant permanent. Ces deux bobines C, D sont reliées l'une à l'autre. Devant chacune d'elles se trouve disposée une mince plaque de fer doux L, M. Quand on parle devant la plaque L par exemple, celle-ci vibre modifie le champ magnétique de la bobine C, et crée par suite un courant dans cette bobine. Ce courant se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

transmet par la ligne et passe dans la bobine D du poste émetteur B. L'aimantation de l'électro-aimant D est donc modifiée et par suite attire plus ou moins la plaque métallique M qui se met à vibrer, exécutant, à l'intensité près, les mêmes mouvements que la plaque L, c'est-à-dire reproduisant la parole.

* * *

Si intéressante que soit la solution de Bell, elle est évidemment insuffisante, car les courants induits ainsi produits n'ont qu'une très faible intensité et, lorsque la ligne a quelque longueur, ils deviennent incapables d'actionner l'écouteur. Pratiquement, même en perfectionnant le type initial par l'emploi d'aimants en fer à cheval par exemple, on ne peut dépasser des portées de quelques kilomètres.

En 1877, ***Hughes*** fit faire un progrès décisif à la téléphonie. Il ne conserva du système de Bell que le poste récepteur, aimant et bobine placés

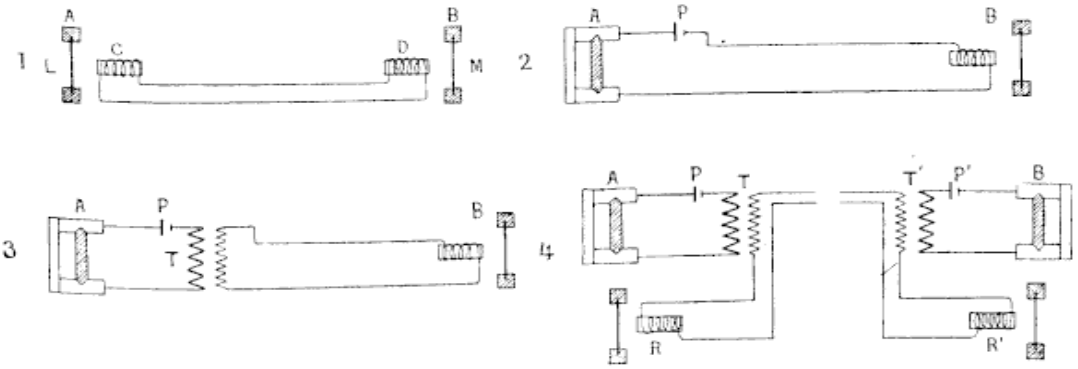


Fig. 685. — Les divers perfectionnements du principe du téléphone.

dans le circuit, mais il intercala dans ce circuit en premier lieu une ***pile*** et en second lieu un ***microphone*** qui est le poste transmetteur le plus sensible et le plus ingénieux que l'on puisse imaginer.

Le microphone se compose essentiellement d'un crayon de charbon disposé verticalement entre deux plaquettes de même matière réunies aux deux fils de ligne par l'intermédiaire de la pile P (fig. 685, 2). Le crayon de charbon n'est pas fixé dans ses logements ; au contraire, on a soin de réaliser un contact imparfait entre ces trois pièces, car c'est là le principe même de l'appareil.

En effet, lorsqu'on parle devant la planchette qui recouvre le microphone, ses vibrations se transmettent au charbon, d'où modification de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la résistance de contact du charbon et de ses supports ; par suite, l'intensité du courant varie dans de grandes limites dans le circuit téléphonique (il peut même être interrompu totalement). La transmission est réalisée et peut être assurée à des distances beaucoup plus grandes qu'avec le système Bell. Remarquons que, dans le téléphone Hughes, le transmetteur est différent du récepteur, qui reste l'appareil primitif de Bell.

* * *

Un perfectionnement très important a été apporté par ***Edison*** au système Hughes, permettant d'envisager des distances de transmission considérables : c'est l'emploi d'une ***bobine d'induction***.

Nous avons vu que, pour le transport à distance de l'énergie, on avait tout intérêt à utiliser des courants de haute tension pour réduire au minimum les pertes dans la ligne. C'est le même problème qui se présente ici. Les lignes téléphoniques ont une grande longueur, une résistance notable, car on ne peut leur donner des sections considérables, et, pour ne pas utiliser des courants trop intenses, il faut transmettre leurs variations en haute tension. La figure 685, 3, montre le schéma du montage.

Il reste à rendre les deux postes A et B récepteurs et transmetteurs à la fois. On y arrive très simplement en constituant le primaire de chacun d'eux par une pile, un microphone et l'enroulement primaire d'une bobine d'induction. Les récepteurs sont placés à chaque poste sur le circuit secondaire. La figure 685, 4, montre le schéma des connexions.

* * *

Il ne suffit pas que les deux postes puissent converser, il faut encore qu'ils puissent *s'appeler*, pour se mettre en communication. Aussi faut-il prévoir l'adjonction à chaque poste d'une sonnerie actionnée par l'autre poste. Naturellement, comme l'appel précède la conversation, la même ligne pourra servir aussi bien pour actionner les sonneries que pour transmettre la parole. Nous verrons plus loin comment ces opérations s'effectuent automatiquement.

* * *

Tels sont les principes du fonctionnement du téléphone et, malgré la complication des installations, leurs aspects différents, systèmes à batteries locales, à batterie centrale, systèmes automatiques, etc., tout se ramène en définitive au schéma essentiel que nous venons de décrire. Avant de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dire quelques mots de la « téléphonie pratique », il est intéressant de fixer l'***ordre de grandeur des phénomènes téléphoniques***.

Lord Rayleigh a étudié la question et a cherché en particulier quelle était l'intensité minima des courants capables d'actionner un récepteur téléphonique. Il a trouvé qu'au-dessus de 10^{-7} ampère (soit un dixième de millionième d'ampère), on ne perçoit plus rien dans le téléphone. En pratique, les courants utilisés de l'ordre d'un dix-millième d'ampère.

Ces courants sont donc extrêmement faibles. Comme ils produisent une sensation sonore sur le tympan de l'oreille, la question qui se présente naturellement à l'esprit est de déterminer quel est l'ordre de grandeur du déplacement de la plaque vibrante du récepteur du téléphone ainsi provoquée, et également l'ordre de grandeur des compressions et dilatations de l'air en résultant.

Lorsque l'on regarde la plaque du téléphone récepteur, on ne la voit pas vibrer à l'œil nu, et il faut, pour déceler son déplacement, avoir recours à des phénomènes optiques (utilisation des franges d'interférence). On trouve ainsi qu'*au maximum*, c'est-à-dire pour les sons les plus forts transmis sans crachement, l'amplitude de la vibration de la plaque est de 1 à 2 millièmes de millimètre !

Si on calcule alors la variation de pression que détermine un déplacement de 1 micron (millième de millimètre) de la plaque du récepteur, on trouve qu'elle est inférieure à 2 millionièmes !

On voit donc de quelle extrême sensibilité est notre tympan aux variations de pression. D'ailleurs, les nombres que nous venons de donner sont certainement de beaucoup supérieurs à la réalité. En effet, lord Rayleigh a effectué des expériences extrêmement intéressantes à ce sujet. Faisant vibrer un sifflet, avec une dépense d'énergie facilement mesurable, et calculant l'amplitude de la vibration de l'air à la distance maxima où le son est entendu, il trouva des nombres de l'ordre de grandeur du millième de micron, bien inférieurs par suite à ceux que l'on réalise en téléphonie.

* * *

Nous allons maintenant décrire les principaux organes d'un poste téléphonique. Les ***transmetteurs*** sont tous des modifications de l'appareil de Hughes.

Dans le ***microphone Ader***, encore en service dans quelques anciennes installations, au lieu d'un seul crayon disposé verticalement, qui présente une trop grande instabilité produisant les bruits de « friture » caractéristiques, on dispose dix crayons de charbon horizontalement en deux rangées

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de cinq (fig. 686). Leurs extrémités sont d'un diamètre plus petit que le crayon lui-même et reposent dans des logements pratiqués dans trois barres de charbon, *a*, *b*, *c*. L'ensemble est recouvert d'une planchette de sapin inclinée formant pupitre.

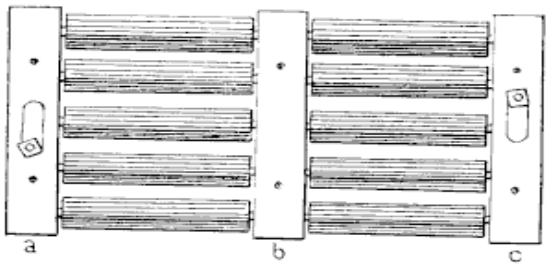


Fig. 686. — Microphone Ader.

Chose curieuse, si on remplace le sapin par un autre bois, la transmission est moins nette et moins intense, sans que l'on puisse expliquer ce phénomène.

A l'heure actuelle, on tend de plus en plus à employer les ***microphones à grenaille de charbon***. En principe, ils sont constitués par deux lames minces de charbon, A, B (fig. 687), dont l'une est plane, celle devant laquelle on parle, et l'autre présente des alvéoles dans lesquels se trouvent placées des billes de charbon plus petites, s'appuyant constamment contre la lame B.

Au lieu de billes, on emploie plus généralement de la grenaille de charbon, comme dans le ***microphone de l'Administration des téléphones***, dont la figure 688 montre une coupe schématique de l'appareil. Le boîtier B renferme un bloc de charbon C fixé contre le fond du boîtier par une vis V, l'ensemble étant isolé de la masse par des rondelles d'ébonite E. Le bloc de charbon est évidé, et la cuvette K ainsi formée est remplie de charbon granulé maintenu en place par une rondelle de feutre. Enfin, une membrane de charbon G ferme la cavité en s'appuyant sur la rondelle de feutre. Le courant est amené d'une part au boîtier (et par suite à la membrane G) et d'autre part au bloc de charbon par la prise P montée sur le boulon V.



Fig. 687. — Microphone à grenaille.

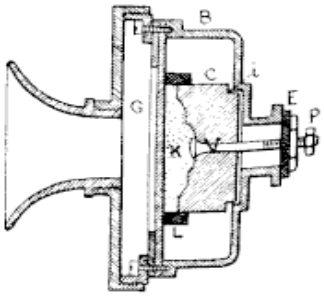


Fig. 688. — Microphone de l'Administration des téléphones.

* * *

Un transmetteur ultra-sensible, utilisé dans les bureaux centraux, où il est nécesseaire de ne parler qu'à voix basse afin de ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas gêner les opérateurs voisins, est le ***transmetteur Solid-Back***.

La figure 689 montre la coupe de l'appareil. Il comprend deux parties : le microphone proprement dit et le boîtier. Le premier est constitué par une petite boîte AB renfermant 4 décigrammes de graphite en petits grains. Le couvercle A de la boîte est formé par une bague de laiton maintenant serrée une lame mince de mica C servant de support à un disque de cuivre D terminé par une vis V sur laquelle est fixée la plaque vibrante P du transmetteur. Le boîtier est constitué par un morceau de cuivre F muni d'un rebord intérieur sur lequel repose la plaque vibrante P. Un pont transversal G sert à presser sur la plaque ; enfin, le couvercle M garni d'un boulon isolé X supporte l'ensemble. Le courant entre par X, va par le fil *f* à la plaque vibrante isolée de la masse par des rondelles de caoutchouc, traverse les grains de charbon et sort par une borne fixée sur la masse de l'appareil.

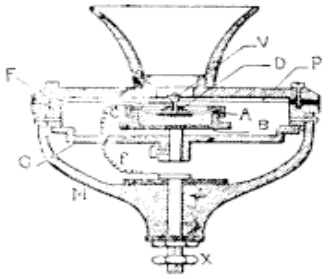


Fig. 689. — Transmetteur Solid-Back.

Quand on parle devant P, la vibration de cette plaque se transmet par la vis V à la lame mince de cuivre qui laisse toute liberté au mouvement de la plaque P. C'est grâce à cette absence de liaison entre les deux organes d'une part et, de l'autre, à la flexibilité parfaite de la lame de cuivre que l'on doit l'excellent fonctionnement de cet appareil, qui est en même temps plus robuste que le transmetteur de l'Administration, car la membrane métallique est plus solide que la plaquette de charbon.

* * *

Les ***récepteurs*** actuels ne diffèrent que par des détails de construction du téléphone primitif de Bell.

Dans la plupart des appareils, on remplace l'aimant droit par un aimant en fer à cheval, ce qui rend l'ensemble plus compact, donne une meilleure utilisation de l'aimant dont les deux pôles sont employés, et enfin assure une plus longue durée par suite de la meilleure fermeture du circuit magnétique.

Le ***récepteur Ader*** est encore un des plus répandus aujourd'hui ; aussi en donnerons-nous une brève description (fig. 690). L'aimant est un anneau plat constitué par deux lames superposées M_1, M_2. Sur les pôles sont fixées deux équerres *e*, *e'*, en fer doux, dont les parties verticales munies de joues en cuivre constituent les noyaux de deux bobines B, B' dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quelles passe le courant téléphonique. Devant elles, à très petite distance (3 à 6 dixièmes de millimètre), se trouve la plaque vibrante en fer doux P. Dans certains appareils, un anneau de fer doux E est disposé autour du trou central du pavillon d'écoute destiné à renforcer le champ magnétique et à augmenter la sensibilité de l'appareil. C'est le *surexcitateur*. Le courant est amené par deux bornes isolées.

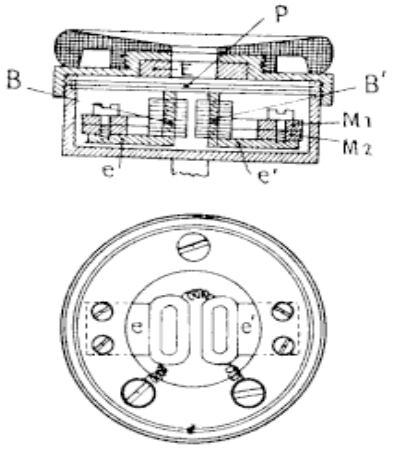


Fig. 690. — Récepteur Ader.

* * *

Dans certains appareils téléphoniques dit ***monophones***, on réunit dans le même boîtier le microphone et le récepteur. La figure 691 montre un des nombreux dispositifs réalisés ; on reconnaît facilement les organes dont nous venons de parler.

En Amérique, l'appareil téléphonique est toujours fourni par la Société des téléphones (société privée). Récepteur et transmetteur sont entièrement séparés. Le modèle est unique, standard dans tous les États-Unis et le Canada. Les spécialistes américains attribuent à ce fait la netteté remarquable des communications. Tous les abonnés ayant le même modèle d'appareil, les postes sont identiques et par suite fonctionnent de la même façon ; en un mot, ils sont équilibrés. De plus, la séparation du récepteur et du microphone permet d'avoir des appareils plus robustes et aussi plus parfaits, car la proximité trop grande des deux organes dans un même boîtier donne lieu à des phénomènes d'induction électrique qui nuisent à la bonne transmission.

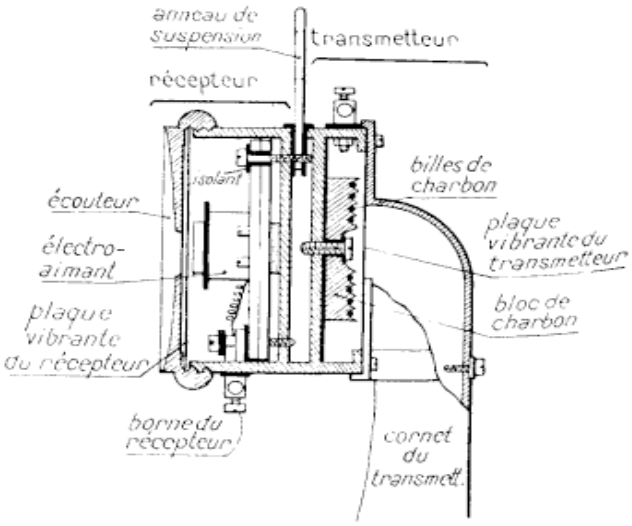


Fig. 691. — Monophone.

Moins élégants, plus encombrants, moins commodes d'emploi peut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être que nos appareils français, ils ont une netteté et une puissance d'audition tout à fait remarquables.

* * *

Les **sonneries** d'appel sont également un des organes indispensables du poste téléphonique. Tout le monde connaît la *sonnerie trembleuse ordinaire*, qui n'est d'ailleurs qu'un rupteur à lame vibrante de bobine de Ruhmkorff. Aussi n'en dirons-nous rien, surtout qu'elle n'est employée qu'en téléphonie privée. La figure 692 permet d'en comprendre le fonctionnement sans explications complémentaires. Dans les installations de réseau, on se sert de *sonneries polarisées*, dont la figure 693 montre le schéma de

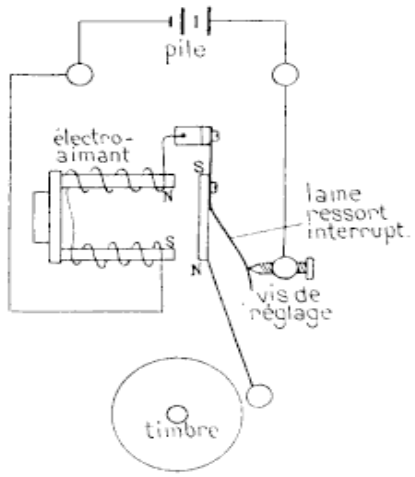


Fig. 692. — Sonnerie ordinaire.

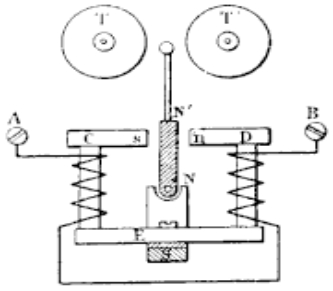


Fig. 693. — Sonnerie polarisée.

fonctionnement, que l'on peut rapprocher d'ailleurs de celui du relais polarisé dont nous avons parlé à propos de la télégraphie.

Le courant passe dans un électro-aimant à branches écartées, sur la culasse E duquel se trouve fixé un aimant NS par sa face sud. Sur le pôle N est montée une palette en fer doux NN' terminée par une tige pouvant frapper alternativement sur les deux timbres T, T'. Actionnons l'appareil par du *courant alternatif*. Quand le courant va de A vers B, l'électro-aimant détermine la formation d'un pôle sud par exemple sur la branche C et nord sur la branche D. La palette de fer doux, qui est aimantée comme le pôle nord auquel elle est fixée, sera attirée par C et repoussée par D. Le timbre T sera donc actionné. A la demi-période suivante du courant alternatif, le sens du courant est renversé, il va de B vers A, le sens de toutes les actions est renversé également, c'est le timbre T' qui vibre.

L'emploi des sonneries polarisées a permis de réaliser un progrès consi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dérable dans l'installation des postes téléphoniques. En effet, grâce à elles, on peut superposer sur la ligne *à la fois des courants alternatifs pour l'appel et du courant continu pour le fonctionnement du microphone*. Cela a permis de supprimer complètement les piles chez l'abonné et de remplacer le système primitif *à batterie locale* par le système *à batterie centrale*. Nous reviendrons plus loin sur cet important progrès.

* * *

Pour séparer le courant alternatif destiné à actionner la sonnerie du courant continu nécessaire pour le fonctionnement du microphone, on se sert d'un petit ***condensateur*** qui laisse passer le courant alternatif, mais oppose un obstacle infranchissable au courant continu.

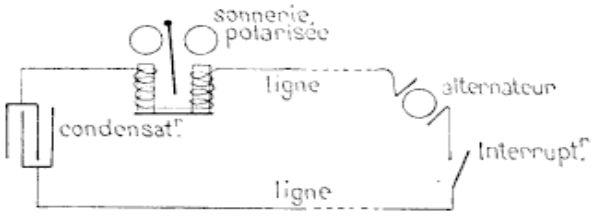


Fig. 694. — Montage d'une sonnerie polarisée sur un circuit téléphonique.

Les condensateurs de téléphone ont une capacité de 2 microfarads ; ils sont constitués par un rouleau fortement comprimé formé de deux feuilles d'étain (les deux armatures) séparées par du papier de soie (le diélectrique). La figure 694 montre le montage de ce condensateur sur le circuit de la sonnerie. Le condensateur se charge d'un signe ou de l'autre, suivant la période du courant alternatif, et se décharge, lors du renversement de sens, dans le circuit de la sonnerie, qu'il actionne alors.

* * *

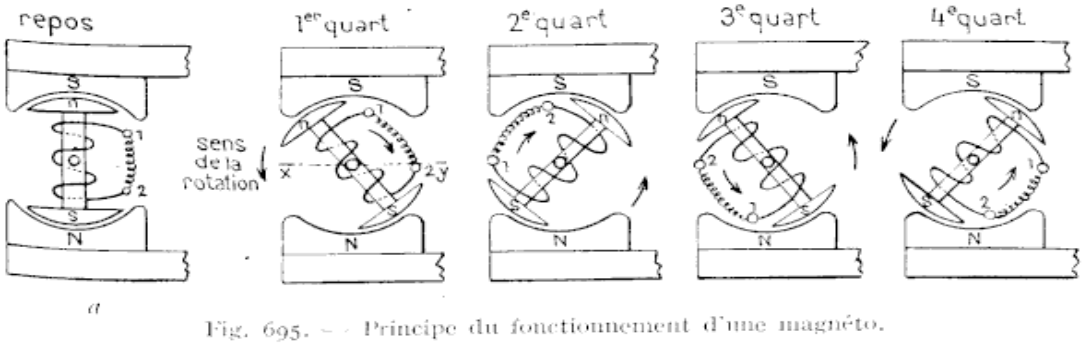
Il faut, d'après ce que nous venons de voir, deux sources d'électricité pour faire marcher un poste ordinaire, l'une destinée au fonctionnement du microphone, l'autre à celui de la sonnerie. Il y a donc intérêt, au point de vue de l'entretien des installations, à diminuer ce nombre si possible.

Dans un certain nombre de postes, avant l'établissement du système à batterie centrale, on a résolu la question par l'emploi d'une ***magnéto d'appel***. Comme cet appareil est le même, tout au moins en principe, que celui qui sert à assurer l'allumage du mélange explosif dans les cylindres des moteurs à explosion, moteurs d'automobile en particulier, nous allons l'étudier avec quelques détails.

La magnéto est un générateur d'électricité extrêmement simple, constitué par un aimant permanent entre les pôles duquel tourne une bobine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

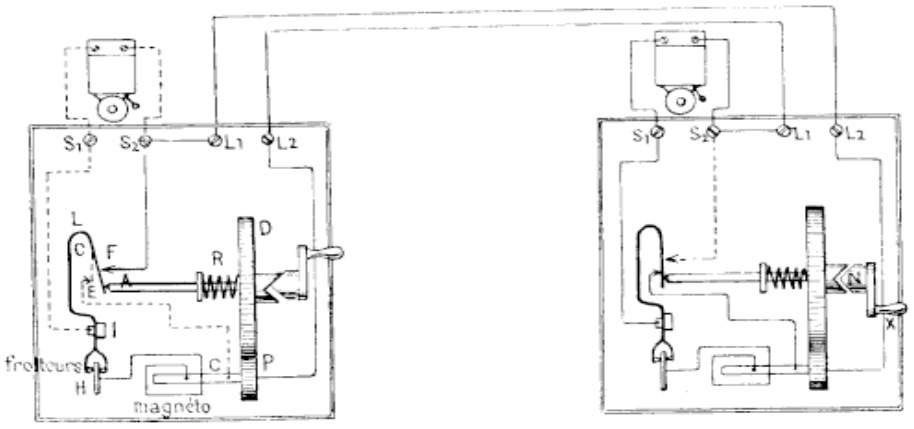
de fil enroulée sur un noyau de fer doux. Voyons les phénomènes qui se produisent lorsque l'on fait tourner la bobine. Au repos, sous l'influence du magnétisme du système inducteur, le fer de la bobine s'aimante et la bobine prend la position indiquée figure 695, *a*. Supposons qu'on la fasse



a

Fig. 695. — Principe du fonctionnement d'une magnéto.

tourner maintenant de droite à gauche, dans le sens de la flèche. Dans le premier quart de tour, les pôles du noyau s'éloignent des masses polaires, leur aimantation diminue donc ; par suite, le flux qui traverse la bobine diminue aussi, et il se crée dans celle-ci un courant induit *direct* dirigé dans le sens 1-2. Dans le deuxième quart de tour, la polarité du noyau



Poste appelant. Poste appelé.

Fig. 696. — Montage de deux magnétos d'appel et de leurs sonneries.

change de sens, mais, comme le sens de la variation du flux est aussi inversé simultanément, puisque le flux se remet à croître, le sens du courant dans la bobine est le même, de 1 vers 2. Au contraire, dans le troisième quart de tour et le quatrième quart, il est facile de voir que le courant est de sens contraire au précédent, dirigé de 2 vers 1.

En résumé, dans un tour complet de la bobine, il y a quatre émissions

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de courant induit se suivant deux à deux dans le même sens ; l'appareil émet donc deux courants alternatifs par tour de bobine.

Dans la réalisation pratique, l'aimant est formé par un groupe d'aimants en fer à cheval ; la bobine, qui a la forme d'un double T, a une de ses extrémités fixée à la masse de fer lui servant de noyau et l'autre extrémité reliée à un doigt métallique isolé monté sur l'extrémité de l'arbre de rotation. Cet arbre est commandé par une roue dentée D (fig. 696) engrenant sur un petit pignon P, ce qui permet de lui communiquer une grande vitesse de rotation. Le courant est recueilli par des frotteurs à ressort appuyant sur un disque H solidaire du doigt auquel aboutit l'une des extrémités de l'enroulement ; l'autre extrémité est reliée à la masse, comme nous venons de le dire, par l'intermédiaire de l'arbre et des paliers et aboutit à la borne L_2.

On utilise la manœuvre à effectuer pour faire tourner la magnéto pour retirer ou introduire la sonnerie dans le circuit. En effet, pour que l'appel soit énergique, il faut que les résistances électriques inutiles soient supprimées, en particulier celle de la sonnerie du poste *appelant* (d'où nécessité de la court-circuiter) et on devra de même éviter de faire traverser au courant l'enroulement de la magnéto du poste *appelé*. On doit donc n'avoir en circuit que la magnéto du poste appelant et la sonnerie du poste appelé. C'est ce que réalise le montage de la figure 696, grâce au commutateur C. L'arbre A de la manivelle peut se déplacer latéralement, mais est poussé constamment vers la gauche par un ressort R. En le tirant vers la droite, la lame-ressort L, qui, en temps normal, est appliquée contre le contact E, vient au contraire s'appliquer sur le contact F, mettant ainsi le frotteur de la dynamo en communication avec la ligne L_1. La sonnerie du poste est donc court-circuitée, puisque les deux bornes S_1, S_2 sont reliées par le ressort R et le contact F. Le premier résultat est donc obtenu. Au poste appelé, la magnéto est dans l'état représenté sur la figure, et on voit que c'est elle qui est court-circuitée par le ressort, tandis que la sonnerie seule est en ligne.

* * *

Après avoir étudié les parties constitutives d'un poste, il nous reste à voir comment on les assemble pour réaliser l'***installation téléphonique complète***.

Un poste se comprend essentiellement : 1° un microphone et une pile reliés au fil primaire d'une bobine d'induction ; 2° un écouteur (ou deux) relié au fil secondaire de la bobine et aux deux fils de ligne ; 3° une sonnerie recevant le signal d'appel et une clef reliée à une pile pour actionner quand besoin est la sonnerie du poste appelé (ou celle du bureau cen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tral). Il y a donc trois circuits de ligne : 1° le circuit de réception d'appel ; 2° le circuit de transmission d'appel ; 3° le circuit de conversation.

La figure 697 montre une des nombreuses dispositions de ces trois circuits. Comme on le voit, il y a huit bornes, sur lesquelles sont en général gravées les lettres suivantes : L_1, L_2 pour les fils de ligne; S_1, S_2 pour le circuit de la sonnerie ; ZM (zinc microphone) et CM (cuivre microphone) pour le circuit du microphone ; enfin ZS (zinc sonnerie) et CZ (cuivre sonnerie) pour le circuit de la sonnerie d'appel. Pour faciliter le montage, les fils de divers circuits sont recouverts de soie de couleur différente : *jaune* pour le circuit d'appel, *bleu* pour celui de conversation, *tricolore* pour le fil commun à ces deux circuits et *rouge* pour le circuit microphonique.

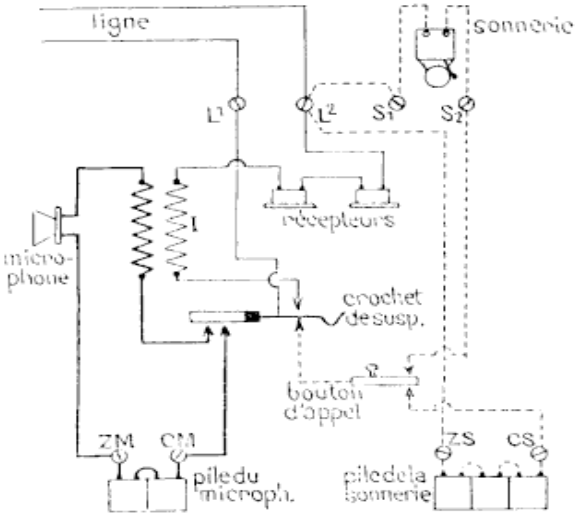


Fig. 697. — Schéma de montage d'un téléphone. Le circuit de conversation est en traits forts; le circuit de ligne est en traits fins ; le circuit d'appel est en traits ponctués.

A titre d'exemple, nous représentons figure 698 le schéma du poste mobile modèle 1902, qui est très facile à comprendre. L'écouteur est suspendu sur un levier terminé par un crochet. Ce levier, lorsqu'on décroche le téléphone, est relevé par un ressort et établit automatiquement les connexions nécessaires.

Dans la position d'attente représentée par la figure, deux lames-ressorts solidaires du crochet établissent la communication entre la ligne et la sonnerie. Le circuit est le suivant : ligne-L_1-p_1-s_1-a_1-b_1-S_1-sonnerie-S_2-b_2-a_2-s_2-p_2-L_2-ligne.

La transmission d'appel du poste s'effectue en appuyant sur le bouton d'appel qui relie les pôles de la pile de la sonnerie aboutissant aux contacts d_1, d_2 aux bornes a_1, a_2, et le circuit est alors : pile-ZS-d_2-a_2-s_2-p_2-L_2-ligne-L_1-p_1-s_1-a_1-d_1-pile.

Quand on décroche l'écouteur pour téléphoner, le crochet se relève et les lames-ressorts établissent le contact entre p_1c_1 et p_2c_2 ; en même temps, le ressort R vient mettre en communication les deux plots m, n. Le circuit aboutissant en s_1s_2 est par contre éliminé. Dans ces conditions, le circuit microphonique est le suivant : pile-CM-fil primaire-P-m-n-micro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

phone-ZM-pile. Quant au circuit de conversation, il est constitué par : ligne - L_1-p_1-c_1-téléphone-écouteur-fil secondaire F-c_2-p_2-L_2-ligne.

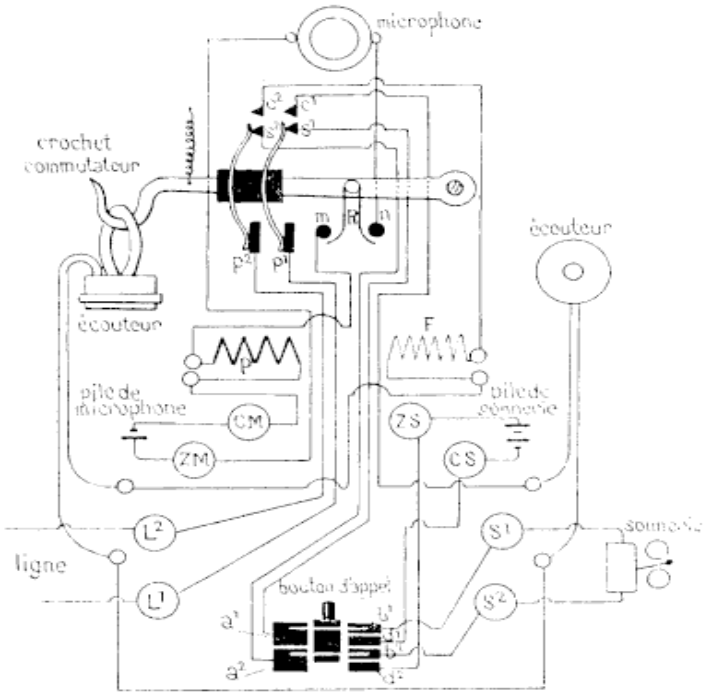


Fig. 698. — Schéma du poste mobile 1902.

* * *

Nous venons de voir comment est constitué le poste d'abonné. Il nous faut maintenant dire un mot des opérations qui s'effectuent au ***bureau central téléphonique*** pour permettre de relier deux abonnés quelconques.

Pour résoudre ce problème, on fait converger toutes les lignes à deux fils issues de chaque poste vers un point central où sera placé un appareil assurant l'intercommunication. On peut diviser les réseaux en deux grandes classes : ceux *à batterie locale*, lorsque chaque poste comporte une pile (ou une magnéto) d'appel et une pile microphonique ; ceux *à batterie centrale*, lorsque tout le courant nécessaire aussi bien pour l'appel que pour la conversation est fourni par une source d'électricité située au central. Actuellement, tous les réseaux modernes sont à batterie centrale, mais nous commencerons par étudier le système à batterie locale, qui permettra ensuite de se rendre mieux compte des perfectionnements modernes. Ajoutons d'ailleurs que, dans la *téléphonie privée*, dont nous dirons quelques mots, c'est encore le plus employé.

Les organes nécessaires au poste central sont les suivants : 1° un téléphone permettant de parler aux abonnés ; 2° des dispositifs de réception d'appel pour reconnaître les abonnés appelant ; 3° des organes de jonction mettant en communication deux postes quelconques du réseau.

* * *

L'organe de réception d'appel est l'***annonciateur***. C'est un électro-aimant (fig. 699) portant une armature A fixée à un ressort monté sur le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prolongement B d'une des pièces polaires. Quand le courant passe, A est attiré ; la tige C portant un doigt F se soulève et libère le volet V qui démasque le numéro de la ligne et en même temps ferme le circuit P d'une sonnerie d'appel en appuyant la lame E sur son contact.

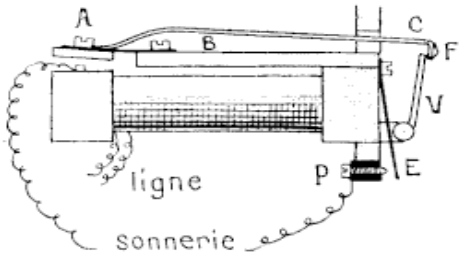


Fig. 699. Annonciateur.

* * *

Le dispositif de jonction est le ***jack***. Il est constitué par une pièce fixe en relation avec un circuit de ligne dans laquelle on introduit une fiche reliée par un cordon au circuit que l'on veut réunir à celui aboutissant à la pièce fixe.

La pièce fixe comporte quatre ressorts (*a*, *b*, *c*, *d*, fig. 700) reliés d'une part à la ligne (*a*, *b*), d'autre part à l'annonciateur A (*c*, *d*). Au repos, les ressorts *a* et *c*, *b* et *d* se touchent, de sorte que, si l'on envoie un courant dans la ligne, il actionne l'annonciateur A indiquant que l'abonné appelle.

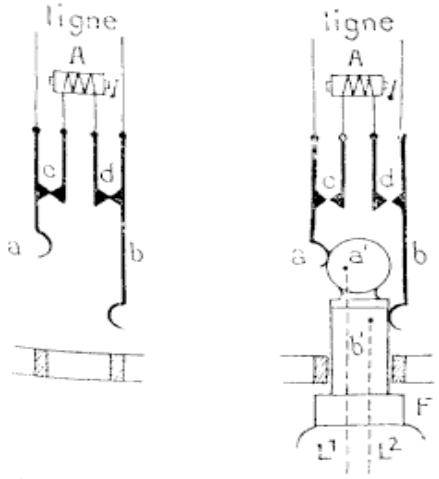


Fig. 700. Jack et fiche introduite dans le jack.

A ce moment, on introduit la fiche F, qui est constituée par deux parties métalliques *a'*, *b'*, isolées l'une de l'autre et reliées chacune avec un des deux fils du cordon. Ces deux pièces écartent respectivement les ressorts *a*, *b*, comme le montre la figure. L'annonciateur est donc automatiquement mis hors circuit et les deux fils de ligne réunis aux fils L_1, L_2 qui aboutissent par exemple au téléphone de l'opérateur du standard.

* * *

Annonciateur et jack de ligne sont réunis sur un ***meuble standard*** ou *tableau commutateur*. Le fonctionnement de cet appareil est représenté schématiquement figure 701.

Considérons seulement deux postes d'abonnés, 1 et 2, qui désirent être mis en communication. Le poste 1 appelle ; son annonciateur A_1 fonctionne. Au standard, l'employé introduit dans le jack la fiche I qui se trouve reliée à son autre extrémité à deux bornes c_1, f_1 qui communiquent avec le téléphone T de l'employé. Celui-ci prend la demande de l'abonné 1 qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

désire parler à l'abonné 2. Il enfonce alors la fiche II dans le jack de l'abonné 2 et appuie sur la clef C_2. Les deux fils de ligne sont alors reliés aux bornes de la pile P_2 et la sonnerie de l'abonné 2 est mise en fonctionnement. Cet abonné décroche son appareil et est en communication avec 1, les deux fiches I et II assurant la liaison.

Pour être averti de la fin de la conversation, l'employé peut soit intro-

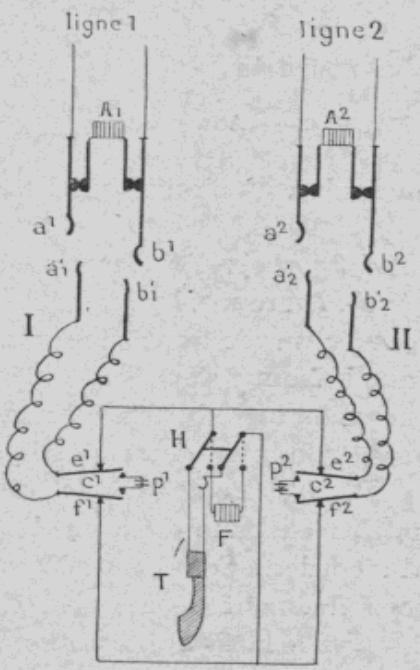


Fig. 701. — Schéma d'un central à batterie locale.

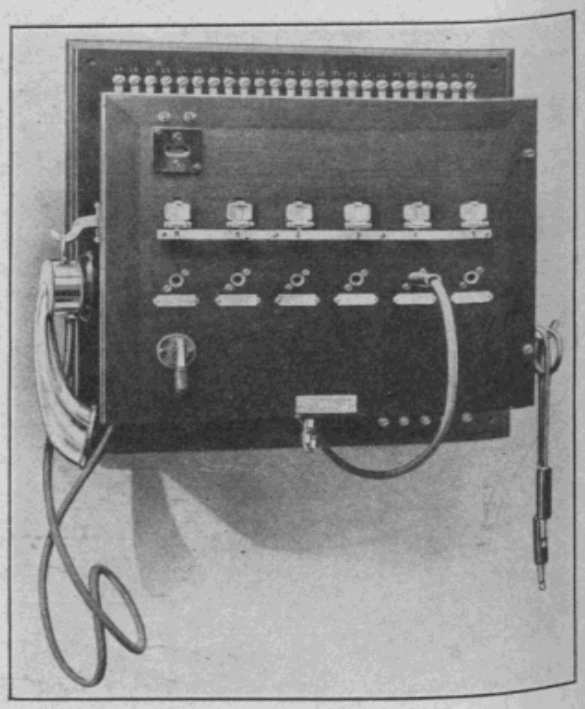


Fig. 702. — Tableau commutateur, fiches et jacks avec poste d'opérateur pour réseau à batterie centrale. Capacité : 1 ligne réseau, 5 lignes supplémentaires.

duire son téléphone T en dérivation, comme l'indique la figure, soit, en manœuvrant la clef H, dite *clef d'écoute*, remplacer son téléphone par un *annonciateur de fin de conversation* F qui fonctionnera lorsque les deux abonnés, ayant terminé leur conversation, appuieront sur leur bouton d'appel pour prévenir le poste central.

* * *

Nous allons maintenant passer au cas du ***système à batterie centrale***. On a remarqué, dans les installations dont nous venons de parler, que chaque poste possède deux piles : l'une pour actionner la sonnerie, l'autre pour alimenter le circuit de conversation. C'est un premier inconvénient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

très grave, car l'entretien des piles est une opération difficile lorsqu'il y a plusieurs milliers d'abonnés sur un réseau.

Un autre inconvénient réside dans la nécessité, pour obtenir une communication, d'appuyer sur un bouton d'appel ou de tourner une magnéto

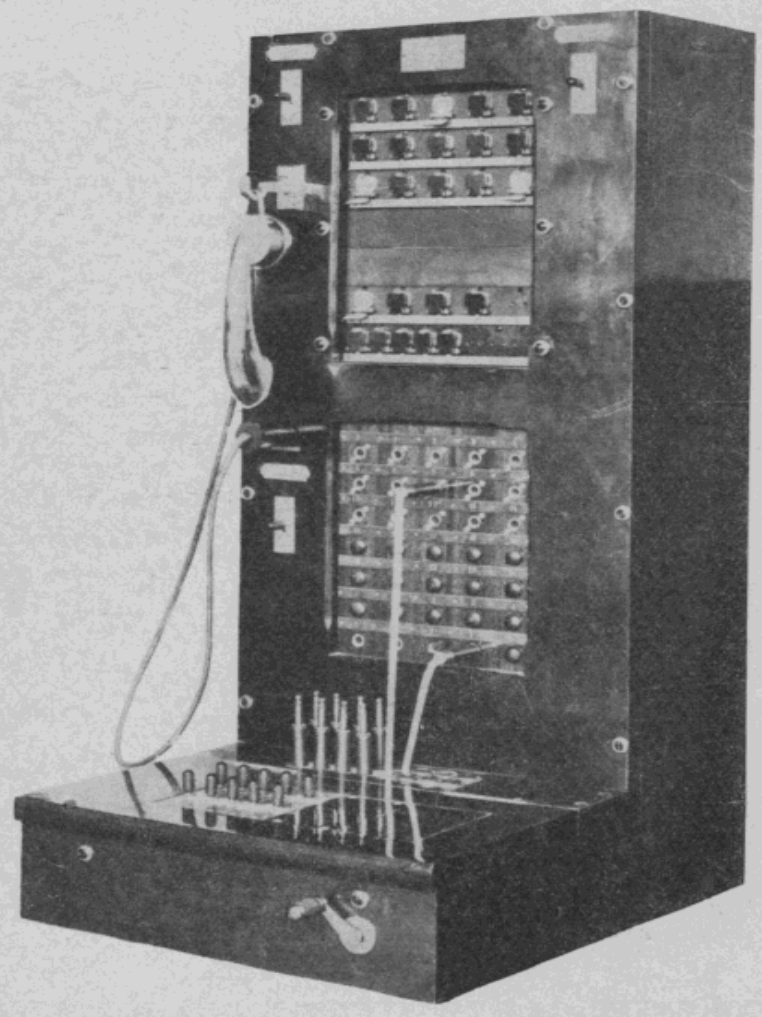


Fig. 703. — Standard mobile à volets. Capacité : 5 lignes réseau, 25 lignes de postes, 8 paires de cordes.

et, lorsque la conversation est terminée, de donner le signal de fin pour être sûr que la ligne sera de nouveau libre.

Enfin, au bureau central, l'employé doit se brancher fréquemment sur la ligne pour savoir si la communication est terminée, dans le cas où l'un des abonnés ne donne pas le signal de fin ; de plus, il doit relever les volets des annonciateurs. Lorsqu'un standard comprend déjà une centaine de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lignes, ce travail est très ardu et rend peu rapide le branchement des divers postes entre eux.

C'est à tous ces inconvénients que remédie le système à batterie centrale. Ici, chez l'abonné, plus de piles, plus de bouton d'appel, plus de nécessité de signaler que la conversation est terminée ; appel et signal de fin

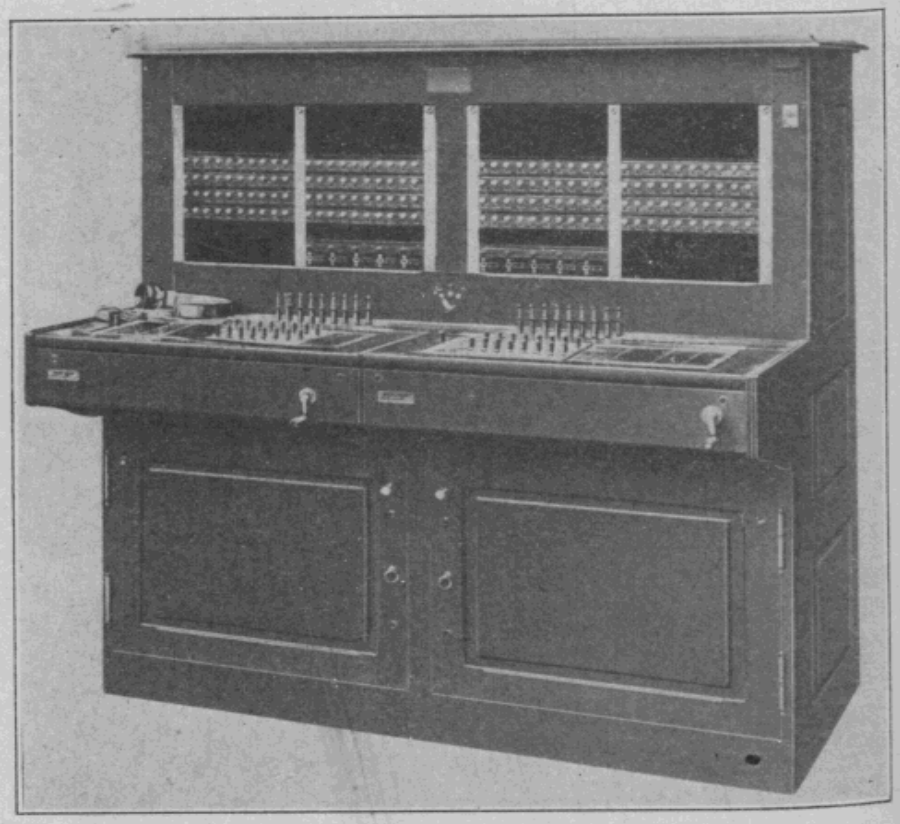


Fig. 704. — Standard mixte à batterie centrale à deux postes d'opératrices. Capacité : 20 lignes réseau, 200 lignes de postes, 30 paires de cordons.

sont automatiquement donnés par le fait seul de décrocher ou de raccrocher le récepteur. Au standard, les annonciateurs d'appel et de fin de conversation sont remplacés par des lampes qui s'allument et s'éteignent au moment voulu, de sorte que le rôle de l'employé est simplement d'établir les communications.

En conséquence, au poste de l'abonné, les organes de transmission d'appel sont supprimés (piles ou magnétos) ou sans emploi (bouton d'appel). La ligne ne devant être fermée qu'au moment où l'abonné décroche son récepteur, le circuit de réception d'appel est ouvert par l'intercalation d'un condensateur et la sonnerie ordinaire est remplacée par une sonnerie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

polarisée. Le central appelle donc l'abonné au moyen de courant alternatif.

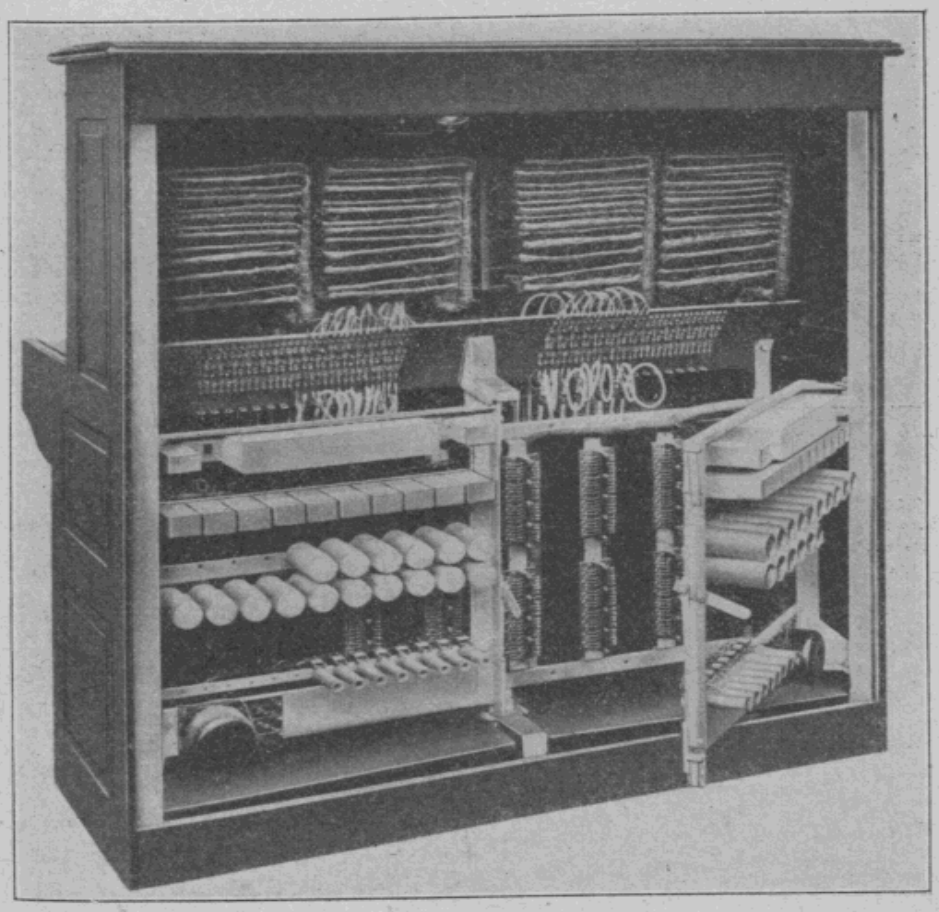


Fig. 705. — Vue arrière du standard précédent.

* * *

Le montage d'un poste d'***abonné à batterie centrale*** est représenté schématiquement sur la figure 706. On voit que le rôle du crochet C est simplement de fermer le circuit de ligne et le circuit primaire ; ces deux circuits sont tous deux alimentés par le courant de la batterie centrale et ont une partie commune dans laquelle est intercalé le microphone. Le fonctionnement est le suivant : le crochet étant relevé, le courant continu passe dans le circuit de ligne et dans la partie du circuit primaire qui est commune avec lui ; il rencontre donc sur sa route le microphone. Il ne peut traverser le récepteur, car le condensateur lui barre la route. En parlant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

devant le microphone, les variations d'intensité du courant se transmettent par induction dans l'enroulement secondaire de la bobine d'induction. Inversement, quand le poste reçoit une communication, les variations d'intensité sont reproduites par induction dans le circuit local renfermant le récepteur.

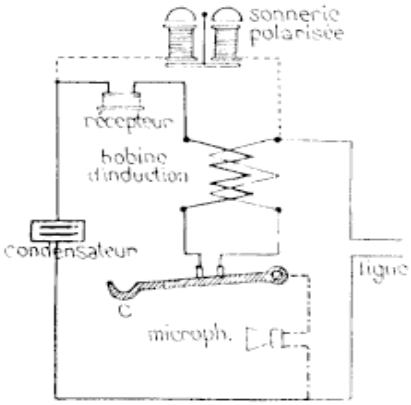


Fig. 706. — Poste d'abonné à batterie centrale.

Le circuit de sonnerie est en traits pointillés ; le circuit primaire de ligne est en traits pleins gros ; le circuit secondaire est en traits fins. La partie commune est en traits mixtes.

* * *

Au standard, lorsque le récepteur est décroché, le courant continu circule dans la ligne, et immédiatement une lampe s'allume, un électro-aimant E attirant une armature A fermant le circuit d'éclairage. Quand l'opérateur enfonce la fiche dans le jack correspondant à l'abonné, ce circuit est rompu et la lampe s'éteint. Le montage est analogue à celui de la figure 707. A partir de ce moment, c'est une lampe auxiliaire dite de *supervision*, montée sur le cordon souple d'intercommunication, qui renseigne sur la présence de l'abonné sur sa ligne. Cette lampe se rallume dès que l'abonné raccroche son récepteur.

Quant à l'appel d'un abonné, il s'effectue en envoyant dans la ligne un courant alternatif qui, chargeant et déchargeant le condensateur disposé sur le circuit de la sonnerie, actionne celle-ci.

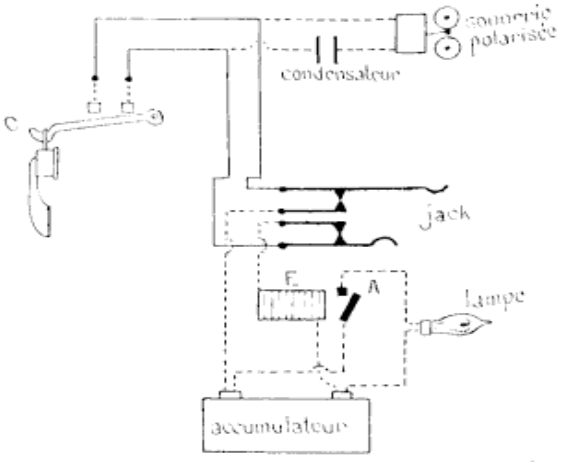


Fig. 707. — Montage d'une lampe d'appel.

* * *

Nous venons de parler des standards, et on comprend facilement qu'un seul opérateur ne peut surveiller qu'un nombre assez petit d'abonnés. Dans les grandes villes, où chaque bureau dessert 10 000 ou 20 000 abonnés, il serait impossible d'adopter le dispositif précédent, et on a alors recours aux ***multiples***, dont nous allons exposer le principe de fonctionnement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chaque ligne d'abonné communique non seulement à un *jack individuel* et une lampe d'appel, comme dans les standards, mais de plus à un certain nombre d'autres jacks, répartis le long du multiple et disposés de telle façon qu'un employé quelconque puisse utiliser l'un d'eux si la ligne correspondante est demandée par l'un des abonnés qu'il dessert. Ce sont les ***jacks généraux***. La figure 718 montre le principe du montage.

Ainsi, un employé a devant lui les jacks individuels et les lampes d'appel de cent abonnés par exemple et en plus les 10 000 ou 15 000 jacks généraux reliés aux lignes de tous les abonnés du bureau.

La figure 709 montre la vue d'un panneau de multiple : en bas, les organes des abonnés particuliers à l'opérateur ; en haut, les jacks généraux.

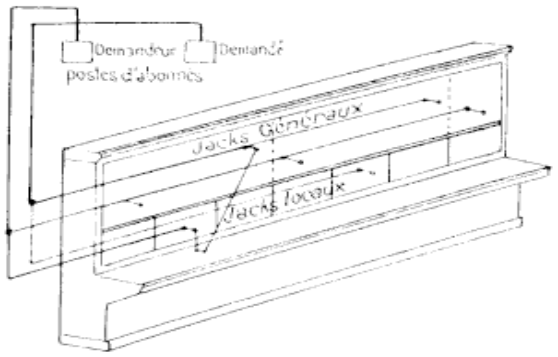


Fig. 708. — Système multiple simple.

Afin que chaque employé puisse atteindre tous les jacks généraux de tous les abonnés, il n'a directement devant lui que le tiers du nombre total des jacks généraux, mais, en prenant soit sur le panneau qui est à sa droite, soit sur celui qui est à sa gauche, il peut communiquer avec l'ensemble des abonnés.

Quand un abonné demande un numéro du même bureau, le téléphoniste commence par s'assurer que la ligne demandée est libre, et pour cela il lui suffit de toucher avec la fiche de l'appeleur le jack général de l'abonné appelé. Si celui-ci est déjà en communication, on entend un bruit bien déterminé dû au passage du courant dans le circuit. En effet, tous les jacks généraux d'un abonné sont intercalés dans un même circuit comprenant également la batterie centrale du bureau, circuit qui est ouvert en temps normal, mais automatiquement fermé quand la fiche d'un cordon de jonction quelconque est déjà enfoncée dans l'un de ces jacks.

* * *

Dans les réseaux desservant les grandes villes, l'impossibilité de réunir plus de 12 000 à 15 000 jacks généraux dans un seul panneau en les rendant accessibles à l'opérateur, l'intensité du trafic qui croît avec le nombre des abonnés, la nécessité de réduire le développement total des lignes extérieures, exigent l'installation de plusieurs bureaux centraux ; la région à desservir est divisée en secteurs ou quartiers comprenant chacun un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nombre d'abonnés suffisant pour équiper un bureau central simple.

Chaque bureau central est constitué par deux groupes distincts de tables : les tables A contiennent les jacks et les signaux d'appel, et les tables B les jacks généraux des abonnés ; des circuits de jonction et de

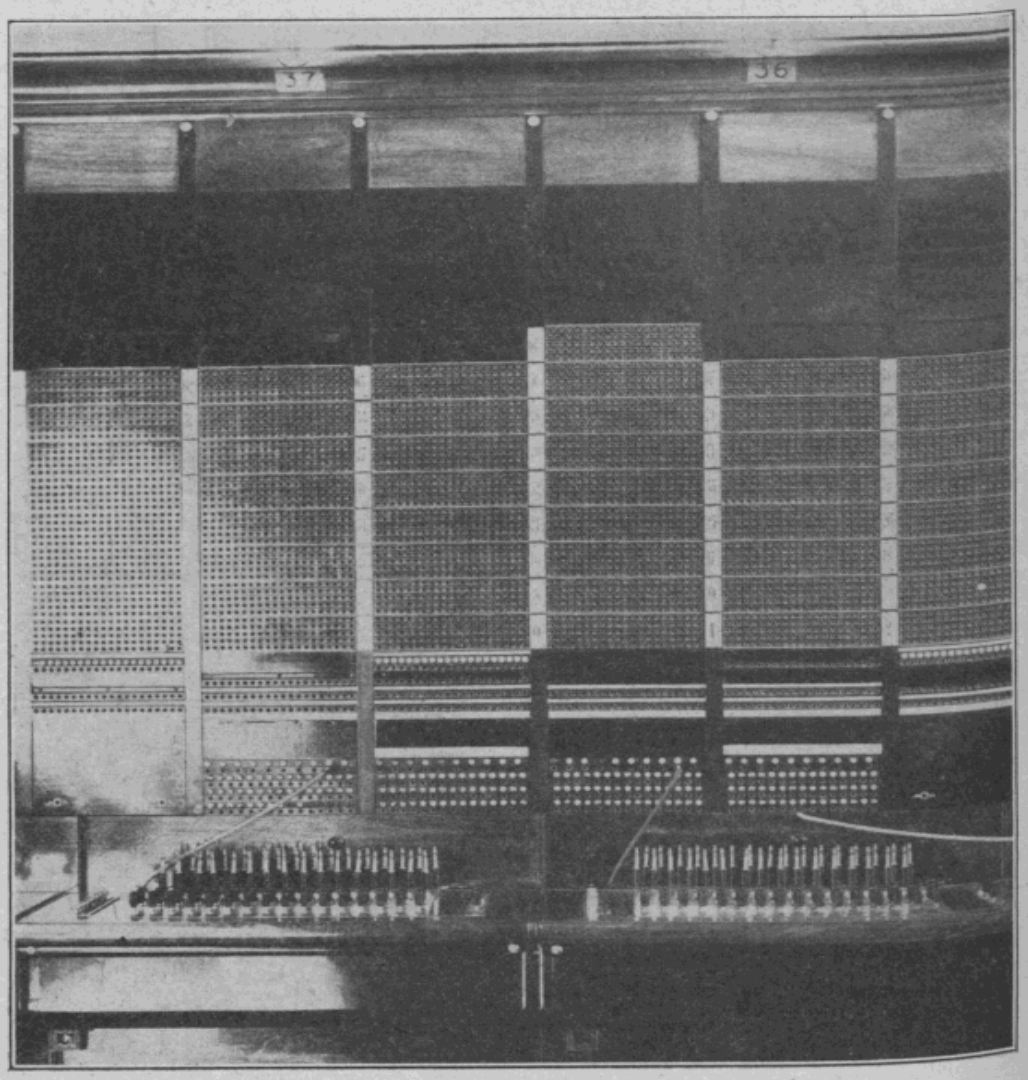


Fig. 709. — Détail des deux groupes de départ du multiple téléphonique de Lyon-Vaudrey.

conversation relient les tables A de chaque bureau central aux tables B non seulement du bureau central considéré, mais encore de tous les autres bureaux centraux de l'agglomération ; chaque circuit de jonction commence aux tables A du bureau central d'origine des jacks multiples de départ, et se termine par une fiche avec cordon d'arrivée dans une des tables B du bureau central de destination (fig. 710).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'opérateur A, recevant une demande de communication, ne connecte plus directement par un circuit de cordons le jack d'appel de l'abonné demandeur au jack d'appel ou multiple de l'abonné demandé, mais se met en relation par un circuit de service ou de conversation avec un opérateur B du bureau central auquel appartient l'abonné demandé ; après indication par l'opérateur B du circuit de jonction à employer, la communication est établie par les deux opérateurs, le jack d'appel de l'abonné demandeur étant relié à la table A par un circuit de cordons au jack de départ du circuit de jonction, tandis que la fiche d'arrivée de ce circuit à la table B est insérée dans le jack multiple de l'abonné demandé.

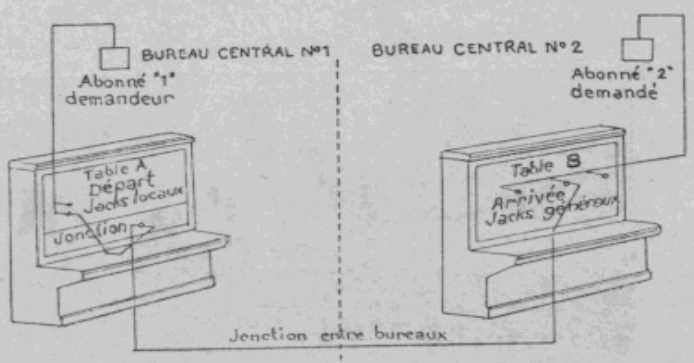


Fig. 710. — Système multiple à plusieurs bureaux centraux.

* * *

La répartition des lignes sur les jacks des tableaux à cent numéros, les permutations à opérer ultérieurement entre ces lignes et, enfin, les



Fig. 711. — Vue des groupes de départ et tables de renseignements du central Élysées à Paris.

coupures à effectuer pour la recherche des dérangements, nécessitent des dispositions spéciales pour l'arrivée des fils de ligne des abonnés. Tous ces fils arrivent à une sorte de meuble en fer qui constitue le ***répartiteur*** et les fils sont distribués sur des coupe-circuit. D'autre part, des câbles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

venant du ou des tableaux, sont également amenés au répartiteur et leurs fils distribués sur des plots de raccordement. La liaison entre les coupe-circuit et les plots est faite ensuite au moyen de câbles à deux conducteurs

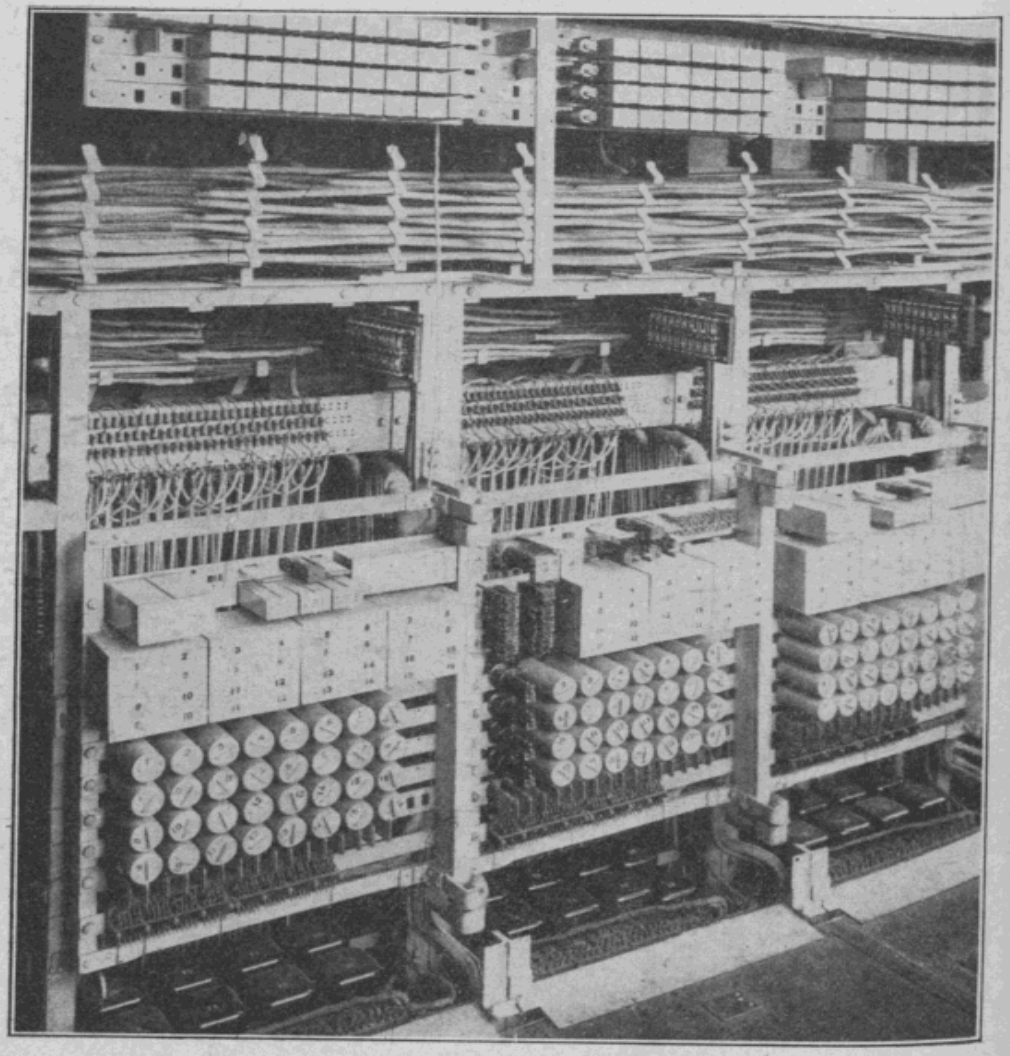


Fig. 712. — Vue des relais de groupes de départ du multiple Élysées.

sous coton ignifugé qu'il sera facile de déplacer ou changer, en cas de besoin.

La figure 711 montre l'ensemble du multiple Élysées du réseau de Paris, groupes de départ et table de renseignement; la figure 712, la vue arrière des bâtis des relais de groupe de départ, et la figure 713, la vue arrière du multiple de la ville de Tours, avec les répartiteurs visibles à droite de la photographie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

La ***téléphonie automatique***, dont l'usage tend de plus en plus à se répandre, aussi bien dans les installations privées que dans les réseaux publics, est certainement la meilleure solution du problème, puisqu'elle supprime l'élément humain, la trop célèbre demoiselle du téléphone. Il n'y a plus confusion de numéros mal compris, plus de coupures intempestives, une libération instantanée de la ligne sitôt la communication terminée. De plus, malgré son prix de premier établissement, un peu plus élevé que celui du système manuel, l'automatique assure une économie d'exploitation que l'on a calculé, pour Paris, ne pas être inférieure à 20 p. 100 du total des dépenses d'exploitation.

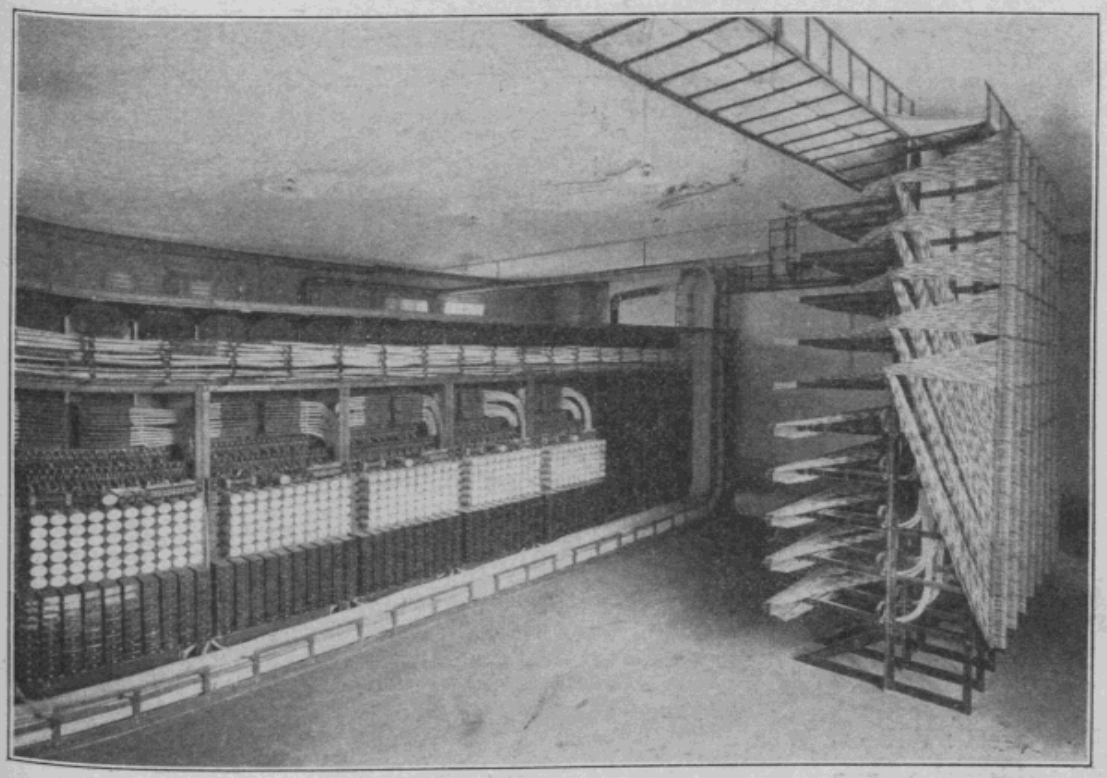


Fig. 713. — Vue arrière des groupes et répartiteur intermédiaire (à droite) du multiple de Tours.

Ajoutons qu'une installation automatique s'use au moins deux fois moins vite que l'installation manuelle ; comme, d'autre part, il n'y a plus aucune raison technique pour concentrer tous les organes automatiques dans un bureau unique, il sera possible d'installer des bureaux en différents points des réseaux téléphoniques ; de la sorte, on pourra réduire sensi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

blement la longueur de la ligne reliant chaque abonné à son central, et il importe de ne pas oublier que cette dépense est de beaucoup la plus forte de celles qu'entraîne une installation téléphonique.



Fig. 714. — Appareil téléphonique automatique, type portatif, avec cadran à dix numéros.

Si, à l'heure actuelle, on se borne presque uniquement à utiliser le téléphone automatique dans les réseaux urbains, il est cependant possible de l'employer pour les relations interurbaines. Des installations de ce genre fonctionnent parfaitement en Amérique, en Allemagne, et, en France, entre Rouen et Oissel.

Nous allons exposer le principe de fonctionnement d'un réseau automatique, sans entrer dans le détail des divers organes, assez compliqués mécaniquement d'ailleurs.

L'appareil de l'abonné ne se distingue de l'appareil ordinaire que par l'adjonction d'un cadran d'appel (fig. 714). Ce cadran, composé de deux parties, l'une fixe, l'autre mobile, est en réalité un petit interrupteur (fig. 715.) Voilà comment on utilise l'appareil : l'abonné décroche son récepteur et le porte à l'oreille ; au bout de deux secondes à peine, il percevra un ronflement qui, en téléphonie automatique, signifie : « J'écoute ». A ce moment, si l'abonné demande par exemple le nº 2345, il enfoncera son index dans le trou

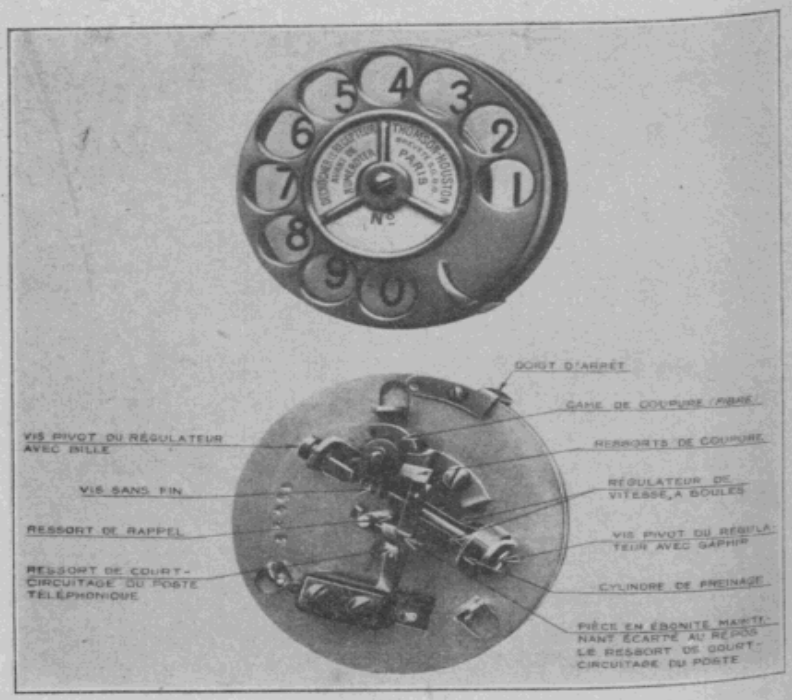


Fig. 715. — Cadran d'appel à dix numéros. Vue de face et vue arrière du boîtier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

marqué 2, fera tourner la partie mobile du cadran dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à une butée fixe et l'abandonnera ; lorsque

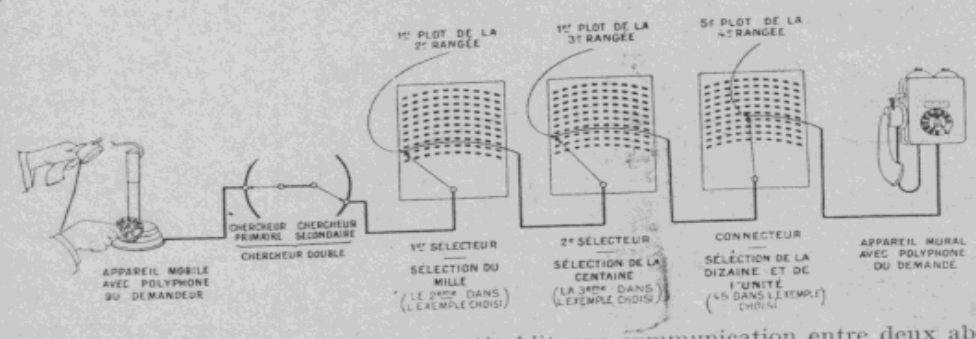


Fig. 716. — Schéma montrant comment s'établit une communication entre deux abonnés reliés à un central téléphonique automatique. L'abonné appelé porte le nº 2345.

le disque sera revenu au repos, il agira de la même manière pour faire un 3, puis un 4 et enfin un 5. Ceci fait, il sera relié à son correspondant et n'aura plus qu'à attendre que celui-ci, prévenu par la sonnerie, vienne à son appareil.

Voici comment tout ceci a été obtenu ; Dès que l'abonné a eu décroché son récepteur, son appareil s'est trouvé parcouru par le courant fourni par la batterie d'accumulateurs du central. Ce courant traverse au central les enroulements d'un électro-aimant ; grâce à des combinaisons convenables de ressorts actionnés par l'armature de cet électro-aimant, la communication a pu s'établir par sélections successives.

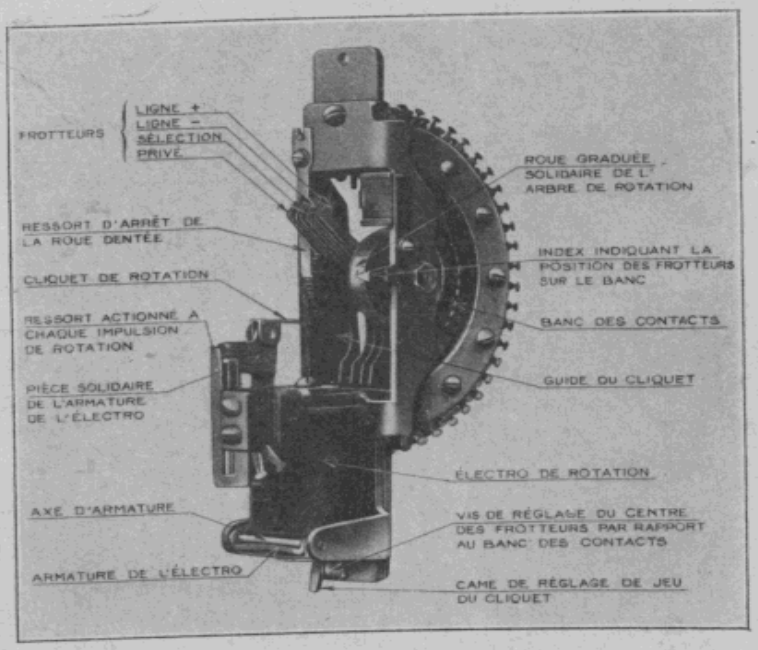


Fig. 717. — Barre de commutateur primaire rotatif avec son électro de rotation.

La sélection de l'abonné s'opère suivant l'idée qui vient le plus naturellement à l'esprit : si on a à chercher un numéro tel que 2345 dans un barème quelconque, on cherchera d'abord le mille correspondant à ce numéro, puis la centaine, ensuite la dizaine et enfin l'unité. C'est exacte-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment ainsi qu'opère le téléphone automatique. La ligne de l'abonné est d'abord reliée à un appareil qui choisit le mille, le sélecteur de mille; c'est cet appareil qui, lorsque le disque mobile du cadran d'appel reviendra à sa position de repos après qu'on aura fait le chiffre 2, montera de deux étages et reliera alors la ligne à un sélecteur de centaine; celui-ci montera de trois étages à l'envo du 3; la ligne sera alors reliée à un dernier appareil, le connecteur, qui, lui, achèvera la mise en communication, enverra le

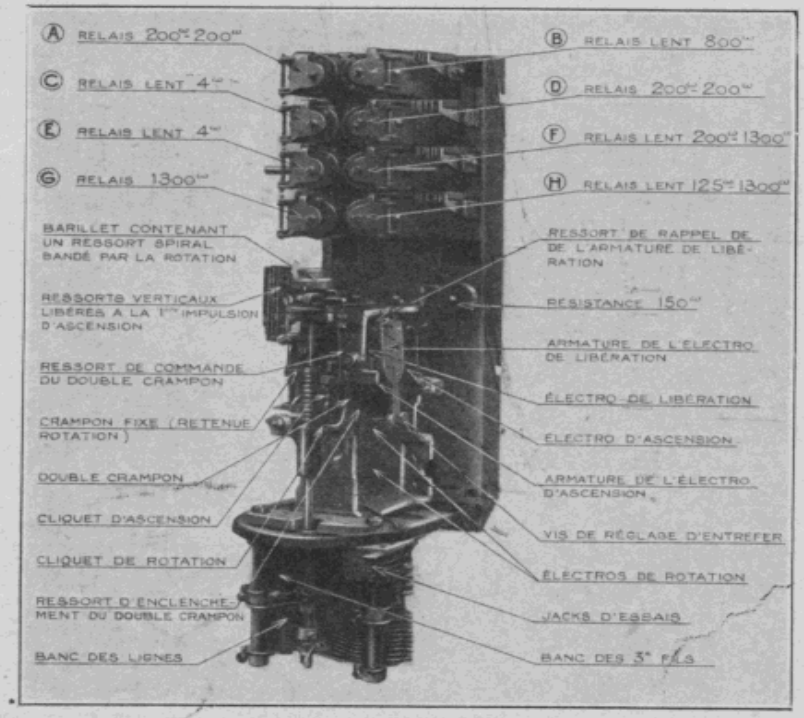


Fig. 718. — Vue des chercheurs.

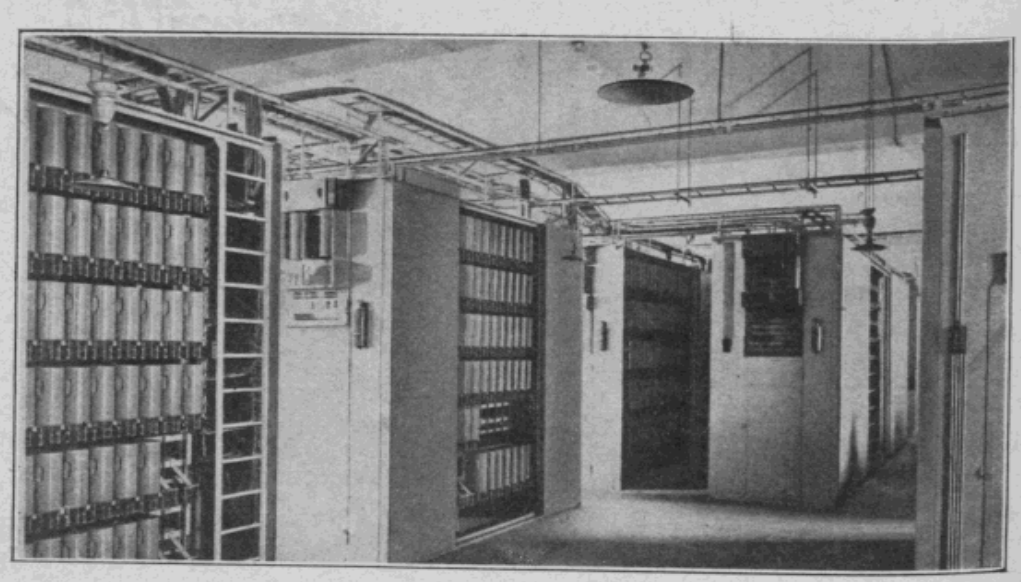


Fig. 719. — Vue arrière du central téléphonique de Rabat.

courant d'appel au poste du demandé ou préviendra par l'envoi d'un signal

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

spécial, dit signal d'occupation, le demandeur que la ligne qu'il désire est occupée (fig. 716).

La liaison de la ligne de l'abonné avec un sélecteur de mille se fait par l'intermédiaire d'un organe appelé *chercheur double*.

Le chercheur double comprend deux commutateurs rotatifs, appelés l'un chercheur primaire, l'autre chercheur secondaire. Ces commutateurs sont des appareils (fig. 717) comportant une partie fixe, des bancs de contacts auxquels sont reliés soit des lignes d'abonnés (dans le cas du chercheur primaire), soit des sélecteurs de mille (cas du chercheur secondaire), et une partie mobile : des frotteurs qui explorent ces contacts. Un électro-aimant dont l'armature porte un cliquet agit, grâce à celui-ci, sur une roue dentée solidaire des frotteurs et à chaque mouvement de l'armature les frotteurs avancent d'un contact.

Au décrochage de l'abonné, les deux commutateurs constituant le chercheur double entrent automatiquement en rotation. Les frotteurs de ces commutateurs sont reliés deux à deux ; ceux du chercheur secondaire s'arrêtent quand ils se trouvent sur des contacts correspondant à un sélecteur libre, ceux du chercheur primaire lorsqu'ils se trouvent sur les contacts de la ligne appelante.

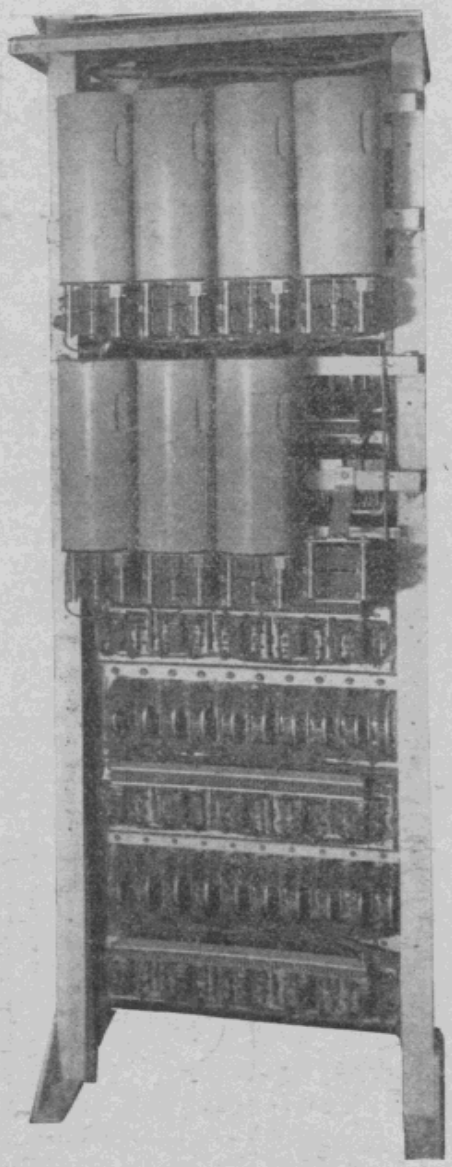


Fig. 720. — Autocommutateur à cinquante directions.

Le sélecteur et le connecteur sont deux appareils de construction mécanique semblable (fig. 718). Ils se composent essentiellement d'une partie fixe formée par un banc de contacts disposés en dix rangées horizontales comportant des contacts reliés à dix sélecteurs ou connecteurs (cas des sélecteurs) ou à dix lignes d'abonnés (cas des connecteurs) et d'une partie mobile constituée par un arbre portant à sa partie inférieure des frotteurs susceptibles d'explorer tous les contacts et à sa partie supérieure dix dents horizontales dans lesquelles peut s'engager un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cliquet porté par l'armature de l'électro en rotation. Chaque fois que l'électro d'ascension est actionné, et il est actionné par suite des coupures produits par le cadran d'appel du demandeur, l'arbre monte d'une dent ; de même, chaque fois que l'armature de l'électro de rotation est attirée, l'arbre tourne d'une dent. On conçoit donc qu'en commandant convenablement ces électros, on puisse amener les frotteurs sur n'importe lequel des contacts du banc.

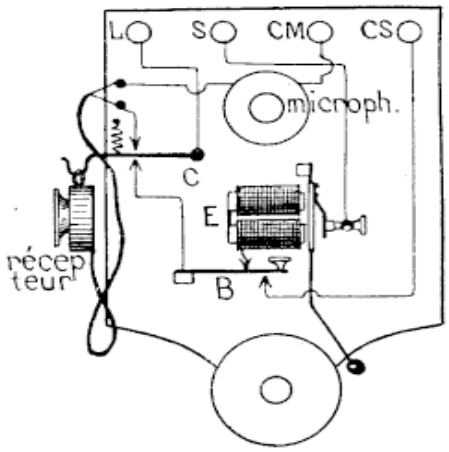


Fig. 721. — Schéma d'un téléphone privé.

La suite des différentes opérations, qui s'exécutent en beaucoup moins de temps qu'il n'en faut pour le dire, se fait grâce à de nombreuses combinaisons de circuits électriques dans lesquels entrent en jeu un grand nombre de relais. Ces relais agissent plus ou moins instantanément, avec plus ou moins d'énergie suivant leur résistance ; mais n'insistons pas sur les détails des appareils, le principe seul est intéressant ici.

La figure 720 permet de se rendre compte, sur un appareil à cinquante directions, de la disposition des divers organes. Le tableau suivant

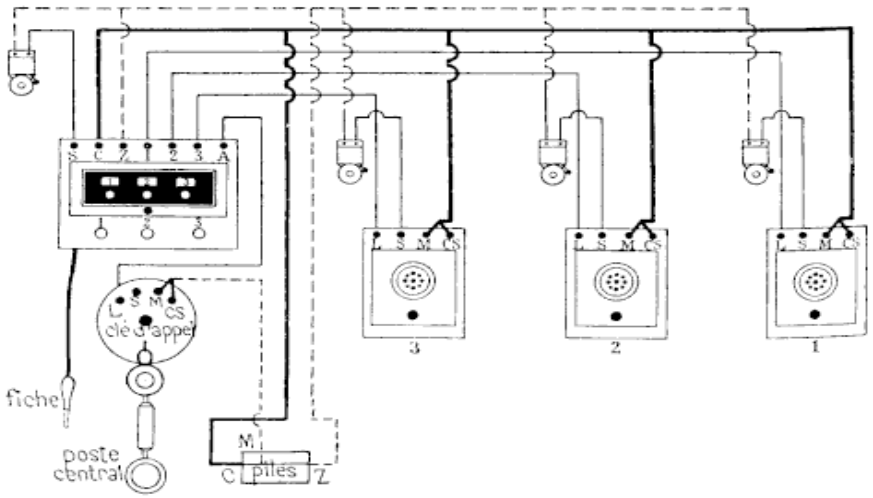


Fig. 722. — Poste central avec tableau annonciateur spécial à fiche.

donne la liste des réseaux automatiques *publics* en service en France, sans tenir compte des nombreuses installations dans des établissements privés tels que grands magasins, usines, administrations, qui de plus en plus adoptent ce nouveau système de téléphonie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Réseau de	Équipé à (en 1925).	Capacité prévue.
Nice	4 900	10 000
Orléans	1 400	10 000
Oissel	75	100
Bordeaux	12 000	17 000
Le Havre	5 000	12 000
Montpellier	3 000	5 000
Lyon	12 000	24 000
Troyes	2 100	4 000
Petit-Quevilly	100	210

Le grand-duché de Luxembourg a 3 000 lignes automatiques, et une prévision de 10 000. Au Maroc, le réseau de Rabat est à 1 450 lignes, avec possibilité de 3 500 (fig. 719).

* * *

En ***téléphonie privée***, les montages sont beaucoup plus simples que ceux que nous avons étudiés précédemment ; les postes sont en général des postes à microphone et à circuit primaire, les transmissions n'allant jamais à plus de 400 à 500 mètres. Ils comportent en général quatre bornes marquées L, S, CM, CS, et leur schéma de montage est analogue à celui représenté figure 721. Il est facile de se rendre compte de leur fonctionnement.

De la borne L reliée au fil de ligne, le courant passe par le crochet C soit dans la sonnerie, lorsque le récepteur est accroché, soit dans le récepteur et le microphone avec retour à la borne CM, soit par le bouton d'appel B, qui met la ligne en relation avec la borne CS de la pile.

* * *

Dans les hôtels modernes, chaque chambre communique avec un poste central qui reçoit les ordres des clients. Dans les grands immeubles, on relie souvent chaque appartement à la loge du concierge. Le schéma du montage est extrêmement simple, grâce à l'emploi d'un tableau à fiches. Il est représenté schématiquement sur la figure 722, qui permet de suivre les divers circuits que l'on peut établir.

Enfin, lorsqu'il s'agit de relier entre eux les divers services d'une même administration, ce qui se présente dans un grand nombre de maisons de commerce, la solution la plus simple consiste à monter tous les postes en dérivation sur une ligne commune, avec des boutons d'appel pour chacun d'eux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 723 montre le montage à réaliser. Les postes à circuit primaire 1, 2, 3, 4 sont en dérivation par leurs bornes CM et L sur deux fils de ligne

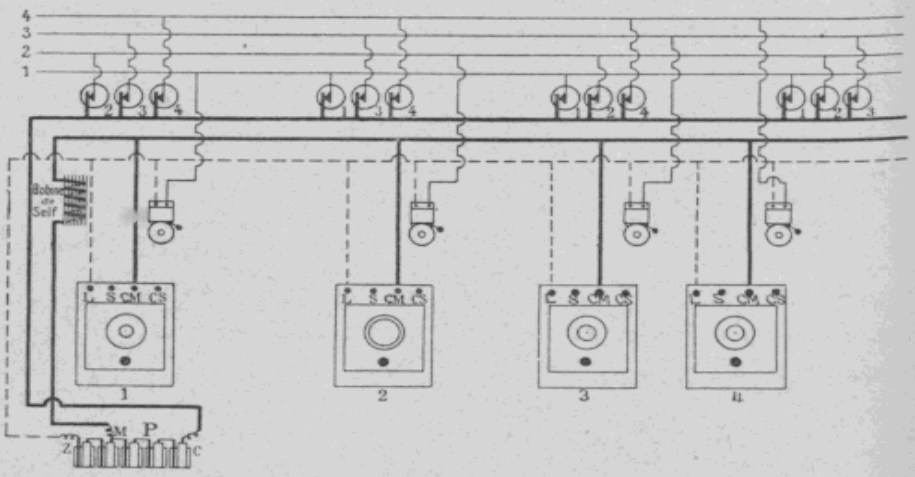


Fig. 723. — Montage d'un nombre quelconque de postes téléphoniques à circuit primaire communiquant directement ensemble sans poste central.

(représentés en gros trait et en trait ponctué) reliés à la batterie de piles P. Les autres bornes des postes restent libres, car le circuit d'appel indépendant est constitué par un réseau de sonnerie, alimenté par la même pile P, et actionné par des boutons 1, 2, 3, 4 (voir, pour le montage de ces sonneries, les schémas, chapitre XXII). Quand un poste appelle, il appuie sur le bouton de son correspondant, dont la sonnerie fonctionne alors puisque sa ligne se trouve ainsi en relation avec le pôle C de la pile et le pôle 2 par le fil de retour. Remarquons que l'on a figuré dans le montage une bobine de self-induction sur le trajet des fils de pile. Voici son utilité. Si deux postes sont en conversation, nous savons que les microphones provoquent des variations continuelles du courant. Le rôle de la

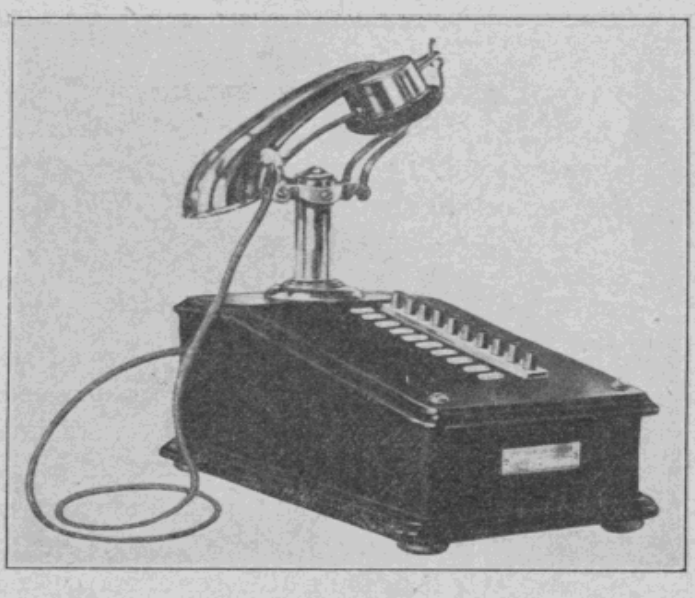


Fig. 724. — Poste d'intercommunication à deux directions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bobine est de localiser ces variations entre les deux postes ; elle agit comme un filtre, laissant passer le courant continu de la pile, mais arrêtant les courants variables qui ne peuvent plus aller que d'un poste à l'autre.

En pratique, les divers boutons des sonneries d'appel sont groupés sur le pied de l'appareil téléphonique, dont l'aspect est alors analogue à celui de la figure 724.

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE SANS FIL

Nous ne dirons que quelques mots sur ce sujet, et ceci pour plusieurs raisons. La première est que le principe de la télégraphie sans fil apparaît extrêmement simple, lorsque l'on connaît les phénomènes électriques oscillatoires (voir chapitre VIII). La seconde raison est que les principes originaux de réception ou de transmission sont peu nombreux et que les montages, innombrables il est vrai, sont purement empiriques, et les résultats remarquables obtenus avec certains d'entre eux sont impossibles à prévoir, à calculer, à expliquer. Enfin, les revues, livres et publications consacrés à la télégraphie sans fil sont pleins de « recettes » excellentes dont il nous serait impossible de donner même un rapide exposé en quelques pages. Ajoutons d'ailleurs que, depuis l'orientation vers les ondes courtes, dont les résultats sont si imprévus, les conceptions anciennes, « classiques » pourrait-on dire, sont nettement en défaut et que le problème de la télégraphie sans fil, lorsque l'on s'éloigne des généralités, est encore extrêmement obscur. Nous examinerons successivement les trois questions de l'émission, la transmission et la réception des ondes électriques.

* * *

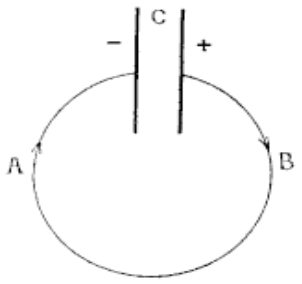


Fig. 725.

L'***émission*** ne peut se faire avec le dispositif classique que nous avons étudié dans le chapitre sur les oscillations électriques : décharge d'un condensateur dans un circuit à self-induction tel que le représente la figure 725, car un tel dispositif ne peut rayonner que dans un très petit espace. En un point éloigné, le champ électromagnétique dû aux variations de courant dans le circuit est pratiquement nul, puisque deux éléments de courant, en A et B par exemple, neutralisent mutuellement leurs actions (ils sont de sens opposé). De même, le champ électrostatique est pratiquement localisé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre les deux faces du condensateur C et ne s'étend pas à l'espace environnant.

Il faut donc se servir d'un ***oscillateur ouvert*** constitué par un conducteur linéaire, l'***antenne***, réuni au sol à l'une de ses extrémités et dont l'autre extrémité est isolée. Par induction, on produit dans cette antenne un courant alternatif de haute fréquence dont le champ électromagnétique rayonnant se propage à de grandes distances. Une telle antenne a une longueur d'onde propre qui est égale à quatre fois sa longueur, mais on peut la modifier à volonté en intercalant entre l'antenne et le sol soit un condensateur (pour diminuer la longueur d'onde) soit une self-induction (pour l'augmenter). Au début de la télégraphie sans fil, on dressait les antennes verticalement le plus haut possible, comme par exemple à la Tour Eiffel ; actuellement, on se sert surtout d'antennes horizontales. Leur mode de fonctionnement est sensiblement le même, bien que l'énergie rayonnée ne soit pas la même dans toutes les directions et présente un maximum dans la direction du fil de l'antenne et du côté de l'extrémité de l'antenne reliée au poste.

En général, on augmente la puissance en constituant l'antenne par plusieurs fils parallèles ou convergents. A Croix-d'Hins, près Bordeaux, le poste comporte une antenne formée de seize fils parallèles formant un rectangle de 400 mètres de large et 1 200 mètres de long supporté par huit tours de 250 mètres de hauteur.

La plus grande difficulté dans l'installation des antennes est la liaison avec le sol, qui doit être parfaite, de façon à ce que la résistance ohmique de ce contact soit aussi faible que possible. On y arrive, soit en reliant l'antenne à de grandes plaques de cuivre ou de zinc enfouies profondément dans un sol mouillé, soit en disposant au-dessous de l'antenne, comme au poste de Sainte-Assise, une nappe de fils placés à quelques mètres au-dessus du sol et réunis à la terre en plusieurs points.

* * *

L'antenne étant installée, il faut l'***exciter***, c'est-à-dire produire dans cette antenne les courants alternatifs de haute fréquence générateurs des ondes électromagnétiques qu'il s'agit d'envoyer dans l'espace.

On ne peut, lorsqu'il s'agit de postes puissants, relier directement l'antenne à l'éclateur, car les énergies utilisables sont trop faibles. Aussi a-t-on recours à ce que l'on appelle l'émission indirecte, qui consiste à transmettre les oscillations à l'antenne par induction électromagnétique.

Les montages possibles sont très nombreux ; ils se ramènent en dernière

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

analyse à deux types : le montage Tesla par couplage par induction (fig. 726) et le montage Oudin par couplage par dérivation (fig. 726). Les schémas donnent le principe de ces deux montages sans qu'il soit besoin d'entrer dans leur description détaillée.

Naturellement, si l'on veut des émissions puissantes, il faut donner aux condensateurs une grande capacité, ce qui augmente la longueur d'onde (qui est proportionnelle à la racine carrée de la capacité). Les difficultés techniques apparaissent alors, car l'éclateur chauffe beaucoup lorsque la puissance mise en jeu est de l'ordre d'une centaine de kilowatts ; il faut le refroidir, par un violent courant d'air, ou le constituer par des cylindres tournants de façon que les étincelles successives ne partent pas du même point de la surface du métal, etc.

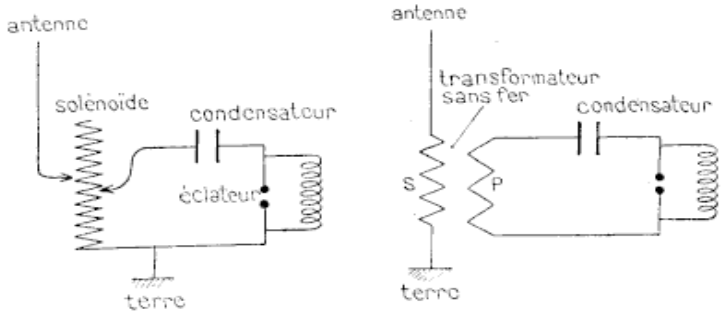


Fig. 726.

Montage Tesla. Montage Oudin.

Pour la réception au téléphone, il faut que les trains d'ondes se succèdent dans l'espace avec une fréquence musicale de l'ordre de 500 à 1 000 par seconde. A cet effet, on utilise, pour produire le courant primaire, des alternateurs spéciaux donnant des courants alternatifs de haute période. Ces courants se transforment en courants de haute fréquence dans des transformateurs qui alimentent le circuit de l'antenne. Afin de couper les trains d'ondes conformément à l'alphabet Morse, en points et traits, on interrompt à l'aide d'un manipulateur le courant primaire de l'alternateur, dont le voltage est faible.

Nous ne dirons rien de plus de ce procédé d'émission qui donne des *ondes amorties*, car on ne l'utilise guère plus que pour les signaux horaires. Le seul intérêt qu'il présente est de permettre la réception avec des installations de fortune constituées simplement par un cristal de galène et un téléphone.

* * *

Actuellement, on utilise de plus en plus les ***ondes entretenues*** pour les transmissions sans fil. Ce sont de véritables courants alternatifs de haute fréquence qui leur donnent naissance, tandis que, dans le cas des ondes amorties, les courants générateurs sont de nature pseudo-périodique seulement ; ce sont des courants hachés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le premier procédé qui a permis de produire des oscillations entretenues est celui de l'***arc chantant*** de Poulsen, perfectionnement d'une expérience intéressante de Duddell.

Ce savant a montré que, si l'on dispose en parallèle avec un arc alimenté par du ***courant continu*** une self-induction et une capacité, l'arc rend un son musical pour un réglage convenable. Le montage schématique est représenté figure 727. Le son est produit par les retards de régime de l'arc provoqués par l'échauffement et le refroidissement des électrodes quand on fait varier l'intensité du courant entre deux limites. Ces variations d'intensité sont provoquées par la charge et la décharge du circuit dérivé de la self et du condensateur. Les fréquences obtenues par Duddell étaient de l'ordre de 500 à 10 000 vibrations par seconde.

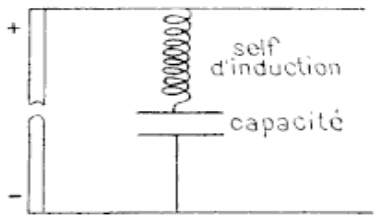


Fig. 727. — Arc chantant de Duddell.

Poulsen a réussi à élever le taux des vibrations de 10 000 à plus de 500 000 par seconde en produisant l'arc dans une atmosphère d'hydrogène ou d'un carbure d'hydrogène (gaz d'éclairage, par exemple). Le phénomène se produit plus aisément si à l'action de l'hydrogène on ajoute celle d'un soufflage électromagnétique de l'arc obtenu en disposant l'arc entre les pièces polaires d'un électro-aimant. Le voltage employé est de 500 à 1 000 volts. Nous n'insisterons pas sur les détails de construction (électrodes de l'arc constituées par des pièces métalliques refroidies par un courant d'eau interne et tournant autour de leur axe, soufflage magnétique de l'arc par un électro-aimant extrêmement puissant, etc.) qui jouent un rôle très important lorsque les énergies mises en jeu sont considérables. Le rendement de l'arc est d'ailleurs faible ; c'est ainsi qu'à Croix-d'Hins, il faut dépenser 1 000 kilowatts pour en mettre 500 dans l'antenne. Celle-ci est reliée à l'un des charbons par l'intermédiaire d'une self-induction qui permet de régler la longueur d'onde. Ce réglage est utilisé pour produire les traits et les points de l'alphabet Morse. En effet, il ne peut être question, dans le dispositif de l'arc chantant, d'éteindre et de rallumer l'arc pour produire les signaux, ni même de couper le circuit de l'antenne. Mais il est par contre possible, en court-circuitant quelques spires de la self d'antenne, de produire des ondes de longueur d'onde différente. Dans ces conditions, les traits et les points sont constitués par des émissions d'une certaine longueur d'onde, les intervalles les séparant étant représentés par des émissions de longueur d'onde différente. La réception par hétérodyne permet facilement de séparer les deux émissions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Les perfectionnements de la construction des ***alternateurs de haute fréquence*** ont permis de produire directement des courants de 20000 périodes par seconde, correspondant environ à une longueur d'onde de 1 500 mètres. Naturellement, il faut, pour que la transmission et la réception soient bonnes, que la longueur d'onde (et par suite la période du courant alternatif) reste constante, ce qui nécessite que les variations de la vitesse de rotation de l'alternateur ne soient pas supérieures à $\frac{1}{1\,000}$. Quelque difficile que soit le problème, il est actuellement résolu, et le poste de Sainte-Assise, près Melun, est équipé avec deux alternateurs de 500 kilowatts chacun.

Le montage de transmission est un montage Tesla : l'alternateur débite dans une self-induction qui agit par induction sur une bobine montée en série avec la self d'antenne. Pour manipuler, on dérègle la self d'antenne de façon à ce que le circuit de l'antenne ne soit plus en résonance avec la période de l'alternateur, ce que l'on obtient facilement en faisant varier l'aimantation d'un noyau de fer doux autour duquel est enroulée la self d'antenne. Quand le fer doux est aimanté à saturation par un courant contraire auxiliaire, il n'a aucune action sur le fonctionnement de la self d'antenne ; si on coupe ce courant continu auxiliaire, la self d'antenne se comporte comme une bobine à noyau de fer, et par suite à coefficient de self élevé.

* * *

Nous avons indiqué que les ***lampes à trois électrodes*** pouvaient servir à produire des oscillations électriques dans un circuit. Ce mode de génération est maintenant extrêmement employé dans les émissions artistiques et la téléphonie sans fil ; il se prête en effet particulièrement bien à la réception, car il donne des oscillations très stables et très pures. Les montages possibles sont très nombreux. Nous

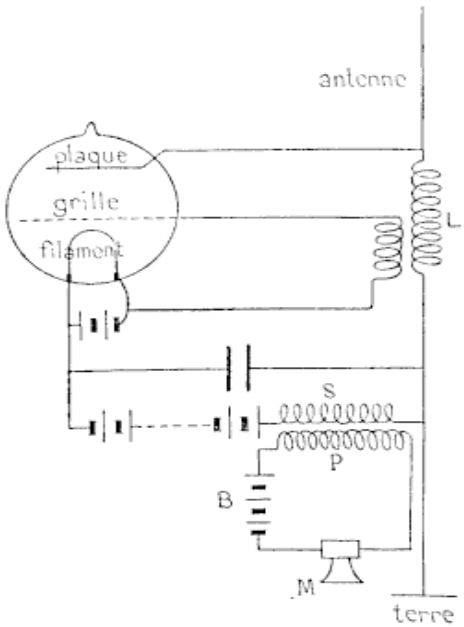


Fig. 728. — Montage d'émission par lampe à trois électrodes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n'en indiquerons qu'un à titre d'exemple, utilisé dans la téléphonie sans fil.

Les circuits de la plaque et de la grille sont couplés par l'intermédiaire d'un transformateur L faisant partie du circuit de l'antenne (fig. 728). Toute variation dans le circuit de l'antenne produira des oscillations dans le circuit de la grille, dirigées dans un sens tel qu'elles réagissent sur le circuit de plaque et augmentent ses oscillations. Ainsi, lorsque le réglage convenable est réalisé, il peut se produire de violentes oscillations dans l'antenne, la source d'énergie étant la batterie à haut voltage du circuit de plaque. Pour modifier ces oscillations, pour les « moduler », le téléphone microphonique M agit par l'intermédiaire du transformateur PS sur le circuit de l'antenne. Si, dans le secondaire S de ce transformateur, les variations de courant sont représentées par la courbe *a* (fig. 729), les oscillations dans l'antenne seront modifiées d'une façon analogue (*b*, fig. 729) et ce sont ces modifications qui seront entendues dans les téléphones et haut-parleurs des stations réceptrices.

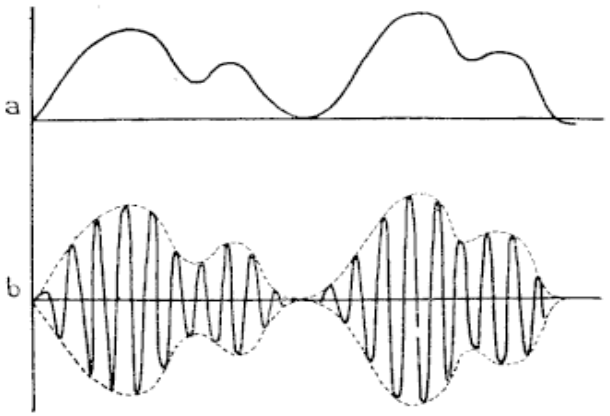


Fig. 729.

Le rendement de ces installations est faible, de l'ordre de 30 à 40 p. 100, car une grande partie de l'énergie est utilisée à produire l'échauffement de la plaque par le bombardement des électrons. Néanmoins, en employant des lampes de grandes dimensions, capables de supporter une tension de plaque plus élevée, de l'ordre de 15 000 à 20000 volts, munies de filaments générateurs d'électrons plus gros, donnant une émission plus intense, on arrive à pouvoir mettre 10 kilowatts en jeu dans chaque lampe et, en associant plusieurs lampes en série, deux ou trois par exemple, il est possible de transmettre d'une façon parfaite à des distances de plusieurs milliers de kilomètres.

Il est probable que ce mode d'émission remplacera tous les autres, lorsque les progrès de la technique permettront de construire industriellement des lampes de plusieurs centaines, voire même de plusieurs milliers de kilowatts.

* * *

Si la production des ondes électriques que nous venons d'examiner rapidement ne soulève pas de questions auxquelles il est impossible de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

répondre, si nos connaissances actuelles permettent de calculer, d'interpréter et de prévoir les phénomènes, il n'en est pas de même du problème de la ***propagation des ondes***. Nombre de points sont encore bien obscurs et, si le savant constate des faits étranges, il est incapable de les expliquer dans l'état actuel de nos connaissances.

* * *

Nous avons, dans le chapitre sur les oscillations électriques, étudié la forme des ondes dans l'espace avoisinant le système oscillant. Il nous faut maintenant examiner ce qui se passe à grande distance.

Les ondes sont analogues, comme forme, à celles d'un oscillateur de Hertz, mais, comme une moitié de l'oscillateur est mise à la terre, il n'y a à considérer qu'une moitié des ondes émises. La figure 730 montre la

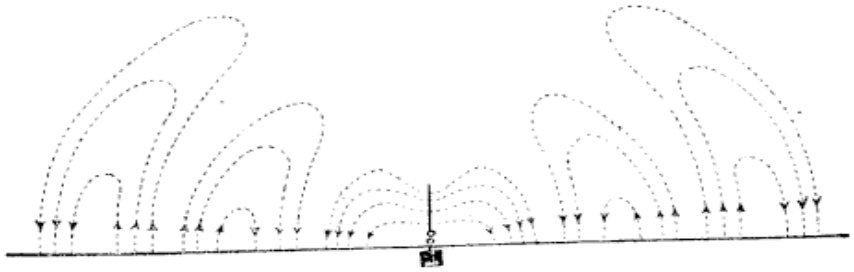


Fig. 730. — Les ondes rayonnées à grande distance par une antenne.

forme des ondes émises par une antenne rectiligne. On constate d'ailleurs expérimentalement que l'intensité efficace du courant reçu par une antenne réceptrice varie en raison inverse de la distance, c'est-à-dire que l'énergie mise en jeu, qui est proportionnelle au carré de l'amplitude, varie en raison inverse du carré des distances. L'onde est donc sensiblement hémisphérique à grande distance de l'antenne.

En pratique, les résultats ne sont pas si simples ni si nets : la surface du sol n'est pas un conducteur parfait, de sorte que les ondes y pénètrent jusqu'à une certaine profondeur, donnant naissance à des courants qui absorbent une partie de l'énergie transmise. De plus, la surface du sol n'est pas lisse, elle présente des aspérités (montagnes, continents, etc.) qui diffusent les ondes électromagnétiques de la même façon que les ondes lumineuses sont diffractées par les obstacles matériels extrêmement petits. C'est même grâce à cette diffraction que l'on rend compte de la possibilité de communiquer en dépit de certains obstacles naturels, comme les chaînes de montagnes.

Mais, si cette explication peut être admise dans les transmissions à dis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tances moyennes (quelques centaines de kilomètres), elle est impuissante à rendre compte du mécanisme des communications aux très grandes distances que l'on atteint aujourd'hui. Elle ne peut s'appliquer par exemple aux communications entre l'Europe et l'Amérique, et on est alors conduit à supposer que les couches supérieures de l'atmosphère sont conductrices et qu'elles réfléchissent les ondes vers le sol. Au lieu de se perdre dans l'espace, celles-ci resteraient confinées entre deux surfaces sphériques conductrices concentriques.

D'autre part, comme la mer est plus conductrice que les continents, les portées pratiques de transmission sont plus grandes sur mer que sur terre. De même, par temps sec, les transmissions terrestres sont moins intenses.

* * *

Les ***ondes courtes***, dont le développement depuis quelques années est véritablement prodigieux, sont venues contredire complètement les conceptions assez simples que l'on se faisait sur la transmission des ondes électromagnétiques, et que nous venons de résumer.

Ces ondes courtes, de longueur d'onde comprise entre 15 et 150 mètres environ, avaient été abandonnées aux amateurs comme peu intéressantes ; ils en ont tiré un parti tel qu'elles ont bientôt forcé l'attention des techniciens et des savants, et aujourd'hui leur étude est poussée de toutes parts avec beaucoup d'activité.

Les caractéristiques principales de ces ondes sont : leurs grandes portées, les zones de silence auxquelles elles donnent lieu et l'influence capitale de l'éclairement de leur parcours.

Il n'est pas rare de pouvoir établir des communications avec les antipodes en n'utilisant qu'une puissance d'émission de 100 watts ; on a pu traverser l'Atlantique avec 2 watts. En revanche, pour les plus petites d'entre elles, — celles ayant moins de 50 mètres, — il est fréquemment impossible de percevoir les signaux à quelques dizaines ou centaines de kilomètres, alors qu'on les reçoit très fortement à plusieurs milliers de kilomètres. La propagation de nuit est généralement très supérieure à celle de jour, mais cela dépend de la longueur de l'onde : les ondes de 100 mètres n'ont, de jour, qu'une portée de quelques centaines de kilomètres pour une puissance de 4 à 5 kilowatts ; les ondes de 15 à 20 mètres ont au contraire des portées du même ordre le jour et la nuit.

Cette facilité de propagation est encore attribuée à l'existence d'une couche conductrice dans la haute atmosphère, couche déjà réclamée pour l'explication des variations diurnes du magnétisme terrestre et celle des aurores polaires. La formation de cette couche par ionisation est actuel-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lement l'objet de nombreux travaux, et l'on s'accorde souvent pour placer sa limite inférieure dans le voisinage d'une hauteur de 100 kilomètres.

Il semble également que les variations de densité de l'air jouent un rôle dans le retour des rayons à la terre.

On voit combien nous sommes loin des conceptions primitives : au lieu d'augmenter les puissances mises en jeu afin d'accoître le rayon des stations, qui alors deviennent de véritables centrales électriques (1 000 kilowatts et plus), il suffit de diminuer la longueur d'onde pour obtenir des portées infiniment supérieures en ne faisant intervenir que des puissances de quelques kilowatts ! Au lieu de la propagation régulière, reposant sur la diffraction des grandes ondes et sur la réflexion sur une haute atmosphère conductrice, il faut maintenant admettre en plus des influences mystérieuses qui agissent plus ou moins fortement sur les ondes suivant leur longueur d'onde, suivant que la propagation est diurne ou nocturne. Même dans certaines zones, les ondes sont indécelables, de même que le son du canon n'était pas, pendant la guerre, perçu dans certaines régions, tandis qu'il était nettement entendu en des lieux beaucoup plus éloignés.

Le problème est donc extrêmement complexe et, jusqu'à présent, on en est réduit à des hypothèses absolument gratuites.

* * *

Quel que soit leur mode de propagation, les ondes électromagnétiques se déplacent dans l'espace, et il nous reste maintenant à dire quelques mots de leur ***détection*** et de leur ***réception***.

Le ***mécanisme*** de la réception est théoriquement très simple. Lorsque les ondes électromagnétiques rencontrent un conducteur AB (fig. 731) présentant une petite coupure à sa partie centrale S, si le champ électrique des ondes est dirigé vers le haut, comme en C et E, il y aura création d'une force électromotrice induite dans le conducteur AB dirigé vers le haut. Quand les trains d'ondes D et F rencontreront le conducteur, le courant, au contraire, sera dirigé de haut en bas. Si les forces électromotrices induites sont suffisamment élevées, le courant franchira la coupure et on observera une étincelle microscopique. C'est le principe du premier dispositif de Hertz, pour déceler les ondes à distance. Mais on constate bientôt

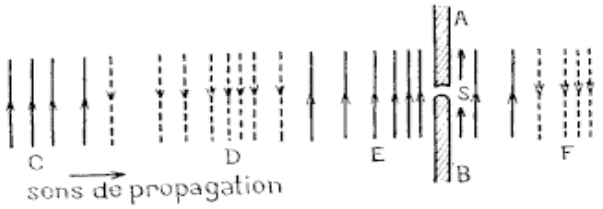


Fig. 731. — Principe de la réception des ondes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que l'effet peut être considérablement amplifié si la période d'oscillation du courant de A vers B et de B vers A est la même que celle des ondes qui le produisent. En effet, chaque onde arrivant alors juste à point pour renforcer le phénomène, celui-ci prend de plus en plus d'amplitude, de même que, lorsqu'on donne à un pendule une impulsion, même faible, au moment de son élongation maximum, on augmente progressivement l'amplitude de ses oscillations.

C'est ce que l'on appelle en télégraphie sans fil la ***syntonisation de l'accord*** du circuit récepteur. Celui-ci doit avoir, autant que possible, la même période de vibration électromagnétique que le circuit émetteur, afin que les effets de détection soient intensifiés au maximum.

* * *

Si le dispositif de Hertz permet de déceler les ondes par l'observation d'étincelles d'ailleurs microscopiques, il est complètement insuffisant pour une application pratique quelconque. Mais alors un problème nouveau se pose.

En effet, les ondes électromagnétiques se propagent avec la vitesse de la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde. Si leur longueur d'onde est de 500 mètres par exemple, cela veut dire qu'il y aura 600 000 oscillations par seconde. Or, aucun système matériel n'est capable de vibrer à cette fréquence, aucune membrane téléphonique par exemple ne peut suivre ce rythme d'impulsions, et d'ailleurs l'oreille ne pourrait percevoir aucun son aussi aigu.

Il faut donc, entre le circuit récepteur, *accordé* pour la longueur d'onde d'émission, et l'appareil d'enregistrement (téléphone par exemple), interposer un dispositif spécial qui obvie à cet inconvénient. C'est le ***détecteur***.

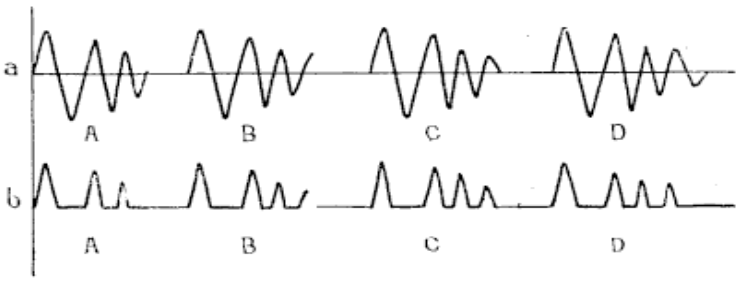


Fig. 732.

Le détecteur, ou plutôt les détecteurs, car leur nombre est assez grand et ils font intervenir des phénomènes extrêmement différents, opèrent tous de la même façon. Leur principe est identique : ils ne laissent passer que les impul-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sions d'un certain sens, et arrêtent plus ou moins totalement celles du sens opposé. Ce sont donc des valves à une direction.

Si par exemple A, B, C, D, sont les courants produits par les trains d'ondes successives (fig. 732), le détecteur supprime la montée de chaque onde, de sorte que les courants résultants ont l'allure représentée en *b*, figure 732. Il en résulte que, dans le téléphone récepteur, A, B, C, D vont maintenant produire une impulsion sur la membrane élastique et l'oreille entendra un son correspondant à la fréquence de ces impulsions.

* * *

Le premier en date des détecteurs est le ***cohéreur*** de Branly, à limaille de fer. Il était formé d'un tube de verre rempli de limaille de fer constituant la coupure. Les étincelles microscopiques qui s'y produisaient rendaient l'ensemble conducteur en diminuant sa résistance, ce qui permettait au courant d'une batterie auxiliaire de passer dans le circuit en actionnant une sonnerie ou un électro-aimant. Ce dispositif n'a plus qu'un intérêt historique.

Le ***détecteur magnétique*** perfectionné par Marconi est, lui aussi, disparu de la pratique radiotélégraphique. Il met en jeu la propriété suivante signalée par lord Rayleigh et Rutherford : lorsqu'une aiguille d'acier aimantée à saturation se trouve placée dans une bobine dont les spires sont le siège d'oscillations électriques, elle subit une désaimantation partielle et permanente. La réalisation pratique est la suivante : un fil d'acier sans fin tourne lentement sur deux poulies (fig. 733). Il est aimanté à saturation par deux aimants permanents E_1, E_2 et passe dans une bobine B disposée sur le circuit de l'antenne. Une seconde bobine D est reliée au téléphone T. Quand les ondes sont captées par l'antenne, elles traversent la bobine B et provoquent la désaimantation du fil d'acier. Cette modification de l'état magnétique du système produit un courant induit dans D, lequel agit sur le téléphone.

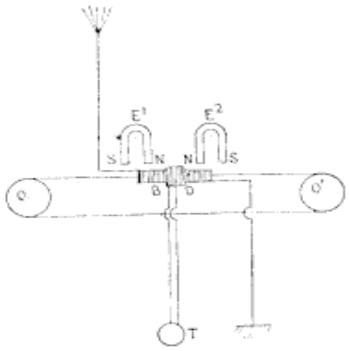


Fig. 733. — Détecteur magnétique Marconi.

Le ***détecteur électrolytique*** de Ferrié ressemble, toutes proportions gardées, à un Wehnelt, dont la cathode serait constituée par un fil de platine assez gros N (fig. 734), tandis que l'anode est formée d'un fil de platine M très fin, scellé dans un tube de verre et en sortant à peine. L'appareil est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

intercalé dans le circuit auxiliaire d'une pile. En dérivation aux bornes M et N, on dispose le circuit de réception (antenne et terre) et un téléphone. Ce détecteur est encore parfois utilisé, car il est beaucoup plus sensible que les précédents.

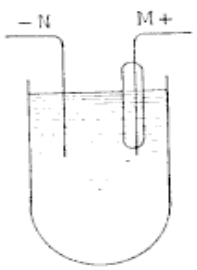


Fig. 734. — Détecteur Ferrié.

La ***valve de Fleming*** est également un détecteur. On sait en quoi elle consiste : si, en face d'un filament d'une lampe à incandescence, on dispose une plaque P reliée par exemple à un téléphone (fig. 735), un courant ne passe entre le filament et la plaque que dans un sens tel que la charge négative aille du filament vers la plaque. Par suite, si un circuit oscillant est branché en AB, le courant à travers la soupape est d'un seul sens, une moitié de chacune des ondes est arrêtée par l'appareil. Nous verrons plus loin le perfectionnement de cet appareil dans les lampes à trois électrodes.

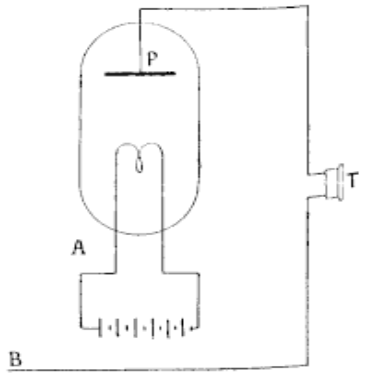


Fig. 735. — Valve de Fleming.

Le ***détecteur à cristal*** est encore actuellement l'un des plus employés, surtout dans les postes de faible puissance. Son principe est le suivant : la résistance de contact entre un fil métallique et un cristal (presque toujours la galène, ou sulfure de plomb naturel) est beaucoup plus grande (dix à vingt fois plus grande) pour le courant allant par exemple du fil vers le cristal que pour le courant allant en sens inverse. Dans ces conditions, on supprime donc encore pratiquement une moitié de chacune des ondes des courants de haute fréquence.

Enfin, la ***lampe à trois électrodes***, dont nous avons vu l'utilisation comme générateur d'ondes, peut également fonctionner comme détecteur, et son emploi se généralise de plus en plus dans les postes modernes. Elle s'appuie sur l'effet Edison (émission d'électrons négatifs par un filament chauffé) et est un perfectionnement de la valve de Felming. Nous l'avons étudié en détail dans le chapitre III, et son fonctionnement comme détecteur est évident.

Quand la grille (fig. 736) est à un potentiel inférieur à celui du filament, les électrons émis par le filament ne peuvent arriver jusqu'à la plaque.

Au contraire, si le potentiel de la grille est supérieur à celui du filament, le courant électronique passe librement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite, le potentiel de la grille commande le passage du courant, tout comme une valve ou un robinet règle le flot de liquide traversant une conduite. Pour comprendre le fonctionnement de la valve comme détecteur, il suffit de se reporter aux courbes caractéristiques de l'appareil, courbes que nous avons étudiées chapitre.

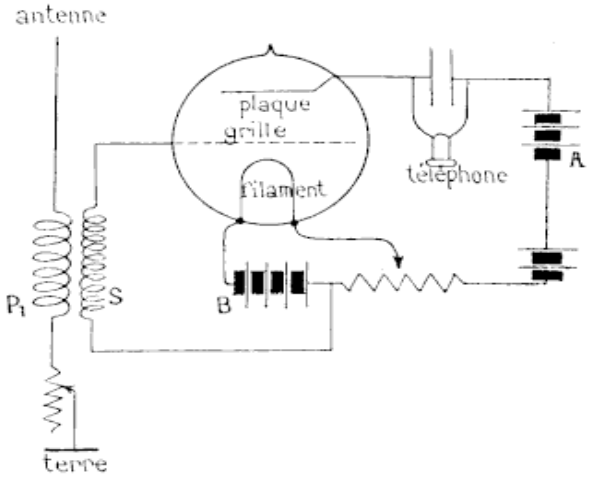


Fig. 736. Réception par triode.

Considérons la caractéristique de plaque et la caractéristique de grille (fig. 737). Si OE est le potentiel moyen de la grille, lorsque les ondes arrivent, elles produisent des variations EA, EB de ce potentiel, ce qui détermine dans le circuit de plaque des variations de courant *ca*, *cb*, de sens contraire. Or, ces variations de courant, si on choisit le potentiel OE convenablement, ne sont pas égales en valeur absolue. Dans le cas de la figure, par exemple *cb* est beaucoup plus important que *ca*. Par conséquent, dans le circuit du téléphone, il y aura prédominance d'un des effets sur l'autre, ce qui est la condition nécessaire pour l'audition.

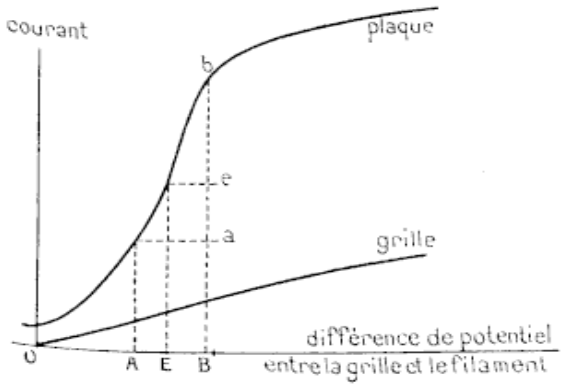


Fig. 737.

* * *

On voit que, dans le cas de l'ampoule à trois électrodes employée comme détecteur, la rectification du courant est très imparfaite, beaucoup moins complète que dans les détecteurs à cristaux par exemple, mais cet inconvénient est plus que compensé par les effets d'***amplification*** que permet cet appareil.

En effet, si nous nous reportons à la figure 737, nous voyons que la troisième électrode ou plaque est reliée à une batterie à haut voltage et que le courant qu'elle peut donner est commandé par le potentiel de la grille. Par suite, de petites oscillations de celui-ci, provoquées par les ondes électro magnétiques reçues par l'antenne et transformées par l'intermé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diaire du transformateur PS, produiront de grandes variations dans le circuit filament-A-plaque. La lampe à trois électrodes fonctionne alors comme ***amplificateur***. Si on utilise non plus une, mais deux, trois, quatre... de ces lampes convenablement montées, on peut, à l'aide de chacune d'elles, amplifier le courant de la précédente et arriver ainsi à augmenter plusieurs milliers de fois le courant initial.

* * *

En résumé, un ***poste récepteur*** se compose essentiellement :

1° D'une *antenne* recevant les ondes (cette antenne peut avoir des formes extrêmement variées, depuis la forme rectiligne horizontale ou verticale jusqu'à la forme d'un cadre comportant un certain nombre de spires enroulées) ;

2° D'un *circuit électrique* comprenant une self-induction et une capacité variables, de façon que la période de vibration électrique propre de ce circuit puisse être rendue égale à celle des ondes que l'on cherche à capter;

3° D'un *détecteur* ayant pour but de redresser les courants induits dans le circuit de réception ;

4° D'un *appareil d'écoute*, téléphone ou microphone ;

5° D'un *dispositif d'amplification* lorsque l'on désire recevoir des ondes provenant des postes éloignés ou peu puissants.

* * *

Le couplage de circuit de l'antenne et du circuit électrique d'accord, qui permet la *syntonie*, est obtenu de différentes manières. On utilise ce que l'on appelle le montage Tesla ou le montage Oudin, dont nous dirons quelques mots à propos des applications médicales de l'électricité. En principe, le circuit de l'antenne comprend le primaire d'un transformateur dont le secondaire fait partie du circuit d'accord. C'est le montage par induction.

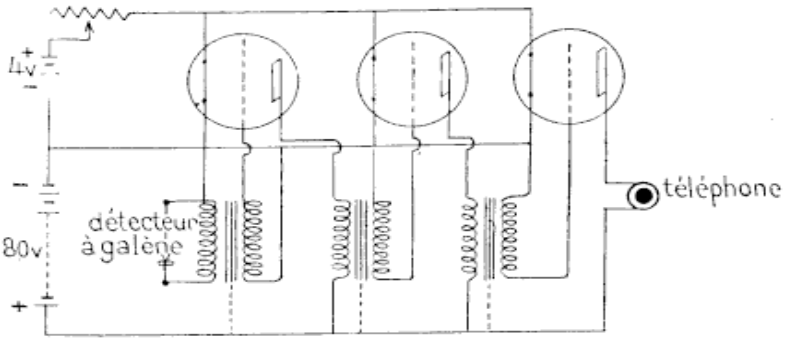
* * *

Nous ne parlerons pas des innombrables ***montages*** comportant des amplificateurs que l'on peut réaliser, et dont il est facile de trouver la description dans tous les manuels et publications de télégraphie sans fil. Quelques exemples simples suffiront à faire comprendre leur principe.

Nous citerons d'abord l'amplification en basse fréquence après détection, qui peut se réaliser très simplement avec les postes à galène. Tous les dispositifs reposent sur le même principe. Le primaire d'un premier transformateur, relié aux deux bornes de l'appareil récepteur, reçoit le courant détecté, par une galène par exemple. Le secondaire de ce transformateur est relié au circuit de la grille d'une première lampe, dont le circuit de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plaque est connecté au primaire d'un second transformateur. Le secondaire est, à son tour, relié au circuit de la grille de la seconde lampe, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière lampe, dont le circuit de plaque comprend un récepteur téléphonique ou un haut-parleur. En général, on n'emploie



BIBLIOTHÈQUE

Fig. 738. — Amplification en basse fréquence après détection.

guère plus de trois étages en basse fréquence, à cause de la déformation de la parole qui, elle aussi, irait en s'amplifiant (fig. 738).

Dans d'autres dispositifs, on amplifie en haute fréquence les courants reçus à l'aide de transformateurs à circuit magnétique très perméable et à nombre de spires en rapport avec les diverses longueurs d'ondes à amplifier. L'énergie ainsi amplifiée est détectée par un cristal de galène et des transformateurs pour basse fréquence montés comme précédemment amplifient le courant détecté. Naturellement, il faut, dans ce montage, prévoir un dispositif d'accord indépendant de l'amplificateur.

* * *

La propriété précieuse des lampes à trois électrodes de pouvoir fonctionner soit comme générateur d'ondes, soit comme détecteur, soit comme amplificateur, a permis dans ces dernières années de perfectionner considérablement la réception des émissions téléphoniques par ondes entretenues. A l'heure actuelle, c'est dans cette voie que sont engagés tous les chercheurs, et nous donnerons simplement le principe des innombrables montages réalisés.

La ***méthode hétérodyne***, inventée par Fessenden, consiste à superposer à l'onde reçue une onde auxiliaire, produite par une lampe fonctionnant en générateur, mais dont la fréquence est légèrement différente de celle de l'onde à déceler. Dans ces conditions, on observe le phénomène des battements, bien connu en acoustique.

Si l'onde reçue a une fréquence de 100 000 par exemple et l'onde auxiliaire une fréquence de 99 000, mille fois par seconde les deux trains d'ondes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seront en concordance de phase, et les intensités des courants produits s'ajouteront alors ; mille fois par seconde également ils seront en opposition et se détruiront mutuellement. De sorte que tout se passera comme si on avait un courant unique de fréquence 1 000. C'est ce son que l'on entendra dans le téléphone. Comme on peut agir à volonté sur la fréquence et l'intensité du courant alternatif produit par l'hétérodyne, on peut se placer dans les meilleures conditions de réception.

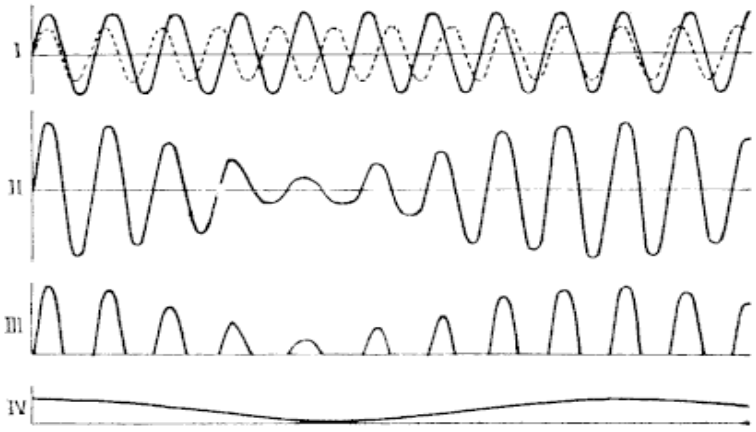


Fig. 739. — Battements et rectification en réception hétérodyne.

Si l'on veut représenter graphiquement le phénomène d'une manière simple, on obtient les apparences de la figure 739. Les deux courbes I représentent les deux trains d'ondes de la réception et du générateur auxiliaire ; la courbe II donne le courant résultant de leur superposition ; la courbe III montre le courant redressé par le détecteur, et la courbe IV le courant alternatif de basse fréquence qui est équivalent, en ce qui concerne l'action sur la membrane du téléphone, au courant redressé provenant du circuit oscillant.

Naturellement, on peut amplifier le courant soit avant, soit après détection.

Dans la ***méthode superhétérodyne***, le procédé est un peu différent. Il consiste :

1° A changer la fréquence reçue (300 mètres par exemple) en une fréquence généralement plus basse et réglable à une valeur déterminée (6 000 mètres par exemple) toujours la même, quelle que soit la fréquence d'onde initiale ;

2° A amplifier cette nouvelle longueur d'onde 6 000 mètres par deux ou trois lampes de moyenne fréquence, par exemple ;

3° A détecter l'onde 6 000 mètres et à l'amplifier en basse fréquence.

* * *

Quel est l'***avenir de la télégraphie et de la téléphonie sans fil*** ? C'est une question à laquelle il est difficile de répondre avec certitude. Malgré le développement prodigieux des méthodes de transmission et de réception, bien des problèmes restent encore à résoudre.

Seuls moyens de communication dont disposent les navires et les avions,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la télégraphie et la téléphonie sans fil rendent des services inappréciables, surtout depuis qu'une organisation internationale permet de renseigner les navigateurs aussi bien sur leur position par l'emploi des méthodes radiogoniométriques, que par l'envoi de bulletins météorologiques et de signaux horaires. Pour les transmissions de dépêches commerciales et de messages privés, les conditions à remplir sont multiples : d'abord, il faut que la transmission soit assurée en tous temps, ce qui a nécessité, malgré le perfectionnement des méthodes de réception, la construction de postes de plus en plus puissants afin de ne pas risquer de voir les bruits parasites brouiller les transmissions. C'est ainsi que, bien qu'il soit possible de transmettre entre l'Europe et l'Amérique avec des postes de moins de 100 watts, comme nous l'avons déjà signalé, les postes commerciaux, comme Croix-d'Hins et Sainte-Assise, peuvent mettre 1 000 kilowatts dans l'antenne, afin d'être assurés d'être entendus en tous temps.

Il faut ensuite que le débit des postes soit assez considérable pour assurer une exploitation rémunératrice. On a été conduit, pour atteindre ce résultat, à séparer entièrement l'émission de la réception. C'est ainsi que le poste de Sainte-Assise, transmetteur, est doublé par un poste uniquement récepteur, à Villecresnes. On équipa ensuite les postes émetteurs de façon à permettre de transmettre simultanément sur plusieurs longueurs d'ondes, avec des énergies différentes, de façon à pouvoir communiquer avec plusieurs stations. A Sainte-Assise, par exemple, on peut expédier en même temps quatre télégrammes sur quatre longueurs d'ondes différentes, à quatre postes récepteurs distincts. Enfin, au lieu de la transmission à la main et de la réception à l'oreille, on a adapté à la télégraphie sans fil les appareils qui sont en service dans la télégraphie ordinaire.

Remarquons d'ailleurs que l'évolution des deux modes de transmission a suivi une marche identique : augmentation de la portée, transmission multiple, automaticité. Mais, tandis que l'inertie électrique des fils ou câbles conducteurs impose une limite à la vitesse de transmission, il n'en est plus de même lorsque c'est l'éther qui est le milieu de propagation des signaux. Enfin, l'extension du réseau de télégraphie sans fil est beaucoup plus rapidement réalisable et à un prix bien inférieur à celui de la pose de nouvelles lignes télégraphiques.

Aussi, pour les transmissions à grandes distances, la télégraphie sans fil semble-t-elle avoir le plus bel avenir. Pour les petites et moyennes distances, il n'en est plus de même. La multiplication des postes, entrainant celle des longueurs d'ondes, compliquerait le problème à l'extérieur et, de plus, le secret des communications, assuré par la télégraphie ordinaire, ne l'est absolument pas par les transmissions sans fil.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XXIX

ÉLECTRICITÉ MÉDICALE

Les divers courants employés en médecine. — Terminologie médicale. — Le courant continu : production, application. — Pile Marié-Davy au bisulfate de mercure. — Les courants faradiques. — Bobines de Ruhmkorff. — La magnéto faradique. — Le courant ondulatoire. — Les courants statiques. — Les courants à haute fréquence. — La radiologie. — Dispositif Tesla. — Dispositif d'Arsonval. — Utilisation des courants de haute fréquence. — D'Arsonvalisation. — Effluvation. — Courants de Oudin. — Montages Oudin, O' Farrell, Lebailly, Rochefort. — Radiographie. — Divers types d'ampoules. — Contrôle du vide. — Spintermètre. — Radiochromomètre de Benoît. — Intensionomètre. — Dosimètre Dauvillier. — Réglage du vide. — Osmorégulateur de Villard. — Régulateur à étincelles. — L'ampoule Coolidge. — Diverses formes. — Construction des ampoules à rayons X. — Divers montages radiologiques. — Les courants redressés à 250 000 volts. — Protection contre les rayons X. — Les électro-aimants médicaux.

Les médecins ont toujours été les premiers à appliquer à la thérapeutique les notions nouvelles de l'électricité. Sitôt que Volta eut découvert la pile électrique, la ***galvanisation*** fut à l'ordre du jour, et depuis, immédiatement après leur découverte, ions, courants de haute fréquence, courants induits, oscillations électriques, rayons X, radioactivité, etc., ont trouvé des applications médicales extrêmement nombreuses.

Notre but n'est pas d'examiner la valeur thérapeutique et clinique des dispositifs si nombreux qui constituent l'électrothérapie. Nous donnerons simplement sur le matériel particulier dont se servent les médecins, et qui bien souvent pourrait être remplacé à meilleur compte et avec un meilleur rendement par une installation ordinaire, quelques renseignements permettant au lecteur de s'y reconnaître dans une terminologie et des dispositifs totalement différents de ceux que nous avons étudiés jusqu'à présent.

* * *

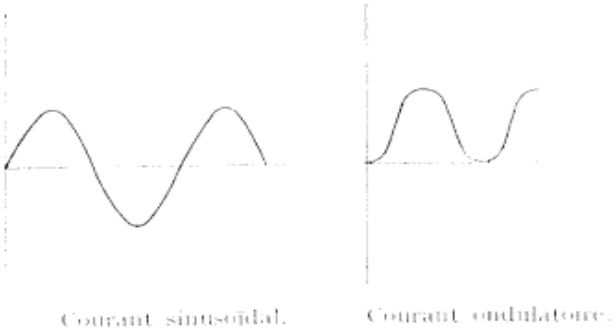
Tout d'abord, les médecins distinguent beaucoup plus de sortes de courants que les électriciens, courants auxquels ils ont donné des noms spéciaux et qui ne sont employés qu'en électrologie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le courant continu fourni par les piles, les accumulateurs, les secteurs, est appelé ***courant galvanique***.

Le courant induit dans le secondaire d'une bobine de Ruhmkorff est appelé ***courant faradique***.

On a parfois proposé l'utilisation en médecine de *courants galvano-faradiques* ou *courants de Watteville*, qui consistent en la combinaison des deux courants précédents : le secondaire de la bobine de Ruhmkorff est relié en série avec une pile, de telle sorte que l'onde induite de rupture de la bobine ait le même sens que le courant de la pile. C'est le montage *tension*. On a également proposé le montage *en opposition*, le courant de rupture étant de régime opposé au courant de la pile. Ces courants galvano-faradiques, pour l'ingénieur électricien, sont des non-sens : la force électromotrice aux bornes du secondaire d'une bobine de Ruhmkorff, même de très petite puissance, est si considérable que l'action d'une pile de deux ou quatre éléments, correspondant à une force électromotrice de 4 à 8 volts, est inexistante et impuissante à modifier l'allure du diagramme de fonctionnement de la bobine. Ceci est particulièrement évident dans le montage dit en opposition, où l'on oppose, dans l'espoir d'un résultat pratique, 8 volts à 1 000 ou 2 000 !



Courant sinusoïdal. Courant ondulatoire.

Fig. 740.

Un courant *toujours dirigé dans le même sens*, mais dont l'intensité varie périodiquement de zéro à une valeur maxima, est appelé ***courant ondulatoire***, tandis que le *courant alternatif* ordinaire est baptisé ***courant sinusoïdal*** (fig. 740). Les courants produits par les machines électrostatiques à influence, comme les machines de Ramsden, Wimshurt, etc., sont dénommés ***courants statiques*** et, si on ajoute des condensateurs aux bornes de la machine, le courant est dit ***courant de Morton***.

Enfin, les ***courants de haute fréquence*** sont désignés, suivant leurs caractéristiques et leur mode de production, sous les noms de *courants de Tesla*, courants de *d'Arsonval*, courants de *Oudin*, etc.

* * *

Le ***courant galvanique ou continu*** est utilisé en médecine sous de très faibles intensités (au maximum 100 milliampères) ; aussi est-il généra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment produit par des piles ou de petits accumulateurs. On les utilise soit pour leur action directe sur l'organisme en traversant une partie du corps, soit par leurs actions électrolytiques sur la matière organique d'un organe déterminé. Dans le premier cas, il faut éviter, aux points de contact avec le corps, les actions chimiques qui modifieraient l'épiderme et produiraient une sensation de brûlure que l'on nomme escarre. Dans le second cas, au contraire, ce sont ces actions chimiques électrolytiques que l'on utilise.

Les ***piles*** génératrices de courant peuvent être l'une quelconque des piles que nous avons décrites chapitre XV, mais on utilise en médecine des batteries transportables en boîtes, qui sont à recommander, soit pour un malade se traitant lui-même sur ordonnance de son médecin (on choisit alors de préférence les batteries de piles Féry ou de piles au bioxyde de manganèse, toujours prêtes à fonctionner et ne nécessitant que très peu d'entretien), soit pour un médecin n'ayant pas le secteur à sa disposition et ne faisant d'applications que de loin en loin ou encore faisant de fréquentes séances au domicile de ses clients. Les batteries au bisulfate de mercure sont les mieux appropriées à ce cas. Elles peuvent être facilement rechargées et n'ont aucune usure pendant la période de repos. Il suffit de remettre du liquide excitateur dans les vases pour que la batterie soit prête à fonctionner.

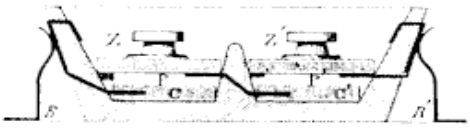


Fig. 741. — Pile au bisulfate de mercure.

Ces piles, dites piles Marié-Davy, ont une force électromotrice de 1,5 volt. Elles sont constituées par deux électrodes, l'une de charbon, l'autre de zinc, plongeant dans une dissolution de bisulfate de mercure.

Généralement, on les associe par deux ; chaque élément est formé d'un charbon C (fig. 741) moulé en place dans un récipient en ébonite et d'un zinc Z.

Des fils de platine P, P′ assurent les connexions des éléments entre eux ou avec le circuit extérieur, lorsque la pile est serrée entre les ressorts R, R′ fixés sur l'appareil que la pile doit actionner. La pile se charge au moyen d'une pincée de bisulfate et d'un peu d'eau dans chaque godet.

On a utilisé également des piles au bioxyde de manganèse et chlorure de zinc, sortes de piles Leclanché dont le vase poreux est constitué par un cylindre creux de charbon contenant des couches alternées de grains de bioxyde de manganèse et de grains de charbon et dont la solution de chlorhydrate d'ammoniaque est remplacée par une solution de chlorure de zinc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Lorsqu'on dispose de ***courant continu*** produit par un secteur, on peut, le cas échéant, se servir de ce courant, à condition :

1° Que les conducteurs soient parfaitement isolés ;

2° Que le sol de la salle de traitement soit en bois, et non en ciment ou en mosaïque continuellement lavés ;

3° Que la distribution du secteur soit à deux fils et sous 110 volts au maximum.

Si toutes les conditions ci-dessus ne sont pas réalisées, on risque des accidents plus ou moins graves, pouvant aller jusqu'à l'électrocution du patient, celui-ci pouvant se trouver intercalé dans un circuit de tension très élevé (550 volts dans le cas d'une distribution à cinq fils) par suite d'une perte à la terre toujours possible sur le réseau du secteur.

De plus, le courant continu fourni par les secteurs est toujours légèrement ondulé et présente des variations de tension qui le rendent moins facilement tolérable par le patient.

D'autre part, cette méthode entraîne un véritable gaspillage d'énergie électrique, puisque la plus grande partie de cette énergie est en effet simplement dissipée sous forme de chaleur dans les résistances destinées à abaisser la tension du courant.

Pour toutes ces raisons, il est toujours préférable, surtout si l'on fait des applications de bains hydro-électriques généraux, de se servir d'une petite batterie d'accumulateurs de trente éléments environ, d'une dizaine d'ampères-heure de capacité, qui ne nécessite qu'un très petit entretien. Si l'on dispose d'un secteur à courant continu, on charge les accumulateurs au moyen du secteur en disposant un groupe de deux lampes en dérivation sur le secteur; ce groupe est monté en série avec la batterie en ayant bien soin d'installer un dispositif enlevant tout contact avec le secteur pendant les applications.

Lorsque le secteur est alternatif, les applications de courant continu peuvent se faire également avec une batterie d'accumulateurs ; cette dernière peut être chargée d'une manière quelconque, soit avec un convertisseur rotatif redresseur Copper-Hewitt, un redresseur Tungar, etc., soit, dans le cas où l'on fait de la radiologie, avec l'interrupteur Blondel à mercure du matériel de rayons X. Dans chaque cas, on utilise un dispositif coupant automatiquement le circuit de charge pendant l'utilisation.

Les électrodes sont des plaques, tampons, rubans, aiguilles, etc., ser-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vant à l'application du courant sur le corps. L'*électrode indifférente* est une électrode de grande surface, et par suite réduisant les actions polaires au minimum ; l'*électrode active*, au contraire, a des dimensions beaucoup plus petites et est appliquée sur les régions où les actions électriques doivent s'exercer.

Les traitements par courant continu se font à l'aide d'électrodes appliquées sur les parties à traiter ; avec les aiguilles, pour l'épilation et la destruction de certaines tumeurs ; par des bains hydro-électriques, bains locaux ou généraux.

Le courant continu est surtout employé pour redonner de la vie aux tissus en état de dégénérescence.

On fait aussi, avec le courant continu, de l'*ionothérapie*, c'est-à-dire de la pénétration dans le corps humain, sous l'action de l'électricité, des ions de substances actives au point de vue thérapeutique.

Nous ne décrirons pas les multiples formes d'électrodes proposées pour chaque cas particulier, pas plus que les dispositifs, faciles d'ailleurs à imaginer, permettant de réaliser l'ionothérapie. Chacun d'eux est établi en tenant compte des indications cliniques et d'après la partie de l'organisme à traiter ; aussi leur étude relève-t-elle beaucoup plus de la médecine que de l'électricité.

* * *

Les ***courants faradiques*** peuvent être produits à l'aide de différents dispositifs. Le plus simple utilise des appareils d'induction actionnés par des piles sèches ou humides. Ils se composent d'une *bobine primaire* reliée à la source de courant continu (les piles de l'appareil), d'une *bobine secondaire* dont les deux extrémités communiquent avec les électrodes que l'on appliquera au malade, enfin d'un *récepteur* destiné à couper périodiquement le courant. Les deux bobines sont concentriques, et une âme en fer doux qui peut coulisser à l'intérieur des bobines permet de faire varier l'intensité du courant dans le circuit d'utilisation (fig. 742).

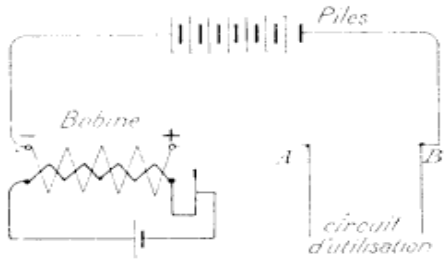


Fig. 742. — Montage faradique.

Une pile genre Marié-Davy suffit pour actionner les modèles portatifs, dont la figure 743 montre un spécimen courant.

Dans les installations plus importantes, en particulier pour les appareils d'ergothérapie passive suivant la méthode de Bergonié (traitement de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'obésité et des affections dues à la poussée des muscles), on ne peut plus utiliser les dispositifs simplifiés précédents. On se sert en général, dans ce cas, de ce que l'on appelle une ***magnéto faradique***, qui est une modification de la magnéto ordinaire.

Le problème à résoudre consiste à réaliser une génératrice de courant faradique produisant un courant induit à ondes très aiguës, de même force que les ondes induites d'ouverture d'une bobine d'induction, mais ne présentant pas les irrégularités inévitables que l'on rencontre dans cette dernière.

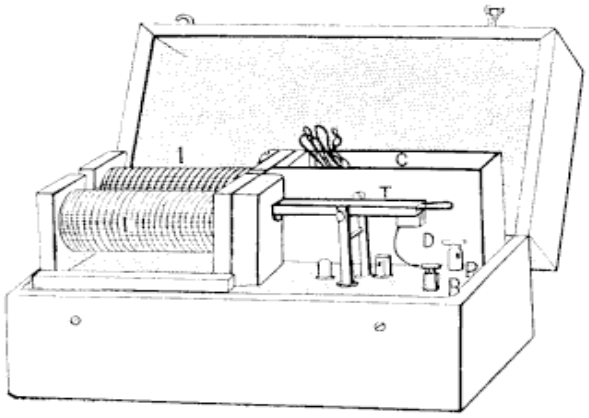


Fig. 743. — Appareil faradique.

La magnéto faradique (fig. 745) est un groupe électrogène pouvant tourner à une vitesse variant de 1 200 à 3 000 tours par minute et accouplé à une magnéto dont l'inducteur a comme particularité de présenter un épanouissement des pièces polaires beaucoup plus considérable que celui des machines inductrices habituelles.

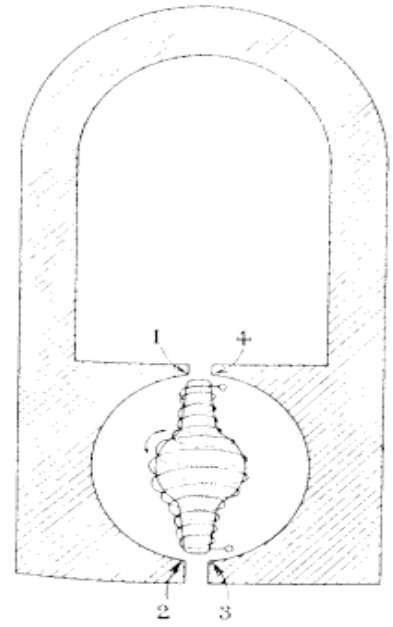


Fig. 744. — Coupe schématique de la magnéto faradique.

L'armature de l'induit est constituée par une palette de fer d'une section extrêmement faible, sur laquelle l'enroulement induit se trouve bobiné ; les deux extrémités de cet induit sont reliées à deux bagues. Le collecteur et les quatre balais de la magnéto faradique sont disposés de telle sorte que l'on puisse obtenir à volonté, par tour de l'induit, soit une onde de polarité quelconque, soit deux ondes de même polarité, soit deux ondes de polarité différente.

La figure 744 montre immédiatement qu'entre les positions 1 et 2, le flux traversant l'enroulement reste par exemple constamment positif ; le déplacement de l'armature de l'induit n'apporte aucune perturbation dans le circuit magnétique, et il n'y a aucun phénomène d'induction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au contraire, entre les positions 2 et 3, extrêmement rapprochés d'après la construction de l'appareil, le flux traversant l'induit change de sens et passe de sa valeur positive maxima à sa valeur négative maxima. L'inversion totale du flux (2) induit naturellement dans l'enroulement une

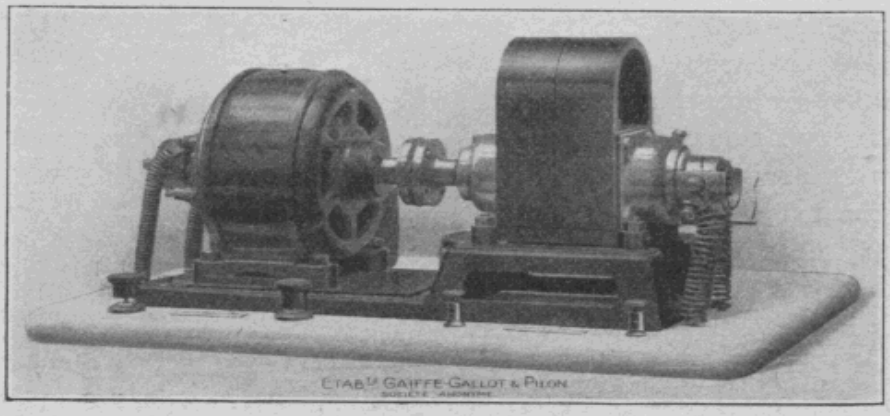


Fig. 745. — Machine dynamo à ondes aiguës de Bergonié-Gaiffe.

onde extrêmement énergique dont la durée est celle séparant la position 2 de la position 3, soit $\frac{1}{24}$ de la demi-révolution dans l'appareil réalisé.

Entre les positions 3 et 4, le flux traversant l'induit a constamment une valeur négative, et aucun phénomène d'induction ne se produit.

En passant de la position 4 à la position 1, il se produit un courant induit égal et opposé à celui développé en passant de 2 à 3.

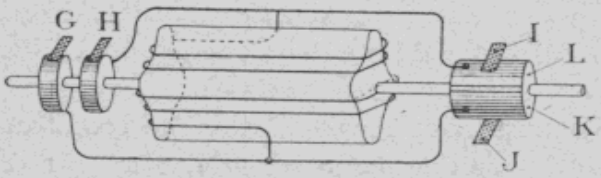


Fig. 746. — Machine magnéto-faradique Gaiffe.

Étant donné qu'il est intéressant pour le traitement d'opérer avec des ondes constamment de même sens, afin de pouvoir plus facilement localiser les phénomènes de contraction sur le point intéressant, la machine magnéto-faradique est complétée (fig. 746) par des coquilles K et L, permettant de redresser les impulsions. On comprendra que la rapidité des impulsions est fonction de la vitesse de rotation de la machine ; on diminue ainsi le temps pendant lequel se produisent les variations de flux 2-3 et 1-4.

Lorsqu'on désirera diminuer le nombre d'impulsions produites par la machine, le résultat sera obtenu d'une façon extrêmement simple, en se branchant entre une des bagues et l'un des balais frottant sur les coquilles ; avec ce montage, on supprimera automatiquement une onde induite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur deux, et on obtiendra des ondes continuellement de même sens.

En effet, si on se branche entre la bague G et le balai J, pour une position de l'induit, le balai J sera en relation avec l'une des extrémités de l'enroulement, celle précisément en contact avec la bague G. A ce moment, l'enroulement de l'induit ne sera donc pas branché dans le circuit d'utilisation, et nous aurons une différence de potentiel nulle. Au bout d'un demi-tour, la coquille K ayant pris à ce moment la position de la coquille L, le balai J se trouvera en relation avec l'extrémité de l'enroulement reliée à la bague H ; l'enroulement induit se trouvera donc intercalé entre la bague G et le balai J. Dans ces conditions, il ne passe dans le circuit d'utilisation qu'une onde de la machine par tour complet (fig. 747).

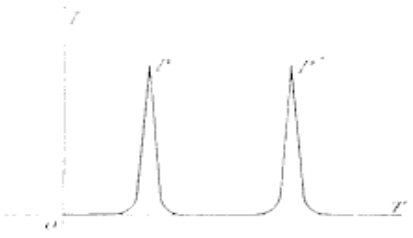


Fig. 747. — Coupe des ondes redressées.

L'intérêt de ce dispositif est d'éliminer totalement l'onde d'établissement, qui avait des inconvénients au point de vue du traitement médical.

Remarquons que l'on peut également réaliser une dynamo faradique, en alimentant par le courant continu du secteur les inducteurs au lieu de les constituer par des aimants permanents.

* * *

Le ***courant ondulatoire*** est un courant toujours dirigé dans le même sens, mais dont l'intensité, à chacune de ses périodes, de vitesse variable, part de zéro pour atteindre un maximum et diminuer ensuite jusqu'à zéro.

Pour produire du courant ondulatoire, on se sert d'une commutatrice en utilisant un balai du collecteur — côté continu — et un balai d'une des bagues — côté alternatif. On redresse ainsi une des deux ondes du courant sinusoïdal, ce qui donne un courant variant de zéro à la valeur maxima du sinusoïdal, à la fréquence de celui-ci, mais toujours de même sens.

Cette forme de courant est parfois utilisée au lieu et place du courant faradique, pour les traitements, mais cette méthode n'est qu'une approximation, les ondes faradiques étant de forme beaucoup plus aiguë et de durée plus courte que celles du courant ondulatoire.

Le courant sinusoïdal est en général le courant du secteur et, dans d'autres cas, le courant d'une commutatrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous ne dirons rien des ***courants statiques***; on les produit avec les machines à influence, type Wimshurst, Ramsden, etc.

* * *

Les courants de ***haute fréquence***, par suite de leurs nombreuses applications, méritent une mention particulière, étant donné le grand nombre d'appareils spéciaux que les constructeurs ont réalisé afin d'en permettre l'emploi simple et sans danger pour le médecin. La ***radiologie*** est la plus importante de ces applications.

Les propriétés physiologiques de la haute fréquence ont été mises en évidence par le professeur d'Arsonval qui en a rendu possible l'usage en médecine.

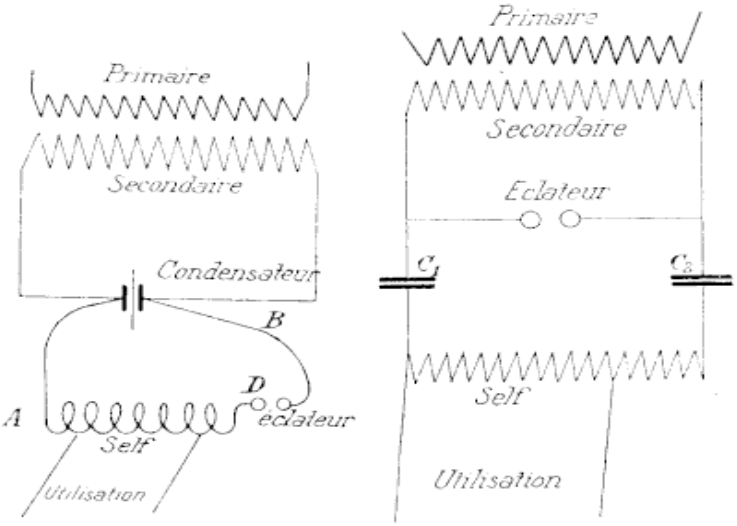


Fig. 748.
Dispositif de Tesla. Dispositif d'Arsonval.

Pour produire des courants de haute fréquence, on a employé primitivement le ***dispositif de Tesla***, si connu en télégraphie sans fil (voir chapitre *Oscillations électriques*), mais ce dispositif, représenté schématiquement figure 748, a le gros inconvénient d'avoir le circuit de décharge ADB en communication électrique directe avec la bobine de charge, de sorte que, si le condensateur ne fonctionne pas, le malade reçoit directement le courant du transformateur.

Dans le ***dispositif d'Arsonval***, le malade est à l'abri des décharges de basse fréquence. Il consiste (fig. 748) dans l'interposition de deux condensateurs C_1 et C_2 en dérivation sur le circuit de l'éclateur et réunis par une self considérable.

Toutes les sources à haut potentiel peuvent être utilisées pour charger les condensateurs dont la décharge disruptive produit les courants de haute fréquence. On n'utilise pratiquement que les bobines d'induction excitées par du courant continu ou alternatif, et les transformateurs utilisant directement les courants alternatifs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous avons étudié en détail les interrupteurs, mécaniques et électrolytiques, que comporte par suite toute installation de haute fréquence.

* * *

On peut utiliser de différentes manières les courants de haute fréquence : En les faisant passer directement à travers le corps, on fait ce que les médecins appellent de l'***application directe***, dont la *diathermie* ou *électrocoagulation* est une application. Grâce à l'intensité élevée des courants qui traversent l'organisme, on peut provoquer au sein même des tissus compris entre les électrodes une élévation notable de la température permettant par exemple de coaguler les albumines.

Dans les modèles d'appareils courants, on met en jeu des puissances de 300 à 800 watts, ce qui correspond à la production d'une grande calorie en quatorze secondes dans le premier cas et en quatre secondes environ dans le second.

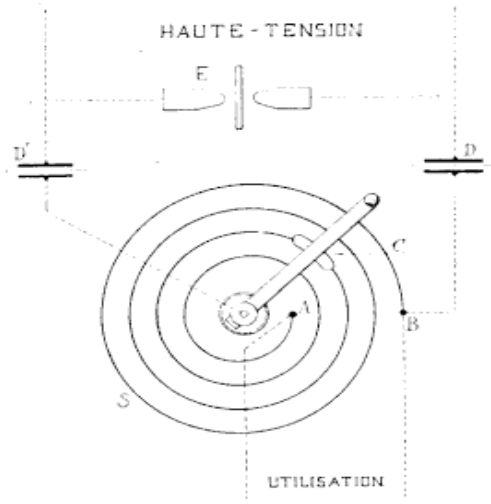


Fig. 749. — Schéma des connexions d'un appareil de diathermie.
C, curseur ; D, D', condensateurs ; E, éclateur.

Il importe particulièrement, dans les applications urologiques de la diathermie, que le courant de haute fréquence ne produise sur le patient aucune sensation de courant faradique. Cette condition est réalisée très simplement dans l'appareil Gaiffe, qui comporte un simple circuit oscillant, formé d'un circuit inductif S et d'une batterie de condensateurs D et D', en dérivation sur un éclateur E (fig. 749). Ce circuit est relié aux bornes du secondaire d'un transformateur élévateur de tension. La self-induction CB intercalée dans le circuit de décharge des condensateurs est réglable au moyen du curseur C. On supprime toute sensation du courant faradique en plaçant le curseur en B au début de l'application ; la self-induction étant sensiblement nulle, la fréquence du courant est très élevée ; au fur et à mesure que l'intensité du courant augmente, on introduit progressivement de la self-induction dans le circuit de décharge du condensateur en déplaçant le curseur C, de façon à conserver à la fréquence du courant sa valeur la plus élevée possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un organe délicat qui entre dans la constitution de ce dispositif est l'éclateur. On utilise l'éclateur Broca, dans lequel l'étincelle jaillit au sein d'un diélectrique carburé (gaz d'éclairage, par exemple). Ce système ne présente pas l'irrégularité dans le jaillissement de l'étincelle que l'on rencontre dans l'éclateur à air libre. On peut, semble-t-il, expliquer ce fait de la façon suivante : l'irrégularité que l'on veut éviter provient de l'usure des électrodes au point où se produit l'étincelle, et cette usure est d'autant plus rapide que la température est plus élevée. Or, en se produisant dans le diélectrique carburé, l'étincelle, qui décompose le gaz en ses éléments principaux, fournit une certaine quantité de chaleur au système, quantité de chaleur absorbée par la réaction chimique de décomposition, d'où résultent une moins grande élévation de la température du milieu et un moindre effet destructeur de l'étincelle sur les électrodes.

* * *

Les effets d'induction très considérables que produisent les courants de haute fréquence sont utilisés dans la ***d'Arsonvalisation***, qui consiste à placer le patient au centre d'un grand solénoïde parcouru par le courant

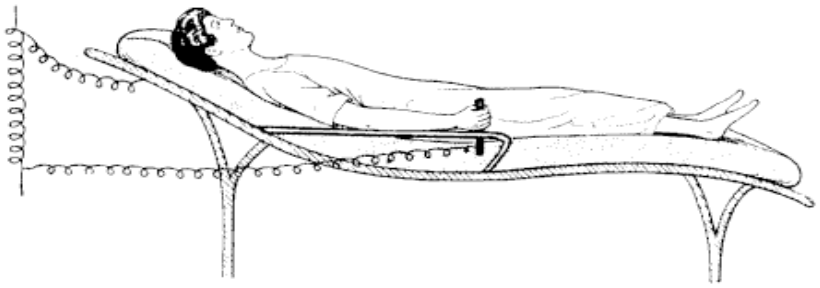


Fig. 750. — Lit condensateur.

de décharge des condensateurs. Le corps du malade est alors parcouru par des courants induits très intenses (on voit s'allumer une lampe de bas voltage placée entre ses mains) qui exercent sur son système respiratoire, sur la sécrétion urinaire et sur la vie cellulaire des actions que le médecin utilise dans ses traitements.

Au lieu de placer le malade à l'intérieur d'un solénoïde, on peut l'installer sur le *lit condensateur* (fig. 750). Le malade repose sur un matelas isolant, et est relié à une des extrémités de la bobine de self. Le matelas est disposé sur un lit recouvert d'une lame de plomb reliée à l'autre extrémité de la bobine de self. On réalise ainsi un condensateur ayant pour armatures le malade et la feuille de plomb, pour diélectrique le matelas isolant. A chaque oscillation, ce condensateur se charge et se décharge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

On utilise, dans certains cas, les courants de haute fréquence après élévation de leur tension ; on produit alors l'***effluvation*** ou un *étincelage* puissant. On appelle parfois ces courants modifiés ***courants de Oudin***.

La figure 751 montre le dispositif électrique employé. Aux bornes de la bobine de self du dispositif d'Arsonval, on monte en dérivation une bobine de fil de cuivre ; l'effluve se produit à l'extrémité E. DD′ sont les spires

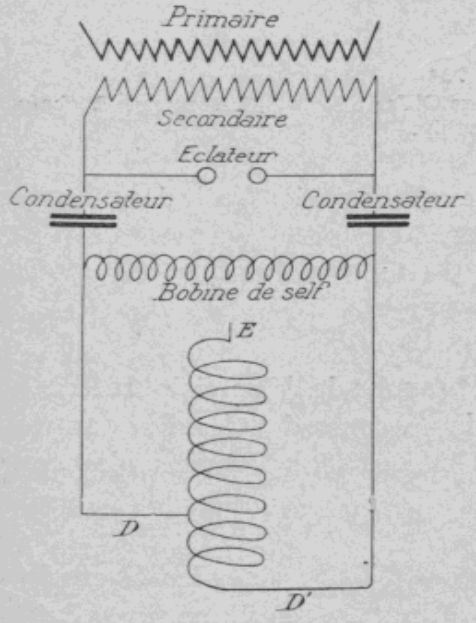


Fig. 751. — Montage Oudin primitif.

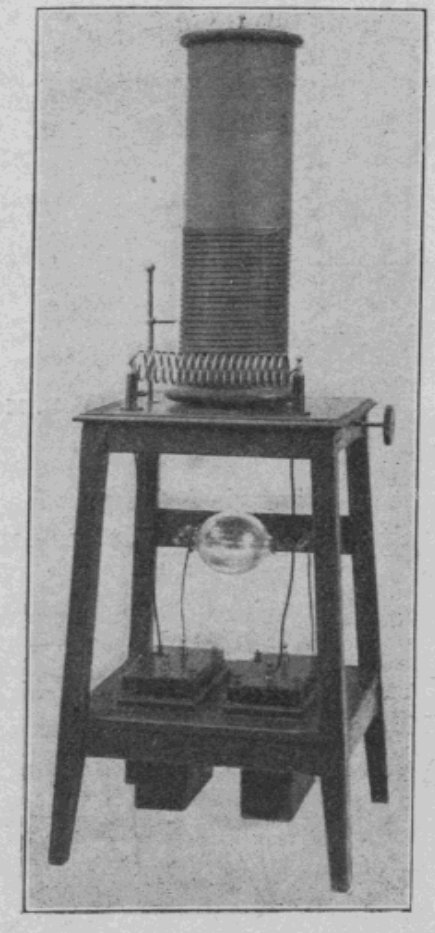


Fig. 752. — Appareil haute fréquence Oudin.

jouant le rôle de primaire, DE les spires jouant le rôle de secondaire. Dans des dispositifs ultérieurs, Oudin supprime même complètement la bobine de self.

Au lieu de relier l'hélice Oudin par son extrémité à l'un des condensateurs, on peut établir la connexion par la partie médiane. On a alors le ***montage O' Farrell et Lebailly*** (fig. 753, B).

Enfin, si on dédouble ce dernier montage, on a la ***disposition Rochefort*** (fig. 753, C).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut, à l'aide de ces dispositifs, obtenir soit des étincelles qui ser-

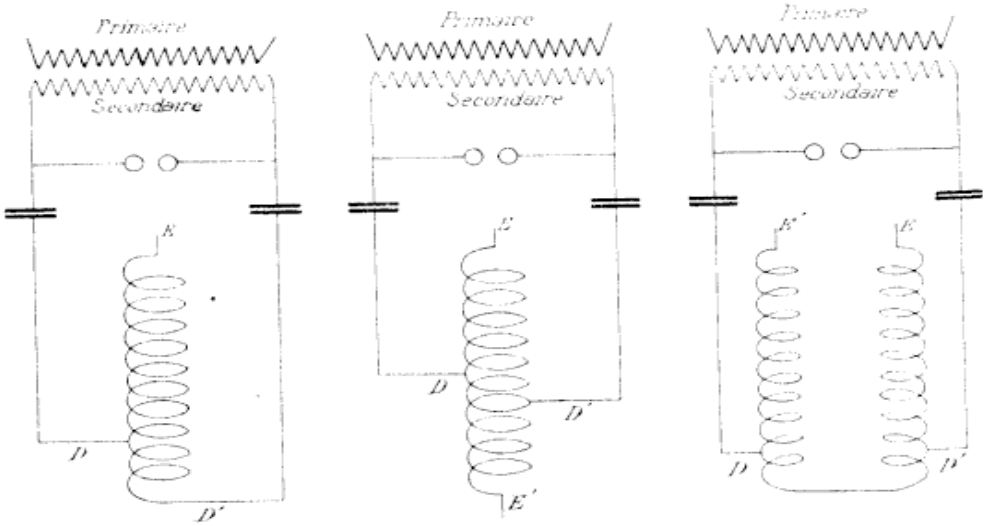


Fig. 753.
A. Montage Oudin. B. Montage O'Farrell-Lebailly. C. Montage Rochefort.

viront en chirurgie à détruire les tissus (fulguration), soit des effluves pour le traitement des lupus et des eczémas.

* * *

La ***radiographie*** est peut-être la branche de l'électricité médicale dont le développement a été le plus rapide au cours des dernières années, car elle a bénéficié immédiatement des découvertes les plus récentes de la science. Nous allons successivement examiner les divers éléments d'une installation radiographique: ampoule, alimentation en courant convenable de cette ampoule, enfin appareillage et dispositifs de protection.

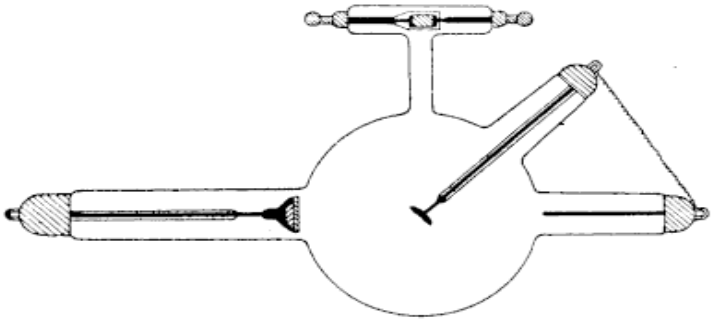


Fig. 754. — Ampoule ordinaire.

Les anciens types d'ampoules à rayons X, dits *tubes focus*, étaient constitués d'une ballon de verre portant deux tubulures dans lesquelles étaient montées la cathode en aluminium et l'anode servant en même temps de disque *focus* pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

arrêter les faisceaux cathodiques, d'où son nom d'*anticathode*. Dans les tubes courants, ou tubes *bianodiques*, il y a deux anodes connectées l'une à l'autre et dont l'une, inclinée à 45° sur l'axe de la cathode, joue le rôle d'anticathode.

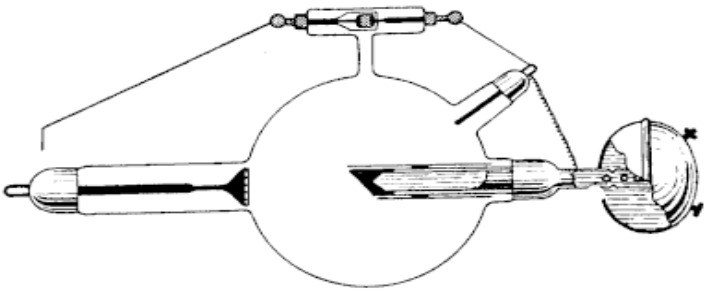


Fig. 755. — Ampoule à refroidissement par eau.

La cathode est en aluminium, métal présentant la moindre évaporation électrique, tandis que l'anticathode est en platine iridié ou en tungstène, afin de mieux résister à l'élévation de température due au bombardement cathodique et également parce que le rendement en rayons X est d'autant meilleur que le poids atomique du métal qui les émet est plus élevé.

La figure 754 montre un type classique de tube focus ; on remarquera à la partie supérieure de l'ampoule une tubulure auxiliaire qui est le système régulateur, dont nous dirons quelques mots plus loin.

Lorsque le tube à rayons X doit fonctionner assez longtemps, ou lorsque la puissance mise en jeu est considérable, il faut lutter contre l'échauffement excessif de l'anticathode.

On peut assurer le refroidissement par un réservoir en cuivre rouge rempli d'eau (fig. 755).

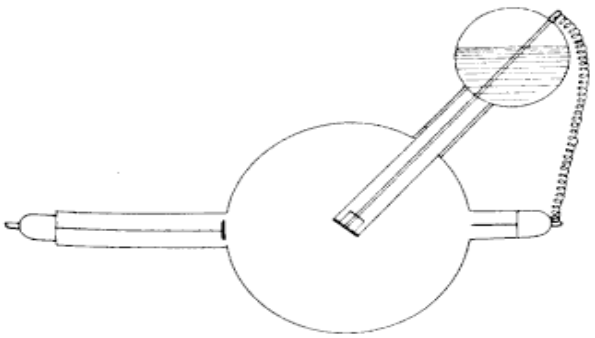


Fig. 756. — Tube à refroidissement par réservoir latéral.

La grande surface du radiateur en cuivre rouge, très bon conducteur, élimine déjà par radiation une grande partie de la chaleur émise ; l'eau, qui est amenée par une large canalisation jusqu'au fond même de l'anticathode, circule par thermosiphon et concourt au refroidissement parfait.

Le réservoir contient environ 300 centimètres cubes d'eau, ce qui lui permet déjà d'absorber une très grande quantité de chaleur. De plus, la paroi métallique noire et mate du réservoir est très conductrice et possède un pouvoir émissif élevé, de sorte qu'elle disperse par rayonnement dans l'air la plus grande partie de la chaleur apportée par l'eau en circulation continuelle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans certains modèles, le réservoir d'eau est placé hors de l'axe du tube (fig. 756).

On a proposé également le refroidissement par circulation d'eau ou d'air, mais l'installation devient immédiatement beaucoup trop compliquée.

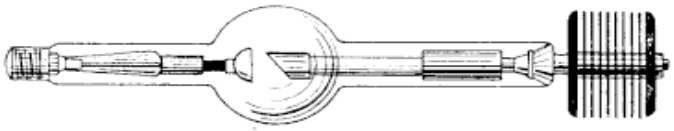


Fig. 757. — Ampoule à refroidissement par radiateur à ailettes.

Enfin, dans les tubes très puissants, comme les tubes Coolidge, que nous verrons plus loin, on adopte le refroidissement par radiateur à ailettes. L'anticathode, très volumineuse, est entourée d'un cylindre de cuivre qui se prolonge à l'extérieur par le radiateur (fig. 757).

* * *

Les ***tubes à vide*** présentent une résistance variable au passage de la décharge, suivant le degré de vide qui règne à l'intérieur de l'ampoule. Plus la résistance est grande, plus il faut appliquer aux bornes du tube une forte différence de potentiel. Il en résulte que les projectiles cathodiques se déplacent dans le champ intense avec de grandes vitesses, donnant naissance à des rayons X de grande pénétration. On dit alors que le tube est *dur*. Si, au contraire, la résistance est faible, le tube est dit *mou*, et les rayons X produits ont une pénétration beaucoup moindre.

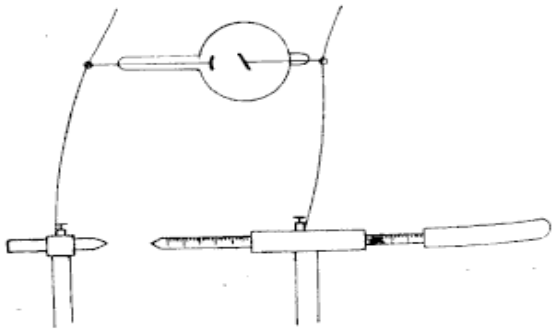


Fig. 758. — Spintermètre.

Au cours du fonctionnement, le tube à rayons X devient de plus en plus dur, et finalement peut même ne plus laisser passer la décharge. De plus, comme il importe, pour le traitement, d'avoir des rayons X d'une dureté bien définie suivant le résultat à atteindre et constante pendant toute une séance, il faut pouvoir mesurer la dureté d'un tube et ensuite, par un dispositif convenable, la modifier à volonté.

Pour évaluer la dureté d'un tube, on se sert de ce qu'on appelle l'*étincelle équivalente*. C'est l'étincelle maxima qui tend à s'amorcer entre les pointes d'un éclateur monté en dérivation aux bornes du tube (fig. 758).

L'appareil utilisé, appelé ***spintermètre***, consiste en deux tiges hori-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

zontales terminées par deux pointes, en regard l'une de l'autre, dont la première est fixe sur une colonne isolante et la seconde montée sur une autre colonne mobile le long d'une règle graduée en centimètres.

Un autre dispositif consiste en une sorte de compas dont les branches isolantes s'ouvrent et se ferment pour régler la distance explosive.

Bien que ce procédé de mesure soit empirique, puisque la longueur de l'étincelle dépend de la forme des électrodes, de l'état d'ionisation de l'air, etc., il permet de se rendre suffisamment compte, au point de vue pratique, de la dureté des tubes.

Un tube *mou* donne une étincelle équivalente de 4 à 7 centimètres.
— *moyen* — — 8 à 14 —
— *dur* — — plus de 14 centimètres.

(Certains tubes Coolidge dépassent 35 centimètres d'étincelle équivalente.)

En pratique, on ne se contente pas de ce seul procédé ; on mesure la dureté du rayonnement par un procédé également empirique d'ailleurs, mais qui a l'avantage d'être basé directement sur les propriétés de ce rayonnement.

L'appareil employé, le ***radiochromomètre de Benoît,*** est fondé sur ce principe que la perméabilité des corps aux rayons X est une fonction de la dureté de ces rayons, fonction très variable suivant les corps. C'est ainsi que la perméabilité de l'argent augmente peu avec la dureté ; celle de l'aluminium, au contraire, augmente rapidement.

On conçoit donc que chaque dureté moyenne d'un rayonnement puisse être caractérisée par le rapport entre les épaisseurs d'aluminium et d'argent qui ont même perméabilité.

La radiochromomètre de Benoît est formé d'un disque d'aluminium divisé en douze secteurs dont les épaisseurs croissent de 1 à 12 millimètres. Le centre évidé est occupé par un disque d'argent de 1 millimètre d'épaisseur. On utilise l'appareil en le plaçant soit devant l'écran fluorescent (entre l'écran et l'ampoule), soit sur la plaque photographique enveloppée. On obtient, dans ces deux cas, une image où les secteurs d'aluminium présentent une opacité croissante. Le numéro du secteur qui a même opacité que le disque d'argent sert de caractéristique à la dureté du rayonnement.

De nombreux procédés ont été proposés pour définir plus exactement le rayonnement des ampoules, ce qui, au point de vue clinique, est extrêmement important, surtout avec les rayonnements très puissants et très durs que l'on utilise couramment. Nous ne décrirons pas ces procédés (Guilleminot, Sabouraud, Bordier, Kienbock, Huguet, etc.), qui tous reposent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur l'appréciation de la fluorescence de diverses substances sous l'action du rayonnement X.

La seule méthode véritablement scientifique consiste, comme dans l'étude des rayonnements par les physiciens, à mesurer l'ionisation produite par le faisceau de rayons X. Malheureusement, le courant d'ionisation est extrêmement faible; aussi remplace-t-on sa mesure par celle du temps de décharge d'un condensateur de capacité connue.

On remplace ainsi la mesure d'une *intensité* de rayonnement par celle d'une *quantité* de rayonnement.

L'un des appareils les plus précis réalisant cette mesure est l'***intensionomètre***. Il est constitué par une chambre d'ionisation de forme tronconique que l'on place sur le trajet du rayonnement X. Cette chambre d'ionisation comporte (fig. 759) une série de disques en papier, recouverts d'une mince couche de carbone conducteur, maintenus séparés parallèlement par un intervalle de 1 centimètre, à l'aide d'anneaux périphériques isolants. Ces disques sont alternativement reliés aux deux bornes de la chambre d'ionisation, et constituent ainsi une sorte de condensateur à lames parallèles, dont le diélectrique serait l'air interposé, ionisé par le rayonnement X qui le traverse.

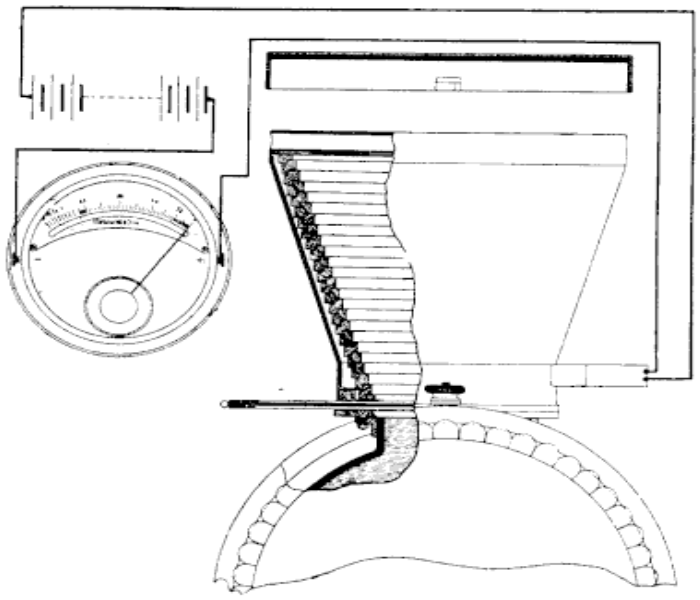


Fig. 759. — Intensionomètre.

Une double enveloppe, plomb et aluminium, constitue les parois latérales, et assure la protection contre le rayonnement X diffusé pouvant sortir de la chambre. La base supérieure, par où pénètre le rayonnement à mesurer, comporte un tiroir permettant de placer facilement les filtres utilisés.

Les dimensions extérieures du cône sont : diamètre de la base inférieure : 29 centimètres ; hauteur totale : 26 centimètres. Il correspond à un faisceau de 25 centimètres de diamètre, pour une distance de 40 centimètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'anticathode. Le volume de la chambre d'ionisation, rapporté à cette distance, est de 11 litres environ.

Cette chambre d'ionisation est placée dans le circuit d'une batterie de piles avec un galvanomètre à aiguille, à lecture directe. Cet appareil doit être sensible. Pratiquement, il donne toute la déviation de l'échelle pour 2 micro-ampères environ.

Le fonctionnement de l'appareil est des plus simples. Sous l'influence du rayonnement, les diverses couches d'air de l'appareil s'ionisent et permettent le passage d'un courant dont l'intensité est donnée par le galvanomètre. Cette intensité est rigoureusement proportionnelle à l'intensité du rayonnement définie comme la quantité d'énergie de rayons X traversant l'unité de surface perpendiculairement à la direction du faisceau, pendant l'unité de temps (ergs par seconde et par centimètre carré).

Un autre appareil intéressant donne la « dose en profondeur » des rayons X, qui a, au point de vue médical, une très grande importance. En effet, en radiologie, il faut tenir compte des conditions particulières du problème : on désire faire absorber par une lésion à l'intérieur du corps une certaine quantité d'énergie sous forme de rayons X. Or, la tumeur profonde, située au sein d'un cône de rayonnement, reçoit non seulement une radiation primaire importante, mais aussi un rayonnement secondaire parfois prépondérant et venant de toutes parts. Aussi est-on conduit, pour résoudre le problème, à remplacer le corps humain, impénétrable à l'appareil de mesure, par une cuve d'eau ou *fantôme* réalisant une absorption sensiblement identique à celle exercée par les tissus vivants.

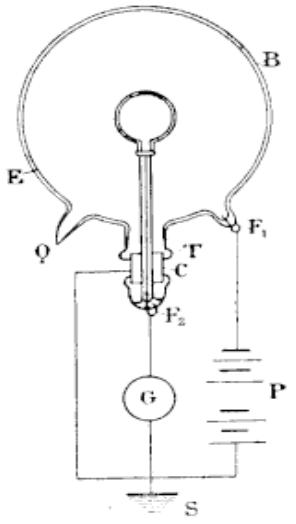


Fig. 760. — Chambre exploratrice du dosimètre Dauviller.

Le ***dosimètre Dauviller*** exprime en unités C. G. S. la quantité d'énergie Rœntgen retenue par les tissus là où se trouve une petite chambre d'ionisation exploratrice dans le fantôme d'eau.

La chambre exploratrice, d'un volume de 4 centimètres cubes environ, est constituée par un petit ballon B en verre mince (fig. 760) revêtu intérieurement d'un enduit conducteur E chimiquement inerte vis-à-vis du gaz employé. Cet enduit, qui constitue l'électrode extérieure, est porté à un potentiel élevé, de l'ordre de 1 000 volts, par l'intermédiaire d'un fil de platine F_1, scellé dans la paroi. L'ampoule porte une tubulure T dans laquelle est soudé un collet

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de platine C qui, mis au sol, joue le rôle d'un anneau de garde parfait. Enfin, à l'extrémité de cette tubulure est scellé un fil de platine F_2 relié d'une part, à l'électrode centrale sphérique et, de l'autre, à l'appareil de mesure, qui est un galvanomètre très sensible G. L'ampoule, dont le volume est calibré, est remplie d'un gaz convenable dans des conditions voulues de température et de pression, puis scellée en Q à la manière d'une lampe à incandescence. Elle demeure ensuite indéfiniment dans des conditions immuables d'absorbabilité.

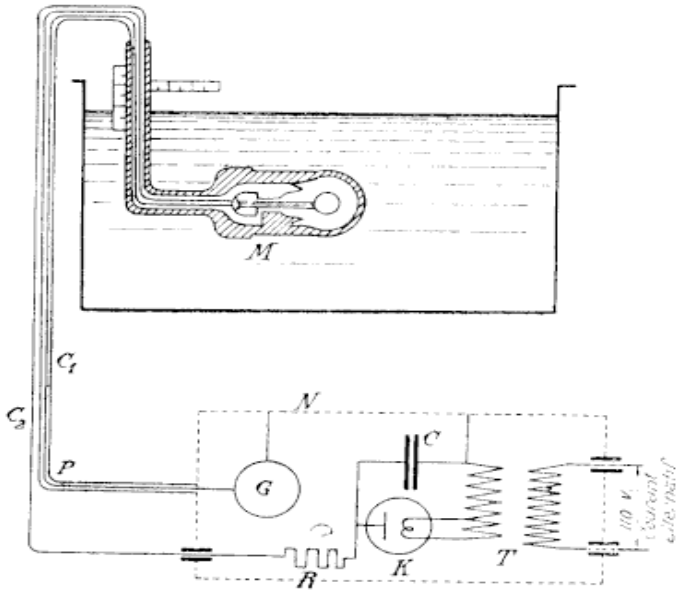


Fig. 761. — Schéma général du dosimètre montrant l'explorateur immergé dans le fantôme d'eau, les échelles de localisation en surface et en profondeur, le générateur de tension constante et l'appareil de mesure.

Le gaz absorbant placé dans l'ampoule doit être un gaz lourd, afin que le nombre des molécules présentes ne soit pas trop considérable par rapport au nombre d'ions formés. Le choix s'est porté sur le xénon, qui constitue le gaz absorbant idéal, par suite de son faible potentiel d'ionisation

La figure 761 indique également le montage des différentes parties de l'appareil. L'ampoule, le galvanomètre G et la batterie P sont disposés en série avec un point commun relié au sol.

Au lieu d'utiliser une batterie de piles P pour obtenir le potentiel de 1 000 volts environ nécessaire pour le fonctionnement, on se sert en général du dispositif statique dû à M. Villard, et qui consiste en un redresseur de courant alternatif formé d'un transformateur, d'un kénotron et d'un condensateur.

En pratique, l'ampoule est enfermée dans un mince manchon protecteur en aluminium de 25 millimètres de diamètre, l'espace résiduel étant rempli de paraffine fondue. Celle-ci isole et protège mécaniquement l'ampoule, en même temps qu'elle réduit au minimum la perturbation apportée dans la répartition des doses dans le fantôme lorsqu'on y introduit l'explorateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Ayant mesuré le rayonnement X et caractérisé le régime des ampoules, il faut pouvoir faire varier à volonté la nature des rayons X émis, c'est-à-dire faire varier le vide qui règne dans l'ampoule. Un grand nombre de dispositifs ont été proposés à cet effet.

Le plus connu est l'***osmo-régulateur*** de Villard. Il est constitué par un petit tube de platine (on emploie aussi pour cet usage le palladium) de 2 à 3 millimètres de diamètre et 50 à 60 millimètres de long, traversant la paroi d'une tubulure de verre soudée à l'ampoule, et fermée à l'autogène à son extrémité extérieure (fig. 762). En chauffant la partie extérieure du tube de platine au rouge avec une flamme bleue de bec Bunsen ou de brûleur à essence, l'hydrogène, qui existe toujours à l'état libre dans la flamme, diffuse à l'intérieur de l'ampoule au travers du platine ou du palladium incandescent. Le tube *mollit*.

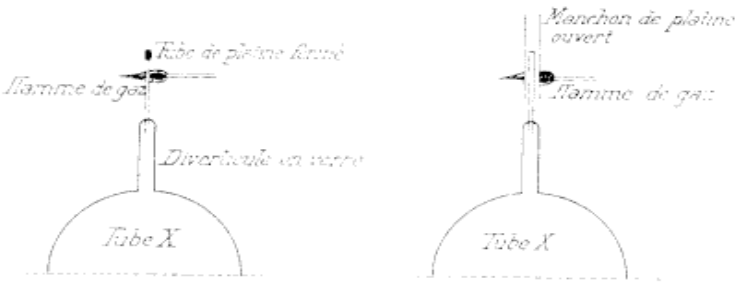


Fig. 762. — Osmo-régulateur de Villard.

On peut, par ce même dispositif, *durcir* une ampoule dont on a poussé trop loin le ramollissement. Il suffit d'entourer le tube osmo-régulateur d'un manchon de platine qui s'interpose entre ce tube et la flamme. L'osmo-régulateur se trouve encore porté au rouge par le rayonnement intérieur du manchon, mais il se trouve alors, grâce au courant d'air qui s'établit dans ce manchon, placé dans une atmosphère exempte d'hydrogène. C'est donc l'hydrogène contenu dans l'ampoule qui diffuse à l'extérieur (fig. 762).

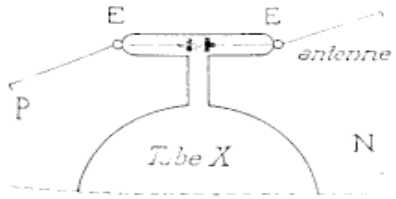


Fig. 763. — Régulateur à étincelles.

On utilise en général, maintenant, le ***régulateur à étincelles***. Il consiste en deux électrodes annexes placées dans un cylindre de verre relié à l'ampoule par une tubulure de verre. Ces électrodes sont reliées à l'anode et à la cathode par des tiges mobiles.

Lorsque les connexions sont établies par ces tiges, la décharge passe par les électrodes auxiliaires, qui présentent un écart moindre que la dis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tance cathode-anticathode. Les gaz qui sont occlus dans le métal de ces électrodes auxiliaires ou dans des matières inertes que l'on interpose entre elles (mica, amiante) se dégagent sous l'action de la décharge, et le tube devient plus *mou* (fig. 763).

Ce régulateur ne permet pas de durcir le tube.

* * *

Les tubes focus à atmosphère gazeuse disparaissent actuellement devant le tube Coolidge, à vide absolu, et dans lequel, comme nous l'avons vu, l'émission d'électrons est due à l'incandescence de la cathode. Nous avons donné, chapitre X, la théorie de cet appareil; il nous reste à voir comment on le construit et comment on l'utilise en médecine.

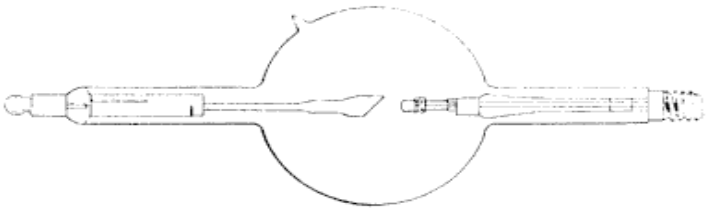


Fig. 764. — Ampoule Coolidge standard.

Il existe quatre types principaux de tubes Coolidge en France. L'ampoule dite ***standard*** (fig. 764), dont la cathode est constituée par une spirale en fil de tungstène supportée par deux tiges de molybdène, portées par un support en verre, et recevant le courant par deux conducteurs traversant ce support. Ces deux conducteurs sont reliés extérieurement à l'ampoule au moyen d'une douille à vis à l'aide de laquelle on établit d'une part les connexions avec une source de courant convenable pour le chauffage du filament (8 à 12 volts, 3 à 5 ampères), et d'autre part l'arrivée du courant à haute tension qui doit passer de la cathode à l'anticathode.

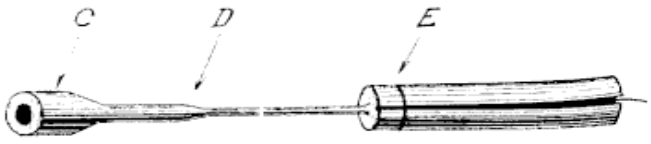


Fig. 765. — Anticathode du tube standard.

L'anticathode est constituée par un bloc de tungstène du poids de 100 grammes environ, C, soutenu par une tige de molybdène D, elle-même fixée dans un cylindre métallique E (fig. 765).

Ce type d'ampoule peut supporter en régime 4 à 5 milliampères avec une longueur d'étincelle équivalente de 25 centimètres.

Dans le type ***Bahy-Coolidge***, ou ampoule *à radiateur* (fig. 766), l'anticathode est formée par une tige de cuivre rouge portant à son extrémité

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une pastille de tungstène sur laquelle vient s'arrêter le faisceau cathodique. Grâce au refroidissement énergique de l'anticathode par convection, l'appareil fonctionne comme soupape, car l'anticathode n'est pas portée à une température suffisante pour qu'elle émette des électrons lorsqu'elle devient cathode si l'ampoule est branchée directement sur un circuit alternatif.

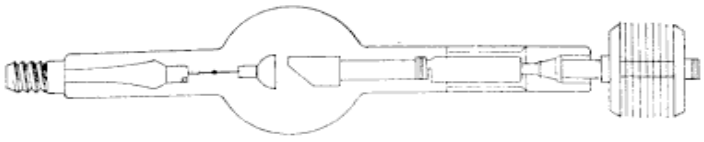


Fig. 766. — Ampoule Bahy-Coolidge.

En général, on donne au support de la cathode une forme spéciale concave qui concentre le faisceau cathodique sur un espace très restreint de l'anticathode afin d'obtenir un faisceau de rayons X provenant d'une source presque ponctuelle, ce qui est très important en radioscopie et en radiographie pour avoir des images nettes.

Ces tubes à radiateur peuvent supporter 3 milliampères pour une longueur d'étincelle équivalente qui ne doit pas dépasser 15 centimètres.

Pour la ***radiographie dentaire***, il existe un type d'ampoule de petite dimension (fig. 767) caractérisé par la disposition de la tubulure de la cathode, qui est non plus dans le prolongement de celle de l'anticathode, mais dans le sens perpendiculaire. La cathode étant, en outre, reliée à la terre (ce qui reporte toute la tension sur l'anticathode), il est possible de placer l'ampoule très près du patient et d'obtenir ainsi des radiographies très rapides.

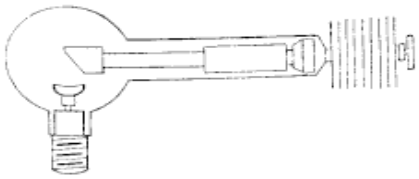


Fig. 767. — Ampoule dentaire.

Enfin, lorsque l'on veut faire de la radiothérapie profonde, c'est-à-dire opérer sous 250 000 volts, correspondant à une longueur d'étincelle équivalente de 40 à 45 centimètres, on se sert soit d'ampoules dont les électrodes sont très allongées de façon à empêcher l'eau de jaillir entre les électrodes, soit d'ampoules standard, mais alors immergées dans un bain d'huile. Nous reviendrons plus loin sur les installations de ce type, qui sont les plus puissantes actuellement réalisées.

* * *

La ***fabrication des ampoules à rayons X***, et des ampoules Coolidge en particulier, est extrêmement délicate. Nous allons la décrire rapidement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La préparation des électrodes est la première opération. L'emploi de deux métaux dans la constitution de l'anticathode a pour but d'utiliser la conductibilité moindre du molybdène pour s'opposer tout au moins partiellement à la transmission de la chaleur produite sur le tungstène par le bombardement cathodique, cette chaleur devant s'éliminer, dans les ampoules type standard, uniquement par radiation. La partie en tungstène de l'anticathode est tirée d'une barre obtenue en comprimant à très forte pression dans un moule en acier de la poudre d'oxyde tungstique que l'on réduit dans un courant d'hydrogène à très haute température.

A cet effet, l'aggloméré d'oxyde tungstique est parcouru par un courant électrique qui le porte à l'incandescence et dont l'intensité atteint 10 000 ampères sous un très faible voltage. Une des extrémités de la barre est solidement serrée dans une pince métallique qui la maintient verticale et réalise un parfait contact électrique. L'autre extrémité plonge dans un bain de mercure dont le contact intime assure le passage du courant électrique malgré les déformations considérables et les variations de dimensions de la barre pendant le traitement.

Dans les ampoules à radiateur, le disque de tungstène est noyé dans un bloc de cuivre rouge qui est coulé autour du disque sous vide afin d'éviter l'oxydation et l'occlusion des gaz. Ce bloc est ensuite soudé électriquement à un support de cuivre.

Les cathodes sont constituées par une pièce en molybdène, dite pièce de concentration, et servant au centrage du faisceau cathodique. Le filament est placé à l'intérieur de cette pièce, qui est creuse ; une de ses extrémités est soudée électriquement à la pièce de concentration, l'autre étant soudée à une tige de molybdène.

Les électrodes, avant montage dans l'ampoule, sont nettoyées, puis purgées de gaz par un chauffage à haute température dans le vide.

L'ampoule de verre, dont le diamètre atteint parfois 20 centimètres, a une épaisseur de $0^{mm},8$ à $1^{mm},5$ et doit résister aux pressions de plusieurs centaines de kilogrammes qu'exerce sur elle la pression atmosphérique ; malgré cette charge énorme, elle doit pouvoir se contracter et se dilater sous l'influence de la température.

L'ampoule est livrée de la verrerie avec une tubulure. On la monte sur une sorte de tour, et une paire de chalumeaux, fixés sur un chariot mobile comme le sont les poupées de tours, permet à l'ouvrier souffleur de munir l'ampoule de tous ses appendices, et l'anticathode est mise en place. Une autre machine permet la fixation de la cathode. Après ces traitements, l'ampoule est « recuite » afin d'éviter les tensions internes qui pourraient se produire dans la masse de verre lors d'un refroidissement brusque, ce qui amènerait fatalement la rupture de l'ampoule en service.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un examen de l'ampoule en lumière polarisée permet de se rendre compte si ces tensions ont bien disparu.

L'ampoule étant munie de ses électrodes, il faut y faire un vide qui doit être de l'ordre du millième de micron de mercure.

Pour arriver à ces vides élevés, il faut que les électrodes et le verre soient débarrassés des gaz occlus. A cet effet, on chauffe les ampoules dans une étuve tout en y faisant le vide, puis ensuite, quand les parois ont ainsi été débarrassées des gaz qui y adhéraient, on lance le courant électrique dans l'ampoule pour porter les électrodes à la température la plus élevée possible et en éliminer les gaz.

Il ne reste plus ensuite qu'à fermer l'ampoule et à la mettre en observation pendant quelque temps, afin de s'assurer de la constance de ses caractéristiques, avant de la livrer au médecin.

Afin de montrer la durée et le nombre des manipulations que nécessite la fabrication d'un tube Coolidge, nous dirons que, si on admet que toutes les opérations puissent se succéder sans interruption, il s'écoulerait quarante-quatre jours entre le moment où le premier ouvrier touche aux pièces jusqu'au moment où le tube a terminé ses essais.

On remarquera qu'il n'y a aucun système de réglage dans ces ampoules, et cependant elles permettent d'obtenir avec la plus grande facilité les rayonnements X de toute dureté et de toute intensité.

En effet, l'*intensité* qui peut traverser le tube dépend du nombre d'électrons émis par le filament ; cette quantité dépend elle-même de la température du filament, et celle-ci est réglée par le radiographe. Comme, d'autre part, il peut faire varier à son gré la différence de potentiel appliquée aux bornes du tube, il lui devient donc possible d'obtenir un faisceau de particules cathodiques ayant des vitesses plus ou moins grandes, et par suite de produire le faisceau de rayons X de *pénétration* désirée.

* * *

Les ***installations de radiologie*** se composent de deux parties bien distinctes : tout d'abord, le générateur de courant à haute tension qui servira à alimenter l'ampoule ; ensuite, l'ampoule et les appareils d'utilisation.

La production du courant de haute fréquence a déjà été étudiée. On part du courant alternatif ou du courant continu actionnant une bobine de Ruhmkorff ou un transformateur, et un interrupteur convenable, trembleur, turbine à jet de mercure, interrupteur électrolytique, contact tournant, etc., ne laisse passer qu'une des alternances du courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les figures 768 et 769 montrent les schémas des deux installations, l'une dite « à bobine », l'autre dite « à contact tournant » ; les figures suffisent pour comprendre le fonctionnement électrique de ces dispositifs,

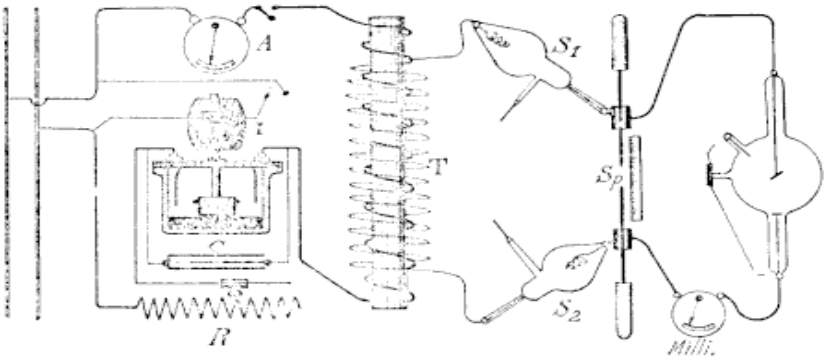


Fig. 768. — Installation avec contact tournant et tube ordinaire.

et la figure 770 représente une crédence radiologique Gaiffe à bobine, sur laquelle on reconnaît les divers organes électriques.

Un tube Coolidge peut être alimenté par les mêmes installations ; mais, dans certains cas, lorsqu'il suffit par exemple d'avoir des rayons X d'un

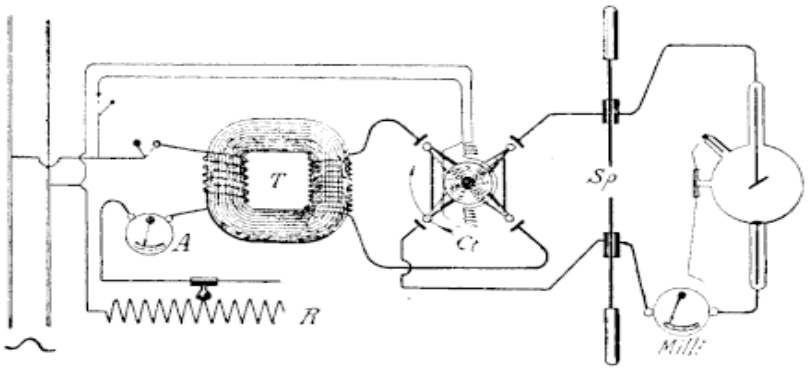


Fig. 769. — Installation avec bobine et tube ordinaire.

degré de pénétration fixe, on peut utiliser l'effet auto-rectificateur du tube et le montage se simplifie (fig. 771).

On peut également se servir des kénotrons pour remplacer la soupape de Villard. La protection est plus efficace et la chute de tension est moindre. La figure 772 montre un dispositif dans lequel on utilise deux condensateurs C et C′, l'onde inverse étant absorbée par le kénotron K. Pour la radiothérapie profonde, l'expérience a montré qu'il est très désirable de réaliser l'alimentation de l'ampoule à tension constante, tout en ayant un voltage aussi élevé que possible. Le kénotron a fourni une solution très élégante du problème, et qui mérite d'être signalée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme on sait, le kénotron ne laisse passer qu'une alternance du courant alternatif. Pour utiliser les deux demi-ondes, on dispose deux kénotrons en dérivation aux bornes d'un transformateur statique de construction courante, dont le primaire est alimenté par le courant du secteur, à basse tension (110 ou 220 volts). Dans chacun des circuits décrits est intercalé, en série avec le kénotron, un condensateur qui se charge à travers le kénotron correspondant et se décharge lorsque le kénotron ne laisse pas passer le courant. Si la tension du secondaire du transformateur est de 62 500 volts, la tension très sensiblement constante aux bornes extrêmes des deux condensateurs est de 125 000 volts et, pour obtenir une tension de 250 000 volts, on monte en série deux dispositifs identiques à celui dont nous venons de parler.

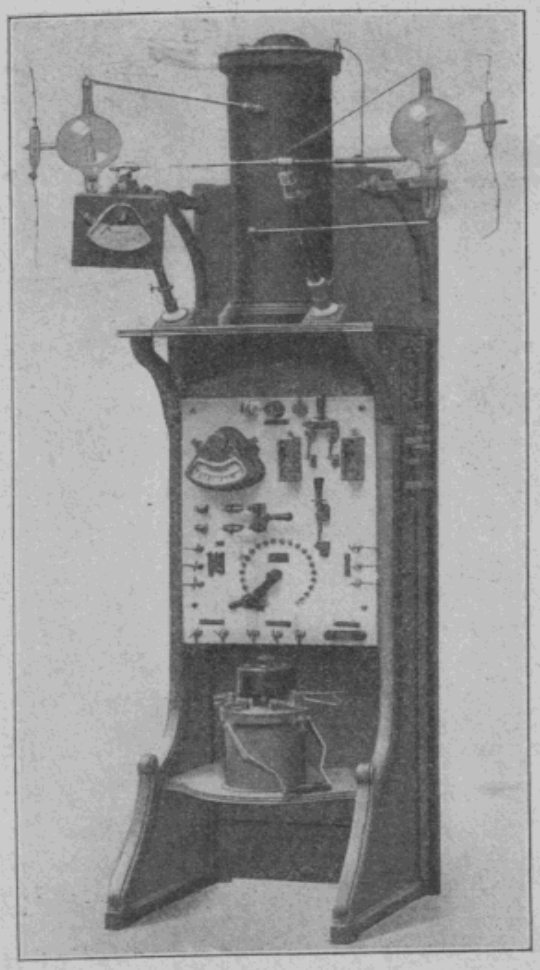


Fig. 770.— Crédence radiologique Gaiffe à bobine.

La figure 773 donne le schéma de montage dont les figures 774 et 775 représentent des vues d'ensemble sur lesquelles on aperçoit très distinctement les quatre kénotrons.

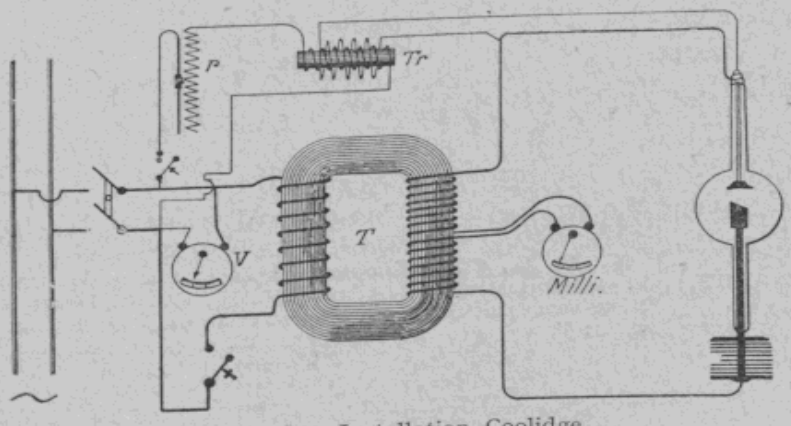


Fig. 771. — Installation Coolidge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

* * *

Lorsque l'on opère avec des ampoules donnant un rayonnement très pénétrant, il est nécessaire de prendre de grandes précautions pour ***soustraire à son atteinte l'opérateur*** et pour limiter exactement la zone d'action sur le patient. Aussi, toutes les ampoules sont-elles placées dans d'épaisses cupules de plomb qui les entourent entièrement, sauf une petite fenêtre qui délimite le champ du faisceau de rayons X.

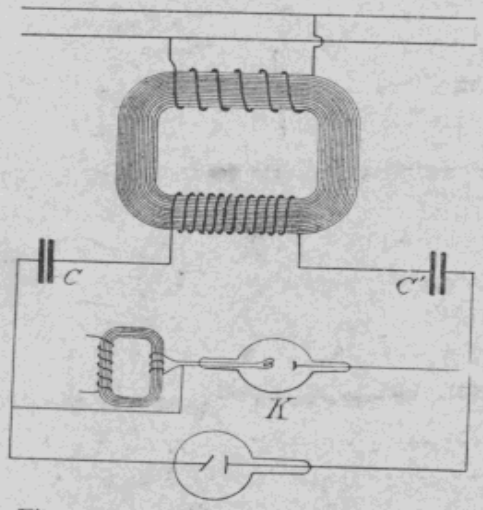


Fig. 772. — Montage avec kénotron.

Pour les ampoules fonctionnant à très haut voltage, 150 000 ou 200 000 volts, on place en général l'ampoule dans un bain d'huile isolant contenu dans une cuve en plomb de 6 millimètres d'épaisseur. Le faisceau de rayonnement X direct donnant naissance, à sa sortie de la cuve, à un rayonnement secondaire assez important, par diffusion sur le corps du patient, la protection absolue de l'opérateur est aisément réalisée en plaçant le tableau de commande dans une pièce contiguë avec cloison de séparation doublée de plomb (2 millimètres minimum) et fenêtre à glace opaque pour le contrôle du traitement, ou dans une cabine entièrement recouverte de plomb.

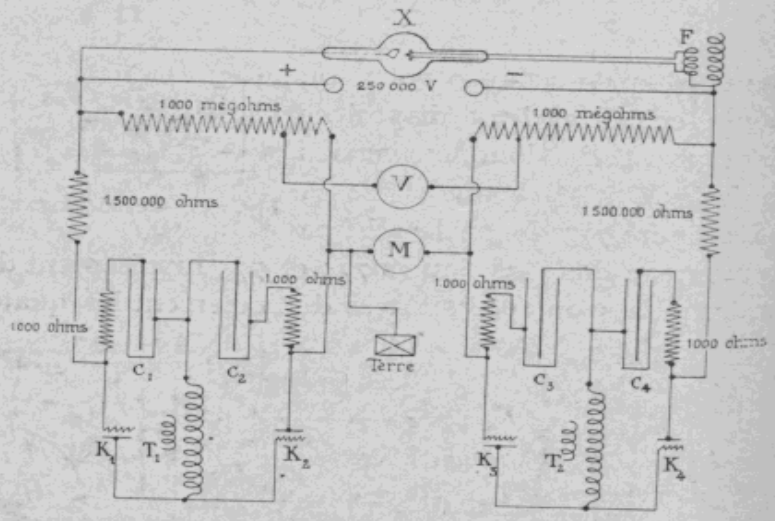


Fig. 773. — Schéma de montage d'un groupe générateur à courant redressé à 250 000 volts.

C_1, C_2, C_3, C_4, condensateurs à haute tension de 0,02 microfarad ; F, transformateur de filament ; K_1, K_2, K_3, K_4, kénotrons de charge ; M, milliampèremètre ; T_1, T_2, transformateurs à haute tension de 75 kilowatts ; V, voltmètre électrostatique : X, ampoule radiogène.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

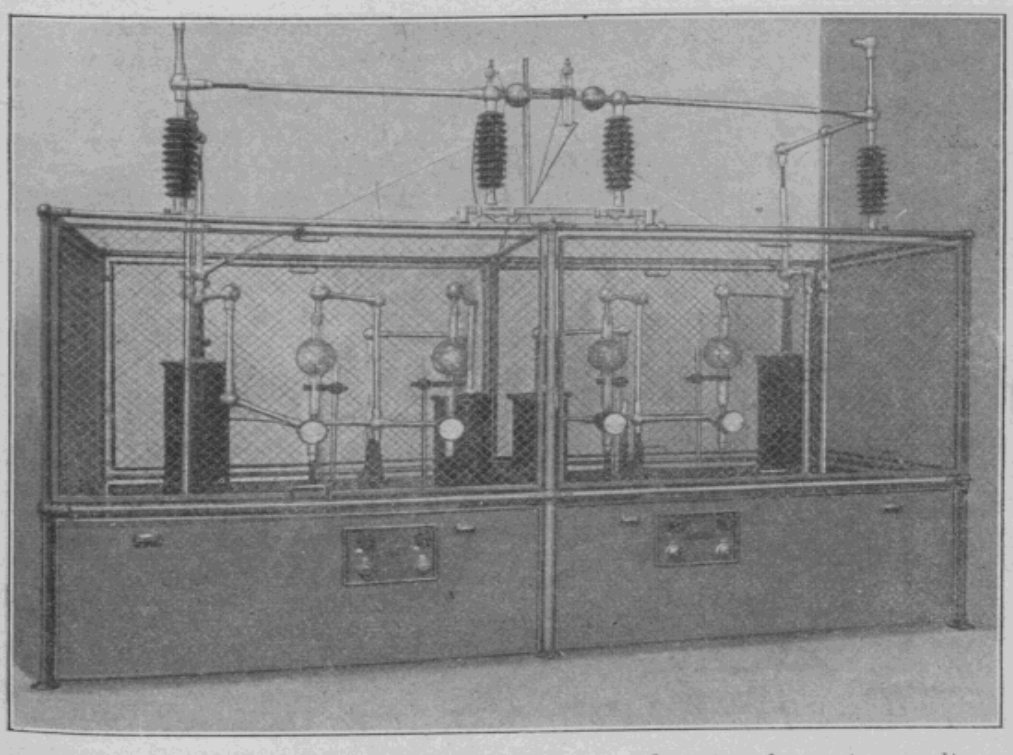


Fig. 774. — Vue de l'installation de quatre kénotrons redresseurs donnant un voltage de 250 000 volts.

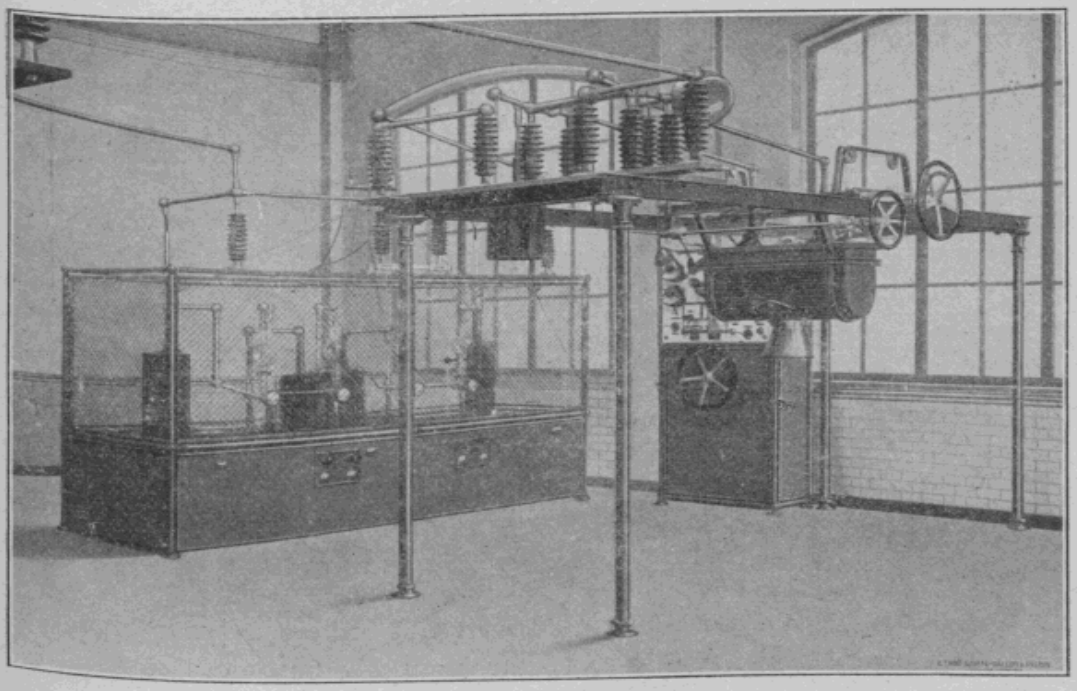


Fig. 775. — Vue d'ensemble de l'installation de radiographie à 250 000 volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

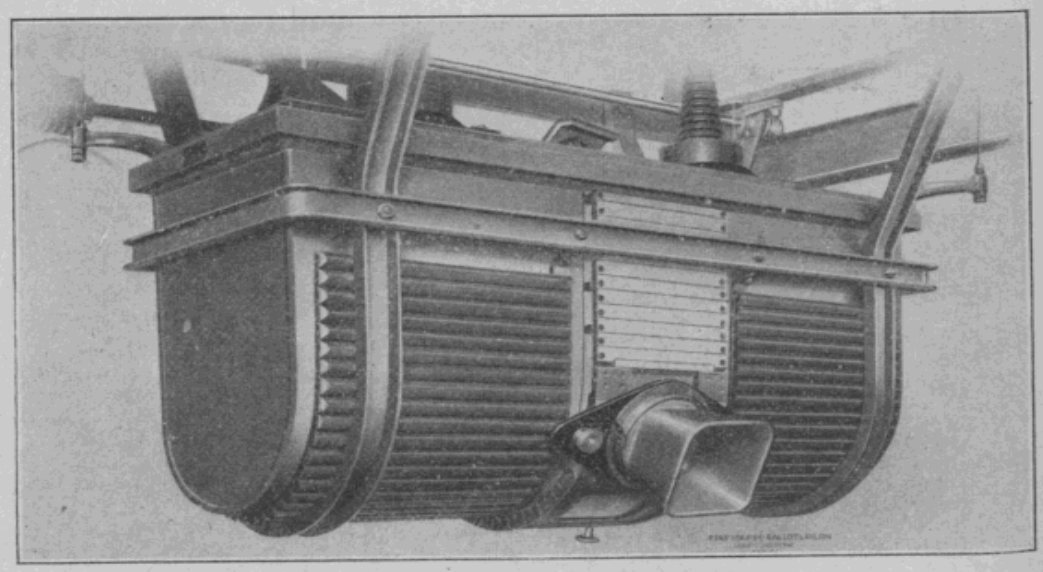


Fig. 776. — Vue de la cuve recouverte de lames de plomb renfermant l'ampoule. On aperçoit la fenêtre par où sort le faisceau de rayons X.

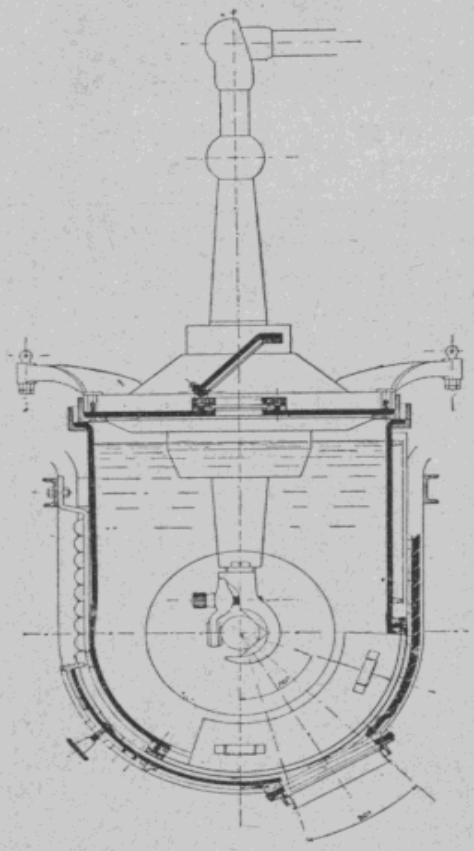


Fig. 777. — Coupe de la cuve renfermant l'ampoule.

Les locaux voisins seront efficacement protégés par un revêtement de 2 millimètres de plomb fixé aux parois, dans le cas où ces dernières seraient constituées par des matériaux légers.

La haute tension arrive par des antennes verticales à haut isolement, fixées solidement au couvercle en plomb de la cuve qu'elles traversent, et portant à leurs extrémités des pinces en bois, permettant ainsi de supporter le tube et le maintenir solidement en position.

La mobilité d'une cuve de ce genre ne peut évidemment être réalisée de la même manière que celle d'une cupule du type ordinaire; aussi la cuve est-elle placée sur un pont roulant, dont les deux rails traversent la salle de traitement.

La cuve à huile est munie d'un ajutage orientable autour de l'axe de l'ampoule, fixé au milieu d'une pla-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quette de plomb épais coulissant dans un chemin fixé sur la cuve.

Cette plaquette de plomb portant l'ajutage est prolongée de part et d'autre par des lames mobiles à recouvrement, de manière à épouser la courbure du chemin de glissement. L'ajutage se déplace naturellement devant une fenêtre garnie d'aluminium mince en forme de secteur cylindrique, ménagée dans la cuve (fig. 776 et 777).

Pour réduire l'épaisseur d'huile, un volet de transparence en celluloïd plein d'air est placé devant cette fenêtre et remplit le rôle des cônes de transparence précédemment utilisés avec les ajutages fixes. Le support d'ajutage permet d'utiliser un cône de rayonnement d'un angle de 30° au sommet.

L'axe de l'ajutage peut être déplacé d'un angle de 70° à partir de la verticale.

Des précautions spéciales sont prises pour assurer l'isolement des conducteurs amenant la haute tension. La figure 776 montre la vue générale de l'installation.

Dans les cas les plus courants, la puissance de l'appareil est beaucoup moindre, par suite son encombrement beaucoup plus restreint. A titre d'exemple, et pour fixer les idées, nous donnons dans les figures 778 et 779 la vue de deux ensembles destinés l'un à la radiographie dentaire, l'autre à la radiographie et la radiothérapie dans toutes les positions, grâce à une table basculante spéciale.

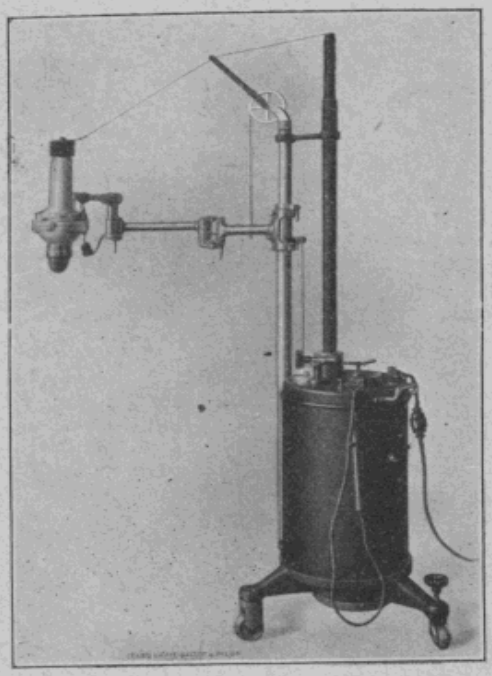


Fig. 778. — Appareil de radiographie dentaire.

* * *

A côté de ces applications importantes, l'électricité s'est révélée, en médecine comme dans toutes les branches de l'activité humaine, un auxiliaire précieux. C'est ainsi que les ***électro-aimants*** ont rendu de grands services pendant la guerre pour localiser les projectiles lorsque l'on ne disposait pas d'installations radiographiques.

Si un fort électro-aimant est alimenté par du courant alternatif, tout corps métallique qui se trouve dans son champ est animé d'un mouvement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vibratoire qui trahit sa présence (électro-aimant vibreur de Bergonié).

En ophtalmologie, on utilise les électro-aimants pour extraire des parcelles magnétiques accidentellement introduites dans les tissus.

A l'aide d'un électro-aimant analogue à celui représenté figure 780,

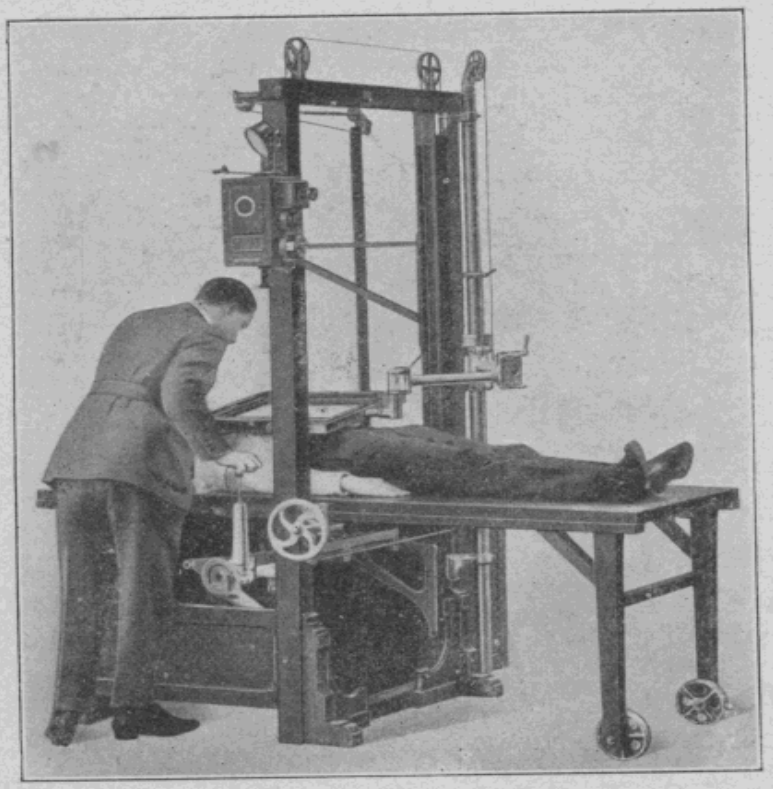


Fig. 779. — Table basculante pour examen radiographique.

consommant 200 watts, on a trouvé les nombres suivants pour l'attraction en fonction de la distance d'une paillette magnétique pesant $0^{gr},028$.

Distance en millimètres.	*Force attractive en grammes.*
0,1	135
0,4	53
0,53	48
0,72	42
1,09	31
2,03	20
2,89	14,5
3,83	11
4,82	8,5
5,82	7,5
6,87	6
11,95	3

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est-à-dire que la force attractive peut s'élever à 4 500 fois le poids de la paillette.

La force portante de l'électro-aimant ayant servi à ces expériences est

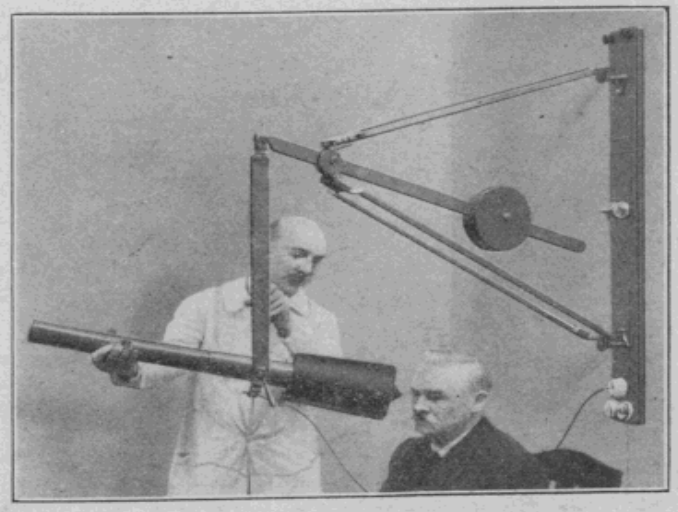


Fig. 780. — Électro-aimant pour l'extraction des corps métalliques introduits dans l'œil.

d'environ 1300 kilogrammes, et le flux magnétique au niveau de la pointe voisin de 2 450 gauss.

* * *

Enfin, nous citerons pour mémoire les autres applications à la médecine de l'énergie électrique, car elles ne présentent, au point de vue de l'électricien, aucune particularité spéciale : galvanocautères, lampes spéciales pour l'éclairage des cavités, production de l'air chaud, massage vibratoire, sphygmophone, bains de lumière, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE ALPHABÉTIQUE

A

Absorption de masse (Coefficient d') 180
Accumulateurs 266
— (Groupement des) 286
— au plomb 270
— force électromotrice 270
— résistance intérieure 271
— capacité 273
— décharge 273
— coefficient d'utilisation 274
— rôle de l'épaisseur des plaques .. 275
— rôle de l'électrolyte 276
— sulfatation 276
— électrodes 279
— — (Fabrication des) 279
— — (Formation des) 282
— (Traction par) 615
Accumulation (Chauffage par) 630
Actinium 198
Actions secondaires 91
A. D. (Pile) 261
Ader (Microphone) 713
— (Récepteur) 715
Aimants 38
Aimantation (Intensité d') 47
Alliages (Propriétés électriques des). 243
Aluminium (Propriétés électriques). 241
Aluminium (Métallurgie de l') 691
Alternateurs 319
— à inducteurs tournants 323
— polyphasés 326
— (Caractéristiques des) 330
— (Couplage des) 331
— (Construction des) 334
— (Entraînement des) 336
— bipolaires 322
Alternatifs (Courants) 73
— propriétés générales 74
— représentation cinématique 75
— (Puissance des) 80
Amiante 229
Ampère (Définition électromangétique de l') 55
Ampère (Définition de l') 29
— (Règle d') du magnétisme 45
— (Courants moléculaires d') 62
— tour 56
— étalon 122
— international 122
— (Bonhomme d') 67
Amplificateurs 753
Amplificateur (Audion comme) 181
Ampoules radiographiques 771
— (Fabrication des) 779
Anneau (Enroulement en) 300
Annonciateur 725
Anode 88
Appareils de chauffage (Construction des) 642
Arago (électromagnétisme) 45
Arc chantant 744
Arcanson 230
Archet (Prise de courant par) 591
Ardoise 231
Argenture 689
Aron (Compteur) 461
Arrhénius (Expériences sur les sels chauffés) 170
— (Théorie de) 89
Arsen (Four) 639
Arsonvalisation (D') 768
Atmosphériques (Ions) 219
Astatique (Équipage) 118
Aston (Expériences de) 192
Asynchrones (Moteurs) 87
Attractions électromagnétiques 59
Audion 177
Aurores boréales 214
— répartition géographique 215
— (Hauteur des) 215
— (Fréquence des) 215
— (Théorie des) 216
Azote (Fixation de l') 654

B

Bacs d'accumulateurs 282
Bahy-Coolidge (Tube) 778
Bakélite 231

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Balais (Construction des) 315
— (Calage des) 306
Barbier (Pile de) 258
Bardon (Lampe) 531
Barkla (Expériences de) 186
Barlow (Roue de) 61
Basalte 232
Bastian (Lampe) 542
Boîtes de résistances 120
— à décades 121
Baudot (Télégraphe) 702
Beck (Lampe) 531
Becquerel (Rayons de) 195
Bell (Téléphone) 710
Bender (Expérience de) 124
Benoît (Radiochromomètre) 773
Bemont (Découverte du radium) ... 197
Bergonié (Pile de) 258
Bichat et Blondlot 109
Biot et Savart (Loi de) 56
Birkefand (Aurores boréales) 210
— (Four) 657
Bipolaires (Dynamos) 295
Bitumes 232
Blondel (Lampe) 531
Bobine de Ruhmkorff 398
— Petersen 432
— de self 438
Bodde (Dispositif de) 542
Bouteille de Leyde 15
Boys (Radiomicromètre de) 117
Bragg (Rayons α) 200
Branly (Cohéreur de) 751
Bremer (Lampe) 530
Brienne (Régulateur) 528
Bronzes (Propriétés électriques) 239
Bunsen (Pile de) 255

C

Cabaret (Pile de) 254
Cabestans électriques 620
Câbles de transport de force 440
Cage d'écureuil (Moteurs à) 579
Calage des balais 306
Callaud (Pile de) 253
Caniveau (Prise de courant par) ... 593
Canson (Turbine) 367
Caoutchouc 231
Capacitance 81
Capacité (Notion de la) 7
— (Unité de) 9
— (Modification de la) de deux conducteurs en présence 13
— d'un corps (Augmentation de la). 14
— (Mesure de la) 113
Caractéristiques des dynamos 297
— externe 297
— interne 298
— des alternateurs 330
Carpentier (Boîte de résistances de). 121
— (Rupteur) 399
Carré (Pile de) 253
Caténaire (Suspension) 597
— simple 597
— triangulée 597
— double 598
Cathode 88
Centrales 346
Centraux téléphoniques 724-730
— à batterie centrale 725
Champ électrique (Notion du) 4
— — (Lignes de force du) 5
Champ magnétique 40
— — (Intensité du) 43
— — des courants 52
— oscillatoire 130
— tournant 85
— — (Moteurs à) 578
Chaperon et Lalande (Pile) 258
Charbon (Propriétés électriques) ... 245
— (Emploi du) en électricité 246
— de lampes à arc (Fabrication) ... 521
Charge électrique (Unité de) 4
— des accumulateurs 268
Chatterton 232
Chauffage par arc 625
— électrique des appartements 628
Chauffe-bains électriques 630
— à accumulation 630
Chercheurs téléphoniques 735
Chlorates (Fabrication des) 679
Choc (Résistances de) 385
Circuit magnétique 57
Claude (Lampe de) 546
Clark (Pile étalon) 263
Cohéreur de Branly 751
Collecteurs (Construction des) 314
Commutation 305
Commutatrice 404
Compteurs 456
— électrochimiques 456
— O'K 456
— Thomson 457
— de puissance 457
— à champ tournant 458
— Ferrari 459
— C. A. C 459
— Sangamo 460
— Aron 461
— à tarifs variables 462
— (Fabrication des) 463
Condensateur (Principe) 14
— (Facteurs déterminants) 15
— cylindrique 15
— plan 15
— variable 16
— multiple 16
— (Décharge des) 127
Condensation (Force électromotrice de) 80

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Conducteurs 3
Conductibilité des gaz 141
— — (Mécanisme de la) 158
Conductivité des électrolytes 96
— limite 96
Constante diélectrique 17
Contacts successifs (Loi des) 22
Controller 608
— de tramway 610
— pour deux moteurs série-parallèle 611
— électro-pneumatique 612
Convection (Courant de) 124
Coolidge (Tube) 176, 772
Cooper-Hewitt (Lampe) 540
Corps incandescents (Émission d'électricité par les) 166
Cosses 466
Couche double 98
Coulomb (Loi de) 4
— (Définition du) 4
Coupe-circuit 471
— haute tension 374
— à cornes mobiles 374
— à résistance 371
Couplage des dynamos 308
Courant électrique (Notion du) 20
— — (Production du) 21
— — (Manifestations du) 28
— — (Intensité) 29
— dérivés (Lois des) 33
— (Champ magnétique des) 52
— (Unité d'intensité du) 55
— moléculaires d'Ampère 62
— de Foucault 66
— déwatté 83
— watté 83
— de convection 124
— de haute fréquence (Propagation des) 137
— de saturation 191
— telluriques 223
— galvanique 759
— faradique 759
— ondulatoire 759
— de Morton 759
Cowper-Cooles (Procédé) 682
Crémieu (Expérience de) 124
Crookes (Espace obscur de) 140
Cuirassé (Inducteur) 294
Cuirassés (Transformateurs) 390
Cuisine électrique 629
— — spécifications 635
Cuivrage 687
Cuivre (Propriétés électriques) 238
— (Électrométallurgie du) 680
— (Quartz piézométrique de) 26
Curie (Loi de) du magnétisme 49
— (Découverte du radium) 197
— (Unité d'émanation) 203

D

Daniell (Pile de) 251
Dauviller (Dosimètre de) 775
Debierne 198
Décharge (Potentiel de) des électrolytes 100
— des accumulateurs 267
Déclinaison (Définition) 207
— (Variations de la) 208
Delezenne (Anneau tournant de) 291
Densité électrique 10
Deri (Moteurs) 583
Dérivations 33
Desprez-d'Arsonval (Galvanomètre) 114
Desprez (Transport de l'énergie) 454
Détecteurs 750
— Branly 751
— magnétique 751
— électrolytique 752
— Fleming 752
— à cristal 752
— à lampes 752
— (Audion comme) 181
Déwatté (Courant) 83
Diamagnétiques (Substances) 51
Diathermie 767
Diélectrique (Constante) 17
— (Définition) 17
— (Effets) 17
— (Polarisation des) 18
Diélectrine 232
Différence de potentiel (Notion de la) 8
— — et travail 8
— — et force électromotrice 31
Dinin (Accumulateur) 281
Diphasés (Courants) 84
Disjoncteurs à maxima 474
— à minima 475
— à retard 475
— dans l'air 477
— dans l'huile 478
— ultra-rapides 480
Dispatcher 347
Dissociation (Coefficient de) 93
Dissolution (Tension de) 99
Distribution 450
— en boucle 452
— par feeder 452
— continue à trois fils 453
— diphasée à quatre fils 453
— diphasée à trois fils 454
— triphasée en étoile 454
— triphasée en triangle 455
— tétraphasée 455
Dolezalek (Électromètre de) 112
Dorure 689
Dosimètre Dauviller 775
Doublets magnétiques 39

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Duddell (Thermogalvanomètre) . . . 117
— (Arc de) . . . 744
Duplex (Montage) . . . 694
— différentiel . . . 695
— en pont . . . 695
Duralumin (Propriétés électriques) . . 243
Dynamos (Couplage des) . . . 308
Dynamos . . . 292

E

Ébonite . . . 232
Éclair (Genèse de l') . . . 224
— (Ordre de grandeur de l') . . . 225
— effets mécaniques . . . 225
Éclairage . . . 491
Éclairage des rues, des salles, des ateliers . . . 505
Edison (Effet) . . . 167
— (Accumulateur) . . . 284
— (Dynamo) . . . 294
— (Téléphone) . . . 712
Effluvation . . . 709
Effet Peltier . . . 24
Efficace (Intensité) . . . 76
— (Potentiel) . . . 76
Einthoven (Galvanomètre de) . . . 115
Électricité vitreuse . . . 3
— résineuse . . . 3
— (Production de l') par voi chimique . . . 21
— — par la chaleur . . . 22
— — par pyro-électricité . . . 23
— — par piézo-électricité . . . 25
— terrestre . . . 218
— médicale . . . 758
Électro-aimants . . . 45
— médicaux . . . 787
Électrochimie . . . 670
Électrode normale . . . 101
Électrodes des accumulateurs . . . 279
Électrodynamomètre . . . 122
Électrolyse (Lois de l') . . . 92
Électrolytes . . . 88
— (Conductibilité des) . . . 96
Électromètre . . . 107
— de Wilson . . . 108
— à plateau . . . 109
— de Kelvin . . . 111
— (Montage des) . . . 112
— de Dolezalek . . . 112
Électron . . . 2
— (Inertie de l') . . . 163
— (Rayon de l') . . . 163
— (Masse de l') . . . 163
Électroscope à feuille d'or . . . 108
Électrostatique . . . 1
Électrostatiques (Machines) . . . 19
Électrozincage . . . 687
Elmore (Procédé) . . . 681
Elster et Geitel (Expériences de) . . . 100
Émanation (Propriétés) . . . 203
Émission radiotélégraphique . . . 741
Empâtage des plaques d'accumulateurs . . . 281
Enroulement des induits des dynamos . . . 300
— imbriqué . . . 303
— ondulé . . . 304
— compensateurs . . . 307
— des alternateurs . . . 323
— imbriqué des alternateurs . . . 325
— ondulé — — . . . 325
Entraînement élastique . . . 604
Entretenues (Oscillations) . . . 182
Équipotentielles (Surfaces) . . . 9
Équivalent électrochimique . . . 93
Étalons (Piles) . . . 202
Éther (Notion de l') . . . 19
Étincelage . . . 709
Étincelle électrique (Lois de l') . . . 142
Étoile (Groupement des enroulements des alternateurs en) . . . 329
Étuves de laboratoire électriques . . . 638
Excitation indépendante . . . 295
— (Auto-) . . . 295
— série . . . 296
— en dérivation ou shunt . . . 296
— compound . . . 296
— des dynamos . . . 295
Excitatrice . . . 323
Explosif (Potentiel) . . . 142
— — (Variation du) . . . 143
Extra-courants . . . 71
Ewing (Théorie du magnétisme) . . . 48

F

Farad (Définition du) . . . 9
Faraday (Conception de) . . . 2
— (Lois de) . . . 92
— (Définition du) . . . 93
— (Espace noir de) . . . 146
Faradique (Courant) . . . 759
Faure (Électrodes d'accumulateurs) . . . 279
Feddersen (Expériences de) . . . 133
Fer (Propriétés électriques) . . . 240
— électrique . . . 626
— (Spécifications) . . . 634
— à souder électrique, spécifications . . . 637
— -nickel (Accumulateurs au) . . . 285
Ferrari (Compteur) . . . 459
Ferrié (Détecteur) . . . 752
Ferro-magnétiques (Substances) . . . 50
Féry (Pile) . . . 259
Feuillet magnétique . . . 54
Feussner (Boîte de résistances de) . . . 121
Fibre . . . 232

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fixation de l'azote 654
Fleming (Soupape de) 171
— (Valve de) 752
Flux lumineux des lampes 558
Fontaine (Turbine) 368
Force électromotrice et différence de potentiel 31
— contre-électromotrice 37
— magnétomotrice 57
— électromotrice des piles (Calcul de la) 97
Forest (Audion de) 177
Foucault (Courants de) 66
— (Rupteur de) 400
Foudre 223
Fours électriques, généralités 625
— — à arc 625
— — à induction 625
— — à vide 639
— — de laboratoire 639
— — — à vide 640
— — à recuire 641
— — à haute fréquence 660
Fourneyron (Turbine) 366
Foyers lumineux (Répartition des) 501
— mécaniques 351
Francis (Turbine) 307
Freinage électromagnétique 613
Fréquencemètre de couplage 334
Fusibles 499

G

Gaulot (Accumulateur) 281
Galalithe 233
Galvani (Expérience de) 21
Galvanique (Courant) 759
Galvanomètre 113
— à cadre mobile 114
— à aimant mobile 114
— Desprez-d'Arsonval 114
— à corde 115
— thermique 117
— de Kelvin 118
Galvanoplastie 689
Gassiot (Expériences de) 140
Gauss (Définition du) 44
Gearless (Locomotives électriques) 603
G. E. C. (Lampes) 532
Geiger (Parcours des rayons α) 201
Geissler (Tube de) 246
Geitel et Elster (Expériences de) 166
Gennevilliers (Description de la centrale de) 349
Gilbert (Définition du) 57
Gin (Four) 644, 659
Girard et Street (Procédé) 522
Girod (Four) 652
Goldstein (Rayons de) 190
Gomme laque 233
Graetz (Soupape) 407
Gramme (Inducteur) 294
Graphite (Four à résistance de) 639
Grenaille (Microphone à) 714
Griesheim-Elektron (Procédé) 677
Groupement des enroulements 329
Guthrie (Expérience de) 166
Gutta-percha 233

H

Halage électrique 617
Halbwachs (Expériences de) 157
Hargreaves Bird (Procédé) 677
Haute fréquence (Four à) 660
— — (Alternateurs de) 745
Haute tension (Coupe-circuits) 374
— — (Sectionneurs) 373
— — (Interrupteurs) 377
— — (Disjoncteurs) 378
Henry 70
Heraues (Lampe) 543
Hercule (Turbine) 369
Hermite (Procédé) 679
Héroult (Four) 652
Hertz (Expériences de) 133
Hertzien (Miroir) 136
Hétérodyne (Méthode) 755
Hétérostatique (Montage) des électromètres 112
Hittorf (Phénomène de) 94
Hughes (Télégraphe) 701
— (Téléphone) 711
Huiles 233
Hydro-électriques (Centrales) 361
Hypochlorites (Fabrication des) 678
Hystérésis 50

I

Idiostatique (Montage) des électromètres 112
Imbriqué (Enroulement) 303
Impédance 79
Inclinaison (Définition) 207
— (Variations de l') 210
Induit des générateurs 300
— (Réaction d') des dynamos 305
— — des alternateurs 329
— (Construction des) 312
— à dents droites 313
— à encoches 313
Inductance 79
Inducteur des générateurs 293-294
— (Construction des) 310
— tournants (Alternateurs à) 323
Induction 63
— (Origine de l') 64
— (Force électromotrice) 68

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Induction mutuelle (Coefficient d'). 69
— magnétique 40-44
Influence électrique (Notion d') 11
— (Charge par) 12
— magnétique 40
Installations téléphoniques 721
Intensionomètre 774
Intensité du courant (Facteurs d') .. 29
— du champ magnétique 43
— d'aimantation 47
— du courant (Unité d') 55
Intercommunication des centrales. 347
Interrupteurs haute tension 377
— à cornes 378
— à huile 379
— turbine 400
— Wehnelt 401
— Simon 402
— d'installations 471
— à balais 472
— à bascule 472
— à rupture brusque 472
— multiples 473
— dans l'huile 474
Ionisation 89
—(Pression d') 99
— par choc 161
Ionothérapie 762
Ions 89
— (Vitesse des) 95-97
— atmosphériques 219
Isogones 207
Isolants 3, 228
— (Résistivité des) 228
Isolateurs d'appartement 467
— par pylônes 428
Isolement des câbles transatlantiques 709
Isomères électrochimiques 90
Isotopes 193

J

Jack 723
Joule (Loi de) 35
— (— et conservation de l'énergie). 35

K

Kastner-Kellner (Procédé) 675
Kaufmann (Rayons) 201
Keller (Four) 653
Kelvin (Replenisher) 19
— (Voltmètre multicellulaire) 110
— (Électromètre de) 111
— (Galvanomètre de) 118
— (Siphon recorder) 707
Kénotrons 171
— (Caractéristiques des) 172
Kénotron (Redresseur) 419
— en radiographie 783
Kirchhoff (Loi de) 33
— (Loi du rayonnement) 494
Kjelling (Four) 658
Kleeman (Rayons) 200
Kohlrausch (Loi de) 96
Kowalski et Mosciki (Four) 655
Krogness (Aurores boréales) 214

L

Lalande et Chaperon (Pile) 258
Lampe valve 171
Lampes (Montages divers) 487
Lampe à incandescence à filament de charbon 499
— — à osmium 500
— — à tantale 501
— — tungstène 501
— — à atmosphère gazeuse 504
— — (Construction des) 505
— — (Formes des) 511
— — (Dispositifs de montage) 512
— — (Caractéristiques lumineuses des) 548
— Nernst 512
— à arc 514
— — (Rendement des) 515
— — enfermé 516
— — flamme 517
— — métallique 519
— — carbo-minérales 518
— — entre métaux 520
— — (Fabrication des charbons de). 521
— — (Réglage des) 523
— — série 524
— — tension 525
— — différentielles 526
— — (Régulateurs) 528
— — (Comparaison des) 550
— — Bremer 530
— — Beck 531
— — Blondel 531
— — Bardon 531
— — G. E. C. 532
— — Lilliput 540
— de projection à filament 535
— — à arc 536
— à vapeur de mercure 540
— — (Allumage des) 541
— — (Modèles divers) 542
— — (Conditions de fonctionnement) 553
— (Comparaison des) 548
— (Répartition du flux lumineux des) 558
— (Choix des) 563
— à trois électrodes en T. S. F. 745
Langevin (Ultra-sons) 20

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Laplace (Loi de) 59
Laporte (Comparaison des lampes) . 559
Latour (Moteurs) 584
Laval (Turbines de) 357
Labailly (Montage) 769
Lebedew (Oscillateur de) 138
Leclanché (Pile) 257
Lenard (Expériences de) 151
Lenz (Loi de) 66
Leyde (Bouteille de) 15
Lieben (Expériences de) 183
Lignes de force du champ électrique. 5
— — magnétiques 42
Lilliput (Lampe) 540
Lit condensateur 768
Locomotives électriques 602
Lumière (Lampe) 544
— froide 546
Lumineuse (Intensité), définition et unités 558

M

Magnétique (Masse) 39
— (Doublet) 39
— (Induction) 40-44
— (Spectre) 40
— (Champ) 40
— (Lignes de force) 42
— (Intensité du champ) 43
— (Perméabilité) 44
— (Électro-) 45
— (Susceptibilité) 47
— (Saturation) 47
Magnétisme rémanent 49
Magnétique (Moment) 51
— (Feuillet) 54
— (Circuit) 57
— (Pôles) terrestres 207
— (Orages) 213
— (Matériaux) 247
Magnétisme terrestre 206
Magnéto 719
— faradique 763
Magnéto-motrice (Force) 57
Manchester (Inducteur type) 294
Marbre 234
Marié-Davy (Pile) 760
Marcoin (Détecteur) 751
Masses magnétiques 39
Maxwell (Conception de) 18
— (Règle du tire bouchon de) 67
— (Relation de) 138
Meidinger (Pile de) 254
Mercure (Redresseur à vapeur de) .. 410
Méthode de zéro 121
— de déviation 121
Mica 234
Microphone 711
— Ader 713
Microphone à grenaille 714
— solid-back 715
Millikan (Expériences de) 162
Mixte (Groupement) des piles et accumulateurs 287
Moment magnétique 51
Monophone 716
Moore (Tube de) 546
— (Soupape de) 547
Morse (Alphabet) 697
— (Clef) 698
Morton (Courant de) 750
Moseley (Relation de) 188
Moteurs synchrones 86
— asynchrones 87
— électriques 570
— (Calage des balais) 571
— (Force contre-électromotrice des) 571
— (Rendement) 572
— (Courbes caractéristiques) en tension 573
— — en shunt 574
— — compound 575
— synchrones 575
— asynchrones 577
— à collecteurs 577
— à répulsion 583
— Deri 583
— Latour 584
Moufles électriques 639
Multiple (Télégraphe) 696
Multiples téléphoniques 728

N

Navires (Propulsion électrique des) . 616
Nernst (Tension de dissolution) 90
Neu (Pile) 261
Nichols (Oscillateur de) 138
Nickelage 680
Nodon (Soupape) 407
Nombres de transport 94
Northorp (Etude de l'éclair) 225
Northrup (Four) 660
Noyau (Transformateur à) 390

O

Œil (Sensibilité aux diverses radiations) 496
Œrsted (Définition de) 57
O'Farrell (Montage) 769
Ohm (Loi d') 30
— (Définition de l') 31
— étalon 123
— international 123
O'Keenan (Pile de) 256
Omnibus (Dynamo) 404

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ondes stationnaires électromagnétiques 134
— lumineuses et électriques (Identité des) 135
— entretenues 743
— (Propagation des) en T. S. F. ... 747
— courtes 748
— (Réception des) 749
— (Détection des) 749
Ondulatoire (Courant) 759
Ondulé (Enroulement) 304
Or (Métallurgie de l') 684
— (Affinage électrique) 686
Oscillateur ouvert 742
— (Excitation de l') 743
Oscillations électriques 128
— amorties 128
— entretenues 128
— (Propagation des) 130
Oscillateur de Hertz 133
Oscillations entretenues 182
Osmo régulateur de Villard 777
Oudin (Courants de) 128, 769
Outhenin-Chalandre (Procédé) 676

P

Paliers des alternateurs 339
Pantographe 598
Papier 235
Paraffine 235
Parafoudres à cornes 433
— à intervalle multiple 434
— à jet d'eau 432
— électrolytique 434
— à électrodes d'aluminium 434
— à oxyde de plomb 434
Parallèle (Groupement des piles et accumulateurs en) 286
Paramagnétiques (Substances) 50
Paratonnerre (Mécanisme du) 13
— (Théorie du) 145
Parsons (Turbine) 359
Pauling (Four) 656
Pécheux (Comparaison des lampes) . 550
Peltier (Effet) 24
Pelton (Roue) 370
Perméabilité magnétique 44
Petersen (Bobine de) 432
Pfaff (Accumulateur) 279
Phase (Différence de) 75
— (Décalage de) 79
— (Indicateur de) 332
Photo-électrique (Effet) 157
Pièces polaires des dynamos 294
Piézo-électricité 25
Pile thermo-électrique 23
Piles 250
— sèches 259
— (Résistance intérieure des) 264
Piles (Capacité des) 265
— étalon 263
— Marié-Davy 760
Pilsen (Régulateur) 528
Planté (Électrodes d'accumulateurs) 279
Plateau (Électromètre à) 109
Plomb (Accumulateur au) 270
Pliotron 174
Plucker (Expériences de) 140
Poggendorff (Pile de) 255
Poincaré 50
Pointes (Pouvoir des) 11
— (Redresseur à) 408
Pôles des aimants 38
— radiaux 300
— auxiliaires 307
Pollak (Télégraphe) 703
Polonium 197
Polyphasés (Courants) 84
Pont de Wheatstone 34
Porcelaine 230
Potentiel (Notion de) 7
— de décharge des électrolytes 100
— explosif 142
Poulsen (Arc de) 744
Pression d'ionisation 99
Projecteur Sperry 536
Propulsion électrique des navires .. 616
Protection des lignes 433
— des centrales 443
Puissance (Unité de) 30
Pulsation du courant 79
Pylônes (Construction des) 427
Pyro-électricité 25
Pyromètres électriques 25

Q

Quartz 236

R

Radiateurs électriques 627
— (Spécifications) 634
Radiation électromagnétique (Mécanisme de la) 132
— pénétrante 221
Radioactifs (Chaleur dégagée par les éléments) 205
Radioactives (Transformations) ... 203
Radioactivité 195
— induite 204
Radioactive (Constante) 204
Radiochromomètre de Benoit 773
Radiographie 770
— dentaire 779
Radiomicromètre 117
Radium 197

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Rapport $\frac{e}{m}$ 153
Rateau (Turbine) 360
Rayonnement X caractéristique ... 188
— (Lois du) 494
Rayons α (Propriétés) 199
— β (Propriétés) 201
— secondaires 152
— X 152
— — (Propriétés des) 185
— — (Absorption des) 185
— cathodiques 148
— — (Propriétés des) 149
— canaux 199
— γ (Propriétés) 202
— δ (Propriétés) 203
Réaction d'induit 305
— (Bobine de) 389
Récepteurs Ader 715
— monophone 716
— (Postes) T. S. F 754
Réchauds électriques 626
— (Spécifications) 634
Redresseur Soulier 406
— Rosengart 406
— Nodon 407
— Graetz 407
— Villard 409
— à pointes 408
— tournant 409
— à vapeur de mercure 410
— Tungar 419
Réducteurs de vitesse des locomotives 605
Régulateurs de lampes à arc 528
— à moteur 529
— à étincelles 777
Reisz (Expériences de) 183
Relais d'interrupteurs 385
— télégraphiques 609
— polarisé 700
Réluctance 57
Rémanent (Magnétisme) 49
Répartiteurs téléphoniques 731
Replenisher de Kelvin 19
Répulsion (Moteurs à) 583
Résines 230
Résineuse (Électricité) 3
Résistances (Boîte de) 120
— (Définition de la) 30
— spécifique 30
— (Unité de) 31
— de choc 385
Résistivité des électrolytes 96
Résonance 82
Résonateur de Hertz 134
Rhéostats industriels 481
— à plots 481
— à curseurs 481
Richardson (Expériences de) 157
Rigidité électrostatique 229
Rochefort (Montage) 769
Röchling-Rodenhauser (Four) 658
Rœntgen (Rayons de) 152
Roney (Foyer) 352
Rosengart (Soupape) 406
Rotors (Construction des) 334
Rowland (Expérience de) 124
Ruhmkorff (Bobine de) 398
Rupteurs de bobines 399
Rutherford (Mesures radioactives) . 199

S

Sadler (Expériences de) 186
Saladin (Four) 660
Sangamo (Compteur) 460
Saturation magnétique 47
— (Courant de) 161
Schuster (Variation du magnétisme terrestre) 211
Secondaires (Actions) 91
Sectionneurs 373
Seebeck (Expérience de) 22
Sélecteur téléphonique 737
Sellon (Accumulateur) 280
Self induction (Coefficient de) 70
Sels chauffés (Émission par les) 170
Séparation électrolytique des métaux 105
Série (Montage des conducteurs en) . 33
— des tensions 102
— (Groupement des piles et accumulateurs en) 285
Siemens (Procédé) pour le cuivre ... 684
— et Halske pour l'or 685
Simon (Interrupteur) 402
Siphon recorder 707
Solénoïdes 54
— (Champ magnétique des) 56
Solid-back (Microphone) 715
Solvay (Procédé) 675
Sonneries (Montages divers des) 480
— polarisées 717
Soude électrolytique 673
— — (Méthode de préparation) ... 674
Soudure électrique 662
— par arc 663
— par résistance 666
Soufre 230
Soulier (Soupape) 406
Soupape de Fleming 171
— Soulier 406
— Rosengart 406
— Nodon 407
— Graetz 407
— à pointe 408
— Villard 409
— Dushman 419
Sous-stations 444
— automatiques 446

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Spectrographe de masse 192
Spécifique (Résistance) 30
Spectre magnétique 40
Sperry (Projecteur) 536
Spintermètre 772
Standard téléphonique 723
Stassano (Four) 651
Statiques (Courants) 706
Stators (Construction des) 334
Stéatite 237
Stephan Boltzmann (Loi de) 494
Stokes (Foyer) 355
Störmer (Aurores boréales) 216
Strutt (Expérience de) 202
Substances ferro-magnétiques 50
— paramagnétiques 50
— diamagnétiques 59
Sulfatation des accumulateurs 276
Superhétérodyne (Méthode) 756
Surfaces équipotentielles 9
Surtensions dans les lignes 429
Susceptibilité magnétique 47
Suspension par le nez 604
— par barres latérales 604
Synchrones (Moteurs) 87, 577

T

Tableaux 486
Taches solaires et variations des éléments magnétiques terrestres. 212
Tambour (Enroulement en) 300
— (Enroulement en) des alternateurs 323
Taylor (Foyer) 351
Tear (Oscillateur de) 138
Télégraphie 693
— sans fil 731
Télégraphe multiple 696
— Hughes 701
— Baudot 702
— Pollak et Virag 703
Téléphone 710
— Bell 710
— Hughes 711
— Edison 712
— automatique 733
Téléphonie privée 739
Telluriques (Courants) 223, 709
Température (Influence de la) sur la résistivité 244
Temps caractéristiques des câbles 705
Tension (Notion de la) 7
— (Montage des conducteurs en) 33
— de dissolution 99
— (Série des) 102
— de réactance 305
Terre (Charge électrique de la) 218
Terrestre (Magnétisme) 206
— (Électricité) 218
Tesla (Courants de) 129
Thermogalvanomètre 117
Thermo-électricité 23
Thermo-ionique (Émission) 158
— (Courants) 168
Thomson (Expérience de Elihu) 87
— (Compteur Elihu) 457
Thomson (J. J.) (Expériences sur les sels chauffés) 170
— (Déterminations de $\frac{e}{m}$) 160
— (Mesure de $\frac{e}{m}$) 190
— (Rayons δ) 203
Touage électrique 620
Tournant (Redresseur) 400
Tournants (Champs magnétiques) 85
Towsend (Expériences de) 162
Townsend (Procédé) 677
Traction électrique 585
— généralités 586
— par courant triphasé 588
— par courant monophasé 588
— par courant continu 589
— (Moteurs de) 598
— par accumulateurs 614
Transatlantiques (Câbles) 704
— — (Isolement des) 719
Transformateurs 388
— théorie 389
— réalisation 390
— refroidissement 392
— couplage 396
— (Installation des) 397
— (Protection des) 397
Transport (Nombres de) 94
— de l'énergie électrique 424
Travail électrique 8
Triangle (Groupement des enroulements des alternateurs en) 329
Triphasés (Courants) 84
— (Transformateurs) 390
Trois doigts (Règle des) 58-67
Troisième rail (Alimentation par) 595
Trolley aérien 591
Tube de Moore 546
— (Conditions de fonctionnement) 554
Tubes à vide 772
— focus 778
Tudor (Accumulateur) 270
Tungar (Redresseur) 419
Turbines (Classification des) à vapeur 355
— à eau (Classification des) 366
— (Interrupteur) 400

U

Ultra-sons 26
Unités électrostatiques et électromagnétiques 125

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Unités pratiques 125
— multiples (Traction par) 612

V

Valve de Fleming 752
Vegard (Aurores boréales) 214
Vent électrique 11
Ventilation des générateurs 344
Verres 237
Vide (Tubes à) 772
Vie moyenne des éléments radio-actifs 204
Vieillissement magnétique 50
— des transformateurs 391
Villard (Soupape) 409
— (Osmo-régulateur) 777
Vitreuse (Électricité) 3
Volt (Définition) 8
— international 123
Volta (Expérience de) 21
— (Pile de) 251
Voltmètre électrostatique 110
— multicellulaire 110
— et ampèremètres 481
— à cadre mobile 402
Volmètres électrodynamiques 482
— thermiques 482
— à fer doux 484
— à induction 485
— électrostatiques 485
— (Montage des) 486

W

Watt (Définition du) 36
Watté (Courant) 83
Wehnelt (Interrupteur) 401
Weintraub (Dispositif de) 541
Weston (Pile étalon) 264
Wheatstone (Pont de) 34
Whiddington (Expériences de) 186
Wien (Loi de) 495
Wilson (Électromètre de) 108
— (Expériences de) 160

Z

Zoelly (Turbine) 360
Zincage (Électro-) 687

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

ÉLECTRICITÉ THÉORIQUE

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTROSTATIQUE

Pages.

Électricité statique et courant. — Conception de Coulomb. — Conception, de Maxwell. — Les deux sortes d'électricité. — Corps conducteurs et corps isolants. — La loi de Coulomb. — L'unité de charge électrique. — Le coulomb. — Le champ électrique. — Lignes de force du champ électrique. — Nature des charges électriques. — La tension ou potentiel. — La capacité des conducteurs. — La différence de potentiel. — Le volt. — L'unité de capacité. — Le farad. — Les surfaces équipotentielles. — La densité électrique. — Le pouvoir des pointes. — Les phénomènes d'influence. — Charge par influence. — Fonctionnement des paratonnerres. — Variation de la capacité d'un conducteur. — Condensateurs. — Capacité des condensateurs. — Formes des condensateurs. — Rôle du diélectrique. — Polarisation des diélectriques. — Localisation de l'énergie dans le diélectrique. — L'éther. — Principe des machines électriques. — Le replenisher de Kelvin. — Le courant électrique. — L'électricité de contact. — Expérience de Galvani. — Loi des contacts de Volta. — La pile. — Piles thermo-électriques. — Effet Peltier. — Pyromètres. — Pyro-électricité. — Piézo-électricité. — Applications. — Ultra-sons 1

CHAPITRE II

LE COURANT ÉLECTRIQUE

Phénomènes détecteurs des courants : effets calorifiques ; effet Peltier ; actions chimiques ; effets lumineux, actions électro-magnétiques. — Intensité du courant. — Ampère. — Facteurs de l'intensité. — Force électromotrice, résistance. — Loi d'Ohm. — Expression de la résistance. — La résistance spécifique. — Ohm. — Force électromotrice et différence de potentiel. — Circuits dérivés. — Lois. — Application : pont de Wheatstone. — Effets calorifiques du courant. — Loi de Joule. — Conservation de l'énergie 28

CHAPITRE III

MAGNÉTISME. — ÉLECTROMAGNÉTISME. — ÉLECTRODYNAMIQUE

Aimants. — Pôles. — Masses magnétiques. — Loi de Coulomb. — Influence ou induction magnétique. — Champ magnétique. — Spectres magnétiques. — Lignes de force magnétiques. — Intensité du champ magnétique. — Gauss. — Représentation du champ magnétique. — Induction et perméabilité magnétique. — Aimantation par les courants. — Règle d'Ampère. — Intensité d'aimantation. — Susceptibilité magnétique. — Saturation. — Théorie d'Ewing. — Variation de la susceptibilité. — Loi de Curie. — Magnétisme rémanent. — Force coercitive. — Hystérésis. — Substances ferro-magné-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

tiques, paramagnétiques, diamagnétiques. — Moment magnétique. — Champ des courants. — Feuillet magnétique. — Puissance d'un feuillet. — Définition électromagnétique de l'intensité de courant. — Loi de Biot et Savart. — Champ intérieur d'un solénoïde. — Circuit magnétique. — Réluctance. — Force magnétomotrice. — Actions mutuelles des champs et des courants. — Règle des trois doigts. — Loi de Laplace. — Attraction du fer par les solénoïdes. — Actions entre courants. — Formule d'Ampère. — Action d'un courant sur lui-même. — Rotations continues; roue de Barlow. — Théorie du magnétisme d'Ampère 38

CHAPITRE IV

L'INDUCTION

Réversibilité des phénomènes électriques. — Caractère temporaire des courants induits. — Origine des courants d'induction. — Vérifications expérimentales. — Courants de Foucault. — Loi de Lenz. — Règles pratiques. — Valeur de la force électromotrice d'induction. — Le coefficient d'induction mutuelle. — Le henry. — Le coefficient de self-induction. — Extra-courants. — Calcul de la self-induction. — Élimination de la self-induction. — Cas des circuits renfermant des noyaux de fer. — L'extra-courant de rupture . . 63

CHAPITRE V

COURANTS ALTERNATIFS

Production et définition du courant alternatif. — Propriétés générales des courants alternatifs. — Variation de l'intensité. — Représentation graphique. — Intensité efficace. — Force électromotrice efficace. — Puissance. — Circuit avec self-induction. — Décalage de phase ; sa valeur. — Inductance. — Impédance. — Circuit avec capacité. — Décalage de phase. — Capacitance. — Circuit avec self induction et capacité. — Résonance. — Période propre du circuit. — Influence de la self-induction et de la capacité. — Puissance réelle et puissance apparente. — Facteur de puissance. — Courant watté. — Courant dewatté. — Courants polyphasés. — Courants diphasés. — Courants triphasés. — Propriétés générales. — Champs magnétiques tournants. — Principe des moteurs synchrones. — Principe des moteurs asynchrones. — Expérience d'Elihu Thomson 72

CHAPITRE VI

ÉLECTROLYSE. — THÉORIE DES IONS. — FORCES ÉLECTROMOTRICES

Deux sortes de conducteurs. — Électrolytes. — Non électrolytes. — Ionisation. — Théorie d'Arrhénius. — Actions secondaires. — Exemples. — Mécanisme du passage du courant. — Lois de Faraday. — Coefficient de dissociation. — Perte faradique. — Nombres de transport. — Théorème de Hittorf. — Marche d'une électrolyse. — Conductivité des électrolytes. — Conductivité limite. — Loi de Kohlrausch. — Vitesse relative et vitesse absolue des ions. — Calcul des forces électromotrices. — Différence de potentiel au contact de deux liquides. — Mécanisme du passage du courant. — Calcul de la force électromotrice. — Différence de potentiel entre un métal et un liquide. — Tension de dissolution de Nernst. — Potentiel de décharge. — Déplacement réciproque des métaux. — Calcul de la tension de Nernst. — Différence de potentiel aux électrodes. — Série des tensions. — Application. — Théorie de l'électrolyse. — Tension de décomposition des corps. — Applications de la théorie 80

CHAPITRE VII

APPAREILS DE MESURES. — UNITÉS

Les électromètres. — Électroscopes. — Électromètre à feuille d'or de Wilson. — Électromètre à plateaux. — Électromètre cylindrique. — Voltmètre élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

trostatique. — Voltmètre multicellulaire. — Électromètre à quadrants. — Montage hétérostatique. — Montage idiostatique. — Mesure de la capacité par l'électromètre. — Galvanomètres. — Galvanomètre à cadre mobile. — Galvanomètres à aimant mobile. — Galvanomètre Desprez-d'Arsonval. — Galvanomètre à corde de Einthoven. — Thermogalvanomètre de Duddell. — Radiomètre de Boys. — Galvanomètre de Kelvin. — Systèmes astatiques. — Ampèremètres et voltmètres. — Boîte de résistances. — Méthodes de mesure : méthode de déviation, méthode de zéro. — Mesures absolues. — Ampère-étalon. — Ampère international. — Électrodynamomètre. — Ohm-étalon. — Ohm international. — Volt international. — Mesure absolue des autres grandeurs électriques. — Courants de convection. — Expérience de Rowland. — Identité du déplacement des charges électriques et du courant. — Détermination du rapport c des unités électrostatiques et électromagnétiques. — Principe des mesures. — Valeur de c 107

CHAPITRE VIII

LES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES

Production des oscillations par décharge d'un condensateur. — Période. — Oscillations amorties. — Oscillations entretenues. — Transformation des courants de haute fréquence. — Montage Tesla. — Montage Oudin. — Phénomènes dans l'espace environnant. — Champ oscillatoire. — Déplacement des lignes de force. — Mécanisme de la propagation des ondes. — Vérifications expérimentales de la théorie. — Expériences de Fessenden et de Hertz. — Oscillateur de Hertz. — Résonateur de Hertz. — Ondes stationnaires. — Analogies avec les ondes lumineuses. — Vitesse de propagation. — Propagation superficielle des courants de haute fréquence dans les fils. — Relation de Maxwell. — La gamme des radiations des oscillations électriques aux rayons γ 127

CHAPITRE IX

LE PASSAGE DE L'ÉLECTRICITÉ A TRAVERS LES GAZ. — L'ÉLECTRON

Conductibilité des gaz à la pression ordinaire. — L'étincelle. — Potentiel explosif. — Variations du potentiel explosif en fonction de la distance, de la pression, de la forme des électrodes. — Cas d'électrodes dissymétriques. — Cas d'une pointe et d'un plan. — L'arc électrique. — Passage de l'électricité dans les gaz raréfiés. — Tube de Geissler. — Les diverses régions d'un tube de Geissler. — Répartition du potentiel. — Tube de Crookes. — Rayons cathodiques. — Propriétés électriques et magnétiques des rayons cathodiques. — Actions mécaniques. — Les rayons X. — Propriétés. — Rayons secondaires. — Mécanisme des rayonnements précédents. — Le rapport $\frac{e}{m}$. — Principe des méthodes de mesure. — Constance du rapport $\frac{e}{m}$. — L'électron. — Détermination de la charge de l'électron. — L'effet photo-électrique. — Les phénomènes thermo-ioniques. — L'universalité de l'électron. — Phénomènes provoqués par les électrons dans les milieux gazeux. — Ionisation. — Conductibilité des gaz. — Matérialisation des électrons. — Expériences de Wilson. — Variations de la conductibilité des gaz ionisés. — Interprétation par la théorie des ions. — Ionisation par chocs. — Détermination directe de la charge de l'électron. — Expérience de Millikan. — L'inertie de l'électron. — Le rayon de l'électron. — L'électron, constituant fondamental de la matière 141

CHAPITRE X

L'ÉMISSION D'ÉLECTRICITÉ PAR LES CORPS INCANDESCENTS

Actions électriques des solides incandescents. — Effet Edison. — Électrovaporisation. — Expériences de Dupré. — Courants thermo-ioniques. —

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

Émission par les sels chauffés. — Soupape de Fleming. — Kénotrons. — Courbes caractéristiques. — Effet rectifiant. — Courant limite. — Pliotrons. — Tube de Coolidge. — Audion de Forest. — Courant de plaque. — Courant de grille. — Réalisation pratique de l'audion. — Effet amplificateur. — Effet détecteur. — L'audion comme générateur d'oscillations entretenues. — Emploi de substances spéciales. — Limite de fonctionnement..... 166

CHAPITRE XI

LES RAYONS X ET LA CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

Absorption des rayons X par la matière. — Rayons X caractéristiques. — Expériences de Barkla et Sadler. — Séries K et L. — La longueur d'onde des rayons X. — Rayonnement caractéristique des métaux. — Loi de Moseley. — Les rayons canaux. — Influence de la nature du gaz dans l'émission des rayons canaux des tubes à vide. — Expériences de J. J. Thomson. — Spectrographe de masse. — Les isotopes. — Expériences de Aston..... 185

CHAPITRE XII

LA RADIOACTIVITÉ

Historique. — Travaux de Becquerel, Curie, Debierne. — Étude de l'ionisation. — Électroscopes. — Différents rayonnements émis. — Rayons α, β, γ. — Étude de chacun des rayonnements. — Rayons α, courant d'ionisation. — Rayons β. — Complexité du rayonnement β. — Rayons γ. — Les transformations radioactives. — Émission de chaleur par les sels de radium..... 195

CHAPITRE XIII

MAGNÉTISME ET ÉLECTRICITÉ TERRESTRES

Magnétisme terrestre. — Déclinaison. — Inclinaison. — Lignes d'égale déclinaison. — Isogones. — Pôles magnétiques. — Carte magnétique. — Variation des éléments magnétiques. — Variations séculaires. — Variations annuelles. — Variations journalières. — Action du soleil sur le magnétisme terrestre. — Théorie actuelle de l'origine du magnétisme terrestre. — Les perturbations sont d'origine terrestre. — Les aurores boréales. — Leur hauteur. — Répartition géographique. — Leur fréquence. — Recherches de Birkeland. — Théorie de Störmer. — Actions perturbatrices locales des éléments magnétiques. — Les phénomènes électriques terrestres. — La charge de la Terre. — Le gradient de potentiel. — Ses variations. — Origine de la charge de la Terre. — Les ions atmosphériques. — Émanations radioactives. — Radiation pénétrante. — Les courants telluriques. — La foudre. — Mécanisme de la décharge. — Ordre de grandeur des phénomènes de l'éclair..... 206

DEUXIÈME PARTIE

PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XIV

LES MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES EN ÉLECTROTECHNIQUE

Les isolants. — Décharge conductive. — Résistivité. — Décharge disruptive. — Distance explosive. — Rigidité électrostatique. — Revue des principales matières isolantes : amiante, arcanson, ardoise, bakélite, basalte, bitumes, caoutchouc, chatterton, diélectrine, ébonite, galalithe, gutta-percha, gomme laque, huiles, marbre, mica, papier, paraffine, porcelaines, quartz, résines,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

soufre, stéatite, verres. — Les conducteurs solides. — Le cuivre : le cuivre de Matthiesen. — Les bronzes. — Le fer. — Les aciers. — L'aluminium. — Comparaison entre le cuivre et l'aluminium. — Le duralumin. — Conducteurs mixtes. — Le zinc. — Les alliages. — Variations de la résistivité en fonction de la température. — Le charbon. — Les conducteurs liquides. — Conductibilité des électrolytes. — Les matériaux magnétiques. — Aciers. — Classifications d'Osmond. Choix suivant les usages..... 227

CHAPITRE XV

LES PILES

Généralités. — Description des diverses piles. — Pile de Volta. — Pile Daniell. — Pile Carré. — Pile Callaud. — Pile Cabaret. — Pile Meidinger. — Pile Bunsen. — Pile bouteille de Poggendorff. — Pile O'Keenan. — Pile Leclanché. — Pile Leclanché-Bertier. — Pile Bergonié. — Pile Lalande et Chaperon. — Piles sèches. — Pile Féry. — Pile A. D. — Pile Neu. — Piles étalons. — Élément Clark. — Élément Weston. — Résistance intérieure des piles. — Capacité des piles..... 250

CHAPITRE XVI

LES ACCUMULATEURS

Réversibilité des accumulateurs. — Fonctionnement à la décharge et à la charge. — L'accumulateur au plomb. — Caractéristiques ; force électromotrice ; résistance intérieure ; différence de potentiel aux bornes ; capacité. — Influence de l'intensité de décharge, de l'épaisseur des plaques, de la concentration de l'électrolyte, de la température. — Les actions locales dans les accumulateurs : sulfatation ; actions électrochimiques. — Rétablissement de la force électromotrice après repos à la charge et à la décharge. — Construction des accumulateurs : électrodes à grande surface, à oxydes rapportés. — Grilles simples, grilles doubles, grilles en deux pièces. — L'empâtage des plaques. — La formation des accumulateurs. — Choix de l'électrolyte. — Les bacs. — Perfectionnements récents. — L'accumulateur Edison au fer-nickel. — Groupement des piles et des accumulateurs : tension, parallèle, mixte. — Danger des groupements en parallèle et mixte. — Force électromotrice et différence de potentiel aux bornes..... 266

CHAPITRE XVII

MACHINES GÉNÉRATRICES D'ÉLECTRICITÉ

Anneau tournant de Delezenne. — Dynamo à courant continu. — Principe. — Inducteurs. — Formes diverses. — Excitation. — Auto-excitation. — Excitation en série. — Excitation en dérivation. — Excitation compound. — Caractéristiques des divers modes d'excitation. — Induit. — Enroulement en anneau, enroulement en tambour. — Représentation des schémas d'enroulement. — Enroulement imbriqué. — Enroulement ondulé. — Le collecteur et les balais. — Calage des balais. — La commutation. — Pôles auxiliaires de commutation. — Enroulements compensateurs. — Couplage des dynamos. — Réalisation pratique. — Inducteur : culasse, noyau polaire, pièces polaires. — Induit : denté, à encoches, enroulements. — Collecteur. — Balais, caractéristiques et emplois ; densité de courant, chute de tension au contact. — Alternateurs. — Généralités. — Alternateurs multipolaires. — Enroulement des alternateurs. — Alternateurs à inducteurs tournants. — Enroulement : ondulé, imbriqué. — Alternateurs polyphasés. — Enroulement en tambour. — Fréquence du courant alternatif. — Disposition des inducteurs. — Groupement en triangle et en étoile. — Réaction d'induit. — Caractéristiques des alternateurs : caractéristique à circuit ouvert ; caractéristique externe. — Puissance des alternateurs. — Couplage des alternateurs. — Indicateur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

de phase. — Fréquencemètres. — Construction des alternateurs. — Stator. — Rotor. — Alternateurs de différentes puissances. — Montage. — Bobinage. — Ventilation des alternateurs..... 291

CHAPITRE XVIII

USINES GÉNÉRATRICES D'ÉLECTRICITÉ

Variations de la consommation des usines électriques. — Interconnexion des centrales. — Le load dispatcher. — Les centrales thermiques. — Description de la centrale de Gennevilliers. — La chaufferie. — Divers types de foyers mécaniques. — Disposition générale des divers services. — Les turbines à vapeur : turbines d'action ; turbines de réaction. — Les centrales hydro-électriques. — Les turbines hydrauliques : turbines radiales, turbines axiales, turbines mixtes. — Centrales thermiques ou centrales hydrauliques. — Appareillage électrique des centrales : sectionneurs. — Coupe-circuit haute tension. — Interrupteurs et disjoncteurs. — Interrupteurs à cornes. — Interrupteurs dans l'huile. — Conditions de fonctionnement et de commande. 346

CHAPITRE XIX

TRANSFORMATION ET CONVERSION DU COURANT ÉLECTRIQUE

Transformateurs. — Principe. — Propriétés fondamentales. — Réalisation des transformateurs. — Transformateurs à noyau, transformateurs cuirassés. — Vieillissement des tôles. — Constitution du circuit magnétique. — Constitution des bobines. — Transformateurs dans l'huile. — Refroidissement naturel, par circulation d'eau. — Transformateurs triphasés. — Couplage des transformateurs. — Auto-transformateur. — Installation des transformateurs. — Dispositifs de protection. — La bobine de Ruhmkorff. — Principe du fonctionnement. — Divers modes de rupture du courant : rupteur Carpentier, rupteur Foucault, turbine à mercure. — Interrupteurs électrolytiques : Wehnelt, Simon. — Commutatrices à deux ou un enroulement. — Dynamo omnibus. — Redresseurs de faible puissance. — Soupape Soulier. — Redresseur Rosengart. — Soupapes électrolytiques : Nodon, Graetz. — Redresseur à pointe. — Soupape de Villard. — Redresseur à contact tournant. — Redresseurs à vapeur de mercure. — Principe. — Forme du courant redressé. — Réalisation pratique. — Convertisseurs de faible puissance en verre ou en quartz. — Convertisseurs métalliques de grande puissance. — Difficultés à vaincre : étanchéité, réalisation du vide. — Constitution de l'anode. — — Amorçage. — Mesure du vide. — Le redresseur kénotron de Dusham. — Le redresseur Tungar..... 387

CHAPITRE XX

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A DISTANCE

Historique. — Avantages des courants à haute tension. — Lignes aériennes. — Pylônes. — Isolateurs. — Protection des lignes. — Origine des surtensions. — Bobines de Petersen. — Appareils de mise à la terre continue : parafoudres à jets d'eau. — Appareils de mise à la terre discontinue. — Montage. — Parafoudres à cornes ; parafoudres à rouleaux ; parafoudres électrolytiques à aluminium ou à plomb. — Bobines de self-induction. — Installation des postes de protection. — Lignes souterraines. — Isolement des conducteurs. — Câbles à 60 000 volts. — Refroidissement des conducteurs souterrains. — Installation des lignes souterraines..... 424

CHAPITRE XXI

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sous-stations. — Stations de faible puissance. — Stations de grande puissance. — Stations automatiques : principe du fonctionnement. — Distri-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

bution de l'énergie électrique. — Courant continu. — Distribution en dérivation, en boucle, par feeders, distribution à trois fils. — Courant alternatif diphasé, distribution à quatre fils, à trois fils. — Courant alternatif triphasé : distribution en triangle, en étoile. — Courants tétraphasés, divers modes de couplage des circuits. — Compteurs. — Compteurs électrolytiques. — Compteurs électromécaniques. — Classification. — Compteurs à moteurs magnéto-électriques, genre O'Keenan ; compteurs à moteurs dynamo-électriques, genre Elihu Thomson ; compteurs à moteurs à induction ou à champ tournant, genre C. A. C., Ferrari. — Compteur Sangamo à mercure. — Compteurs oscillants, genre Aron. — Compteurs à tarifs multiples, à dépassement. — Étalonnage des compteurs. — Sensibilité..... 444

TROISIÈME PARTIE

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE XXII

GÉNÉRALITÉS SUR LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES

Les conducteurs électriques de distribution. — Constitution. — Jonction. — Supports de lignes. — Isolateurs. — Moulures. — Tubes Bergmann. — Règles à observer dans les installations intérieures. — Les fusibles. — Caractéristiques. — Forme. — Les coupe-circuits unipolaires à barrette mobile, sur coffret, en tubes isolants. — Les interrupteurs. — Interrupteurs pour faible intensité, à balais, à bascule. — Interrupteurs industriels à rupture brusque. — Interrupteurs pour très grandes intensités, à lames multiples ; interrupteurs dans l'huile. — Disjoncteurs industriels dans l'air, dans l'huile, à maxima, à minima, à retard. — Cataracte de mercure, retardeurs. — Disjoncteurs ultra-rapides. — Rhéostats à variation continue. — Rhéostats industriels. — Les appareils de mesure. — Ampèremètres et voltmètres à cadre mobile (Desprez-d'Arsonval), électrodynamiques, thermiques, à fer doux, à induction, électrostatiques. — Montage des appareils de mesure. — Tableaux. — Schémas d'installations domestiques usuelles..... 465

CHAPITRE XXIII

L'ÉCLAIRAGE

Historique des procédés d'éclairage. — Rappel des lois du rayonnement thermique : loi de Kirchoff, loi de Stephan-Boltzmann, loi de Wien. — Sensibilité de l'œil aux diverses radiations. — Expériences de Nutting. — Les diverses solutions du problème de l'éclairage. — Lampes à incandescence à filament de charbon, d'osmium, de tantale, de tungstène. — Comparaison. — Lampes à filament et atmosphère gazeuse : lampe demi-watt. — Construction des lampes à incandescence. — Fabrication du filament. — Procédés indirects : nourrissage simple, suivi de décarburation, par substitution. — Procédés directs : filage, étirage. — Les perfectionnements récents, par étirage à partir d'un seul cristal. — Fabrication de l'ampoule. — Montage du filament dans l'ampoule. — Formes des lampes à incandescence. — La lampe Nernst. — Propriétés électriques des terres rares. — Résistance de chauffage auxiliaire. — Les lampes à arc. — Mécanisme de l'arc électrique. — Différents procédés d'augmentation du rendement des arc : arcs enfermés ; arcs à flammes. — Les charbons des lampes à arc : minéralisés, homogène, à zones. — Les lampes à arcs métalliques. — Arcs entre métaux dans le vide. — Industrie des charbons électriques. — Charbons agglomérés. — Charbons graphités. — Les colorants. — Fonctionnement d'un arc électrique. — Dispositifs de réglage. — Montages en série, en dérivation, différentiel. — Description de quelques lampes à arc. — Régulateurs Pilsen, Brianne, A. E. G. — Lampes Bremer, Beck, Bondon, C. G. E. — Les lampes de grande puissance.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

— Lampes de projection à filaments métalliques. — Lampes à arcs de projection à réglage à la main. — Lampes de projecteur Sperry. — Lampes à gaz lumineux. — Lampe Cooper-Hewitt à mercure. — Mode de fonctionnement. — Dispositifs d'allumage : Weintraub, Bodde. — Lampes Bastian et Salisbury, Heraues, Lumière. — Fonctionnement en courant alternatif. — Tube de Moore, soupape de Moore. — Tubes à gaz rares de Claude. — Caractéristiques électriques des diverses lampes électriques. — Lampe à filament de carbone. — Lampe à filament de tungstène. — Lampes à atmosphère gazeuse. — Lampes à arc. — Lampes à vapeur de mercure. — Tubes de Moore et Claude. — Caractéristiques photométriques des diverses lampes électriques. — Facteur physiologique. — Rendement lumineux des diverses lampes. — Répartition du flux lumineux des lampes ordinaires à filament, des lampes demi-watt, des lampes à arc nu ou sous globe. — Le problème de la distribution des foyers lumineux. — Influence de l'éclairage sur les conditions de travail. — Choix des lampes à incandescence. — Règles pratiques pour l'établissement d'un projet d'éclairage, exemples 491

CHAPITRE XXIV

APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ. — LES MOTEURS

Réversibilité des génératrices. — Moteurs à courant continu. — Généralités. — Calage des balais. — Force contre-électromotrice. — Conditions au démarrage. — Rendement. — Vitesse de rotation. — Puissance. — Caractéristiques. — Moteur série. — Moteurs shunt. — Moteurs compound. — Caractéristiques de chacun d'eux. — Moteurs à courant alternatif. — Moteurs synchrones. — Principe de fonctionnement. — Accrochage. — Indicateurs de phases. — Moteurs asynchrones. — Moteurs d'induction. — Champs tournants. — Moteurs à cage d'écureuil. — Moteurs à enroulement. — Moteurs à collecteurs. — Moteurs série, moteurs universels. — Moteurs à répulsion. — Moteurs Deri. — Moteurs Latour. 570

CHAPITRE XXV

LA TRACTION ÉLECTRIQUE

Avantages de la traction électrique. — Le problème de l'électrification des chemins de fer. — Les systèmes en présence : traction par courant alternatif triphasé ; par courant alternatif monophasé ; par courant continu. — Avantages et inconvénients de chaque système. — La captation du courant. — Alimentation par fil aérien ; mode de suspension et d'isolement. — Dispositif de prise du courant : trolley, archet. — Alimentation par caniveau. — Dispositif de prise du courant. — Alimentation par troisième rail. — Suspension caténaire. — Les moteurs de traction. — Les locomotives électriques. — Liaison des moteurs aux châssis. — Les systèmes de transmission de la puissance motrice. — Les organes de régulation. — Les controllers. — La traction par unités multiples. — Le freinage des trains électriques. — Freinage électromagnétique. — La traction par accumulateurs. — La propulsion électrique des navires. — Le halage électrique et magnétique sur les rivières et canaux. — Organes auxiliaires de manœuvre : les cabestans électriques 584

CHAPITRE XXVI

APPLICATIONS THERMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Divers modes de transformation de l'énergie électrique en chaleur. — Effet Joule. — Diverses compositions des résistances. — Arc électrique. — Divers types de fours électriques. — Effets d'induction. — Applications domestiques. — Fer électrique, réchauds, appareils à ébullition, radiateurs. — Prix de revient du chauffage électrique des appartements, de la cuisine, des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

bains. — Les appareils à accumulation. — La tarification de l'énergie électrique pour les applications domestiques. — Conditions de réception imposées pour les divers appareils. — Applications dans les laboratoires. — Étuves. — Fours et moufles électriques. — Fours électriques à vide. — Applications industrielles. — Fours à recuire. — Four Gin à résistance. — Construction des appareils à résistance. — Coefficient de profil. — Coefficient de montage. — Exemples. — Les fours à arc. — Fours Stassano, Héroult, Girod, Keller. — Fours pour la fixation de l'azote. — Conditions à remplir. — Fours Kowalski et Moscicky, Paulig, Birkeland et Eyde. — Les fours à induction. — Fours Kjellin, Röchling-Rödenhauser, Gin, Saladin. — Les fours à haute fréquence de Northrup. — La soudure électrique par arc. — Caractéristiques pratiques, résultats. — La soudure électrique par résistance, par rapprochement, par points, continue. — Rendement. — Fers à souder électriques 624

CHAPITRE XXVII

APPLICATIONS CHIMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Généralités. — Les actions chimiques produites par l'énergie électrique : électrolyse, actions calorifiques. — Avantages des procédés électrochimiques. — Applications de l'électrolyse aqueuse. — Électrolyse des chlorures alcalins. — Produits obtenus. — Méthodes de préparation de la soude : au mercure ; avec diaphragme ; avec circulation. — Appareils Kastner Kellner, Solvay, Outhenin-Chalandre, Griesheim-Elektron ; Hargraves, Bird, Townsend. — Préparation des hypochlorites. — Procédé Hermite. — Préparation des chlorates. — Électrométallurgie du cuivre. — Raffinage. — Principe de la précipitation des diverses impuretés. — Procédé Elmore. — Procédé Cowper-Coles. — Extraction des métaux de leurs minerais. — Électrométallurgie de l'or et de l'argent. — Rappel de la métallurgie de l'or. — Procédé Siemens et Halske. — Affinage et récupération de l'or. — Électrozincage. — Cuivrage. — Nickelage. — Appareil Delval et Pascalis. — Argenterie. — Dorure. — Galvanoplastie. — Électrométallurgie de l'aluminium . . . 670

CHAPITRE XXVIII

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE

Principe du télégraphe. — Montage duplex différentiel. — Montage duplex en pont. — Télégraphe multiple. — Principe du répartiteur. — Télégraphe à enregistrement optique. — Alphabet Morse. — Le manipulateur. — Lecture au son. — Enregistrement des signaux. — Transmission mécanique. — Les relais, relais simples, relais polarisé. — Le télégraphe Hughes. — Le télégraphe Baudot. — Le télégraphe Pollak et Virag. — Rendement des divers systèmes. — Transmissions sous-marines. — Temps caractéristique. — Mode d'établissement du courant dans un câble sous-marin. — Le siphon recorder de Kelvin. — Inscription des signaux. — Montage électrique des câbles sous-marins. — L'isolement des câbles télégraphiques. — Les perturbations : courants telluriques. — Principe de la téléphonie. — Le téléphone Bell. — Ses perfectionnements : microphone de Hughes, montage d'Edison. — Ordre de grandeur des phénomènes téléphoniques. — Les transmetteurs. — Microphone Ader. — Microphone à grenaille de charbon. — Microphone Solid-back. — Les récepteurs. — Récepteur Ader. — Les monophones. — Les sonneries : sonnerie ordinaire, sonnerie polarisée. — Montage des sonneries polarisées. — La magnéto d'appel. — Montage des magnétos. — Constitution d'un poste téléphonique. — Le fonctionnement des postes téléphoniques. — Les centraux. — Central à batterie locale. — Central à batterie centrale. — Les annonciateurs. — Les jacks. — Les standards. — Téléphone à batterie centrale. — Montage des postes. — Lampes d'appel. — Les multiples : multiples simples, multiples à plusieurs bureaux centraux. — Répartiteurs. — Le téléphone automatique. — Principe du fonctionnement. — La téléphonie privée. — Poste simple. — Montages divers. — La télé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

graphie et la téléphonie sans fil. — L'émission. — Oscillateur ouvert. — Modes d'excitation de l'antenne. — Montage Tesla. — Montage Oudin. — Ondes entretenues. — Arc chantant de Duddell. — Alternateurs de haute fréquence. — Lampe à trois électrodes. — Propagation des ondes. — Forme de l'onde à grande distance. — Les ondes courtes. — La réception. — Principe de la réception. — Syntonisation. — Détecteurs. — But de la détection. — Principaux détecteurs : cohéreur, détecteur magnétique. — Détecteur électrolytique. — Valve de Fleming. — Détecteur à cristal. — Lampe à trois électrodes. — L'amplification. — Constitution d'un poste récepteur. — Montage. — La méthode hétérodyne. — La méthode superhétérodyne. — L'avenir des transmissions sans fil 692

CHAPITRE XXIX

ÉLECTRICITÉ MÉDICALE

Les divers courants employés en médecine. — Terminologie médicale. — Le courant continu : production, application. — Pile Marié-Davy au bisulfate de mercure. — Les courants faradiques. — Bobines de Ruhmkorff. — Magnéto faradique. — Le courant ondulatoire. — Les courants statiques. — Les courants à haute fréquence. — La radiologie. — Dispositif Tesla. — Dispositif d'Arsonval. — Utilisation des courants de haute fréquence. — D'Arsonvalisation. — Effluvation. — Courants de Oudin. — Montages Oudin, O'Farrell, Lebailly, Rochefort. — Radiographie. — Divers types d'ampoules. — Contrôle du vide. — Spintermètre. — Radiochromomètre de Benoît. — Intensionomètre. — Dosimètre Dauviller. — Réglage du vide. — Osmorégulateur de Villard. — Régulateur à étincelles. — L'ampoule Coolidge. — Diverses formes. — Construction des ampoules à rayons X. — Divers montages radiologiques. — Les courants redressés à 250 000 volts. — Protection contre les rayons X. — Les électro-aimants médicaux 758

TABLE ALPHABÉTIQUE 791

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS BIBLIOTHÈQUE

7905-10-27. — CORBEIL. IMPRIMERIE CRÉTÉ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A LA MÊME

LIBRAIRIE



MASSON ET Cie,

ÉDITEURS PARIS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

Cours d'électricité

à l'usage de l'Enseignement supérieur scientifique et technique

Par G. BRUHAT

Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille.

Un volume grand in-8° raisin de 712 pages avec 518 figures. . . **70** fr.

Ce livre contient les connaissances scientifiques suffisantes et nécessaires pour comprendre réellement le mécanisme des applications de la science à l'industrie.

D'un niveau scientifique élevé que l'on ne trouve pas dans les cours de sciences appliquées, ce cours d'électricité, que l'auteur a voulu également expérimental, permettra d'aborder avec fruit une étude d'électro-technique et familiarisera le lecteur avec la signification physique des lois fondamentales.

Cours de thermodynamique

à l'usage de l'Enseignement supérieur scientifique et technique

Par G. BRUHAT

Un volume grand in-8° raisin de 408 pages avec 159 figures. . **55** fr.

La première partie du livre est consacrée à la *définition des notions fondamentales ;* réversibilité des transformations, travail, température, quantité de chaleur. Un chapitre est consacré à l'étude expérimentale du réseau d'isothermes des gaz réels.

Dans la deuxième partie, la plus importante, on trouvera l'*étude des principes*. Si l'auteur les considère comme des postulats, qu'il faut poser *a priori* sous forme d'énoncés précis, susceptibles d'une traduction mathématique immédiate, il indique les différentes traductions mathématiques qu'on peut en donner et montre leur application en exemples concrets.

La troisième et la quatrième partie renferment l'étude thermo-dynamique de l'équilibre d'un corps pur et du rayonnement par incandescence.

L'ouvrage se termine par quelques notions sur les machines industrielles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

CHIMIE INDUSTRIELLE

La grande industrie chimique
Les métalloïdes et leurs composés
Les métaux et leurs sels
Industries organiques

Par Paul BAUD

DEUXIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFONDUE

Un volume grand in-8° raisin de 1022 pages avec 331 figures . . **100** fr.

Sans modifier le plan primitivement adopté, M. Baud a refondu son ouvrage pour en accentuer le côté purement technique. Il s'adresse donc sous cette forme non seulement aux élèves des Grandes Écoles des Facultés et des Instituts techniques, mais encore aux ingénieurs. Certains chapitres ont été écrits à l'usine même, toutes les phases d'une fabrication : oléine, soude, cyanamide calcique, superphosphate minéral, coke métallurgique, gaz d'éclairage, air liquide, verre à vitres, ciment, aluminium, acier, or, radium, pâte à papier, sucre de betterave, alcool de mélasse ou de matières amylacées, brasserie, huile d'olive, etc. De nouveaux chapitres ont été consacrés aux produits pharmaceutiques et au caoutchouc.

« L'auteur a eu la hardiesse d'unir l'art du chimiste avec la technique de l'ingénieur... Je crois que, depuis le Dictionnaire de chimie industrielle d'Aimé Girard et Barreswill, les leçons de Girardin et le traité de Payen, personne n'avait osé aborder semblable ouvrage... »

LÉON LINDET, de l'Institut
(*Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale.*)

« L'auteur, au courant des procédés les plus récents, n'a pas hésité à entretenir ses lecteurs de procédés encore à l'étude... Je ne doute pas que cet ouvrage ne rende de précieux services à nos étudiants et ne contribue à faire mieux connaître et apprécier une science appliquée dont le rôle social va en grandissant tous les jours. »

C. MATIGNON, de l'Institut. (*Chimie et Industrie.*)

« Livre d'étude très maniable et source de renseignements précis, l'ouvrage est, dans son ensemble, tout à fait réussi ; la cause en tient, pour une bonne part, à ce fait que son auteur est au courant, de la chimie et aussi de la physique théoriques. »

MARCEL BOLL. (*Le Mercure de France.*)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

ENCYCLOPÉDIE LÉAUTÉ

DEUXIÈME SÉRIE

Directeurs : **MM. André LÉAUTÉ et Jean VILLEY**

Créée pour apporter une contribution efficace à la collaboration de la Science et de l'Industrie, cette nouvelle collection a la prétention, non pas de constituer une encyclopédie complète et méthodique, mais de faire paraître des ouvrages d'un caractère scientifique de premier ordre sur les questions industrielles que leur évolution récente, technique ou économique, met à l'ordre du jour.

L'Azote

La Fixation de l'Azote atmosphérique et son avenir industriel

Par Louis HACKSPILL

Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg.

1922. 1 vol. de 272 pages avec 39 figures dans le texte..... **18** fr.

Les Progrès de la Métallurgie du Cuivre

Par Auguste CONDUCHÉ

Professeur à la Faculté des Sciences de Rennes.

Paris, 1922. 1 vol. de XVI-254 pages avec 26 figures dans le texte. **18** fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ENCYCLOPÉDIE LÉAUTÉ

DEUXIÈME SÉRIE

LES PROCÉDÉS MODERNES DE L'INDUSTRIE DU GAZ

I. — Distillation de la houille

Par

René MASSE
Ancien président du Syndicat professionnel de l'Industrie du gaz.

et

Auguste BARIL
Sous-directeur de la Société d'Éclairage, Chauffage et Force motrice.

Paris, 1923. 1 vol. de 300 pages avec 77 figures dans le texte. . . **25** fr.

II. — Traitement des produits et sous-produits de la distillation de la houille

Par MM. René MASSE et Auguste BARIL

Paris, 1923. 1 vol. de 308 pages avec 115 figures dans le texte. . **25** fr.

Les combustibles liquides

leur avenir industriel, leur utilisation, leur contrôle

Par M. AUBERT

Chef de travaux pratiques à la Faculté des Sciences de Paris.

Paris, 1924. 1 vol. de 368 pages avec 60 figures. . . . . **30** fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

ENCYCLOPÉDIE LÉAUTÉ

DEUXIÈME SÉRIE

LES ÉCONOMIES DE COMBUSTIBLES

Conduite rationnelle des foyers

Par Pierre APPELL

Secrétaire général de l'Office central de chauffe rationnelle

1923. 1 vol. in-8 de XIV-342 pages avec 72 figures. . . . . **22** fr.

LES ÉCONOMIES DE COMBUSTIBLES

Combustibles inférieurs et de remplacement

Par Pierre APPELL

1926. 1 vol. de 204 pages avec 45 figures. . . . . **25** fr.

La Distillation du Bois

Par G. DUPONT

Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

1924. 1 vol. de 284 pages avec 50 figures . . . . . **32** fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

ENCYCLOPÉDIE LÉAUTÉ

DEUXIÈME SÉRIE

Carburation et Carburateurs

Par Léon POINCARÉ

Ingénieur du génie maritime, ingénieur de l'aéronautique.

1925. 1 vol. de 284 pages avec 80 figures dans le texte. . . . . **27** fr.

Les Essences de Térébenthine

Par G. DUPONT

Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

1926. 1 vol. in-8 de 332 pages avec 52 figures dans le texte. . . . **30** fr.

Les Automobiles sans Pétrole

L'Alcool d'industrie

Par M. RICHARD

Professeur de Chimie organique à la Faculté des Sciences de Bordeaux, directeur de l'École de chimie.

1927. Un vol. in-8 de 224 pages avec 34 figures. . . . . **18** fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

ENCYCLOPÉDIE LÉAUTÉ

DEUXIÈME SÉRIE

Les Progrès de la Fonderie moulage et fusion

Par M. DERUELLE

Secrétaire de l'Association technique de fonderie.

1926. 1 vol de 256 pages avec 102 figures . . . . . **27** fr.

L'Éclairage

Solutions modernes des problèmes d'éclairage industriel

Par E. DARMOIS

Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy.

1923. 1 volume in-8 de 276 pages. . . . . **18** fr.

Les réserves d'énergie

Par M. RIGAUD

Ingénieur des Mines.

1926. 1 vol. in-8 de 296 pages avec 7 figures. . . . . **36** fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les Races et les Peuples de la terre

Par J. DENIKER

Docteur ès sciences, Bibliothécaire du Muséum d'histoire naturelle.

DEUXIÈME ÉDITION REVUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

Un volume de 750 pages avec 30 figures et 2 cartes. Broché . . . **80** fr.

Relié toile . . . . . **95** fr.

*L'auteur a condensé les données essentielles de deux sciences jumelles, l'*anthropologie *et l'*ethnographie, *et les a rendues accessibles à la fois aux professionnels et à tous ceux chez qui la culture générale crée le désir de posséder une mise au point d'ensemble de ce qu'est, pour l'ensemble de l'humanité, le problème des races et des mœurs.*

L'Art et la Religion des hommes fossiles

Par G.-H. LUQUET

Un volume de 234 pages avec 119 figures . . . . . **32** fr.

Se basant sur les faits actuellement connus, sur les traces matérielles laissées par les hommes disparus et sur les mentalités primitives analogues à la leur, l'auteur dresse le bilan de nos connaissances sur l'art et la religion des premiers hommes.

Le goût des choses préhistoriques se répand de plus en plus dans le grand public ; mais seuls l'intéressent les travaux qui reposent sur des bases vraiment scientifiques.

La Presse du monde entier a consacré à ces deux grands ouvrages, *Les Races et les Peuples de la Terre* et *L'Art et la Religion des hommes fossiles*, des articles étendus ; non seulement elle les désigne comme source de documentation aux savants, aux sociologues, mais elle les recommande à tous ceux qu'intéressent, à côté des questions d'anthropologie physique, les origines religieuses et morales de l'humanité.

Le caractère attrayant de cet ouvrage se trouve accru par une illustration particulièrement abondante et soignée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

LA T. S. F. DES AMATEURS

TÉLÉGRAPHIE — TÉLÉPHONIE

Par F. DUROQUIER

Septième Édition

Revue, mise à jour et complétée.

Un volume in-16 de 390 pages avec 369 figures. . . . . **15** fr.

Cet ouvrage est recherché parce qu'il est pratique et à la portée de tout le monde et parce qu'il constitue un cours complet de T. S. F. d'une valeur vraiment scientifique. Il est abondamment illustré.

LA T. S. F. DES USAGERS

TOUTES LES INDICATIONS INDISPENSABLES POUR ENTENDRE LES RADIO-CONCERTS SANS AUCUNE CONNAISSANCE TECHNIQUE

Par P. HÉMARDINQUER

Ingénieur-Électricien.

Préface de M. Louis LUMIÈRE

Membre de l'Institut.

Un volume de 136 pages avec 80 figures. . . . . **10** fr.

M. Hémardinquer, dont les nombreux ouvrages plus techniques s'adressaient aux amateurs, a su grouper exclusivement dans ce petit livre — *dont la lecture peut être effectuée par tous, quel que soit le degré d'instruction ou l'âge* — tout ce qu'il est nécessaire de savoir pour *choisir* tout d'abord un modèle de poste récepteur, l'*installer* ensuite avec ses accessoires, le *régler* pour en obtenir les résultats maxima au point de vue intensité et pureté de l'audition, et enfin prendre toutes les précautions nécessaires pour l'*entretenir* avec le minimum de frais et diminuer les risques de détérioration.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

T. S. F. - LA PRATIQUE RADIOÉLECTRIQUE

TOURS DE MAIN ET RECETTES

Par P. HÉMARDINQUER

Un volume de 284 pages avec 252 figures. . . . . **12** fr.

Conçu et écrit simplement, mais sous une forme de haute vulgarisation, cet ouvrage a été écrit par un amateur qui a pu se rendre compte par lui-même des avantages des différents systèmes de réception et des difficultés que peuvent rencontrer les amateurs dans leurs montages ou leurs mises au point. Tous les problèmes devant être résolus par la bonne construction et le bon rendement des appareils sont donc traités dans ce livre.

CENT PROBLÈMES PRATIQUES DE T. S. F.

Par P. HÉMARDINQUER

Un volume de 162 pages avec 100 figures. . . . . **8** fr.

Tous les phénomènes particuliers susceptibles d'être observés pendant le fonctionnement des appareils ne peuvent être décrits dans un manuel. Que fera l'amateur embarrassé par une difficulté nouvelle? Il s'adressera au service des renseignements radiotechniques de son journal, et attendra la réponse...

M. Hémardinquer condense dans ce petit livre l'essentiel des problèmes se rapportant à l'établissement, à l'entretien, à la réparation d'un poste et de ses accessoires.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MASSON ET Cie, ÉDITEURS — PARIS

LA NATURE

REVUE DES SCIENCES ET DE LEURS APPLICATIONS A L'ART ET A L'INDUSTRIE

Par la perfection de son service de *Renseignements* et d'*Informations techniques*, *La Nature* suit le mouvement des idées, les progrès de la recherche scientifique, les perfectionnements techniques ainsi que les transformations économiques et les améliorations pratiques qu'ils provoquent.

L'intérêt de *La Nature* est dû à l'étendue du domaine qu'elle explore, qui va *des Mathématiques, de la Physique et de la Chimie pures, des Sciences naturelles, à la T. S. F., à la Photographie, aux Appareils domestiques, aux Recettes utiles pour l'atelier, le laboratoire, la maison, la campagne.*

La Nature publie des articles accompagnés d'*illustrations nombreuses et artistiques.*

Les faits scientifiques saillants de la quinzaine sont présentés dans une page de photographies, *véritable musée d'images.*

Par son service de *Renseignements* et son *Laboratoire*, *La Nature* donne à ses abonnés, dans la *Boîte aux Lettres* et les *Recettes*, les renseignements les plus variés et les plus utiles.

ABONNEMENTS

MASSON ET Cie, ÉDITEURS
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN — PARIS

Envoi d'un Numéro spécimen sur demande.

FRANCE ET COLONIES.		BELGIQUE.	
Un an (24 nos).	**70** fr.	Un an	**85** fr.

ÉTRANGER.

Tarif extérieur no 1. . . .	**90** fr.	Tarif extérieur no 2. . . .	**110** fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires