

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

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

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

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

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

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

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

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

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment 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)	Exposition internationale d'électricité (1881, Paris)
Auteur(s) secondaire(s)	Armengaud, Jules (1842-1921) ; Becquerel, Edmond (1820-1891) ; Becquerel, Henri (1852-1908)
Titre	L'électricité et ses applications : exposé sommaire et notices sur les différentes classes de l'exposition / Exposition internationale d'électricité
Adresse	Paris : A. Lahure, 1881
Collation	1 vol. (175 p.) : ill. ; 23 cm
Nombre de vues	180
Cote	CNAM-BIB 8 Xae 302
Sujet(s)	Exposition internationale d'électricité (1881 : Paris, France) Électrotechnique -- 1870-1914 Électricité -- 18e siècle Électricité -- 19e siècle
Thématique(s)	Énergie Expositions universelles Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	12/03/2025
Date de génération du PDF	12/03/2025
Notice complète	https://www.sudoc.fr/08915178X
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8XAE302

8^e - 100 - 1
1897

L'ÉLECTRICITÉ

ET

SES APPLICATIONS

4511. — PARIS, IMPRIMERIE A. LAHURE

9, Rue de Fleurus, 9

8° 439

MINISTÈRE DES POSTES ET DES TÉLÉGRAPHES

EXPOSITION INTERNATIONALE D'ELECTRICITÉ De 1881

8° 22

L'ÉLECTRICITÉ

ET

SES APPLICATIONS



EXPOSÉ SOMMAIRE ET NOTICES
SUR LES DIFFÉRENTES CLASSES DE L'EXPOSITION

RÉDIGÉS PAR

MM. ARMENGAUD, Ed. BECQUEREL, H. BECQUEREL

PAUL BERT, BLAVIER, ANT. BRÉGUET

CLÉRAC, M. DÉPREZ, H. FONTAINE, MASCART, RAYNAUD, SEBERT

PARIS

A. LAHURE, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

9, RUE DE FLEURUS, 9

1881

L'ÉLECTRICITÉ

ET

SES APPLICATIONS

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

RÉSUMÉ HISTORIQUE

L'électricité est une science toute moderne. Si du temps de Thalès, six cents ans avant notre ère, on connaissait la propriété que possède l'ambre, après avoir été frotté, d'attirer les corps légers placés à distance, au commencement du dix-septième siècle on n'était guère plus avancé; l'ouvrage de Gilbert, médecin anglais, publié en 1600, et ayant pour titre *de Magnete*, ouvrage qui à ce moment résumait l'état des connaissances déjà assez complètes sur les phénomènes de l'aimant et l'action magnétique du globe terrestre, contenait seulement plusieurs passages concernant les actions attractives et répulsives exercées par l'ambre et d'autres matières, après un frottement préalable.

Mais à cette époque où les esprits se trouvaient entraînés vers l'étude des sciences, ces actions en apparence si mystérieuses ne pouvaient manquer d'attirer vivement l'attention. En 1670, Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, construisit la première machine électrique composée d'un globe de soufre mis en rotation, sur lequel on exerçait le frottement avec la main; en 1675, Newton observa que l'attraction électrique se transmet au travers du verre; en 1727, Grey et Welher montrèrent que tous les corps ne jouissent pas au même degré de la faculté conductrice pour l'électricité, et en 1733 Dufay, physicien français, découvrit que tous les corps sont électriques, pourvu qu'ils soient isolés et qu'il existe deux électricités douées de propriétés contraires, principe fondamental pour la science de l'électri-

cité. Dufay ne reconnut pas cependant que les deux électricités étaient produites simultanément dans le frottement ; ce fait fut mis plus tard hors de doute, notamment par Symmer.

La machine électrique reçut en 1741 de Boze et de Winkler de grands perfectionnements. Boze installa les conducteurs isolés et Winkler les frottoirs ; différents physiciens modifièrent encore la machine dont la forme actuelle est généralement attribuée à Ramsden.

En 1746, Cunéus observa, dit-on, dans le cabinet de Musschenbroek la commotion produite par la bouteille de Leyde dont les effets excitèrent un étonnement aussi grand que celui qu'avait fait naître la vue de l'étincelle électrique éclatant entre le conducteur d'une machine et le corps humain. Les expériences et les publications de l'abbé Nollet, ainsi que plus tard celles de Priestley, contribuèrent beaucoup à répandre le goût des études sur l'électricité.

A mesure que l'on découvrait les principales propriétés de cet agent, on était de plus en plus frappé de la ressemblance entre les effets des décharges électriques et ceux du tonnerre ; Wall en avait parlé près d'un siècle auparavant ; Franklin entreprit des recherches pour prouver l'identité de ces effets déjà admise en principe. Il ne restait plus qu'à recueillir la foudre et à montrer qu'elle pouvait charger les batteries et agir comme l'électricité des machines.

Cette grande expérience fut faite presque simultanément en France par Dalibard à Marly-la-Ville, le 10 mai 1752, à l'aide de barres de fer isolées, au-dessus desquelles un nuage orageux vint à passer, et à Philadelphie par Franklin, en juin de la même année, au moyen d'un cerf-volant enlevé dans les nuages, lequel, par l'intermédiaire de la corde humide, donna l'électricité tant désirée. Peu après, Lemonnier observa qu'il y avait presque toujours de l'électricité dans l'air sans qu'il y ait apparence d'orage et que cette électricité était soumise, dans les temps sereins, à des variations régulières. Franklin, en 1750, avait découvert l'action exercée par les pointes sur les corps électrisés ; il en fit l'application aux paratonnerres ¹.

Les effets électriques par influence, ainsi que les phénomènes de condensation, furent étudiés par des savants éminents tels que Canton, OEpinus, Wilke, l'inventeur de l'électrophore en 1762, Franklin, Beccaria et Volta. Ce dernier fit connaître l'électromètre condensateur et l'eudiomètre.

OEpinus, en 1759, avait fait paraître un ouvrage dans lequel il appliqua le premier les mathématiques à l'étude de l'électricité et du magnétisme et s'efforça de rendre compte de la condensation électrique

1. Plusieurs passages de Pline et de Lucain semblent montrer que les anciens ont connu le moyen de diriger les feux de la foudre. (Pline, liv. II, chap. LV ; Lucain, *Pharsale*, I, 606.)

et de la distribution du magnétisme dans les aimants ; mais de 1785 à 1787, Coulomb fit plus pour la statique électrique que tous ses prédécesseurs. A l'aide de sa balance de torsion, il découvrit les lois des attractions et répulsions électriques et magnétiques, celles de la déperdition de l'électricité par les supports et l'air ambiant et il montra comment s'opérait la répartition de l'électricité sur les corps. C'était en quelque sorte le couronnement des études relatives aux effets électriques de tension, seuls connus des physiciens.

Les actions électro-physiologiques avaient déjà attiré l'attention, lorsqu'en 1790 Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, observa, par hasard, les contractions que le contact de deux métaux fait naître entre les muscles et les nerfs de grenouilles convenablement préparées et en communication avec ces métaux¹. Galvani attribua le phénomène à l'existence d'une électricité propre aux animaux, laquelle passait des muscles aux nerfs par l'intermédiaire des métaux. Cette théorie fut l'objet d'une longue controverse entre Galvani et plusieurs savants parmi lesquels était Volta, professeur de physique à Pavie. Volta s'attacha à démontrer qu'il n'existait pas d'électricité propre aux animaux, ceux-ci, dans le cas actuel, servant seulement de conducteurs ; la contraction résultait alors, suivant lui, de l'action physiologique de l'électricité dégagée au contact des métaux, électricité qu'il pouvait recueillir à l'aide d'un condensateur. Cette lutte se prolongeait lorsque, en 1800, Volta publia la découverte de la pile, l'un des instruments les plus admirables que les sciences physiques aient produits et auquel la reconnaissance publique a donné le nom de son auteur.

De cette époque date une ère nouvelle pour l'électricité ; cet agent fut étudié, non plus à l'état statique, mais à l'état dynamique ou sous forme de courant circulant dans les corps conducteurs. Presque aussitôt, Nicholson et Carlisle observèrent la décomposition de l'eau en transmettant le courant électrique de la pile au travers de ce liquide ; Nicholson remarqua ensuite la décomposition électro-chimique des sels métalliques et les physiciens et les chimistes s'emparèrent aussitôt de ce nouvel agent de décomposition pour en étudier les effets. Parmi les savants qui s'illustrèrent dans cette voie on doit citer H. Davy qui décomposa les alcalis et les terres pour en retirer les métaux et qui montra quelle était la puissance calorifique et lumineuse obtenue en transmettant un courant électrique d'une grande intensité entre deux pointes de charbon, c'est-à-dire en formant ce que l'on a nommé l'arc voltaïque utilisé maintenant pour l'éclairage électrique.

1. Le fait avait été vu en 1658 par Swammerdam qui pensait que les contractions des grenouilles préparées étaient dues à un effet mécanique ; on n'y avait donné aucune suite. (Swammerdam, t. II, p. 840 et 849 ; Duméril, *Bulletin de l'Académie de médecine*, 1840, t. IV, p. 555.)

Si la découverte de la pile avait donné une impulsion puissante aux recherches sur l'électricité et surtout aux travaux électro-chimiques, en 1820 une autre découverte ouvrit de nouveaux horizons et montra la liaison intime existant entre l'électricité et le magnétisme. Oerstedt, professeur de physique à Copenhague, annonça qu'un fil conducteur parcouru par un courant électrique agissait sur une aiguille aimantée placée à proximité et tendait à la mettre en croix avec le fil conducteur.

Immédiatement après avoir eu connaissance de ce fait, Ampère commença une suite de recherches expérimentales et théoriques des plus remarquables, bases de l'électro-dynamique et de l'électro-magnétisme. Arago observa l'attraction exercée sur la limaille de fer doux par un fil parcouru par un courant électrique, et Ampère montra comment on pouvait expliquer tous les phénomènes magnétiques en admettant que les aimants fussent des solénoïdes ou hélices électro-dynamiques. Cette importante théorie est l'une des plus ingénieuses de la physique et jusqu'ici elle n'a été contredite par aucun fait.

Presque à la même époque, en 1821, Schweigger construisit le multiplicateur et Seebeck découvrit les phénomènes thermo-électriques dont A.-C. Becquerel donna les lois, phénomènes qui ont conduit à la formation des piles thermo-électriques ¹ et aux appareils à l'aide desquels on détermine les températures dans des conditions où les thermomètres ordinaires ne peuvent être employés. Ce dernier physicien, en 1823, avait fait connaître les principes du dégagement de l'électricité par pression ainsi que dans les actions chimiques, et obtint plus tard, par voie électro-chimique, un grand nombre de minéraux cristallisés analogues à ceux que l'on trouve dans la nature.

Jusqu'alors la pile avait été modifiée de bien des manières; mais, quelle que soit la forme employée, on observait toujours une diminution rapide dans l'intensité du courant électrique à partir du moment où cet appareil commençait à fonctionner. Becquerel montra en 1829 que la cause de cette diminution d'intensité était la polarisation électro-chimique des lames de la pile elle-même, et il fit connaître la pile à deux liquides ou à sulfate de cuivre dans laquelle la polarisation n'avait pas lieu et qui par conséquent était à courant constant; c'est le premier appareil de ce genre qui ait été formé. Depuis cette époque, toutes les piles en usage ont été établies d'après ces principes; parmi les appareils usuels les plus importants on peut citer la pile à acide nitrique imaginée par Grove en 1839.

En 1827, Ohm publia un mémoire sur la théorie mathématique de la pile, dans lequel il tenta de faire pour l'électricité fournie par cet appa-

1. Les piles thermo-électriques pour les études sur le rayonnement de la chaleur sont dues à Nobili et à Melloni. 

reil ce que Fourier, Laplace, Poisson et Ampère avaient fait pour la chaleur, l'électricité statique et dynamique ; il donna la loi qui règle l'intensité du courant dans un circuit fermé comprenant la pile, et cela d'après le pouvoir conducteur des divers éléments dont il est formé. Pouillet et Fechner établirent expérimentalement cette loi, l'une des bases de l'électricité dynamique.

Depuis le commencement du siècle deux découvertes avaient agi puissamment sur le développement des connaissances électriques : en 1800 celle de la pile, et en 1820 celle de l'électro-magnétisme. En 1833 la découverte de l'induction par Faraday vint donner un nouvel essor à cette science. Ampère avait trouvé que des fils conducteurs disposés en solénoïdes et parcourus par un courant électrique produisaient les mêmes effets que les aimants et provoquaient l'aimantation dans le fer doux et l'acier ; Faraday prouva que l'inverse avait lieu et que l'on pouvait produire des courants électriques dans des corps conducteurs, aussi bien par l'influence des aimants que par celle d'autres courants électriques agissant à distance ; découverte du premier ordre pour la théorie de l'électricité et du magnétisme, qui vient à l'appui de l'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants et explique simplement les effets du magnétisme en mouvement découverts par Arago en 1824.

Plus tard Faraday, en 1845, découvrit qu'un puissant électro-aimant peut agir sur une substance transparente, de sorte que si un faisceau de rayons de lumière polarisée traverse cette substance dans la direction de l'axe d'aimantation, le plan de polarisation de ces rayons est dévié soit à droite soit à gauche, suivant le sens de l'aimantation. Cette découverte établissant une relation entre les phénomènes optiques et les phénomènes magnétiques, a donné une impulsion nouvelle aux études relatives à l'action du magnétisme sur tous les corps qui a été, surtout en France, l'objet d'importantes recherches.

En 1834, Peltier, en analysant les effets calorifiques produits par les courants électriques lors des changements de conducteurs, observa, dans certains cas, suivant le sens du courant électrique, un abaissement de température. Ces effets ont été par la suite le point de départ de travaux très dignes d'intérêt.

L'électricité et le magnétisme n'avaient été cultivés jusqu'à cette époque que par un petit nombre de physiciens, mais les applications diverses de ces sciences aux arts et à l'industrie, qui commencèrent à se répandre dans le public, excitèrent l'émulation des savants et des ingénieurs. De toutes parts l'on se mit à l'œuvre et les travaux scientifiques eux-mêmes prirent une nouvelle extension.

Becquerel appliqua les actions électro-chimiques au traitement des

métaux précieux et en 1836 et 1837 il fit connaître les procédés qu'il avait imaginés pour atteindre ce but.

L'art de la dorure et de l'argenture fut profondément modifié par l'emploi des méthodes électro-chimiques ; bien que Brugnatelli eût fait quelques tentatives de ce genre en 1805, ce fut M. de la Rive, déjà connu par d'importantes recherches sur l'électricité, qui en 1840 réalisa le dépôt de l'or sur les métaux dans les appareils électro-chimiques simples. M. Elkington ainsi que M. de Ruoltz ont fait connaître les procédés aujourd'hui en usage dans l'industrie.

Un peu avant, en 1838, Jacobi, professeur à Saint-Petersbourg, obtint des dépôts de cuivre en couches épaisses et malléables de façon à mouler parfaitement le conducteur polaire négatif qui transmettait dans une dissolution de sulfate de cuivre un courant électrique d'intensité déterminée. Cet art, connu plus particulièrement sous le nom de galvanoplastie, a été étendu à d'autres métaux et est utilisé dans la statuaire, l'orfèvrerie, l'ornementation, la typographie, la gravure, etc.; il constitue actuellement une des applications les plus importantes de l'électricité.

A peu près à la même époque on commença à établir des télégraphes électriques dans différents pays. L'idée de transmettre des signaux à distance a dû se présenter aux premiers observateurs qui se sont livrés à l'étude de l'électricité, et cela en raison de la rapidité de transmission de cet agent dans les fils conducteurs. On cite les tentatives de ce genre faites dès 1753 par Ch. Marshall à l'aide des effets électriques de tension. Les courants donnés par les piles permirent de former des projets plus réalisables. Ampère en 1820, dès ses premières recherches électro-magnétiques, avait indiqué comment on pourrait faire usage de l'action d'un courant sur une aiguille aimantée, comme moyen télégraphique. Si cet appareil avait été construit, il eût été le premier télégraphe à aiguille qui ait fonctionné ; mais cette idée ne fut pas mise en pratique à cette époque.

En 1834, Gauss et Weber, pendant leurs études sur le magnétisme terrestre, se servirent de l'influence exercée par un courant électrique sur un barreau aimanté pour mettre en communication le cabinet de physique et l'observatoire de Goettingue. Dès lors, on put prévoir que ce mode de correspondance à distance pourrait être substitué au télégraphe aérien inventé par les frères Chappe.

Steinheil, à Munich, en répétant les expériences de Gauss et Weber, construisit un télégraphe à aiguilles qui fonctionna en juillet 1837 ; il traça des indications sur des papiers, produisit des chocs et remplaça même un des deux fils conducteurs du circuit télégraphique par la terre ; il toucha donc dès l'origine à plusieurs des points les plus importants de la télégraphie électrique. La même année Wheatstone, à Londres,

construisit un télégraphe à aiguilles ainsi qu'un télégraphe à cadran, et M. Morse, en Amérique, fit connaître l'appareil enregistreur qui porte son nom; en France M. Bréguet ne tarda pas à construire des appareils qui fonctionnèrent sur plusieurs lignes. Depuis cette époque les appareils se sont perfectionnés et un grand nombre de systèmes télégraphiques des plus ingénieux ont été imaginés. Quant à la vitesse de transmission des signaux, bien qu'elle dépende des dispositions des fils conducteurs et de leur entourage, elle est toujours tellement considérable qu'elle peut être négligée, quelque grande que soit la distance qui sépare les stations.

On doit rapprocher des télégraphes les nombreux appareils indicateurs tels que les horloges électriques, les avertisseurs, etc., qui sont fondés sur les mêmes principes.

L'installation des lignes télégraphiques sous-marines a conduit à l'observation des faits très intéressants qui, étudiés d'abord par Faraday, ont été analysés avec soin par d'éminents physiciens. Ils ont permis de reconnaître comment la propagation de l'électricité peut avoir lieu au moment de l'ouverture et de la fermeture des circuits pendant la période variable de l'établissement du courant électrique.

Bien que l'on ignore la nature de l'électricité, on peut néanmoins préciser les différentes conditions dans lesquelles se produisent les phénomènes électriques eux-mêmes. Les recherches théoriques et expérimentales d'Œpinus, de Coulomb, de Poisson, d'Ampère et de Ohm, ont eu à cet égard, comme on l'a vu, une grande importance. Depuis lors d'autres savants sont entrés dans la même voie, notamment MM. Green, W. Thomson, Maxwell, Edlund, etc., dont les travaux, comme ceux de leurs devanciers, ont une haute valeur.

La production de l'électricité a été l'objet de recherches des plus intéressantes dans lesquelles les phénomènes d'induction ainsi que les effets électro-chimiques ont été mis à profit. C'est ainsi que Ruhmkorff empruntant diverses dispositions aux appareils imaginés par MM. de la Rive, Masson et Bréguet, créa vers 1850 l'appareil d'induction qui porte son nom et qui donne lieu à des effets de tension considérables par une sorte de transformation de la puissance électrique. L'énergie de cet appareil a été beaucoup augmentée par l'emploi d'un condensateur suivant les observations de M. Fizeau, ainsi que par la disposition de l'interrupteur dû à Foucault.

En 1859 et 1860, M. G. Planté utilisa les effets de polarisation électro-chimique observés d'abord par Gautherot, puis étudiés par Ritter et d'autres physiciens et dont on a vu précédemment l'influence pour la diminution de l'intensité du courant donné par les piles simples. En se servant de lames de plomb, M. G. Planté forma des batteries secondaires permettant d'accumuler et de transformer la puissance de la pile

voltaïque de manière à donner temporairement des effets de tension et de quantité très supérieurs à ceux de la source génératrice.

Depuis Nicholson, en 1788, on avait cherché à faire usage des effets d'influence pour avoir un dégagement continu d'électricité. Plusieurs appareils, sortes d'électrophores à rotation, avaient été proposés ; en 1865, M. Holtz réalisa sous la forme la plus commode un appareil de ce genre qui est aujourd'hui fréquemment employé dans les études d'électricité statique.

Lorsqu'il fut démontré qu'au moyen des effets d'induction on pouvait développer de l'électricité dans des circuits conducteurs par l'influence d'aimants dont les positions relatives avec celles des conducteurs venaient à changer dans des conditions déterminées, on songea à utiliser cette nouvelle source d'électricité dans laquelle l'action mécanique seule est en jeu. MM. Pixii, Saxton et Clarke, peu après la découverte de Faraday construisirent des appareils qui portent le nom de ces ingénieurs ; mais ce n'est que lorsqu'on chercha à produire économiquement la lumière électrique en utilisant l'intensité lumineuse de l'arc voltaïque comme dans l'expérience de Davy, que l'on fit des machines d'induction capables de donner une quantité d'électricité que les actions mécaniques peuvent seules fournir à bas prix. Nous ne pouvons indiquer ici toutes les machines de ce genre aujourd'hui en usage, mais nous devons dire que celle dont le principe a été donné par M. Gramme en 1871, en raison des effets puissants qu'elle présente sous des dimensions relativement restreintes, a constitué un progrès réel dans la production de l'électricité à l'aide des forces mécaniques.

La découverte par M. Graham-Bell, en 1876, du téléphone magnéto-électrique articulant qui transmet télégraphiquement la parole à distance est la plus récente et certainement l'une des plus originales de l'époque. Au point de vue scientifique elle a révélé un fait nouveau, la mobilité de la distribution magnétique dans un aimant, ainsi que celle de l'état électrique d'un fil voisin, lesquelles sont en rapport avec les mouvements si complexes que les modulations de la parole communiquent à une petite lame de fer servant d'armature à l'aimant. De toutes parts on s'est mis à l'œuvre pour perfectionner ce nouveau mode de correspondance et l'on est arrivé à des dispositions d'appareils téléphoniques et microphoniques des plus ingénieuses qui permettent de penser que cette découverte prendra place à côté de la télégraphie, parmi les grandes applications industrielles de l'électricité et du magnétisme.

En résumé, l'on peut voir comment quelques phénomènes très simples ont conduit pas à pas à l'observation de phénomènes de plus en plus complexes et comment une étude approfondie et des recherches persévérantes ont permis d'établir la science de l'électricité sur des bases certaines.

C'est au milieu de travaux de l'ordre le plus élevé qu'ont pris naissance les grandes découvertes, origines des applications merveilleuses dont l'industrie est dotée depuis près d'un demi-siècle, et ces applications, à leur tour, par leurs développements, ont souvent contribué aux progrès de la science, frayant ainsi la route qu'elle leur trace ¹.

Juin 1881.

ED. BECQUEREL.

1. Il n'a pas été possible, dans un résumé aussi court, de parler des nombreux et importants travaux des divers savants surtout dans la période actuelle, non plus que des instruments et machines diverses qui ont été imaginés ; il en sera question dans les articles relatifs aux différents groupes de l'Exposition.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Pour donner une idée exacte des phénomènes compris sous le nom d'Électricité statique, il est nécessaire de rappeler quelques expériences fondamentales.

Corps électrisés. — On reconnaît habituellement qu'un corps est électrisé quand il a la propriété d'attirer les corps légers tels que des barbes de plume ou des morceaux de papier.

Conducteurs. Isolants. — Ces propriétés sont passagères. — Pour certains corps, elles restent localisées, pendant un temps plus ou moins long, au voisinage des points où on les a produites, par exemple par le frottement; mais, en réalité, elles se propagent peu à peu, s'étendent à toute la surface du corps en s'affaiblissant et finissent par disparaître totalement. Ces corps sont dits *mauvais conducteurs* de l'électricité ou *isolants*. Tels sont à divers degrés : le verre, la résine, le caoutchouc durci (ébonite), les gaz, etc. — Pour d'autres, comme les métaux, la communication électrique est tellement rapide qu'elle échappe à toute mesure; ce sont les *conducteurs*. Les animaux, les plantes, la plupart des matériaux qui constituent le sol rentrent dans cette catégorie, de sorte que si un conducteur électrisé est relié au sol par d'autres conducteurs, les propriétés électriques qu'il a pu acquérir disparaissent aussitôt : le corps est déchargé ou ramené à l'état naturel. Un conducteur ne peut donc être électrisé que s'il est soutenu, ou isolé du sol par un corps mauvais conducteur.

Deux espèces d'électricité. — Un corps électrisé repousse un corps qui a été mis en contact avec lui et auquel il a communiqué une partie de ses propriétés, mais cette répulsion entre corps électrisés n'est pas un fait général. On a reconnu qu'il y a deux manières d'électriser les corps ou deux espèces d'électricités, que deux corps chargés de la même électrisés (comme ils le seraient par contact avec un troisième préalablement électrisé) se repoussent et que deux corps chargés d'électricités différentes s'attirent.

Lorsque deux corps sont frottés l'un contre l'autre, ils s'électrisent tous deux en sens différents et, par suite, s'attirent; mais tous deux

ensemble se comportent vis-à-vis d'un corps extérieur, électrisé ou non, comme s'ils étaient à l'état naturel ou *neutre*. Les propriétés ainsi produites par le frottement présentent donc une sorte d'opposition : les corps sont dans deux états pour ainsi dire complémentaires, comme si l'un avait emprunté à l'autre et possédait en excès une sorte de vertu particulière qui se trouverait en défaut sur l'autre. En raison de cette opposition de propriétés, on a donné à l'une des électricités le nom d'*électricité positive* et à l'autre le nom d'*électricité négative*. — L'électricité positive est, par exemple, celle qui se produit sur le verre quand on le frotte avec du drap.

Lois des actions électriques. — L'action répulsive ou attractive qui s'exerce entre deux corps électrisés dépend de leur distance ; si les dimensions des corps sont très petites par rapport à leur distance, l'action devient quatre fois plus faible pour une distance double, neuf fois moindre à une distance triple, etc. ; en d'autres termes elle est en raison inverse du carré de la distance, comme l'attraction universelle.

L'action d'un corps dépend aussi de son électrisation ou de la quantité d'électricité qu'il possède. Quand on touche un conducteur électrisé par un conducteur identique à l'état naturel, l'action que le premier était capable d'exercer sur un corps extérieur devient moitié moindre. Si l'on admet que la charge électrique du système n'ait pas été modifiée dans cette opération, chacun des conducteurs en a pris la moitié par raison de symétrie. Par suite, l'action d'un corps électrisé est proportionnelle à sa charge électrique. Ces lois ont été établies par Coulomb.

Une charge égale à l'unité est celle d'un corps qui, agissant sur un corps identique à l'unité de distance, produirait une action égale à l'unité de force, par exemple une action d'un gramme à une distance d'un millimètre.

D'après ce qui a été dit plus haut, on voit que si deux corps sont frottés ensemble, la charge positive de l'un est égale à la charge négative de l'autre. C'est là une loi générale de la nature, et l'on peut dire qu'il ne se produit jamais sur un corps une trace d'électricité pour une cause quelconque, sans qu'il y ait en même temps sur un autre corps plus ou moins éloigné une quantité égale et correspondante d'électricité contraire, de sorte que la somme algébrique d'électricité qui existe dans la nature est invariable.

Distribution de l'électricité. — L'électricité ne pénètre pas dans les corps conducteurs, elle réside uniquement à la surface. En touchant la surface extérieure d'un conducteur électrisé par une petite boule isolée, on enlèvera de l'électricité en quantité proportionnelle à celle qui se trouvait autour du point touché ; mais en touchant la surface interne d'un conducteur creux, on n'y prendra aucune trace d'électricité. Inver-

sement, quand on touche par une boule électrisée la surface interne d'un conducteur électrisé ou non, la masse électrique apportée se transmet immédiatement à la surface du conducteur et la boule une fois enlevée se trouve à l'état naturel. On peut, par ce moyen, ajouter constamment et par fractions connues de l'électricité à un corps qui en possède déjà.

La distribution de l'électricité sur un conducteur dépend de la forme de sa surface. Sur une sphère, très éloignée de tout autre corps, la distribution est uniforme; sur un conducteur allongé, l'électricité s'accumule aux parties saillantes et la densité électrique, c'est-à-dire la charge par unité de surface, est variable d'un point à l'autre.

Pouvoir des pointes. — L'électricité exerce sur le milieu extérieur, l'air par exemple, une sorte de pression qui tend à vaincre la résistance du milieu; cette pression électrique ou *tension* est en chaque point proportionnelle au carré de la densité. A l'extrémité d'une pointe en particulier, la densité est telle que l'électricité ne peut demeurer à la surface d'un conducteur et se propage à travers l'air aux corps voisins. Il en résulte qu'un conducteur muni d'une pointe très aigüe n'est capable de conserver qu'une charge d'électricité très faible.

Influence électrique. — Lorsqu'un conducteur isolé est placé dans le voisinage d'un corps électrisé, il s'électrise lui-même sur presque toute sa surface; les régions voisines du corps influent prennent de l'électricité de nom contraire, les plus éloignées de l'électricité de même nom que celle du corps influent, et ces deux charges sont encore égales comme dans le frottement. Les deux régions de lignes contraires sont séparées par une ligne non électrisée ou *ligne neutre*.

D'une manière plus générale, un conducteur s'électrise par influence toutes les fois qu'il est placé dans un espace où s'exercent des forces électriques.

L'électrisation par influence a aussi reçu le nom d'*induction électrostatique*. Le corps influent est alors nommé corps inducteur et le corps influencé est dit induit.

Un cas remarquable est celui où le conducteur induit est fermé et enveloppe complètement l'inducteur. La charge induite est alors égale à la charge inductrice.

Enfin, si le conducteur fermé induit est en communication avec le sol, les deux corps, inducteur et induit, forment un système qui est sans action sur les corps extérieurs.

Le pouvoir des pointes peut être utilisé dans l'électrisation par influence. Si, par exemple, on approche d'un corps électrisé une pointe en communication avec le sol, cette pointe est soumise à l'influence, l'électricité de même nom que celle du corps influent est repoussée dans le sol, l'électricité de nom contraire est attirée, s'écoule par la

pointe et vient neutraliser celle du corps influent qui se décharge comme s'il avait été relié au sol par une communication conductrice.

Des fluides. — On peut rendre compte de ces phénomènes en imaginant que l'électricité est une substance matérielle, *un fluide*, qui peut couler facilement dans les conducteurs et éprouve un frottement plus ou moins énergique dans les corps isolants, qu'il y a deux fluides correspondant aux deux électricités, que les attractions ou répulsions entre les corps ne sont autre chose que les actions directes des fluides dont ils sont chargés, que des quantités égales des deux fluides différents donnent un fluide neutre, c'est-à-dire sans action, que les corps naturels possèdent une quantité pour ainsi dire indéfinie de fluide neutre et que l'électrisation, soit par frottement, soit par influence, n'est qu'un artifice pour séparer les deux fluides élémentaires qui constituent le fluide neutre.

Cette conception matérielle peut offrir quelques avantages parce qu'elle donne une substance au raisonnement, mais elle n'est pas du tout nécessaire. L'idée des fluides, si générale autrefois dans la science, est abandonnée aujourd'hui et remplacée par l'extension des grands principes de la mécanique qui permettent, à l'aide de quelques lois expérimentales, d'établir des relations importantes entre les phénomènes, probablement sans en connaître la nature intime, laquelle restera toujours mystérieuse.

Énergie. — De ces principes, l'un des plus importants est celui de la conservation de l'énergie. Toutes les fois que pour produire un phénomène physique il faut dépenser une certaine quantité de travail, si les corps qui sont entrés en jeu pendant l'opération peuvent retourner à leur état primitif en repassant par les mêmes transformations, ils reproduisent le même travail en sens contraire; en d'autres termes, ils possèdent une quantité d'énergie disponible capable de reproduire ce travail.

La notion de l'énergie permet de considérer les phénomènes électriques sous un point de vue très fécond en applications.

Niveau électrique. Potentiel. — L'espace dans lequel sont sensibles les actions d'un système quelconque de corps électrisés est un *champ électrique*. Le champ électrique d'un système est en général un espace indéfini, si l'on veut raisonner en toute rigueur; mais dans la pratique il suffit de considérer les régions peu éloignées du système que l'on envisage. Dans certains cas le champ est même réellement limité: quand on fait, par exemple, des expériences dans l'intérieur d'une salle fermée conductrice, aucune action n'est sensible au dehors de la salle et le champ est borné par les parois.

Si l'on suppose qu'une masse d'électricité positive égale à l'unité soit placée dans le voisinage de corps électrisés ou, plus généralement,

dans un champ électrique, elle subira une action dont la grandeur et la direction sont déterminées en chaque point. C'est ce qu'on appelle la *force du champ*. Une masse égale d'électricité négative subirait la même action dans une direction opposée.

L'état du champ électrique en un point n'est pas défini seulement par la force, et il faut faire intervenir une autre considération. Si l'on veut amener d'une distance très grande, jusqu'au point considéré, une masse égale à l'unité, il faudrait dépenser un certain travail pour résister aux actions que la masse subira le long du chemin parcouru ; ce travail définit le *niveau électrique* ou le *potentiel* du point considéré, de même que le travail nécessaire pour élever un kilogramme à une certaine hauteur a pour mesure la hauteur elle-même.

D'une manière générale, le travail nécessaire pour déplacer une masse positive égale à l'unité, d'un point à un autre, est égal à l'excès du potentiel du second point sur celui du premier.

On se rendra compte d'une manière très exacte des phénomènes électriques par des comparaisons empruntées à la topographie. Chaque point de la surface du sol est situé à une hauteur déterminée ; les lignes qui passent par tous les points situés à la même hauteur sont des lignes de niveau ; les lignes de plus grande pente sont normales aux lignes de niveau, et un corps pesant abandonné sur la surface tend à tomber en suivant une ligne de plus grande pente. De même, chaque point d'un champ électrique est caractérisé par un niveau ou potentiel électrique ; les points pour lesquels le potentiel a la même valeur forment une surface de niveau électrique. Une masse positive abandonnée en un point ne peut d'elle-même créer un travail et augmenter l'énergie du système ; elle en dépensera, au contraire, obéira à la force et tombera vers les niveaux moins élevés. La direction de force en un point est la direction vers laquelle la chute du potentiel est la plus rapide ; elle est normale à la surface passant par ce point pour laquelle le potentiel est le même, c'est-à-dire à une surface de niveau électrique ou équipotentielle. Si, en marchant dans la direction de la force, le déplacement de la masse est égal à l'unité de longueur, le travail aura pour mesure la force elle-même. La force est donc égale à la chute maximum de potentiel pour une distance égale à l'unité.

Propriétés des conducteurs. Capacités électriques. — Lorsqu'un conducteur est en équilibre, les masses électriques dont il est chargé ne peuvent être soumises qu'à une force normale à la surface, sans quoi elles glisseraient sur la surface, et elles sont maintenues en place par la résistance du milieu ambiant. La surface du conducteur est donc une surface d'égal potentiel. L'intérieur du conducteur est également dans toute son étendue au même potentiel que la surface, car, s'il en était autrement, la force électrique ne serait pas nulle dans la masse du

conducteur et y produirait une nouvelle électrisation par influence.

Le potentiel d'un conducteur est évidemment, toutes choses égales, proportionnel à sa charge; on appelle *capacité* du conducteur la charge nécessaire pour le porter à un potentiel égal à l'unité. La charge est donc le produit de la capacité par le potentiel.

L'électricité d'un conducteur ne peut être en équilibre que si les masses électriques distribuées sur la surface sont poussées vers l'extérieur; la force du champ définie, comme plus haut, par l'action qui s'exercerait sur une masse positive égale à l'unité, est dirigée vers l'extérieur si l'électricité est positive, et vers l'intérieur si l'électricité est négative. Le potentiel du conducteur dans le premier cas est plus élevé et, dans le second, plus bas que celui du milieu extérieur. Si le conducteur est chargé de masses de signes contraires, comme dans les phénomènes d'influence, le potentiel du milieu extérieur au voisinage de la surface est plus faible ou plus élevé que celui du conducteur, suivant que la région correspondante de la surface est positive ou négative, et la ligne neutre correspond aux points où le potentiel du milieu est le même que celui du conducteur; de même qu'en topographie un plateau situé à mi-côte est plus bas que la montagne à laquelle il est adossé et plus haut que la plaine.

Le sol étant conducteur, son potentiel a partout la même valeur et, en raison des dimensions de la terre, ce potentiel est indépendant de toutes les expériences d'électricité que l'on peut réaliser à sa surface. Comme, d'ailleurs, les phénomènes dans un champ électrique ne dépendent que des différences de potentiel entre les différents corps, on peut admettre que le potentiel est nul sur la Terre et le prendre comme terme de comparaison, de même que les hauteurs en topographie sont comptées à partir du niveau moyen de la mer. D'après cela, le potentiel en un point peut être défini comme étant le travail nécessaire pour amener en ce point une masse d'électricité positive égale à l'unité prise sur le sol.

Energie électrique. — Le travail nécessaire pour électriser un conducteur dans des conditions déterminées est la somme des travaux que l'on dépenserait pour y amener depuis la surface du sol, unité par unité, toute la charge qu'il possède. L'opération est comparable à celle qui consisterait à introduire de l'eau dans un vase cylindrique dont le fond serait à la surface du sol; dans ce cas, le travail total est le même que si toute la masse liquide avait été portée à la moitié de la hauteur à laquelle elle s'élève, c'est le produit du poids du liquide par la demi-hauteur. Il en est de même en électricité: le travail d'électrisation est égal à la moitié du produit de la masse par son potentiel, c'est l'énergie qui sera disponible pendant la décharge. Comme la charge est égale au produit du potentiel par la capacité, on peut dire aussi que

l'énergie électrique d'un conducteur est la moitié du produit de la capacité par le carré du potentiel ou du quotient du carré de la charge par la capacité.

Pour un ensemble de conducteurs, et même pour un système quelconque renfermant des corps électrisés conducteurs ou non, l'énergie totale est la moitié de la somme des produits de chaque masse par le potentiel correspondant.

Condensation. — La capacité d'un conducteur dépend des conditions dans lesquelles il est placé. Si une sphère électrisée, par exemple, est entourée d'une couche sphérique reliée au sol, son potentiel sera plus faible que si elle était isolée dans un grand espace, car les forces extérieures ne sont que la différence des actions exercées par la sphère et par l'électricité contraire qui l'entoure. Ces forces extérieures seraient même nulles si la couche enveloppante était complètement fermée ; il n'y aurait de force électrique que dans l'intervalle des deux conducteurs, et l'on voit aisément que le travail nécessaire pour porter une masse électrique depuis l'enveloppe jusqu'à la sphère est notablement diminué. Le potentiel de la sphère se trouve donc plus faible que si l'enveloppe n'existait pas, c'est-à-dire que sa capacité sera augmentée. La présence de l'enveloppe permet donc, pour un même potentiel, d'accumuler ou de *condenser* de l'électricité sur la sphère et on donne quelquefois le nom assez barbare de *force condensante* au coefficient par lequel il faudrait multiplier la capacité primitive de la sphère pour obtenir sa capacité nouvelle.

Un condensateur, en général, se compose ainsi d'un conducteur qu'on électrise (*collecteur*), d'un conducteur voisin qui se charge par influence (*condenseur*) et d'un *milieu isolant* interposé entre eux. Les deux conducteurs s'appellent souvent les *armatures* du condensateur. Telles sont, par exemple, les bouteilles de Leyde, dont les armatures sont formées par des lames métalliques collées, l'une sur la surface interne, l'autre sur la surface externe, et dont le verre constitue le milieu isolant.

La capacité d'un condensateur peut être calculée d'après ses dimensions ; pour le cas de surfaces très rapprochées, comme celles des bouteilles de Leyde, la capacité est en raison inverse de la distance des armatures, c'est-à-dire de l'épaisseur du verre. Cette capacité représente la charge nécessaire pour porter l'armature intérieure au potentiel 1, l'armature extérieure étant au sol, ou, plus généralement, pour établir entre les armatures une différence de potentiel égale à l'unité.

Des diélectriques. — Les expériences de Cavendish et de Faraday ont montré que la capacité d'un condensateur dépend de la nature du milieu intermédiaire ; elle augmente, par exemple, quand on remplace l'air par

une substance solide, telle que le verre ou la paraffine, comme si les forces étaient devenues plus faibles dans ce nouveau milieu.

Ce résultat, que la théorie ne pouvait faire prévoir dans l'idée généralement adoptée des actions à distance, conduisit Faraday à considérer les corps isolants, ou *diélectriques*, comme jouant un rôle capital dans les phénomènes. Dans cet ordre d'idées, l'électricité d'un conducteur ne serait autre chose qu'une modification mécanique, une tension du milieu diélectrique qui l'entoure; les forces qui s'exercent sur les conducteurs seraient produites par les réactions élastiques du milieu; la décharge électrique serait le retour de ce milieu à l'état naturel. On abandonnerait ainsi la notion même de la force à distance et, comme la déformation du milieu qui transmet l'action d'un corps à un autre ne peut être instantanée, les forces elles-mêmes exigeraient un temps pour se propager à distance. On voit combien cette conception serait éloignée de celle à laquelle conduit l'idée des fluides.

Des batteries. — Quoi qu'il en soit, si l'on ne quitte pas le point de vue expérimental, il suffira de tenir compte de ce fait que la capacité d'un condensateur dépend de sa forme, de ses dimensions et de la nature du diélectrique qui le constitue.

Une *batterie* est un ensemble de bouteilles de Leyde dont les armatures ont entre elles des connexions méthodiques. Si toutes les armatures intérieures sont réunies métalliquement, et toutes les armatures extérieures réunies de même, la batterie équivaut à une bouteille unique dont la capacité est la somme des capacités de toutes les bouteilles séparées. On dit alors que les bouteilles sont réunies *en surface*.

On peut, au contraire, isoler toutes les bouteilles, joindre l'armature extérieure de la première avec l'armature intérieure de la seconde, l'armature extérieure de celle-ci avec l'armature intérieure de la suivante, et ainsi de suite. L'armature extérieure de la dernière étant au sol, si on charge d'électricité positive l'armature intérieure de la première, tous les conducteurs intermédiaires s'électrisent par influence, négativement sur la partie qui constitue l'armature externe de la bouteille précédente et positivement sur celle qui forme l'armature interne de la suivante. Dans ce cas, la chute totale de potentiel d'un bout à l'autre de la batterie se fait par échelons d'une armature à l'autre de chaque bouteille; si les bouteilles sont identiques, la capacité de la batterie, c'est-à-dire la charge qui établit une différence de potentiel égale à l'unité entre les armatures extrêmes, est en raison inverse de leur nombre. La batterie est dite réunie *en cascade*.

Il semble que cette disposition fait perdre le bénéfice de la batterie, puisque la capacité est diminuée, mais le rôle des cascades est en réalité tout autre. Lorsque la différence de potentiel des deux armatures d'une bouteille est trop grande, la décharge se fait souvent d'elle-même

par une étincelle le long de la surface ou à travers le verre. La disposition en cascade permettra d'opérer avec des potentiels trop différents pour que chacune des bouteilles puisse les supporter isolément. Si la batterie comprend par exemple dix bouteilles, la différence de potentiel des armatures de chacune d'elles n'atteindra que la dixième partie de la différence totale. Cette propriété est utilisée, en particulier, dans plusieurs machines électriques.

Décharges. — Lorsqu'on décharge un corps électrisé, qu'on établit par exemple une communication entre les armatures d'une batterie, on peut concevoir qu'un flux d'électricité s'écoule par le conducteur intermédiaire depuis l'armature positive (au potentiel le plus élevé) jusqu'à l'autre armature et qu'il se produit, dans le sens indiqué, un véritable courant dont la durée est plus ou moins grande suivant la nature de l'arc qui réunit les armatures.

Cette décharge dépense l'énergie disponible du système électrisé. On pourrait d'abord l'utiliser pour faire marcher un moteur convenablement construit et la transformer ainsi directement en travail mécanique.

Habituellement la décharge donne lieu à un trait de feu, une *étincelle* qui constitue le phénomène principal, mais elle peut produire des effets très variés.

Si l'arc est formé d'un fil métallique très long et très fin, l'étincelle devient très faible et la plus grande partie de l'énergie est employée à élever la température du fil. Cet échauffement peut même servir de mesure à l'énergie électrique (*thermomètre de Riess*).

Un fil plus court ou une lame mince pourront être échauffés au point de rougir, de fondre ou de se volatiliser (*expériences diverses sur la fusion des métaux, portrait de Franklin, etc.*), et si la volatilisation a lieu dans un liquide, l'expansion brusque de la vapeur produit des effets de rupture très violents (*torpille électrique*).

Quand on met sur le trajet de l'arc conducteur un diélectrique solide, et que la décharge le traverse, une partie de l'énergie est employée à l'opération mécanique que subit ce corps intermédiaire (*perce-carte; perce-verre, etc.*). Si l'arc est formé de tiges de métal d'un gros diamètre, la décharge a lieu dans l'air à distance et donne une étincelle qui absorbe la presque totalité de l'énergie. L'examen de la lumière au spectroscope montre des raies qui appartiennent au gaz ambiant et aux métaux entre lesquels a lieu la décharge. Il y a donc des parcelles métalliques arrachées aux conducteurs, et qui sont portées avec le gaz ambiant à une température très élevée.

La longueur de l'étincelle, c'est-à-dire la distance explosive, croît avec la différence de potentiel des armatures; elle est proportionnelle entre certaines limites à cette différence de potentiel et peut servir à la

mesurer, au moins en valeurs relatives (*excitateur à décharges, bouteille de Lane électro-métrique, etc.*)

En diminuant la résistance du gaz par de faibles pressions, on peut augmenter dans de grandes proportions la distance explosive. Les raies des conducteurs disparaissent alors de l'étincelle et le gaz ambiant intervient seul. En même temps la lumière prend les formes les plus variées (*tubes de Geissler, stratifications, nappes de feu, effluves électriques etc.*), et donne lieu à un grand nombre d'expériences.

Quand l'étincelle se produit dans un mélange de gaz détonants, elle en provoque la combinaison (*pistolet de Volta, eudiomètres*).

Si le courant de décharge traverse lentement un liquide décomposable, comme l'eau ou le sulfate de cuivre, les éléments sont séparés comme ils le seraient par une pile de Volta, et subissent le phénomène de l'électrolyse. Enfin, il peut se produire dans les gaz eux-mêmes les réactions chimiques les plus curieuses, comme combinaisons ou décompositions lentes (*ammoniaque, acide carbonique, ozone, acétylène, etc.*).

Les effets physiologiques des décharges sont aussi en relation directe avec l'énergie dépensée à chaque excitation, mais cette question doit être examinée à part.

Des mesures électriques. — La mesure des quantités électriques se ramène à la détermination des potentiels; sans entrer ici dans aucun détail sur les méthodes employées, il nous suffira d'en indiquer le principe.

D'après la loi de Coulomb, on voit aisément que le potentiel d'une masse électrique m à la distance r est égal au quotient de la masse par la distance; c'est, en effet, le travail qu'il faudrait dépenser pour amener de l'infini jusqu'à cette distance r une masse positive égale à l'unité. Le potentiel en un point d'un système quelconque de corps électrisé est égal à la somme des potentiels de chacune des masses qui le constituent; il est donc égal à la somme des quotients de chaque masse par sa distance à ce point.

Pour une sphère conductrice en équilibre et soustraite à l'action de tout corps étranger, le potentiel à l'intérieur étant constant a partout la même valeur qu'au centre, il est donc égal au quotient de la masse totale par le rayon. Il en résulte que la capacité électrique d'une sphère est représentée par son rayon.

Imaginons que, dans un appareil analogue à la balance de Coulomb, on dispose deux boules conductrices égales, reliées entre elles par un fil de métal très fin dont on pourra négliger l'influence. Ces boules seront au même potentiel et auront la même charge. Si elles sont suffisamment éloignées, à une distance de quatre ou cinq fois leur diamètre, l'action réciproque est la même que si les masses de chacune d'elles étaient respectivement concentrées aux centres. En mesurant

par la torsion d'un fil la répulsion des boules et multipliant cette force par le carré de la distance des centres, on aura le produit des deux masses électriques, c'est-à-dire le carré de l'une d'elles. Le quotient de l'une de ces masses par le rayon de la boule donnera le potentiel. On peut donc graduer une balance de Coulomb et construire une table qui donne le potentiel des boules en fonction de leur distance et de la torsion du fil qui supporte la boule mobile; on aura ainsi un *électromètre absolu*. En mettant ce système de deux boules en communication avec un conducteur quelconque, on pourra ainsi déterminer le potentiel du conducteur.

Un *électromètre* est un appareil qui permet de déterminer le potentiel d'un conducteur, ou, plus généralement, la différence des potentiels de deux conducteurs différents. Les électromètres employés dans la science se présentent sous les formes les plus variées, et quelques-uns sont construits sur un principe qui permet de les graduer directement, mais on peut toujours imaginer qu'on les a gradués par comparaison avec une balance de Coulomb.

Les capacités électriques pourront être déterminées de la même manière, car il suffit de mesurer la charge électrique d'un conducteur et son potentiel pour avoir la capacité par le rapport de ces deux quantités. Toutefois, il est plus commode dans la pratique de déterminer les capacités en les comparant avec celle d'un corps que l'on connaît, avec celle d'une sphère, par exemple, dont la capacité est représentée par le rayon.

Cette comparaison se fait par une méthode analogue à celle des mélanges pour la détermination des chaleurs spécifiques. Un conducteur dont la capacité C est inconnue étant électrisé, on détermine son potentiel V ; on le met ensuite en communication par un fil fin et long avec une sphère de rayon R primitivement à l'état neutre et on détermine le nouveau potentiel V' . Comme la masse électrique n'a pas changé, le rapport des deux potentiels V et V' est égal au rapport inverse des capacités correspondantes C et $C + R$, ce qui fera connaître la valeur de C . Toutefois l'expérience est en réalité un peu moins simple, parce qu'il faut éliminer la capacité de l'électromètre qui intervient dans les opérations et les pertes d'électricité inévitables, comme on élimine dans les expériences calorimétriques l'influence du vase, des thermomètres, ainsi que la perte de chaleur par refroidissement.

L'énergie électrique d'un conducteur ou d'un système de conducteur se détermine également par la capacité et le potentiel de chacun d'eux.

On voit ainsi que toutes les grandeurs qui interviennent dans les phénomènes d'électricité sont directement abordables par l'expérience.

Des sources d'électricité. — Nous ne nous sommes pas préoccupés jusqu'à présent des méthodes que l'on peut employer pour produire

l'électrisation et nous avons supposé que l'origine de toutes les opérations était le frottement de deux corps.

En réalité, l'électrisation par frottement n'est qu'un cas particulier d'un fait plus général découvert par Volta. Il suffit de mettre en contact deux corps de natures différentes pour qu'il s'établisse entre eux une différence de potentiel déterminée, comme entre les armatures d'un condensateur électrisé, l'un de ces corps devenant positif et l'autre négatif, en sorte que, si l'on vient à les séparer, ils se trouvent chargés de quantités égales d'électricités contraires. L'électricité de contact est le principe des piles électriques. La charge produite dans le contact dépend de la capacité du système formé par les deux corps; elle sera d'autant plus grande que les surfaces des corps seront rapprochées par un plus grand nombre de points. Le frottement n'est qu'un moyen de multiplier les points de contact, et, si l'un des corps est mauvais conducteur, on y trouve encore cet avantage que l'électricité, une fois produite, reste localisée aux points où le frottement s'est exercé.

Au lieu de recourir au frottement ou au contact, comme sources d'électricité, on peut utiliser le phénomène de l'influence. Un corps étant électrisé, on en approche un conducteur en communication avec le sol; ce conducteur se charge d'électricité de signe contraire; on supprime la communication du sol et on enlève le conducteur qui reste alors électrisé. On peut répéter l'opération, de sorte qu'avec une même quantité d'électricité primitive on en produira une quantité indéfinie. Tel est le cas de l'*électrophore*.

Machines électriques. — Les machines électriques ont pour but d'accumuler sur un conducteur toute l'électricité produite par une série d'opérations successives de frottement ou d'influence. D'un point de vue général, on peut dire que toute machine comprend trois organes:

- 1° Un *producteur* d'électricité;
- 2° Un *transmetteur* qui la porte au point où l'on veut l'accumuler;
- 3° Un *collecteur* qui la reçoit.

Si le transmetteur était en métal, il suffirait de ménager une cavité dans le collecteur et de porter le transmetteur dans cette cavité à chaque opération. Le transmetteur y perdrait au contact toute son électricité et se retirerait à l'état neutre.

Habituellement, le transmetteur est un corps isolant, du verre ou de l'ebonite, qui n'abandonnerait pas son électricité par un simple contact avec un conducteur. On profite alors du pouvoir des pointes en introduisant le transmetteur électrisé dans l'intérieur d'une mâchoire munie de pointes, ces pointes font l'office d'une communication conductrice et le ramènent à l'état neutre.

Dans les anciennes machines à frottement (*machines de Ramsden, de Nairne*, etc.), le producteur d'électricité est formé par deux coussins, ou

deux paires de coussins, entre lesquels tourne un plateau ou un cylindre de verre; le transmetteur est la pièce de verre dont les différentes parties viennent successivement en face des dents d'un peigne après avoir passé sous les coussins; le collecteur se compose habituellement de longs cylindres de métal portés par des pieds en verre.

Les machines à frottement sont quelquefois disposées de façon que le frotteur reste isolé et soit aussi relié à un collecteur auquel il communique l'électricité qu'il a prise dans le frottement. Le jeu est alors double, les deux collecteurs se chargeant d'électricités contraires. C'est la forme habituellement adoptée pour la machine de Nairne.

Les machines à réaction, si employées aujourd'hui, dont la machine de Holtz est la forme la plus répandue et dont l'appareil à écoulement de sir W. Thomson est la solution pour ainsi dire théorique, reposent sur un principe un peu différent. L'électrification du plateau transmetteur a lieu, non par frottement, mais par influence.

L'appareil entier est à double jeu et comprend deux inducteurs, deux transmetteurs et deux collecteurs; on utilise ainsi la charge acquise par l'un des collecteurs pour augmenter l'électrification de l'inducteur qui correspond à l'autre, de sorte que, par cette double réaction, la différence de potentiel des deux collecteurs augmente très rapidement. Ces machines ne peuvent en général s'amorcer d'elles-mêmes et il faut provoquer la mise en train par un corps électrisé étranger; dans plusieurs machines cependant, il suffit que l'équilibre ait été troublé, quelquefois d'une quantité infiniment petite, par exemple par le contact de métaux différents, pour que l'électricité aille en croissant jusqu'à ce que les pertes par l'air et les supports rétablissent l'équilibre. Les détails de construction des différents types de machines qui rentrent dans cette catégorie sont trop variés pour qu'il soit possible d'en donner une brève description (*machines de Tæpler, de Holtz, de Reppenisher, de Thomson, etc.*).

Si l'on met à part les frottements qu'entraîne le mouvement d'un mécanisme quelconque, le jeu d'une machine électrique exige nécessairement un travail continu; c'est le travail nécessaire pour porter le transmetteur depuis le producteur jusqu'au collecteur, malgré les actions électriques qui tendraient à le faire marcher en sens contraire. C'est à ce travail qu'est due l'énergie électrique disponible. Dans la machine à écoulement de sir W. Thomson, l'énergie électrique est empruntée au travail de la pesanteur sur les gouttes qui tombent, car leur mouvement est ralenti et elles arrivent dans le collecteur avec une vitesse moindre que s'il n'y avait pas d'électrification.

Dans les machines à frottement, le *débit* d'électricité produite pendant l'unité de temps est proportionnel à la surface frottée par les coussins, c'est-à-dire à la vitesse de rotation. Il en est de même pour les ma-

chines à réaction lorsqu'elles sont parvenues à un régime régulier et que les potentiels sont constants sur les inducteurs ainsi que sur les collecteurs.

Comme l'énergie d'un corps électrisé peut être transformée par la décharge en un travail quelconque, on voit qu'en dernière analyse tous les phénomènes électriques peuvent être considérés comme un mécanisme dont on ignore la nature intime, mais qui a pour résultat d'effectuer une transformation de travail.

Électricité atmosphérique. — Les éclairs, le tonnerre et les effets produits par la foudre présentent de telles analogies avec les décharges électriques, que l'idée de rapprocher les deux ordres de phénomènes et de les rapporter à la même cause s'est présentée depuis longtemps à la plupart des électriciens; mais elle était restée à l'état de simple conjecture jusqu'en 1749, où Franklin indiqua comment on pouvait *soutirer* directement l'électricité des nuages en utilisant le pouvoir des pointes, et l'expérience fut faite en France pour la première fois par Dalibard à Marly. En même temps, l'illustre physicien de Philadelphie montra les services que cette expérience pouvait rendre à l'humanité en préservant de la foudre les maisons, les vaisseaux et les édifices publics; on sait avec quel empressement la mémorable découverte du paratonnerre a été appliquée dans tous les pays civilisés.

Mais, en dehors de la foudre et des nuages orageux qui sont des effets accidentels, il était à présumer que l'atmosphère devait être le siège continu de phénomènes électriques moins intenses. Dès 1752, en effet, Lemonnier découvrit qu'une tige verticale isolée et placée à l'air libre s'électrise presque toujours par un ciel pur, au point même de donner des étincelles quand on en approche la main. L'atmosphère qui nous entoure est donc un champ électrique et l'expérience montre qu'en temps ordinaire le potentiel en un point dans l'air augmente à mesure qu'on s'élève.

Pour déterminer le potentiel de l'air, on utilise les effets d'influence. Imaginons qu'un conducteur cylindrique, primitivement à l'état neutre, soit placé verticalement dans l'air et isolé, la partie supérieure du conducteur deviendra négative, la partie inférieure positive, et son potentiel sera le même que celui de l'air au voisinage de la région moyenne où se trouve la ligne neutre. Si l'isolement électrique du conducteur par les supports qui le soutiennent et par l'air ambiant restait absolu, le potentiel du conducteur donnerait à chaque instant le potentiel de l'air en un point déterminé; mais, à cause des pertes continues, la position de la ligne neutre varierait incessamment et on n'obtiendrait par cette méthode que des résultats très irréguliers.

Supposons, au contraire, que l'on dispose à l'extrémité du conducteur une pointe infiniment aiguë, ou une mèche allumée qui laisse échapper

des gaz chauds, ou un appareil d'écoulement qui verse de l'eau d'une manière continue. Cette extrémité sera toujours maintenue à l'état neutre, parce que l'électricité qui pourrait s'y produire s'échappe par la pointe aiguë, ou par les gaz, ou par les gouttes de liquide; et le potentiel du conducteur, si l'isolement n'est pas trop imparfait, sera toujours le même que celui de l'air dans le voisinage des points où se fait l'écoulement électrique. Ce potentiel pourra être observé par un électromètre quelconque et inscrit sur un enregistreur.

Sans connaître le siège de cette électricité naturelle, on peut se faire une idée générale des phénomènes. Si l'on imagine que la terre soit dans l'état moyen indiqué par l'ensemble des observations, la surface entière sera partout à un potentiel inférieur à celui de l'air. Les points où le potentiel a une valeur positive très faible formeront dans l'air une surface enveloppant la terre, dont elle suivra les reliefs d'une manière imparfaite : à une petite distance du sommet des montagnes, de la crête des arbres, du toit des maisons et de tous les objets élevés; à une distance plus grande de la plaine, de la surface des mers, du fond des vallées, du sol des rues étroites, etc. La surface entière sera couverte d'électricité négative; sur une étendue assez grande la quantité totale d'électricité sera sensiblement la même que sur une nappe liquide limitée au même contour, mais la distribution de cette électricité sera très inégale; la densité sera plus grande sur les parties proéminentes et les surfaces convexes, plus faible sur les parties abritées et concaves, nulle dans l'intérieur d'une cavité, sous le couvert des bois, sur les parois d'un appartement.

Quant aux surfaces de niveau, dont les premières traduiront ainsi assez fidèlement la topographie du sol, elles deviendront de plus en plus régulières à mesure qu'elles s'éloigneront et correspondront à des potentiels plus élevés; à une grande hauteur, ces surfaces seront sphériques et concentriques à la surface générale du globe.

Toutefois cet état moyen n'est jamais réalisé : le potentiel de l'air en un point varie d'une manière continue et devient souvent négatif, surtout par les temps couverts. A un même instant, la terre est donc entourée d'un milieu dont le potentiel est tantôt plus élevé tantôt moindre que celui du sol; la surface du sol est électrisée partout, négativement sur certaines régions, et ce sont les plus étendues, positivement sur d'autres, ces différentes régions étant seulement séparées par des lignes neutres où la densité est nulle.

L'état électrique de l'air éprouve d'ailleurs des changements rapides. La marche moyenne du phénomène montre que le potentiel est maximum pendant la nuit, minimum dans la journée, et qu'il reste généralement positif. Dans les temps couverts, pluvieux, et surtout à l'approche des orages, le potentiel éprouve des variations très brusques

et oscille entre des limites très étendues. Les plantes et les animaux subissent donc une influence électrique continuelle et, quoiqu'on n'ait sur ce point que des renseignements très incomplets, il est à présumer que l'électricité atmosphérique joue un rôle important dans les phénomènes de la vie à la surface du sol.

MASCART.

PILES ÉLECTRIQUES

I

Piles hydro-électriques.

1° Piles simples.

La *pile* telle que Volta l'a imaginée en 1800 est formée d'une série de disques de cuivre et de zinc *empilés* alternativement l'un au-dessus de l'autre, chaque couple de deux disques étant séparé par une rondelle de drap imbibée d'eau salée ou acidulée par l'acide sulfurique. Les extrémités de la pile portent le nom de *pôles*. Lorsqu'on réunit ceux-ci par une chaîne continue de corps conducteurs, ces corps sont parcourus par un flux d'électricité que l'on appelle *courant électrique*.

Volta ne tarda pas à s'apercevoir de divers inconvénients que présente la superposition de disques métalliques et de rondelles humides, et il construisit la *pile à couronne de tasses* qui est formée de *tasses* placées les unes à la suite des autres renfermant de l'eau acidulée; dans chacune plongent une lame de zinc et une lame de cuivre. Volta réunissait par une soudure la lame de zinc à la lame de cuivre plongeant dans la tasse suivante; il pensait que le dégagement d'électricité était dû au contact des métaux différents. On a reconnu depuis que la cause qui entretient la manifestation continue d'électricité dans cet appareil, est l'action chimique inégale qui s'exerce sur les deux métaux plongés dans la même tasse. Dans la pile de Volta, le zinc s'use et la quantité d'électricité recueillie est proportionnelle à la quantité de métal dissous (voir Electro-chimie). On donne aujourd'hui le nom de *couple* ou d'*élément* à l'ensemble des deux lames séparées plongeant dans la même tasse, et l'on a conservé à l'appareil le nom de *pile* qui rappelle sa forme primitive. Chacune des lames porte le nom d'*électrode*. Pour réunir entre eux les couples on se sert de fils ou de pinces métalliques.

Lorsque des lames de deux métaux inégalement attaquables par un liquide plongent dans celui-ci, le métal le plus attaqué manifeste un

état électrique *négalif*, l'autre un état électrique *positif*. Dans le couple de Volta le zinc est le *pôle négatif* à l'extérieur, et le cuivre, le *pôle positif*. On est convenu de donner un sens au courant électrique et d'admettre qu'il marche, à l'extérieur de la pile, *du pôle positif au pôle négatif*.

L'intensité du courant électrique fourni par un couple dépend de deux ordres de grandeurs distinctes : l'une qui porte le nom de *force électro-motrice*, et qui est intimement liée à l'affinité chimique des substances en présence dont la réaction est accompagnée du dégagement d'électricité, l'autre qui correspond à la plus ou moins grande facilité avec laquelle l'électricité circule au travers des divers corps conducteurs, qui offrent au passage du courant une *résistance* variable avec leur nature, leur longueur, leur section et leur température. L'intensité du courant est proportionnelle à la force électro-motrice, et en raison inverse de la résistance totale du circuit (Ohm).

Lorsqu'on emploie plusieurs couples, ceux-ci, comme dans la disposition de Volta, peuvent être ajoutés bout à bout, le pôle positif de l'un communiquant avec le pôle négatif de l'autre. Les forces électro-motrices s'ajoutent, la pile est dite montée en *tension*. Mais on doit observer que chaque couple présentant une résistance propre, l'intensité du courant fourni par la pile ne croît pas proportionnellement au nombre des couples intercalés dans le circuit. La connaissance des forces électro-motrices et de toutes les résistances du circuit permet de discuter, dans chaque cas, le mode de groupement le plus avantageux. On est alors conduit à associer des couples ou des séries de couples en réunissant les pôles de même nom : deux couples ainsi réunis se comportent comme un seul dans lequel les lames métalliques auraient une surface double, ou dont la résistance intérieure serait moitié moindre; ils sont dits montés en *surface* ou en *quantité*.

Immédiatement après la découverte de Volta, on a cherché à donner à sa pile des formes plus pratiques; on a notamment remplacé les tasses par de petites auges formées par des lames métalliques de zinc et de cuivre de forme quadrangulaire, mastiquées parallèlement entre elles entre des montants de bois; on la chargeait aisément en remplissant ces espaces avec le liquide conducteur actif. Ces piles sont les *piles à auges*.

Nous mentionnerons encore le perfectionnement dû à Wollaston, qui permet d'augmenter la surface de la lame de cuivre par rapport à la lame de zinc, et de diminuer ainsi la résistance de chaque couple; la lame de cuivre est repliée autour de la lame de zinc, qu'elle enveloppe sans la toucher. Quant aux modifications apportées par MM. Muncke et Faraday, elles consistent à disposer les couples à peu près comme le faisait Wollaston, mais en les resserrant dans un espace plus restreint, et à plonger toute la pile dans un même bain liquide.

Aujourd'hui, pour les raisons que nous développerons ci-après, on ne se sert que très rarement de ces piles qui portent le nom de *piles simples*.

Sous l'influence des idées qui attribuent au contact métallique seul le développement de l'électricité, on avait construit des piles sans liquide, appelées improprement *piles sèches*. L'un de ces appareils, dû à Zamboni, est formé de la manière suivante : sur les deux faces d'un petit disque de papier légèrement humide on colle d'un côté une feuille d'étain, et de l'autre on fait adhérer une couche de bioxyde de manganèse en poudre, puis l'on superpose les disques comme dans la pile de Volta. On forme ainsi des piles de plusieurs milliers d'éléments, mais elles ne fournissent qu'une quantité d'électricité très faible parce que l'usure ou l'action chimique est elle-même très faible. On peut s'en servir utilement dans certains appareils pour obtenir une charge électrique en circuit ouvert, mais on a reconnu que la pile s'affaiblissait graduellement et qu'elle cessait de fonctionner lorsque les disques de papier étaient entièrement desséchés.

2° Piles composées.

Le courant électrique fourni par une pile de Volta s'affaiblit très rapidement; cet inconvénient a entravé longtemps les applications de la pile; en laissant les pôles isolés, elle reprend peu à peu son activité première.

A. C. Becquerel a reconnu la cause de l'affaiblissement du courant dans la pile; en annulant cette cause perturbatrice il construisit les premières *piles à courant constant*, en 1829, et donna les principes sur lesquels repose la construction de tous les couples employés aujourd'hui. « La pile porte avec elle la cause des diminutions qu'éprouve le courant électrique, car, dès l'instant qu'elle fonctionne, il s'opère des décompositions et des transports de substances qui polarisent les plaques de manière à produire un courant en sens inverse du premier. L'art consiste à dissoudre ces dépôts à mesure qu'ils se forment, avec des liquides convenablement placés. »

Dans la pile de Volta les dépôts sont dus à la décomposition de l'eau acidulée et du sulfate de zinc dissous : l'eau est décomposée en hydrogène qui se porte sur le cuivre, et en oxygène qui oxyde le zinc; le sulfate de zinc se décompose en zinc qui se porte sur le cuivre, et en acide sulfurique, lequel avec l'oxyde de zinc donne du sulfate de zinc qui se dissout. Ainsi le zinc disparaît peu à peu et le cuivre se couvre d'hydrogène; c'est le dépôt d'hydrogène qui est la principale cause de l'affaiblissement du courant. Pour l'éviter, on divise le vase qui contient le liquide en deux compartiments séparés par une cloison perméable;

dans l'un on met de l'eau acidulée ou salée et une lame de zinc ; dans l'autre une lame de cuivre et une solution de nitrate ou de sulfate de cuivre. Le sel est décomposé par l'hydrogène naissant, donne de l'acide qui se combine au zinc transporté et il se forme sur la lame de cuivre un dépôt de cuivre réduit. Cette disposition constitue la *pile à sulfate de cuivre* (Becquerel, 1829), une des plus constantes que l'on possède.

Cette pile, telle qu'elle fut construite à l'origine, était formée d'une lame de zinc plongeant dans une dissolution saturée de sulfate de zinc, et d'une lame de cuivre plongeant dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre, les deux liquides étant séparés par une cloison perméable plane en baudruche ou par un diaphragme en kaolin. C'est encore l'élément qui sert de type aujourd'hui. Il faut avoir soin d'entretenir la concentration de la dissolution de sulfate de cuivre. Les sulfates peuvent être remplacés par les nitrates des mêmes métaux. On a donné à cet élément des formes très nombreuses en se servant de cloisons perméables diverses et même en les supprimant totalement, les deux liquides étant alors superposés par ordre de densité.

D'après ces principes on construit des piles avec d'autres métaux et d'autres liquides, et l'on peut même utiliser exclusivement la réaction de deux liquides en recueillant l'électricité au moyen de conducteurs inaltérables. Comme exemple nous citerons la réaction de l'acide azotique sur une solution concentrée de potasse, au travers d'une cloison perméable formée par du kaolin humide ou un vase poreux ordinaire. Des lames inaltérables en platine ou en charbon plongent dans les liquides et servent de conducteurs. L'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau se porte sur l'acide qu'il réduit, et l'oxygène se dégage sur la lame qui plonge dans la potasse. Cette disposition constitue la *pile à oxygène*.

M. Grove, en associant au zinc et à l'eau acidulée de l'acide azotique et du platine, a formé un couple à deux liquides très énergique (1839) ; il avait essayé de substituer le graphite au platine. M. Bunsen a réalisé l'emploi du charbon. A l'action de l'eau acidulée sur le zinc s'ajoute l'action de l'acide azotique sur l'eau et le sulfate de zinc, laquelle donne au couple une force électro-motrice assez grande, qui en a répandu l'usage. Mais cette pile est moins constante que la pile à sulfate de cuivre, et l'acide hypoazotique qui se dégage au pôle positif en rend l'emploi continu difficile en dehors des laboratoires ou des locaux spéciaux disposés à cet effet.

On a vu plus haut que la quantité d'électricité dégagée était proportionnelle à la quantité de zinc dissous dans les diverses piles que nous venons de décrire. Il y a donc grand intérêt à ce que ce métal ne soit pas attaqué lorsque le circuit n'est pas fermé. Le zinc du commerce plongé dans l'eau s'altère rapidement, mais le même inconvénient

n'existe plus lorsque la surface du zinc a été enduite de mercure, c'est-à-dire amalgamée; l'usure du zinc est alors très faible quand le circuit est ouvert. La force électro-motrice du zinc amalgamé est même très légèrement supérieure à celle du zinc pur, aussi dans tous les couples aujourd'hui en usage emploie-t-on presque exclusivement le zinc amalgamé.

Dans la construction des couples à courant constant, pour *dépolariser le pôle positif*, c'est-à-dire absorber l'hydrogène, on peut faire usage d'un grand nombre de substances liquides ou solides. Nous avons déjà cité diverses dissolutions de sels métalliques et l'acide azotique; nous ajouterons encore l'acide chromique, divers peroxydes tels que ceux de manganèse et de plomb, les sulfates de plomb, de mercure, de cadmium, les chlorures d'argent, de mercure, etc., soit à l'état de dissolution, soit solides et plus ou moins agglomérés par la pression, et en général toutes les substances qui peuvent être réduites par l'hydrogène naissant. Un grand nombre de couples aujourd'hui répandus dans l'industrie ont été construits d'après ces principes.

3° Piles secondaires.

Les *effets secondaires* sont la manifestation des courants inverses dus à la *polarisation des électrodes*. Les premiers effets secondaires ont été observés par Gautherot en 1801. En 1803, Ritter, après avoir fait traverser par un courant électrique une pile de pièces d'or séparées par des rondelles imbibées d'eau salée, reconnut qu'en réunissant les extrémités de cette pile on obtenait un courant de courte durée en sens inverse de celui qui l'avait chargée. On a vu plus haut comment ce courant s'opposait à la constance du dégagement de l'électricité dans la pile de Volta, et comment il était annulé dans les piles à deux liquides.

On peut du reste prouver directement que des lames métalliques recouvertes de gaz différents donnent lieu à un courant électrique; on prend deux lames de platine ayant séjourné quelques instants: l'une dans l'oxygène, l'autre dans l'hydrogène; en plongeant celles-ci dans l'eau acidulée, on constate la production d'un courant électrique (Matteucci).

M. Grove a montré que l'on avait un courant électrique continu en faisant communiquer deux lames de platine renfermées dans des éprouvettes renversées sur l'eau acidulée et contenant l'une de l'oxygène, l'autre de l'hydrogène; les lames doivent plonger en partie dans le liquide. Cette *pile à gaz* est un appareil des plus intéressants; on peut associer plusieurs couples et les employer à décomposer l'eau; on observe alors qu'il disparaît, dans les éprouvettes de chaque couple, les proportions de gaz qui correspondent à la formation de l'eau, et l'on réalise ainsi à la fois l'analyse et la synthèse de ce corps.

Le problème de l'utilisation des courants secondaires a été très heureusement résolu par M. G. Planté qui s'est servi d'un appareil formé de deux lames de plomb immergées dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Si l'on fait communiquer ces lames avec une pile de quelques couples, celle qui communique avec le pôle négatif se couvre d'hydrogène, l'autre s'oxyde et se couvre d'un dépôt de peroxyde de plomb.

Si l'on vient à supprimer la pile et à réunir les deux lames de plomb ainsi *polarisées*, on observe un courant énergique qui dure quelque temps suivant la plus ou moins grande résistance du circuit qui lui est offert. La force électro-motrice inverse de ce couple est près de deux fois et demie celle d'un couple à sulfate de cuivre, de sorte que, pour le charger, il faut trois éléments à sulfate de cuivre ou deux éléments à acide azotique, associés en tension.

L'usage de ce couple ne semblerait donc offrir aucun avantage si M. Planté n'avait imaginé la disposition suivante qui permet de charger facilement un très grand nombre d'éléments secondaires; on fait communiquer ensemble toutes les lames de même nom des divers couples; la pile est groupée en *quantité*. Elle se comporte comme un seul couple dont la surface serait égale à la somme des surfaces de tous les couples, et se charge au moyen de trois éléments à sulfate de cuivre. Puis, lorsqu'on veut utiliser la batterie, au moyen d'un commutateur, on réunit chaque lame à la lame de nom contraire du couple suivant; les couples sont alors montés en *tension*, et les forces électro-motrices s'ajoutent; les effets obtenus dépendent du nombre des éléments de la batterie.

Avec la quantité d'électricité fournie pendant un temps plus ou moins long par trois couples à sulfate de cuivre, on peut, en dépensant rapidement cette quantité ainsi accumulée dans une batterie secondaire, produire des effets de tension très remarquables.

La quantité que l'on peut accumuler dépend de la *surface* de chaque couple et de l'état physique du plomb. M. Planté a remarqué que par l'usage le plomb plusieurs fois oxydé et réduit se couvre d'une masse poreuse et qui peut se transformer presque totalement en peroxyde de plomb. L'épaisseur de cette couche augmente continuellement au détriment du plomb compact, et permet d'accumuler dans chaque couple plus de peroxyde de plomb, c'est-à-dire d'électricité, que lorsque ceux-ci sont nouvellement formés.

La transformation que l'on réalise est analogue à celle qui consisterait à fournir à une machine 100 calories, par exemple en élevant 100 kilogrammes d'eau de 0° à 1°, puis à reprendre, s'il était possible, cette même quantité de chaleur sous forme de 1 kilogramme d'eau à la température de 100°.

Ces appareils qui emmagasinent l'électricité peuvent donner lieu aux applications les plus diverses.

CH

Piles thermo-électriques.

Seebeck en 1821 observa que si l'on soudait à un barreau de bismuth une lame de cuivre convenablement recourbée de façon à former un circuit fermé, il suffisait de chauffer l'une des soudures pour donner naissance à un courant électrique dans le circuit. En refroidissant la soudure, le courant électrique était inverse. Si l'on répète la même expérience avec divers métaux entre les mêmes limites de température, on obtient des courants d'intensité différente, qui correspondent à des pouvoirs thermo-électriques différents. Les lois de ces phénomènes ont été établies en 1823 par A.-C. Becquerel qui a reconnu également l'existence de courants thermo-électriques entre deux portions d'un même métal homogène, à des températures différentes. Les phénomènes thermo-électriques se manifestent encore au contact des liquides et des solides et des liquides entre eux. Les forces électro-motrices ainsi mises en jeu sont notablement plus faibles que celles des couples hydro-électriques.

Lorsque l'on dispose à la suite les uns des autres des barreaux de bismuth et d'antimoine, ou de bismuth et de cuivre, si l'on chauffe les jonctions paires, les forces électro-motrices s'ajoutent. On peut même disposer les jonctions de manière à réunir sur une même face toutes celles qui doivent recevoir l'action de la chaleur, et former ainsi une pile thermo-électrique. Les premières piles de ce genre ont été construites par Oersted et Fourier; Nobili et Melloni les ont perfectionnées et les ont appliquées à l'étude du rayonnement de la chaleur.

Parmi les métaux purs, le bismuth et l'antimoine donnent des effets énergiques. En chauffant la jonction de ces deux métaux le courant va du bismuth à l'antimoine à travers la soudure chaude, c'est-à-dire que pour le circuit extérieur l'antimoine se comporte comme positif, et le bismuth comme négatif. Le sulfure de cuivre fondu est encore plus positif que l'antimoine; une pile de trente éléments de ce corps associé au maillechort décompose l'eau, quand les différences de température entre les extrémités sont de 250 à 300°. En général l'intensité du courant est d'autant plus grande que la différence des températures de deux jonctions est plus considérable.

On a utilisé dans l'industrie divers alliages, pour former des piles fournissant une certaine quantité d'électricité, notamment un alliage d'antimoine et de zinc qui ne fond qu'à la température rouge et que l'on associe au fer.

Pour les piles très sensibles qui ne doivent pas être portées à une température élevée, on fait usage d'un alliage d'antimoine et de cadmium à équivalents égaux, le plus positif de tous, et d'un alliage de bismuth et d'antimoine plus négatif que le bismuth ($\text{Bi}=10 \text{ Sb}=1$.) En associant ces deux alliages on a une force électro-motrice qui est plus de cinq fois celle des métaux purs. (Ed. Becquerel.)

Lorsqu'on emploie les piles thermo-électriques comme sources d'électricité on reconnaît qu'elles n'utilisent qu'une faible partie de la chaleur empruntée au foyer, et qu'elles sont, sous le rapport du rendement, inférieures aux piles hydro-électriques qui utilisent la presque totalité du travail chimique mis en jeu dans l'intérieur des couples. Dans ces comparaisons il faut avoir égard au prix de revient du zinc qui est le combustible de la pile, ainsi qu'aux liquides et aux autres matières consommés et il arrive que, pour la production des courants très intenses, la solution la plus économique est fournie par les machines fondées sur les phénomènes électro-magnétiques dont il est question dans un autre article.

Les phénomènes thermo-électriques peuvent recevoir d'utiles applications. Parmi les plus intéressantes il convient de citer le *thermomètre électrique*. Cet appareil se compose essentiellement d'un câble, plus ou moins long, formé d'un fil de fer et d'un fil de cuivre isolés sur leur parcours, et soudés aux extrémités. Par l'intermédiaire du fil de cuivre un galvanomètre est intercalé dans le circuit. Lorsque la température n'est pas rigoureusement la même aux deux extrémités du câble, le galvanomètre accuse un courant électrique. On place l'une des soudures en un point où généralement on ne peut mettre un thermomètre et dont on désire connaître la température; l'autre soudure reste à la disposition de l'observateur. Celui-ci fait alors varier la température de cette soudure jusqu'à ce qu'il ne se manifeste plus de courant électrique dans le câble, et la température nécessaire pour obtenir cet équilibre est rigoureusement égale à celle de la soudure qui est à l'autre extrémité. Cet appareil est d'une sensibilité et d'une précision extrême.

Pour la mesure des hautes températures on a fondé sur les mêmes principes un pyromètre formé de platine et de palladium; mais, au lieu d'opérer par compensation, on détermine la température d'après l'intensité du courant électrique. Ce pyromètre est avantageusement employé dans certaines industries.

HENRI BECQUEREL.

LES MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES

On appelle machine magnéto-électrique toute machine capable de donner naissance à un courant électrique dans un circuit métallique fermé, par le fait du déplacement d'une portion de ce circuit dans le champ d'action d'un aimant.

Ce déplacement est évidemment relatif, en ce sens que si les fils sont immobiles et l'aimant mobile, le système, s'il ne cesse pas d'être continu, fournira toujours un courant.

Personne n'ignore que la terre peut être envisagée comme une sorte d'aimant gigantesque. Il s'ensuit que la machine magnéto-électrique la plus simple à réaliser serait, sans contredit, celle qui ne consisterait qu'en un anneau métallique qui tournerait dans l'espace, autour d'un de ses diamètres.

Ce résultat étant acquis, il reste à le faire sortir de la nature, si je puis ainsi dire, pour en commander le jeu, la portée et la puissance. Il reste à construire des machines véritables dont celle que je viens de citer n'est qu'un principe.

Puisque la production d'un courant n'est causée que par le déplacement d'un fil de métal dans le voisinage d'un aimant, il pouvait paraître probable qu'en augmentant la puissance de l'aimant, qu'en augmentant la longueur du fil soumis à l'influence magnétique, et qu'en augmentant la vitesse du déplacement, les effets deviendraient plus importants. C'est ce que la théorie et l'expérience vérifièrent sans peine.

La grande longueur du fil fut obtenue par un enroulement en bobine et l'action de l'aimant fut accrue par son voisinage plus immédiat de la bobine.

Dans la première machine magnéto-électrique méritant vraiment ce nom deux bobines étaient fixes et un barreau d'acier aimanté tournait

dans son plan et autour de son milieu. On reconnut bien vite qu'il était préférable, au point de vue de la pratique, de laisser les aimants immobiles et de mettre en mouvement les bobines, car, pour de puissantes machines, les bobines sont généralement plus légères que les aimants.

Mais le circuit extérieur utilisé étant fixe, sa liaison avec les bobines en mouvement dut s'établir par des frotteurs métalliques qui s'appuyaient sur un axe également métallique, solidaire du système des bobines.

Les courants obtenus à l'aide de semblables dispositions sont toujours alternatifs, c'est-à-dire que deux courants qui se suivent immédiatement sont de signes contraires, et cela peut se concevoir aisément, puisque le mouvement circulaire seul possible à donner à l'ensemble des bobines, pour réaliser un déplacement continu, équivaut à un mouvement de va-et-vient qui fournirait deux courants consécutifs contraires. Comme il est souvent indispensable de produire un courant continu pour certaines applications, on est amené à se servir d'un organe appelé commutateur, dont le jeu consiste à renverser, à des instants convenables, les deux contacts qui relient les bobines mobiles au circuit extérieur fixe.

Dans ces dernières années, ces commutateurs ont été très ingénieusement combinés avec des enroulements particuliers du circuit mobile et ont permis de faire de nouvelles machines, non pas de fournir un courant rigoureusement continu, comme celui d'une pile (cela serait théoriquement impossible), mais de produire une suite très rapprochée de courants de même signe près (de 60 000 par minute), ce qui, dans l'application, revient absolument au même.

Si la puissance d'une machine électrique dépend de la force des aimants qui la constituent en partie, il faudra avoir recours à des aimants d'un poids et d'une dimension considérables pour obtenir des courants de grande intensité. Mais il est heureusement possible de remplacer les aimants par des réservoirs magnétiques bien autrement énergiques, pour un poids égal, par les électro-aimants. Ceux-ci se composent, sous leur forme la plus habituelle, d'un barreau cylindrique de fer sur lequel est enroulé un fil métallique traversé par un courant. L'effet de ce courant est de développer dans la masse de fer des propriétés magnétiques en tout point semblables à celles d'un aimant ordinaire, et si ce courant est suffisamment intense, le magnétisme du barreau dépassera de beaucoup, comme force, le magnétisme d'un barreau d'acier de même forme. Le courant qui parcourt le circuit des électro-aimants d'une machine est la plupart du temps emprunté à la machine elle-même, si bien que la bobine, les électro-aimants, et les fils extérieurs ne font qu'un seul et même circuit.

Cette courte notice n'a d'autre but que de donner aux visiteurs de l'Exposition d'électricité des notions générales qu'ils pourront appliquer à telle ou telle machine particulière. Aussi dois-je m'abstenir, sous peine de dépasser les limites que m'impose la nature de ce guide, de toute description des machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques existantes. Mais je crois indispensable d'envisager encore dans ces machines un point que j'ai négligé jusqu'à présent.

Les machines magnéto-électriques pour être mises en mouvement exigent une force quelquefois considérable, et tout le monde ne comprendra peut-être pas immédiatement pourquoi le palais des Champs-Élysées a fait provision de plus d'un millier de chevaux-vapeur, s'il suffit, pour produire les courants nécessités par les besoins de l'éclairage, de faire tourner une pelote de fil dans un milieu magnétique. C'est au grand principe de la conservation de l'énergie qu'il faut se reporter pour en trouver la raison. Rien pour rien, telle est la devise inflexible de la nature. Si l'on veut produire de la lumière, il faut commencer par produire de la chaleur, et cette chaleur n'est, en définitive, qu'un travail qu'on ne peut éviter de fournir sous une forme ou sous une autre. Les machines que nous étudions ici n'échappent pas à cette loi générale, et chaque fois que leur circuit extérieur, dans lequel se trouveront des lampes électriques, des bains de galvanoplastie, des moteurs électriques, etc., sera fermé, un courant pourra s'y développer à la condition qu'on vaincra un effort constant pour maintenir le mouvement de la bobine. Cet effort vaincu représente un travail effectué et ce travail trouvera lui-même son origine, soit dans l'effort musculaire d'un homme ou d'un cheval, soit dans la combustion de la houille.

Les machines magnéto-électriques sont très probablement une des premières raisons d'existence de la présente Exposition. Leurs perfectionnements ont été si rapides depuis moins de quinze ans qu'ils ont produit la révolution industrielle à laquelle nous assistons en ce moment.

Avant ces machines, c'était du zinc qu'il fallait consommer pour donner naissance aux courants, car c'est du zinc que nécessite l'emploi des piles. Aujourd'hui, c'est au moyen de la houille, c'est-à-dire d'une substance infiniment moins coûteuse que le zinc, que l'on obtient les torrents d'électricité que l'on utilise, soit pour l'éclairage, soit pour la galvanoplastie, soit pour le transport de la force motrice.

Les spécimens de machines magnéto-électriques sont nombreux dans l'Exposition. Nos lecteurs trouveront dans la classe 3 du catalogue les noms de leurs exposants français et étrangers. Ils retrouveront souvent ces machines dans la classe 9, celle des moteurs électriques, car la plupart de ces machines sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles sont capables de fournir un travail lorsqu'elles sont traversées par un

courant étranger, aussi bien qu'elles produisent un courant lorsqu'on leur fournit un travail. Nous devons nous contenter de renvoyer pour cette nouvelle fonction à la notice que notre savant ami, M. Hippolyte Fontaine, consacre plus loin aux moteurs électriques.

ANTOINE BREGUET.

TRANSMISSION DE L'ÉLECTRICITÉ

1° Fils, Câbles et accessoires.

La transmission des courants électriques s'effectue à l'aide de fils métalliques dont la nature, la grosseur et le mode d'isolement doivent être appropriés à l'effet à produire et à la distance qui sépare la source électrique du point où le fluide est utilisé.

Nature des conducteurs. — Les métaux le plus ordinairement employés à cet usage sont le fer et le cuivre. Le premier se laisse beaucoup plus difficilement que le second traverser par le courant ; il devrait donc, pour cette raison, être exclu des applications électriques, s'il ne compensait cet inconvénient par une plus grande résistance à la traction et un plus faible coefficient de dilatation, qualités qui le rendent éminemment propre à l'établissement des communications télégraphiques aériennes.

Les fils de fer sont plus ou moins bons conducteurs selon le degré de pureté du métal ; ceux qui ont été préparés au bois se rapprochent sensiblement, sous ce rapport, des données théoriques, mais leur ténacité est relativement faible. Dans certains cas, pour franchir, par exemple, de grandes portées, on substitue l'acier au fer. On a également proposé d'employer pour les communications télégraphiques le fer dit homogène, qui se rapproche de l'acier par ses qualités mécaniques. Ces conducteurs sont ordinairement galvanisés.

De même que le fer, le cuivre ne possède une haute conductibilité qu'à la condition d'être très pur ; lorsqu'il est destiné aux usages électriques, ce métal est soumis, en outre, pendant le tréfilage, à un traitement qui développe encore cette qualité essentielle.

On a cherché aussi à constituer un fil télégraphique qui fût à la fois très bon conducteur de l'électricité et doué d'une résistance considérable à la traction, en soudant autour d'un brin central en acier un ruban de cuivre enroulé en hélice ; mais cette juxtaposition des deux métaux ne semble pas, jusqu'ici, avoir donné tous les résultats qu'on en attendait.

Diamètre des fils. — On sait que la résistance électrique d'un conducteur est en rapport direct avec sa longueur et en raison inverse de sa section ; ceci explique pourquoi on proportionne le diamètre des fils au chemin à parcourir. Cette règle est observée dans les installations d'éclairage électrique, de transmission de force à distance, etc., aussi bien que dans les applications télégraphiques, et cela, quels que soient la nature et le mode d'isolement du conducteur.

Mode d'isolement. — On évite la déperdition du fluide transmis par un fil nu en ne faisant reposer celui-ci que sur des corps mauvais conducteurs de l'électricité : le verre, le grès verni, la porcelaine, le caoutchouc durci, conviennent surtout pour cet usage. La forme à donner à ces *isolateurs* a été étudiée d'une manière toute spéciale par les électriciens lorsqu'il s'est agi de transmettre à de grandes distances et par des temps humides les signaux télégraphiques. On s'est arrêté, dans ce cas, à l'emploi d'une cloche ordinairement en porcelaine émaillée, à simple ou à double paroi, renversée et reposant sur une console en fer fixée elle-même au sommet d'un poteau ou de tout autre d'appui. Ces supports doivent d'ailleurs être aussi éloignés que le comporte la solidité de la ligne.

La difficulté d'obtenir toujours un isolement convenable à l'aide de fils nus, l'incommodité qu'offre le maniement de ce genre de conducteurs, ont fait naître l'idée d'enduire les fils métalliques d'une substance isolante. On songea naturellement à étendre cette application aux communications télégraphiques sous-marines et, plus tard, à celles terrestres, qu'on devait soustraire ainsi aux perturbations atmosphériques et aux accidents de toutes sortes auxquels elles sont exposées. De nombreux essais furent faits dans ce sens : le coton, la soie, le collodion, le bitume, le goudron, la résine, la paraffine, la gomme-laque, le caoutchouc, la gutta-percha, etc., etc., furent utilisés dans ce but avec plus ou moins de succès. Chacune de ces matières peut trouver son emploi à un moment donné : la soie convient au revêtement des fils d'électro-aimants et de galvanomètres ; le coton, seul ou imprégné de goudron ou de paraffine, suffit dans beaucoup de cas, pour les usages domestiques par exemple ; mais lorsqu'il s'agit d'obtenir un isolement élevé et surtout portant sur de grandes longueurs de fil, la préférence doit être donnée au caoutchouc vulcanisé ou à la gutta-percha. Les fils destinés à l'éclairage électrique, à l'explosion des mines ou des torpilles, à la transmission de la force à distance à l'aide de machines d'induction, sont généralement recouverts de caoutchouc ; il en est de même quelquefois des câbles téléphoniques, de ceux affectés aux opérations militaires et même aux relations télégraphiques ; mais, pour ces dernières applications, la gutta-percha offre des avantages sérieux qui la font généralement préférer au caoutchouc.

La confection des fils isolés varie suivant la nature de la substance

employée. Nous ne pouvons donner ici même un simple aperçu des procédés qui servent à cette fabrication; nous dirons seulement un mot de ce qui concerne les deux principaux enduits. Le caoutchouc préalablement mélangé au soufre et découpé en bandes est appliqué sur le conducteur à l'aide de machines de dispositions variées et fort ingénieuses, puis, enveloppé sur toute sa longueur d'un ruban chargé de maintenir la gomme encore molle et porté, finalement, dans un récipient où, sous l'influence d'une température élevée, s'effectue la vulcanisation; c'est-à-dire, la combinaison du soufre avec le caoutchouc, qui acquiert alors les qualités d'élasticité, de consistance et de durée qui lui manquaient. Afin d'éviter la sulfuration du cuivre, le fil est d'abord étamé; cette précaution est indispensable. Quant à l'application de la gutta-percha, elle se fait à la filière et par passes successives; la gomme, amenée à une température convenable et chassée par un piston, sort du cylindre qui la renferme adhérente au fil qu'elle doit recouvrir.

Câbles télégraphiques souterrains. — Les câbles qui doivent servir aux communications souterraines sont ordinairement formés de plusieurs conducteurs isolés entre eux, ainsi qu'il a été dit plus haut, et composés respectivement de sept brins de cuivre tordus ensemble; ces câbles sont enveloppés de guipages et de rubans goudronnés. Lorsqu'ils sont placés dans des tranchées, on les introduit simplement dans des caniveaux ou, mieux encore, dans des tuyaux en fonte chargés de les protéger. Dans quelques pays, on les revêt d'une armature formée de fils de fer galvanisé et enduite d'un mastic bitumineux. En France, les câbles circulant en galerie (tunnels, égouts, carrières) sont simplement logés dans un tube en plomb; on les suspend à l'aide de crochets scellés dans le mur.

Câbles téléphoniques. — Les conducteurs téléphoniques diffèrent peu des conducteurs ordinaires; ils sont formés d'un seul brin de cuivre isolé par une mince couche de gutta-percha. On réunit généralement plusieurs de ces âmes dans un tuyau en plomb qui sert également à compléter le circuit électrique. Parfois aussi, on dispose ces conducteurs deux à deux dans une même gaine isolante, en laissant entre eux une épaisseur suffisante de gomme pour éviter tout contact métallique; chaque appareil peut avoir ainsi son fil de retour distinct, ce qui supprime à peu près les effets si gênants d'induction entre les conducteurs ayant un parcours commun.

Câbles aériens. — On a construit également des câbles télégraphiques pouvant être suspendus. Dans ce cas, le caoutchouc, qui est moins sensible à l'action d'une température élevée que la gutta-percha, donne de meilleurs résultats que celle-ci. Les câbles aériens sont disposés autant que possible de manière à n'avoir à supporter qu'une faible traction.

Câbles sous-marins. — Les fils sous-marins sont toujours revêtus

d'une armature en fer dont la grosseur augmente à mesure qu'on se rapproche des côtes. Dans les grands fonds, en effet, les câbles ne peuvent être atteints par les ancres des navires et, l'eau n'étant pas agitée, ils n'éprouvent eux mêmes aucun déplacement; il suffit donc que leur armature résiste à l'effort qu'elle doit supporter pendant la pose; dans les fonds moyens, où ces conditions ne sont qu'imparfaitement réalisées, sans que les câbles courent pourtant de grands dangers, on augmente le diamètre des brins protecteurs; mais sur les côtes, où ils sont exposés à la fois à être dragués et à s'user contre les roches par suite des mouvements que leur impriment les vagues, leur armature doit être beaucoup plus puissante: certaines de ces carapaces pèsent plus de huit tonnes par kilomètre. On a cherché à préserver aussi les armatures contre l'action de la rouille en les enduisant d'un mastic bitumineux.

Les procédés employés pour la pose et le relèvement des câbles ont été considérablement perfectionnés depuis quelques années; il suffira de rappeler, pour donner une idée de leur puissance et de leur précision, qu'on est parvenu, par des fonds de plus de 4000 mètres, à retrouver, saisir, couper et ramener à bord le câble à relever. Les appareils et les méthodes employés pour déterminer la position des défauts qui se produisent dans ces longs conducteurs ne sont pas moins remarquables; ils permettent, en cas de dérangement, de circonscrire le champ des recherches et d'effectuer sûrement les réparations devenues nécessaires.

Cette industrie possède aujourd'hui une véritable flotte affectée à la surveillance et à l'entretien des six cents lignes télégraphiques qui sillonnent les mers du monde entier et dont le développement dépasse 120 000 kilomètres; elle met à contribution toutes les ressources de la science moderne dont elle a puissamment concouru à développer l'une des branches principales, l'électricité.

2° Paratonnerres.

On ne saurait parler des paratonnerres, sans prononcer le nom de Franklin. Nous ne ferons pourtant point ici l'histoire de cette belle invention; nous nous bornerons à décrire sommairement l'appareil du savant Américain et à indiquer les conditions essentielles de son fonctionnement.

Lorsqu'un nuage électrisé s'approche de la terre, il développe par induction, dans les parties du sol les plus voisines, de l'électricité de signe contraire à celle dont il est chargé; or, en vertu du pouvoir bien connu des pointes, cette électricité s'accumule de préférence sur les sommets naturels ou artificiels, tels que reliefs de terrain, arbres, bâtiments, et elle y atteint souvent une tension suffisante pour vaincre la résistance de la couche d'air qui sépare ces points culminants du nuage

inducteur : l'étincelle jaillit alors, les deux électricités se combinent à travers l'espace, le nuage est déchargé, du moins en partie, et la zone terrestre soumise à son influence revient subitement à l'état neutre. Ce dernier phénomène, désigné sous le nom de choc en retour, peut être fatal aux hommes et aux animaux aussi bien que la décharge directe ; il se fait parfois sentir assez loin du point où s'est produite la déflagration.

Rapprochant les faits de cette nature, bien souvent observés, de ses propres expériences et de celles effectuées par les physiciens de son époque, Franklin arriva à cette conclusion déjà pressentie par plusieurs savants : que l'électricité atmosphérique était identique à celle produite par les machines, et que, dès lors, il devait être possible de neutraliser à distance la charge d'un nuage orageux, de même qu'on soutire celle d'un conducteur, en lui présentant une pointe métallique. La célèbre expérience du cerf-volant, faite en 1752, vint confirmer cette théorie.

Les idées émises par Franklin eurent en France un grand retentissement, et au commencement de cette même année 1752 on installait pour les vérifier, sur plusieurs points élevés, des barres de fer communiquant avec le sol et dont la pointe tournée vers le ciel laissait par les temps orageux s'échapper des aigrettes lumineuses produites par la décharge partielle et successive des nuages électrisés ; mais ces expériences n'avaient pas encore de but utile : c'était à Franklin que devait revenir, quelque temps après, l'honneur d'en faire l'application à la protection des édifices et des personnes.

De ce qui précède, il résulte que la fonction d'un paratonnerre est double : en raison de sa situation élevée au-dessus des bâtiments, c'est sur lui que s'accumule la charge induite par le nuage qui passe à sa portée, et c'est entre sa pointe et cette nue qu'a lieu la déflagration lors d'une décharge violente ; mais le plus souvent cette décharge s'effectue lentement, graduellement et d'une manière silencieuse ; de telle sorte que les parties du sol voisines, influencées par induction, ne reviennent à l'état neutre que progressivement, c'est-à-dire sans danger pour les êtres animés compris dans cette zone.

Une installation de cette nature comporte trois choses essentielles : une flèche métallique, un câble conducteur et une communication avec la terre.

Le corps de la flèche est formé d'une barre de fer conique dont le diamètre est proportionné à la hauteur, qui varie elle-même suivant la surface du faitage où repose l'appareil : on donne ordinairement à cette flèche une longueur de cinq à dix mètres. Elle est terminée par une tige en cuivre, prolongée par une pointe en cuivre doré ou mieux encore en platine, ce métal s'oxydant moins que l'or et sa température de fusion étant beaucoup plus élevée que celle du cuivre. La pointe

terminale doit être aussi aiguë que possible afin de faciliter l'écoulement du fluide à mesure que la tension de celui-ci s'accroît. Cette considération a fait écarter l'emploi des boules, que quelques constructeurs avaient cru devoir substituer aux pointes. On a, par contre, proposé de multiplier les issues d'écoulement en plaçant autour de la tige centrale, et plus bas que la pointe principale, une série d'aigrettes secondaires.

Il est essentiel que les trois parties de la flèche soient reliées entre elles d'une manière intime.

La chaîne réunissant la flèche à la terre peut être en cuivre ou en fer ; dans ce dernier cas, on doit lui donner une section six à sept fois plus grande et qui ne saurait être moindre de quatre centimètres carrés. La surface des conducteurs jouant un rôle important dans les phénomènes d'électricité statique, certains physiciens donnent la préférence aux chaînes en fer qui, à conductibilité égale, présentent une surface beaucoup plus grande que celles en cuivre. Les chaînes de paratonnerres peuvent être formées soit d'un certain nombre de fils galvanisés tordus ensemble, soit de barres métalliques rigides ; mais la pose et surtout le raccordement de ces barres offrant des difficultés, on préfère généralement les fils câblés, qui s'adaptent mieux aux contours des bâtiments et dont les épissures se font aisément.

Les chaînes sont soutenues sur leur trajet par des crampons de forme convenable scellés dans le bâtiment. Il est bon d'isoler la chaîne de ses supports par des rondelles en verre ou en porcelaine. Disons à ce sujet qu'on n'est pas complètement d'accord sur la question de savoir si l'on doit relier au paratonnerre les grandes pièces métalliques telles que toitures, charpentes en fer, balcons, tuyaux de descente, etc. L'opinion de l'Académie des sciences, qui admet cette réunion, paraît avoir prévalu.

L'intimité du contact d'un paratonnerre avec le sol exerce sur le fonctionnement du système la plus grande influence ; cette communication doit, par conséquent, être établie avec un soin tout spécial. Si l'on dispose de conduites d'eau étendues et de diamètre suffisant, comme à Paris et dans les grandes villes, on peut les utiliser pour cet objet, concurremment avec les puits existant dans le voisinage de l'édifice intéressé. Lorsqu'on ne possède aucune de ces ressources, on peut encore pratiquer en terre un trou de plusieurs mètres qu'on emplit de braise de boulanger, au milieu de laquelle on introduit l'extrémité de la chaîne, préalablement galvanisée afin d'éviter l'oxydation. Il est toujours bon de ramifier le pied de ce conducteur en le reliant à des barres de fer pénétrant profondément en terre. Il va sans dire qu'on doit choisir de préférence, pour y enfouir le paratonnerre, les parties du terrain habituellement humides.

On peut conclure de ce qui vient d'être dit que la première condition

à réaliser dans un système de parafoudre, c'est la continuité : toutes les pièces entrant dans sa construction, depuis le sommet jusqu'à la base, doivent être en communication métallique parfaite entre elles et avec le sol ; toute interruption dans le circuit, toute résistance provenant d'un mauvais contact ou d'une terre défectueuse transformerait cet instrument de sécurité en une cause très sérieuse de danger. On ne saurait donc trop multiplier les précautions dans ce sens. C'est dans cet ordre d'idées que M. Melsens, s'inspirant d'ailleurs des principes posés par Faraday, a réalisé la belle installation qui protège contre la foudre l'hôtel de ville de Bruxelles.

Sur le sommet de la haute tour de cet édifice, il a disposé dans des directions différentes, et au-dessous de l'archange dont l'épée placée la pointe en l'air forme elle-même un premier paratonnerre, une série de tiges inclinées et d'aigrettes métalliques. Des tiges semblables établies aux étages inférieurs de la tour sur les faces des clochelons et sur la partie supérieure des bâtiments, portent le nombre de ces points à 428 ; elles sont toutes reliées entre elles par un réseau de conducteurs en fils de fer galvanisés enlaçant extérieurement le monument et communiquant entre eux à chaque étage à l'aide de fils transversaux. Tous ces conducteurs rassemblés dans la cour principale du monument sont noyés dans un bloc de zinc, puis soudés à un gros tuyau en fer qui plonge dans un puits où l'eau est toujours abondante. Ce tuyau est relié en outre aux conduites d'eau et de gaz de la ville.

Cette installation, qui a été combinée de manière à ne pas nuire à l'aspect architectural, peut être considérée comme le système protecteur le plus complet qu'on ait réalisé. On n'a pas hésité devant la dépense considérable qu'elle devait entraîner à cause de l'intérêt capital qui s'attache à la conservation du monument dont il s'agit.

Il est nécessaire de s'assurer de temps en temps de l'état des paratonnerres. L'une des méthodes employées pour effectuer cette vérification consiste à déterminer d'abord par l'un des procédés connus, à l'aide d'un fil volant préalablement étalonné et dont les deux bouts sont reliés respectivement au sommet et à la base de l'appareil, la résistance électrique de celui-ci : si cette résistance est conforme aux indications de la théorie, c'est que le paratonnerre est *continu* sur tout son parcours. — On s'assure ensuite que le fluide atmosphérique trouvera dans le sol un écoulement facile. A cet effet, on reporte l'extrémité inférieure du fil volant dans le sol humide, à quelque distance du pied de la chaîne, de manière à introduire une portion de la croûte terrestre dans le nouveau circuit ainsi formé : la résistance électrique trouvée dans ce cas ne doit pas être sensiblement supérieure à celle constatée lors de la première opération ; s'il en était autrement, c'est que le contact de la chaîne avec le sol laisserait à désirer.

Le cadre de cette notice ne permet pas d'entrer dans de plus grands développements. Nous renverrons ceux de nos lecteurs désireux d'approfondir cette intéressante question aux beaux travaux de l'Académie des sciences publiés en 1823, 1855, 1867, 1868, à ceux de la Commission chargée par la Ville de Paris d'étudier le même sujet, enfin, aux ouvrages spéciaux.

H. CLÉRAC.

ÉLECTROMÉTRIE

I. Introduction.

Les progrès actuels de l'électricité et de ses applications sont un exemple frappant des services mutuels que se rendent la théorie et la pratique. Toute science appliquée est une œuvre collective à laquelle collaborent les industriels qui n'envisagent cependant que la partie utile et commerciale : la théorie pose les principes, la pratique développe les conséquences; le savant sème, l'industriel féconde et récolte; mais, par un juste retour, les résultats de la pratique contribuent grandement à l'avancement de la théorie.

« Les applications importantes de l'électro-magnétisme à la télégraphie, écrivait en 1873 M. Maxwell¹, ont réagi sur la science pure en donnant une valeur commerciale aux mesures électriques précises et en procurant aux électriciens l'occasion d'expérimenter sur une échelle bien plus vaste que celle d'un laboratoire ordinaire. Cette demande de connaissances électriques et cette facilité de les acquérir par la pratique ont déjà eu de très sérieuses conséquences; elles ont stimulé l'activité des électriciens instruits et diffusé parmi les hommes pratiques des notions exactes éminemment propres à faire progresser la science de l'Ingénieur. »

« Il y a en ce moment, écrivait à la même époque M. Jenkin², deux sciences de l'électricité : celle des ouvrages généraux de physique, et celle plus ou moins connue des électriciens. Ces deux sciences parlent un langage différent et c'est un fait digne de remarque que la science des hommes pratiques est en quelque sorte plus scientifique que celle des traités. »

Le développement des entreprises de télégraphie sous-marine a fait de la mesure des grandeurs électriques, une opération usuelle : aussi s'est-on préoccupé de perfectionner, tout en le simplifiant, ce genre d'expérimentation. C'est en Angleterre, c'est-à-dire dans le pays qui a

1. *Electricity and magnetism*, 1873, préface, p. VIII.

2. *Ibid.*, introduction.

eu l'initiative de telles entreprises, qu'a pris naissance cette science pratique des électriciens. Spéciale d'abord aux électriciens voués à la télégraphie sous-marine, elle s'est imposée bientôt à tous ceux s'occupant de télégraphie et elle se vulgarise aujourd'hui de plus en plus, grâce au besoin de mesures électriques provoqué par les inventions récentes relatives à l'éclairage et au transport de la force par l'électricité. Les savants ont apprécié à leur tour le parti qu'ils pouvaient tirer, même dans les recherches purement théoriques, de ses appareils, de ses méthodes et de son langage, qui ont ainsi pénétré dans l'enseignement; en sorte que la distinction, dont parlait M. Jenkin, est en voie de disparaître et que l'unification des mesures électriques sera bientôt un fait accompli.

Il est à peine nécessaire d'insister sur l'importance d'un pareil résultat : en rapportant toutes les observations à un système commun d'unités, on rend les valeurs numériques des quantités physiques indépendantes des instruments particuliers qui ont servi à les mesurer, et on apporte, dans l'échange des idées et des découvertes scientifiques, des facilités du même ordre que celles introduites dans les transactions commerciales par l'adoption d'un système uniforme de mesures et monnaies.

II. L'unité des mesures conséquence de l'unité des forces.

Les mesures ont un rôle capital dans les sciences d'observation : elles servent à établir les lois et à les vérifier. Toutes ces sciences suivent la même marche progressive : d'abord, on constate simplement les faits, puis on s'occupe de les préciser ; on expérimente, on mesure, on compare ; les lois résultent enfin de la coordination des faits évalués numériquement. La constatation des premiers faits remonte souvent aux temps les plus reculés ; mais l'art d'expérimenter et de mesurer appartient à la science moderne. Abandonnant les errements du passé, la science moderne a renoncé à la recherche de l'absolu, c'est-à-dire de la nature et de l'essence des choses dont les notions sont inaccessibles ; elle a renoncé à la pierre philosophale et au mouvement perpétuel ; l'alchimie a fait place à la chimie, et la physique a succédé à la métaphysique¹.

La chimie a étudié la matière, sans se préoccuper de son essence ; elle a observé les propriétés des corps et leurs rapports ; elle a pesé les

1. « Le secret des découvertes de la science moderne, c'est tout simplement qu'elle n'a cherché que ce qui était accessible à nos moyens d'expérimentation, et si depuis peu d'années la science a tant trouvé, c'est que depuis peu d'années la science n'a cherché que ce qu'il était possible de trouver. » (Babinet, *Études et lectures sur les sciences d'observation et leurs applications pratiques*.)

corps et elle a reconnu que, quelles que soient les transformations physiques ou passagères, chimiques ou permanentes que subit un corps, le poids reste invariable (Lavoisier). La matière se conserve donc, première conséquence de ce principe que *dans la nature, rien ne se crée, rien ne se perd*¹; d'où résulte cette définition de la chimie : l'étude de la matière et de ses transformations.

La physique a étudié les forces naturelles, sans se préoccuper de leur cause primordiale : elle a mesuré les effets et déterminé leurs rapports. Des faits isolés passant à l'ensemble, elle a remarqué que des phénomènes, dissemblables en apparence, étaient le plus souvent connexes dans leur développement et elle a conclu que leur diversité pouvait tenir simplement à la diversité des organes par lesquels se perçoivent les sensations. A la conception d'agents distincts, *proprii generis*, elle a substitué celle de manifestations différentes du grand pouvoir d'activité de la Nature. Dès lors, rien ne pouvant se créer ni s'anéantir, ce qui disparaît sous une forme doit pouvoir se retrouver sous une autre forme ; en d'autres termes, ce qui échappe à un de nos sens doit devenir perceptible à un autre, l'effet mécanique comme chaleur, électricité ou lumière et réciproquement : il n'y a plus qu'à déterminer les équivalences. Pour exprimer ces équivalences, à la notion de *force vive* qui est spéciale aux masses en mouvement, à la notion de *travail* qui suppose le fait accompli, on ajoute la notion d'*énergie*, qui est la capacité d'effectuer du travail et qui s'applique indistinctement à toutes les forces naturelles, même à l'état de repos. Le principe de la conservation de la matière se trouve ainsi complété par celui de la conservation de l'énergie, et la physique devient l'étude de la force et de ses transformations.

Cette nouvelle manière d'envisager les phénomènes a eu des conséquences nombreuses et importantes : elle a donné naissance à la *thermodynamique* ou théorie mécanique de la chaleur et à la *thermo-chimie*, qui est le trait d'union entre la chimie et la mécanique générale.

L'application de la thermo-chimie aux phénomènes électro-chimiques a donné leur signification mécanique. La force électro-motrice d'une pile représente l'équivalent mécanique de l'action chimique ou de la chaleur qui correspond à la dissolution d'un équivalent électro-chimique² de zinc : d'où le moyen de la déterminer par des mesures calorimétriques. Les phénomènes de l'électrolyse, la polarisation des

1. gigni
De nihilo nihil, in nihilum nil posse reverti.

(*Perse*, sat. III, vers 83, 84).

C'est l'axiome fondamental de la philosophie d'Épicure, développé par Lucrèce (*De rerum nat.*, liv. I, vers 150, 206) et dont Lavoisier a fait un principe expérimental.

2. L'équivalent électro-chimique d'une substance est le poids de cette substance qui est dissous dans la pile, ou mis en liberté dans un voltamètre, pendant le passage de l'unité d'électricité. Il est proportionnel à l'équivalent chimique.

électrodes dans les piles, l'induction dans les moteurs électriques deviennent de simples corollaires de la conservation de l'énergie.

Les machines de toute espèce ne sont plus que des engins de distribution et de répartition de l'énergie : elles restituent, sous forme de travail mécanique ou de chaleur, l'énergie qui leur a été communiquée sous l'une ou l'autre de ces formes par les forces naturelles (chute d'eau, puissance musculaire, air en mouvement, actions chimiques, etc.). Dans cette transformation, l'électricité, quand elle se développe, n'est qu'un intermédiaire et n'a d'autre rôle que d'emmagasiner l'énergie, puisque elle la restitue toujours sous forme mécanique ou calorifique, l'énergie chimique n'étant d'ailleurs qu'une forme de l'énergie calorifique. On emmagasine de l'énergie en développant de l'électricité, de même qu'on emmagasine de l'énergie en élevant un poids ou en comprimant un gaz. Cette énergie est restituée pendant la décharge ou le passage du courant, comme elle est restituée par la chute du poids ou l'expansion du gaz. Mais, à l'état électrique, l'énergie peut se transporter à distance, et de là l'importance de cet intermédiaire pour l'utilisation des forces naturelles qui sur place resteraient sans emploi : sans doute l'échauffement du fil conducteur, les résistances passives et les réactions des engins de transformation absorbent une partie de l'énergie initiale, mais l'excédent devient disponible.

Enfin, l'énergie, sous quelque forme qu'elle se présente, étant toujours l'équivalent d'un travail mécanique, il en résulte que le travail est un terme de comparaison universel pour tous les phénomènes naturels, et en conséquence tous ces phénomènes pourront être mesurés en fonction des unités de la mécanique. C'est le fondement du *système absolu d'unités électriques* proposé par l'Association Britannique pour l'avancement des sciences, et adopté aujourd'hui par la plupart des électriciens.

III. Unités électriques dans le système absolu.

On mesure une grandeur en la comparant à une grandeur de même espèce prise pour unité. L'étalon est la représentation matérielle de l'unité; il doit être construit et conservé dans des conditions qui assurent son invariabilité. Cela fait, on laisse de côté les considérations qui ont fixé le choix de l'unité, que l'on définit alors par sa représentation matérielle. Le mètre n'est plus la dix millionième partie du quart du méridien terrestre : ce qui était vrai d'après les calculs de Delambre ne l'est plus depuis que le méridien a été mesuré avec plus de précision. Le mètre, c'est la longueur que possède, à la température de la glace fondante, une certaine règle soigneusement conservée et dont on fait des copies.

Comme on ne peut comparer que des grandeurs de même nature,

chaque espèce distincte de grandeur doit avoir son unité propre; mais s'il existe des relations mathématiques entre les grandeurs considérées, la mesure de certaines d'entre elles pourra s'exprimer à l'aide d'unités définies par leurs relations avec d'autres unités acceptées comme *fondamentales*. Ces unités sont dites *dérivées*.

Un système composé d'unités fondamentales et d'unités dérivées est dit *absolu*.

Ainsi la longueur, la surface et le volume sont des grandeurs distinctes; mais comme la mesure de la surface et celle du volume peuvent se déduire de la mesure de la longueur, on simplifie le calcul des aires et des capacités, en prenant pour unités le carré et le cube dont les côtés ont l'unité de longueur. Le mètre est une unité fondamentale; le mètre carré et le mètre cube sont des unités dérivées. On réduit ainsi le nombre d'étalons fondamentaux types auxquels il faudra toujours comparer les étalons dérivés, tels que les étalons de capacité, construits pour les besoins de la pratique.

Toutes les quantités mécaniques peuvent être mesurées à l'aide de trois unités fondamentales, dont deux sont introduites par l'étude du mouvement : ce sont les unités de *longueur* et de *temps*; elles ont, pour étalons, le mètre et la seconde du temps solaire moyen. La troisième résulte de l'étude des forces : l'unité habituelle de force est le *gramme*, c'est-à-dire, théoriquement, le poids à Paris d'un centimètre cube d'eau distillée à son maximum de densité; pratiquement, la millième partie du kilogramme-étalon conservé à Paris. La masse étant le quotient du poids par l'accélération de la pesanteur, l'unité de masse est alors une unité dérivée. Mais, dans ce système, l'unité de force et l'unité de masse dépendent toutes deux de la pesanteur et, par suite, les mesures dans lesquelles entrent ces unités ne sont complètes que si l'on connaît l'intensité de la pesanteur au lieu de l'observation. Aussi, quand Gauss voulut établir un système uniforme d'observations magnétiques dans des régions où l'action de la pesanteur n'était pas la même, il prit la masse comme unité fondamentale, et rendit par là les valeurs numériques de l'intensité magnétique indépendantes de la pesanteur. L'unité fondamentale de masse, dans le système absolu, est la masse qui pèse un gramme à Paris. La comparaison des masses se fait par la pesée, ce qui est très commode dans les applications de la dynamique où entrent des moments d'inertie.

L'unité de force devient une unité dérivée : c'est la force qui, agissant sur l'unité de masse, lui imprime l'unité d'accélération. En adoptant, comme unités fondamentales, le mètre pour la longueur et le gramme pour la masse, la densité de l'eau serait représentée par un million et la densité d'une substance quelconque serait un million de fois son poids spécifique. En prenant le centimètre au lieu du mètre, la densité

de l'eau devient égale à un, et les densités sont égales aux poids spécifiques. De là le système centimètre-gramme-seconde, ou par abréviation, système C G S. Dans ce système, l'unité dérivée de force s'appelle la *dyne*; celle de travail, le *erg*.

Passons aux grandeurs électriques. Celles dont on a surtout à s'occuper sont au nombre de cinq : la *quantité* Q , la *force électro-motrice* ou *différence de potentiel* E , la *capacité* C , l'*intensité* I et la *résistance* R . Les unités correspondantes pourront être dérivées des trois unités fondamentales de la mécanique et s'obtiendront par simple définition, s'il existe entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques cinq relations distinctes. Or, entre les grandeurs électriques, nous avons trois relations simples qui font dépendre trois d'entre elles des deux autres : elles résultent de la loi de Ohm ($I = \frac{E}{R}$), de la définition de l'intensité ($Q = It$) et de celle de la capacité ($Q = CE$). En prenant, pour étalons de force électro-motrice et de résistance, la force électro-motrice d'un élément Daniell et la résistance à zéro d'une colonne de mercure d'un mètre de long et un millimètre carré de section (unité mercurielle de Pouillet et Siemens), on pourra exprimer les autres unités en fonction de celles-ci.

Si à ces relations on ajoute la loi de Joule¹, exprimant le travail W d'un courant constant ($W = I^2Rt$), on pourra définir toutes les unités électriques en fonction de l'une d'entre elles et de l'unité de travail.

Comme cinquième relation, nous avons, soit la loi fondamentale de l'électro-statique (formule de Coulomb), exprimant la force qui s'exerce entre deux quantités d'électricité ; soit l'une des conséquences de la loi fondamentale de l'électro-dynamique (formule d'Ampère), exprimant la force qui s'exerce entre deux courants ; soit l'une des conséquences de la loi fondamentale de l'électro-magnétisme (formule de Laplace), exprimant la force qui s'exerce entre un courant et un aimant. De là trois systèmes absolus d'unités électriques, mais qui se réduisent en définitive à deux systèmes distincts ; car, en multipliant par 2 la formule d'Ampère, telle qu'on l'écrit habituellement en France, et remplaçant les courants par leurs aimants équivalents, le système électro-dynamique devient identique au système électro-magnétique.

Le système électro-statique est commode pour les mesures des phénomènes d'électricité au repos ; mais le système électro-magnétique est préférable pour la mesure des phénomènes d'électricité en mouvement,

1. La force électro-motrice entre deux points d'un circuit étant E , le travail produit par le transport d'une quantité Q d'un point à l'autre est $W = QE = EIt = I^2Rt$. Quand on décharge un condensateur contenant une quantité Q , la différence de potentiel E va en diminuant de E à zéro pendant la décharge : le travail de la décharge ou l'énergie du condensateur est alors seulement $\frac{1}{2} QE$.

qui se déduit en général d'observations faites avec des aimants. Par exemple, un galvanomètre ordinaire des tangentes donne facilement la valeur de l'intensité d'un courant en unités absolues électro-magnétiques en fonction de la déviation, de la longueur du fil, du rayon du cadre et de la composante horizontale du magnétisme terrestre. Les unités électro-magnétiques dépendent évidemment des unités magnétiques, et les considérations qui ont conduit Gauss à préférer, comme unité fondamentale dans un système absolu de mesures magnétiques, la masse de l'unité habituelle de poids au poids lui-même, s'imposent aussi dans la mesure absolue des grandeurs électriques.

Les unités absolues électro-magnétiques de résistance et de force électro-motrice, dans le système C G S, sont extrêmement petites; pour avoir des unités plus appropriées aux usages pratiques, on a multiplié les premières par des puissances de dix, choisies de façon à avoir une unité de résistance voisine de l'unité mercurielle et une unité de force électro-motrice voisine de l'élément Daniell. L'unité pratique de résistance a reçu le nom de *Ohm* ou unité B A (British Association); l'unité pratique de force électro-motrice a reçu celui de *Volt*. Les autres unités pratiques se déduisent du Ohm et du Volt par les relations $I = \frac{E}{R}$, $Q = It$ et $Q = CE$. Ce sont : le *Weber* pour la quantité, le *Weber par seconde* pour l'intensité, le *Farad* pour la capacité.

Les noms de ces unités, précédés des préfixes *mega* ou *micro*, désignent des unités un million de fois plus grandes ou plus petites. Ainsi les grandes résistances s'expriment en *megohms*, et les capacités qu'on mesure le plus souvent s'expriment en *microfarads*. L'intensité de courant qui fait fonctionner les récepteurs télégraphiques Morse est d'environ 15 millièmes de l'unité pratique d'intensité : ces millièmes s'appellent des *milliwebers*.

IV. Mesure absolue des grandeurs électriques.

Parmi les grandeurs électriques, les unes peuvent toujours être mesurées en unités absolues *directement* et *d'une façon indépendante* : ce sont la force électro-motrice en mesure statique¹, l'intensité et la quantité en mesure magnétique et en mesure dynamique. Les autres ne peuvent être mesurées qu'*indirectement*, soit par leurs *relations* avec les grandeurs qui précèdent, soit par *comparaison* avec des grandeurs de même espèce qu'elles et dont on connaît la valeur numérique en unités absolues.

1. La quantité électrique ne s'obtient directement en mesure statique que si le corps chargé est assez petit pour remplacer la boule fixe dans la balance de Coulomb.

La détermination directe par l'expérience de la valeur absolue des grandeurs de la première catégorie est toujours une opération délicate. Elle exige l'emploi d'*instruments absolus*, c'est-à-dire construits de manière à renfermer tout ce qui est nécessaire pour effectuer la détermination d'une façon indépendante. Ces instruments sont coûteux, peu portatifs et difficiles à manier¹. On ne s'en sert que pour *étalonner* des instruments plus simples, *enregistrant* seulement le phénomène sur une *graduation arbitraire*, et que l'on peut alors utiliser sans qu'il soit nécessaire de connaître exactement la relation qui lie leurs indications à la quantité à mesurer. Il suffit pour cela de dresser une table à deux colonnes où l'on inscrit en regard les lectures fournies par l'instrument simplifié et par l'instrument absolu dans l'observation du même phénomène : c'est ce qu'on appelle prendre les *constantes* de l'instrument arbitraire. Quand on a cette table pour toutes les divisions de son échelle, un simple enregistreur remplace pour les usages pratiques un appareil absolu. Enfin, si on dispose d'un enregistreur tel que les lectures de l'échelle soient proportionnelles aux quantités à mesurer ou à une fonction connue de ces quantités, une comparaison faite une fois pour toutes avec un instrument absolu donnera la *constante*, c'est-à-dire le coefficient unique par lequel il faut multiplier les lectures de l'échelle arbitraire, pour avoir en unités absolues la mesure de la grandeur inconnue.

Une grandeur appartenant à la seconde catégorie se déduira de ses relations avec une de celles de la première, par l'observation d'un phénomène dans lequel elles interviennent toutes deux. Ainsi, par une mesure de l'intensité d'un courant et par celle du travail qu'il développe dans le circuit, la formule de Joule ($W = I^2 R t = I E t$) donnera la résistance et la force électro-motrice ; connaissant Q et E on aura la capacité par $Q = CE$. Cette méthode détournée peut donner d'excellents résultats dans le laboratoire, mais elle ne saurait convenir à des mesures usuelles. Aussi pour les grandeurs qui, comme la résistance et la capacité, ne sont pas susceptibles de mesure directe par les instruments étalonnés, on s'est préoccupé d'établir un *étalon matériel*, afin de ramener leur mesure à une simple comparaison entre grandeurs de même espèce.

La détermination de ces étalons doit être faite avec un soin extrême ; car s'ils s'écartaient trop de la valeur de l'unité, ils constitueraient par le fait une unité arbitraire, et on perdrait les avantages du système absolu.

La résistance est évidemment la grandeur électrique qui se prête le mieux à une représentation matérielle, remplissant les conditions de

1. Ce sont les électromètres, galvanomètres et électro-dynamomètres absolus.

permanence que doit avoir un étalon, et à la formation de multiples et de sous-multiples de l'unité. Le Comité de l'Association Britannique a mesuré avec la plus grande précision¹, la valeur en unités absolues électro-magnétiques de certaines bobines en fil de maillechort (argent allemand), alliage qui présente des qualités remarquables de permanence. Cela fait, les méthodes ordinaires de comparaison ont permis de construire des étalons-types de l'unité B A. Le *Ohm* doit alors être défini comme la résistance, à une température donnée, d'une certaine bobine-étalon conservée à Kew et dont des copies sont livrées au commerce. En prenant des multiples ou des sous-multiples de la longueur du fil qui forme l'étalon, on aura des multiples ou des sous-multiples de l'unité; mais il est plus sûr d'opérer par comparaison électrique avec l'étalon-unité.

Au moyen de résistances connues et d'un instrument étalonné pour la mesure de l'intensité, on peut obtenir la capacité en mesure absolue magnétique² : c'est ainsi en effet que l'on détermine la capacité d'un certain condensateur en unités absolues, et que l'on obtient ensuite par comparaison un condensateur d'une capacité égale à l'unité. Les condensateurs-étalons ont une capacité de 1 microfarad. En construisant des condensateurs identiques, mais de surface deux, trois fois plus grande, ou en ajoutant en surface un certain nombre de condensateurs égaux à l'unité, on forme des multiples de celle-ci; mais il sera prudent de vérifier par comparaison électrique ces étalons secondaires.

La force électro-motrice s'obtient facilement en mesure magnétique, connaissant l'intensité et la résistance : en mesure statique, elle a son instrument absolu. Néanmoins, il est commode d'avoir un étalon de cette grandeur. On emploie généralement à cet effet l'élément Daniell, qui diffère peu du Volt, et on détermine avec précision sa valeur exacte avec des liquides de composition donnée. Il a été reconnu cependant que cet élément varie souvent de 5 pour 100 et plus sans cause apparente, et M. Clark a proposé comme étalon un élément zinc-mercure, dont la force se maintient sensiblement constante dans un circuit

1. Pour que la détermination de l'unité de résistance pût être refaite au besoin dans des conditions identiques, on a voulu, comme pour le *mètre*, lui donner une base toujours existante, et, la mesure absolue de l'intensité reposant déjà sur la mesure du magnétisme terrestre, on a choisi comme force électro-motrice du courant employé dans l'expérience, non pas la force due à une action chimique qui n'aurait pas présenté une constance suffisante, mais la force d'induction engendrée par le mouvement uniforme d'un conducteur dans le champ magnétique de la terre. La résistance que l'on mesure est alors celle d'un certain nombre de tours de fil de maillechort enroulé sur un anneau tournant autour d'un diamètre vertical, et cette résistance s'exprime en unités absolues en fonction de la longueur du fil, de la vitesse angulaire et du rayon de l'anneau, et de la déviation que prend un petit aimant suspendu à son centre.

2. La capacité d'un condensateur en mesure statique s'obtient par comparaison avec un condensateur *absolu*, c'est-à-dire un condensateur de forme géométrique, dont la capacité peut être calculée d'après ses dimensions.

ouvert, ou fermé très peu de temps. En accouplant des éléments en série, on formera des multiples, dont il sera bon toujours de vérifier l'exactitude par comparaison électrique avec l'étalon-unité. Enfin, avec une pile donnée et une série de résistances égales, on réalise une échelle décroissante de potentiels.

Une fois en possession de ces étalons matériels, il est clair qu'on a un étalon d'intensité par l'intensité du courant produit par l'élément étalon dans un circuit de l'unité de résistance, et un étalon de quantité par la charge que l'élément étalon communique au condensateur étalon.

Toutes les grandeurs électriques ayant ainsi leur étalon, leur mesure absolue pour toutes se réduit dans la pratique à une comparaison de grandeurs de même espèce¹.

Pour comparer des grandeurs de même espèce, on a trois manières de procéder :

1° On *oppose* la grandeur inconnue à une grandeur connue, de façon que leurs effets se contrarient; on constate la *différence* et on voit quelle est la plus grande des deux. On prend alors une grandeur connue plus petite ou plus grande que la première et on arrive par tâtonnements à *réduire à zéro* ou à *compenser* l'effet de la grandeur inconnue, à obtenir l'*équilibre* ou la *balance* des effets; de l'égalité des effets on conclut à l'égalité des grandeurs. D'où les noms de méthodes d'*opposition*, d'*différentielles*, de *réduction à zéro*, de *compensation*, d'*équilibre*, de *balance*. Le type, c'est la pesée ordinaire. Comme il s'agit seulement de constater la destruction de l'effet que produit individuellement chacune des grandeurs, l'instrument d'observation est simple et on se préoccupe surtout de lui donner une grande sensibilité; mais on a besoin d'un étalon susceptible d'une variation continue ou d'une série d'étalons gradués. Si l'on a les moyens de réduire ou d'amplifier un des effets dans une proportion connue, il ne sera pas nécessaire que la valeur numérique de l'étalon variable, dont on dispose, reproduise celle de la grandeur à mesurer. Il suffira, dans ce cas, de constater l'égalité de l'effet réduit ou amplifié avec l'autre effet intégral et on en conclura le rapport des grandeurs. Ainsi avec une balance, dont l'un des bras a une longueur double de l'autre, un poids peut être équilibré par un poids moitié moindre. C'est le principe appliqué dans les mesures électriques quand on se sert d'un *galvanomètre différentiel* à circuits inégaux ou quand on met

1. Pour passer d'un système d'unités à un autre, il est indispensable de connaître dans chaque système les dimensions des unités, c'est-à-dire la puissance à laquelle chaque unité fondamentale entre dans les unités dérivées. Or les dimensions des unités de résistance et de capacité ne renferment pas la masse; il en résulte que si on prenait le poids, au lieu de la masse, comme unité fondamentale, à la seule condition de conserver les mêmes unités de longueur et de temps, les étalons matériels de résistance et de capacité conserveraient leurs valeurs absolues : fait à noter, car il s'agit précisément des seules grandeurs qui ne puissent être mesurées d'une façon indépendante par des instruments absolus.

une dérivation sur un des circuits égaux, et aussi quand on emploie des branches de proportions inégales dans le *pont* ou *balance de Wheatstone*.

2° Une grandeur inconnue produit un certain effet, on lui substitue une grandeur connue capable de produire le même effet. On conclut à l'égalité par l'axiome : deux quantités égales à une troisième sont égales entre elles. Le type, c'est la double pesée. Les instruments d'observation devront toujours donner la même indication pour la même valeur de la quantité à mesurer et avoir une échelle divisée pour enregistrer cette indication. Mais il n'est pas nécessaire de connaître la relation entre la lecture et la valeur correspondante de la quantité. Les divisions de l'échelle pourront donc être arbitraires. La méthode exigera, comme la précédente, un étalon variable ou des étalons gradués. On pourra aussi réduire l'un des effets ou les deux effets dans une proportion connue; on y sera quelquefois obligé pour ramener les indications de l'instrument dans les limites de l'échelle : c'est l'objet des dérivations dans les mesures électriques.

3° On mesure séparément l'effet de la grandeur inconnue et celui d'une grandeur *fixe* connue : du rapport des effets on déduit celui des grandeurs. On n'a besoin que d'un étalon fixe, mais l'instrument d'observation doit être tel que les lectures de l'échelle soient proportionnelles aux quantités à mesurer, et alors le rapport des lectures fait connaître celui des quantités; ou bien, que les quantités à mesurer soient proportionnelles à une fonction connue des indications de l'instrument (comme, par exemple, le sinus ou la tangente) et alors le rapport des quantités est égal à celui des valeurs des fonctions. Si on a un instrument à indications proportionnelles dont la constante a été déterminée, une seule observation faite avec la quantité inconnue donnera sa mesure absolue. Le type, c'est la pesée par les balances romaines, les pesons et les bascules. Comme dans les méthodes précédentes, si les indications de l'instrument venaient à sortir des limites de l'échelle, on réduirait au préalable la quantité correspondante dans une proportion connue, de manière à rendre l'observation possible.

En résumé, trois catégories de méthodes :

1° Méthodes dites de *réduction à zéro*, dans lesquelles la chose à observer est la non-existence d'un phénomène. L'instrument n'a pas besoin d'échelle, mais il faut un étalon variable ou des étalons gradués.

2° Méthodes dites de *substitution*, dans lesquelles le phénomène est simplement enregistré. L'instrument a une échelle arbitraire, mais il faut encore un étalon variable ou des étalons gradués.

3° Méthodes plus spécialement dites de *comparaison*, dans lesquelles le phénomène observé est évalué numériquement; il faut un instrument

de *mesure*, mais un étalon fixe suffit et on peut s'en passer, si l'on connaît la constante de l'instrument.

Pour mesurer les phénomènes électriques, il faut donc : 1° des instruments d'observation ; 2° des étalons fixes ou gradués de résistance et de capacité ; 3° certains appareils accessoires pour la commodité des expériences.

V. Appareils de mesure électrique.

Instruments d'observation.

Les instruments d'observation des phénomènes *électro-statiques* sont les *électroscopes* et les *électromètres*. Les électromètres permettent d'évaluer numériquement les charges électriques ou les différences de potentiel ; les électroscopes constatent simplement leur existence ; mais avec un électroscope sensible, on obtiendra des mesures indirectes par l'emploi des méthodes de réduction à zéro. Une lame d'or délicatement suspendue entre deux corps possédant des charges électriques contraires (*électroscope de Bohnenberger*) constitue un instrument capable de déceler les moindres traces d'électricité : la lame s'incline du côté du corps qui possède une électrisation contraire à la sienne, et la répulsion de l'autre corps s'ajoute à l'attraction de celui-ci ¹. Ce petit appareil permet d'établir rigoureusement les lois fondamentales de l'électricité : développement simultané et en quantités équivalentes des deux espèces d'électrisation, quel que soit le mode de production, frottement, induction, actions chimiques ; absence absolue d'électrisation à l'intérieur d'un conducteur creux, d'où l'on peut conclure mathématiquement que les forces électriques suivent la loi de l'inverse carré des distances. L'égalité de deux charges contraires se reconnaît en constatant qu'il n'y a plus d'électrisation quand on les réunit : d'où l'application de l'électroscope à la mesure des capacités ².

La *balance de torsion*, dont Coulomb s'est si bien servi pour poser les fondements de la science électrique, est un instrument absolu ; car la torsion qui fait équilibre à l'action électrique peut se mesurer en unités absolues.

1. Le principe de l'électroscope de Bohnenberger (feuille d'or entre les deux pôles d'une pile sèche) a été appliqué par M. Thomson à son électromètre à quadrants et au *syphon-recorder*, employé comme récepteur de télégraphie sous-marine. Il est aussi utilisé dans quelques électro-dynamomètres.

2. Avec un simple électroscope à balles de sureau, Cavendish (1771-1781) a vérifié de cette façon que les phénomènes électriques obéissent à la grande loi de la nature, précédant ainsi les mesures directes de Coulomb (1787). Avec le même instrument, il a construit des condensateurs à feuilles d'étain étalonnés par comparaison avec une sphère suspendue au milieu de son laboratoire et découvert ainsi le phénomène que Faraday a retrouvé en 1837 et qu'il a appelé la *capacité inductive spécifique*. Les recherches de Cavendish ont été publiées seulement en 1879, par les soins de Clerk Maxwell. Rappelons encore les expériences remarquables par lesquelles, avec l'électroscope à décharges, Gauguin a vérifié sur des conducteurs médiocres les lois de Ohm dans l'état permanent et l'état variable, et établi que les phénomènes de conduction et ceux d'induction sont régis par les mêmes lois mathématiques.

Dans cet instrument, comme d'ailleurs dans tous les appareils électrométriques, il importe d'être garanti contre l'induction des corps extérieurs et surtout contre l'électrisation irrégulière des parois de la cage de verre. Faraday a donné le moyen pratique d'y arriver par l'emploi d'un *écran électrique*, c. à d. d'une cage de métal, ou en fil ou feuille de métal, qu'on interpose entre la cage de verre et les parties essentielles de l'instrument et qu'on met en communication avec la terre, ou, dans certaines expériences, avec une source à potentiel constant. La balance de torsion mesure directement la charge de la boule fixe; mais si l'on met celle-ci en communication, par un fil métallique long et fin, avec un corps électrisé situé à distance, l'instrument donne les mêmes indications, quel que soit le point du corps touché avec le fil, et mesure alors la différence de potentiel entre ce corps et la cage de l'appareil.

L'*électromètre de Peltier* est un instrument à graduation arbitraire, dans lequel la force électrique est équilibrée par l'action de la terre sur une aiguille aimantée solidaire du conducteur mobile.

Sir William Thomson a construit une série d'électromètres dont l'ensemble permet de mesurer des différences de potentiel depuis $\frac{1}{400}$ d'élément Daniell jusqu'à 80 ou cent mille de ces éléments, c. à d. jusqu'aux potentiels les plus élevés des machines de frottement. Le plus sensible de tous, l'*électromètre à réflexion* ou *électromètre à quadrants*, dérive de l'électroscope de Bohnenberger. Une aiguille d'aluminium, en forme de deux secteurs de cercle opposés par le sommet, est suspendue au centre d'une boîte en métal ronde et plate, coupée en quatre quarts ou *quadrants* ne se touchant point, mais reliés électriquement deux à deux et en croix. On fait communiquer chacune de ces deux paires de quadrants avec l'un des corps dont on veut mesurer la différence de potentiel; à l'aide d'un petit multiplicateur d'induction statique ou *rechargeur*, on donne à l'aiguille une charge d'un potentiel très élevé: une *jauge électrométrique* contrôle la constance de cette charge. Pour éviter que des pertes accidentelles ne diminuent beaucoup le potentiel de l'aiguille, celle-ci est reliée à une bouteille de Leyde à grande surface, dont la cage de verre de l'instrument est le diélectrique, et qui constitue un grand réservoir d'électricité dont le niveau ne baisse pas sensiblement s'il n'y a que de petites fuites, et peut d'ailleurs toujours être rétabli par le rechargeur. Pour de *petites déviations*, la force qui s'exerce entre l'aiguille et les deux paires de quadrants est proportionnelle au potentiel de l'aiguille et à la différence de potentiel des corps reliés aux quadrants. Cette force est équilibrée par la torsion de la suspension (à fil simple ou bifilaire), qui, dans ces conditions, est proportionnelle à l'angle de déviation. Les indications sont enfin amplifiées par la méthode de réflexion (miroir, lampe et échelle): l'effet est le même que si l'aiguille

était prolongée par un style sans poids dont l'extrémité parcourerait les divisions d'un cercle de rayon double de la distance du miroir à l'échelle.

On a essayé de simplifier cet instrument en remplaçant la boîte des quadrants par un plateau, en supprimant le rechargeur et la jauge; mais alors la proportionnalité des différences de potentiel aux déviations n'est plus vraie que dans des limites très étroites.

L'électromètre à quadrants n'est *symétrique*, c. à. d. ne donne des déviations égales et contraires pour des différences de potentiel égales et de signes contraires, qu'autant que les potentiels dont on mesure la différence sont eux-mêmes égaux et de signes contraires. Cette condition est remplie quand on mesure la force électro-motrice d'une pile. Mais si l'une des paires de quadrants est reliée à la terre, l'autre étant toujours en communication avec le corps électrisé, les déviations pour des valeurs égales du potentiel sont plus grandes quand il est négatif, que quand il est positif, en supposant l'aiguille électrisée positivement : ce qui est un inconvénient dans les appareils à enregistrement photographique, tels que ceux employés dans l'étude de l'électricité atmosphérique. M. Mascart a rendu l'appareil toujours symétrique dans ses indications en mettant l'aiguille en communication avec le corps dont on cherche le potentiel, et les quadrants avec les parties opposées d'une pile fournissant l'électrisation auxiliaire.

L'*électromètre absolu* de M. Thomson et ses autres électromètres (*portatif, à longue échelle*) dérivent de l'*électromètre à disques de Harris*: dans ce dernier, l'action électrique entre deux disques parallèles et très voisins, dont l'un suspendu au plateau d'une balance et l'autre placé au-dessous, était équilibrée par des poids dans l'autre plateau. Dans les instruments de M. Thomson, l'action électrique est équilibrée par la force *constante* d'un poids ou d'un ressort, et le potentiel se déduit de cette force et de la distance, mesurée par une vis micrométrique, qui sépare les disques quand l'équilibre est atteint. Il faut signaler, dans l'électromètre absolu, l'*anneau de garde* qui entoure de très près le disque mobile, lequel devient ainsi la partie centrale d'un grand disque composé du disque mobile et de l'anneau : avec cette disposition, les irrégularités que les bords amènent dans la distribution électrique se produisent sur l'anneau fixe et non sur la partie mobile, et on rentre dans les conditions de la théorie.

Erman (1809) et plus tard Draper (1845) ont reconnu qu'une colonne étroite de mercure, dont le ménisque terminal est en contact avec de l'eau acidulée, se déplace brusquement sous l'influence d'un courant électrique assez faible pour ne pas décomposer l'eau. Sur le même principe¹, M. Lippmann (1873) a construit un *électromètre capillaire* qui

1. Wheatstone (1875) a imaginé un *relais à mercure*, destiné aux transmissions télégraphiques par les câbles sous-marins, reposant sur la découverte d'Erman.

ne donne des déviations proportionnelles que sur une échelle très courte, mais qui, en raison de son extrême sensibilité, convient très bien aux méthodes de réduction à zéro.

L'étude des phénomènes de *courant* fournit plusieurs catégories d'instruments de mesure correspondantes aux divisions de cette étude. L'observation des phénomènes *mécaniques* a donné naissance aux *galvanomètres*, fondés sur l'action des courants sur les aimants, et aux *électrodynamomètres*, fondés sur l'action des courants sur les courants.

On peut faire entre les *galvanoscopes* et les *galvanomètres proprement dits* la même distinction qu'entre les électroscopes et les électromètres. Les galvanoscopes ordinaires consistent en un cadre ou bobine renfermant un certain nombre de tours de fil métallique isolé par de la soie et entourant une aiguille de *déclinaison* ou d'*inclinaison*, qui oscille sur un pivot central. On augmente la sensibilité par l'emploi d'une suspension en fil de cocon et d'un couple d'*aiguilles astatiques*¹ : tantôt l'une des aiguilles est intérieure au cadre et l'autre extérieure, tantôt chaque aiguille a son cadre spécial et les fils des deux cadres sont reliés de façon que leurs actions s'ajoutent. Dans le premier cas, l'aiguille extérieure peut servir elle-même d'aiguille *indicatrice*, en la prolongeant, s'il est nécessaire, par un style léger parcourant les divisions d'un cadran ; dans le second cas, le système est muni d'une indicatrice spéciale montée sur l'axe commun des aiguilles aimantées. Pour éviter d'avoir à orienter l'instrument, on crée, à l'aide d'un *aimant directeur*, un méridien artificiel qui ramène l'aiguille au zéro de la graduation quand le courant cesse de passer. Si les pôles de l'aimant directeur sont disposés comme ceux de la terre, cet aimant ajoute son action à celle de la terre ; s'ils sont disposés inversement, les deux actions se retranchent, et en plaçant l'aimant à une distance convenable, on peut les faire se compenser et rendre l'appareil tout à fait astatique.

Le *galvanomètre différentiel* (*Becquerel*) sert à constater l'égalité de deux courants : par l'enroulement simultané sur le cadre de deux fils identiques, on a deux circuits égaux que l'on fait parcourir en sens contraires par les courants que l'on compare. En donnant aux deux circuits des nombres de tours différents, on établit entre leurs actions un certain rapport que l'on détermine expérimentalement et l'instrument fait connaître si les deux courants comparés sont entre eux dans ce rapport, qui est la *constante* de l'instrument. Quelquefois le second

1. Un couple d'aiguilles *astatiques* se compose de deux aiguilles solidaires, ayant à peu près la même aimantation, et disposées parallèlement avec les pôles contraires en regard ; l'action directrice de la terre sur un pareil système est la différence des actions qu'elle exerce sur chacune des aiguilles.

circuit est constitué par une bobine *extérieure* au cadre et placée à une distance variable de l'aiguille. On peut comparer alors des courants très différents, en envoyant le plus fort dans la bobine extérieure. Celle-ci est mobile sur une règle divisée, et on détermine la constante pour un certain nombre de positions de la bobine (*méthode différentielle de Siemens*).

Les *galvanomètres* ou *boussoles des sinus ou des tangentes* (*Pouillet*) permettent de comparer les courants par les sinus ou les tangentes de leurs indications. Dans la *boussole des sinus*, le cadre est mobile autour d'un axe vertical : quand le courant fait dévier l'aiguille, on tourne le cadre en la suivant jusqu'à ce qu'elle s'arrête dans son plan et on lit l'angle dont le cadre a tourné. La proportionnalité aux sinus est rigoureuse et il n'est pas nécessaire que le cadre soit circulaire ; mais l'instrument ne peut mesurer tous les courants, car la valeur de 90° , qui est la plus grande que puisse atteindre l'angle, correspond à une certaine intensité finie.

Dans la *boussole des tangentes*, le cadre est fixe et on lit la déviation de l'aiguille : elle peut servir à la mesure des courants de toute intensité, puisque la déviation de 90° correspond à une tangente infinie ; mais, au delà de 45° , l'instrument est peu sensible, car il faut une grande différence entre les tangentes pour avoir une différence appréciable entre les angles. La théorie de cette boussole suppose que les pôles de l'aiguille restent toujours à la même distance des diverses parties du courant : pour se rapprocher de cette condition, il faut que l'aimant soit très petit et que le cadre soit circulaire et de grand diamètre. On prolonge d'ailleurs l'aimant par un style indicateur dont l'extrémité parcourt les divisions de la graduation.

La boussole des tangentes peut servir de boussole des sinus en rendant le cadre mobile et remplaçant l'aiguille des tangentes par une aiguille ordinaire en forme de losange allongé.

Le *multiplicateur conique* de *M. Gaugain* se rapproche beaucoup plus que le galvanomètre ordinaire des tangentes des conditions de la théorie : le cadre forme la base d'un cône droit au sommet duquel est placée l'aiguille, la hauteur du cône étant la moitié du rayon de base. On double l'action avec deux cadres placés symétriquement de chaque côté de l'aiguille.

Weber mesure les courants par l'action d'un cadre rectangulaire sur un *magnétomètre* (barreau aimanté suspendu) placé à distance. La déviation est très petite, mais il compense cette petitesse par la précision de la mesure en empruntant à *Gauss* le principe de la réflexion : un miroir collé à l'aimant réfléchit une échelle divisée disposée à quelque distance, et on lit la division réfléchie qui passe au réticule d'une lunette placée sur l'échelle.

Pour obtenir que l'aiguille se fixe du premier coup à sa position d'équilibre, Weber a *amorti* les oscillations en entourant l'aimant d'une masse de cuivre rouge, qui arrête les vibrations autour de la position d'équilibre par l'effet des courants induits que l'aimant en mouvement développe dans la masse. C'est le principe des galvanomètres *apériodiques* ou *amortisseurs*. On peut se contenter de placer sur le prolongement de la suspension une plaque d'aluminium plongeant dans un vase rempli d'eau à hauteur convenable.

La boussole des tangentes devient un *instrument absolu* si l'on connaît le nombre des tours de fil, les dimensions du cadre et la valeur de la composante horizontale du magnétisme terrestre. Il en est de même de la boussole des sinus, quand le cadre est circulaire et l'aimant très petit. Comme ces données sont difficiles à obtenir exactement, il vaut mieux déterminer la *constante* par comparaison électrique avec une grande *bobine-étalon*, construite de façon à rendre aussi uniforme que possible dans sa partie centrale le champ de force qu'elle développe, et ne contenant que quelques tours de fil afin de pouvoir déterminer avec précision la longueur et la position de chacun d'eux et calculer leur action. On prend la constante en plaçant le galvanomètre dans l'intérieur de la bobine-étalon, de façon que les tours de fil des deux bobines soient concentriques et dans le méridien magnétique; puis on envoie, dans les deux circuits, des courants de direction inverse et dont on fait varier le rapport des intensités, à l'aide de résistances, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro par l'action combinée des deux bobines. Le rapport des intensités, déduit d'ailleurs des résistances des appareils et de celles introduites dans l'expérience, donne la constante.

Du moment qu'on peut avoir la constante par comparaison avec un instrument absolu, on doit se préoccuper surtout de construire un appareil sensible et donnant des déviations proportionnelles. C'est un point de vue tout différent: on cherche à rendre le champ de force du courant autour de l'aimant très intense et non plus très régulier: au lieu de quelques tours de fil enroulé sur un grand cadre, on prend des bobines ne laissant à l'aimant que l'espace nécessaire pour osciller librement, et on met le plus grand nombre de tours possible dans le voisinage de l'aimant, en formant les premières spires de fil très fin, sauf à employer pour les dernières du fil plus gros afin que l'appareil n'ait pas une résistance trop grande. On donne aux bobines une forme cylindrique aplatie, car les tours de fil placés suivant l'axe de l'aiguille ont plus d'action que ceux disposés latéralement. L'aimant est un tout petit ressort de montre, afin de ne pas trop s'écarter cependant des conditions théoriques; pour augmenter l'aimantation, on en prend plusieurs et on les colle au dos d'un petit miroir très léger. Une lampe placée derrière une échelle divisée, à la distance de 0^m,75 ou 1^m du miroir,

envoie sur celui-ci un faisceau lumineux à travers une fente de l'échelle. Un aimant directeur ramène, au repos, l'image réfléchie de la fente sur le zéro de l'échelle. Quand on fait passer le courant, les lectures de l'échelle sont égales au produit de la distance de l'échelle au miroir par la tangente d'un angle double de la déviation du miroir. Mais comme ces déviations, ramenées dans les limites de l'échelle, sont toujours très petites, on peut remplacer $\text{tang. } 2\delta$ par $2 \text{ tang. } \delta$, en sorte qu'on a par le fait un galvanomètre des tangentes dont l'aiguille indicatrice atteint une longueur de 1^m,50 ou 2 mètres, tout en restant impondérable, et dont les déplacements, sur une échelle droite divisée en parties égales, sont proportionnels à l'intensité du courant. Pour les courants intenses, on ramène les déviations dans les limites de l'échelle en ajoutant des résistances dans le circuit du courant, ou en dérivant une portion du courant à travers une résistance reliant les deux bornes auxquelles aboutit le fil du cadre. Habituellement chaque instrument est muni de trois *bobines de dérivation*, que l'on introduit à volonté et qui ne laissent passer autour de l'aimant que le $\frac{1}{10}$, le $\frac{1}{100}$, ou le $\frac{1}{1000}$ du courant total.

En multipliant par 10, 100 ou 1000 la déviation obtenue, on obtient la déviation qui correspond au courant total; mais il faut remarquer que ce courant total est plus fort que le courant qui aurait traversé le galvanomètre, s'il n'eût pas été dérivé; car la résistance de l'appareil a été réduite par la dérivation. On évitera ce changement en employant des *résistances de compensation*, convenablement calculées, que l'on ajoute dans le circuit principal en même temps que l'on introduit les dérivations. Certains galvanomètres ont ainsi leur jeu de dérivations complété par les résistances de compensation correspondantes. Les dérivations permettent de comparer des courants très inégaux.

Le galvanomètre à miroir le plus simple est le *galvanomètre parlant*, employé comme appareil de réception dans la télégraphie sous-marine: le miroir et l'aimant sont fixés à un fil tendu par ses deux bouts dans un petit cylindre de cuivre introduit dans l'ouverture centrale.

Dans le *galvanomètre marin*, destiné aux essais des câbles électriques à bord des navires, on a soin que le fil tendu passe par le centre de gravité du système formé par l'aimant et le miroir, pour éviter les oscillations du roulis et du tangage. Enfin, pour préserver l'instrument des perturbations que produiraient les forces magnétiques extérieures, (notamment le déplacement des masses de fer des machines en mouvement et la variation de la masse de fer qui constitue l'armature du câble et qui change à tout instant pendant l'immersion ou le relèvement), on l'entoure d'une cage épaisse en fer; car le magnétisme ne traverse pas une enceinte magnétique d'épaisseur suffisante.

Les *galvanomètres astatiques à réflexion* ont une bobine autour de chaque aimant. L'aimant supérieur, ou le système des petits aimants,

est collé au miroir ; l'aimant inférieur est muni d'une petite girouette en aluminium pour amortir les vibrations par la résistance de l'air. Dans quelques instruments, dans ceux destinés à des cours, par exemple, on empêche les vibrations de la salle de se communiquer au miroir, en prolongeant la tige d'aluminium, qui rend les aimants solidaires, et la terminant par une lame du même métal plongeant dans l'eau ou l'huile.

Dans le *galvanomètre astatique différentiel à réflexion*, les bobines supérieure et inférieure qui entourent chacun des aimants astatiques sont formées de deux parties : les deux moitiés antérieures de chacune des bobines constituent un des circuits, et les deux moitiés postérieures l'autre circuit. Pour avoir un appareil parfaitement différentiel, on égalise séparément l'effet magnétique de chaque circuit et leur résistance. Pour cela, on ajoute au circuit le plus faible quelques tours de fil que l'on place dans un tube de laiton, qui peut glisser dans un tube fixe situé derrière la bobine supérieure, sur le prolongement de l'axe du miroir. En approchant ou éloignant le tube mobile de l'aimant, on arrive à l'égalité complète des deux actions. On compense ensuite, s'il y a lieu, l'inégalité de résistance des deux circuits, par une résistance auxiliaire, placée dans le circuit le moins résistant, de façon à ne pas agir sur l'aimant.

Les quatre extrémités des circuits aboutissent à quatre bornes, qui établissent les communications de l'instrument soit en différentiel, soit en simple avec l'un ou l'autre des circuits, ou avec les deux circuits parcourus successivement par le courant de façon à ajouter leurs effets (disposition en *tension*), ou avec les deux circuits parcourus simultanément et parallèlement par le courant de façon à ajouter aussi leurs effets (disposition en *quantité*). Dans la disposition en quantité, la résistance est réduite au quart de celle de l'appareil disposé en tension. Le jeu de *dérivations* correspond à la disposition en tension.

Le *galvanomètre différentiel de M. Clark*, qui est destiné à être transporté, a une aiguille aimantée ordinaire montée sur un pivot. Chaque circuit est muni d'une dérivation au $\frac{1}{100}$.

En donnant au galvanomètre une résistance très grande par rapport aux autres résistances du circuit, on pourra comparer directement, par les intensités des courants qu'elles produisent, les différences de potentiel de deux points reliés à l'instrument, ou les forces électro-motrices de diverses sources (galvanomètre de *tension*). Par contre, si l'on veut étudier les variations d'intensité d'un courant, ou mesurer la résistance intérieure d'une source, ou comparer des courants sans les altérer sensiblement, la résistance du galvanomètre doit être faible par rapport aux résistances du reste du circuit ou des sources que l'on étudie (galvanomètre de *quantité*).

Certains galvanomètres sont munis de deux circuits, l'un très résistant,

l'autre peu résistant. Ils ont souvent deux graduations obtenues par comparaison avec un instrument absolu, l'une en *Volts* pour les potentiels, l'autre en *Webers* pour les intensités.

Divers instruments ont été récemment imaginés pour la mesure des courants énergiques engendrés par les machines magnéto ou dynamo-électriques. On peut se servir à cet effet du *galvanomètre d'Obach*, qui est un galvanomètre des tangentes dont le cadre vertical est rendu mobile autour de son diamètre horizontal et peut s'incliner plus ou moins sur le plan de l'aiguille. La déviation pour une intensité donnée est proportionnelle au *cosinus* de l'angle du cadre avec la verticale, et par suite diminue quand cet angle croît. On l'appelle aussi *galvanomètre des cosinus*.

Le *galvanomètre à arête* de M. Deprez n'a pas d'aiguille aimantée en acier, mais il est muni de 18 petites aiguilles en fer doux, montées parallèlement sur la même arête ou axe commun, et placées entre les longues branches d'un fort aimant en fer à cheval qui les polarise et les dirige dans son plan. Le fil est enroulé sur un cadre situé entre les aiguilles et les branches de l'aimant. Une aiguille indicatrice fixée à angle droit sur l'axe parcourt une graduation, et l'instrument peut être étalonné par comparaison avec un instrument absolu ; ou bien encore, on équilibre l'action magnétique par un poids mobile sur un bras de levier solidaire de l'axe. Dès que le courant passe, l'aiguille saute brusquement à sa nouvelle position d'équilibre, où elle vibre un instant comme un diapason¹.

Dans un autre *mesureur de courant*, M. Deprez remplace les aiguilles de fer doux et le cadre fixe par une bobine de fil enroulé longitudinalement, dont l'axe est placé entre les branches de l'aimant permanent et parallèlement à elles. L'aimant et la bobine sont disposés tantôt horizontalement, tantôt verticalement. Dans le premier cas, le courant pénètre par des godets de mercure dans la bobine mobile : elle s'incline dans un sens ou dans l'autre et l'action est mesurée par la distance à laquelle il faut placer un poids sur un levier solidaire de la bobine, pour la ramener à sa position initiale. Dans le second cas, la bobine est suspendue par les fils qui amènent le courant et dont la torsion fait équilibre à l'action électrique. Un miroir porté par la bobine permet d'appliquer la méthode de réflexion à la mesure de la déviation. Par une disposition imitée du *syphon-recorder* de Thomson, on concentre les lignes de force du champ sur les tours de fil à l'aide d'un cylindre de

1. Ce galvanomètre est donc *apériodique*. Un instrument devient apériodique quand la période des vibrations propres de la partie mobile est très petite par rapport à la durée du phénomène à enregistrer. D'où la règle pratique qu'il faut donner à la partie mobile (l'aiguille ou l'aimant et le miroir) une masse très faible et employer une force directive très grande. Cette règle a déjà été appliquée par M. Thomson dans son *dead bead speaking galvanometer*.

fer doux *fixe*, placé à l'intérieur de la bobine. Ces appareils sont munis d'un second circuit, consistant en une lame étroite d'aluminium formant un simple cadre rectangulaire très peu résistant, que traverse le courant.

Enfin, pour mesurer la différence de potentiel entre deux points du circuit d'une machine dynamo, MM. *Siemens et Halske* emploient un *galvanomètre de torsion*, dans lequel la force exercée sur un aimant, en forme de dé à coudre renversé, fendu longitudinalement et dont chaque moitié constitue un pôle, est équilibrée par la torsion d'un ressort en spirale.

Deux courants peuvent encore être comparés par la force attractive qu'exerce sur une armature de fer doux un électro-aimant, placé successivement dans le circuit de chacun d'eux. C'est le principe de la *balance électro-magnétique* de M. *Becquerel*.

Pour compléter l'énumération des instruments destinés à la mesure des courants permanents par leurs phénomènes magnétiques, ajoutons que le *téléphone*, grâce à sa sensibilité, peut être employé comme galvanoscope dans les méthodes de réduction à zéro. Comme il ne fonctionne que sous l'action de courants vibratoires, il faut avoir soin d'intercaler un trembleur ou un diapason entretenu électriquement, qui ouvre et ferme le circuit à de très petits intervalles.

La *quantité* d'électricité qui passe dans un courant instantané, tel qu'un courant d'induction ou les courants de charge et de décharge des condensateurs, se déduit, par application des formules balistiques, de l'*élongation*, c'est-à-dire de la déviation instantanée et passagère que prend l'aiguille par l'effet de l'impulsion qu'elle reçoit. Il importe, pour avoir des résultats dignes de confiance, que cette élongation ne soit pas diminuée par la résistance de l'air. On appelle *galvanomètres balistiques* les instruments dans lesquels cette précaution est prise. MM. *Ayrton et Perry* se servent d'un galvanomètre astatique à réflexion dans lequel ils remplacent chaque aimant par un système de 20 petits aimants, formant la charpente d'une sphère dont la surface est composée de segments taillés dans une balle de plomb creuse. Deux sphères pareilles, réunies par une tige, constituent un système astatique, au mouvement duquel l'air n'oppose qu'une résistance négligeable.

Les *électro-dynamomètres* sont les appareils de mesure fondés sur l'action des courants sur les courants. Ils donnent des indications proportionnelles au carré de l'intensité des courants, et par suite indépendantes du sens du courant. Ils sont donc très propres à la mesure des *courants alternatifs*, tels que les courants d'induction.

L'avantage de ces instruments sur les galvanomètres, pour des mesures absolues, consiste en ce que, ne renfermant pas d'aimants, il est facile de rendre leurs indications indépendantes du magnétisme terrestre. L'*électro-dynamomètre de Weber* se compose d'une bobine fixe et d'une bobine intérieure à suspension bifilaire, dont les spires sont concentriques à celles de la bobine fixe, les axes des deux bobines étant d'ailleurs à angle droit. Les fils de suspension amènent le courant de l'une à l'autre, et la torsion du bifilaire fait équilibre à l'action des bobines. Les déviations de la bobine mobile sont enregistrées par la méthode du miroir ¹.

L'Association Britannique a fait construire un *grand électro-dynamomètre étalon* pour la détermination des constantes des galvanomètres et plus généralement des bobines ou hélices (nombre de tours, somme des aires des cercles, etc.). La bobine fixe de cet appareil est la bobine étalon, dont on a parlé à propos des galvanomètres; la bobine mobile peut être enlevée et remplacée par le galvanomètre ou l'hélice dont on veut mesurer les constantes.

Dans l'*électro-dynamomètre à poids* ou *balance électro-dynamique*, la bobine mobile est placée à l'extrémité d'un fléau de balance, et on mesure l'attraction de la bobine fixe, placée parallèlement à la première et au-dessous d'elle, par le poids qui lui fait équilibre à l'autre bout du fléau.

Dans d'autres appareils, la bobine mobile est suspendue à l'un des bras d'une balance de torsion, entre deux bobines parallèles fixes, dont l'une l'attire et l'autre la repousse, de façon que les actions s'ajoutent. En répétant cette disposition sur l'autre bras, on double l'action et l'effet du magnétisme terrestre est détruit, si les bobines suspendues sont traversées par le courant dans des directions opposées.

Les électro-dynamomètres sont employés dans la pratique pour la mesure des courants alternatifs des machines dynamo. MM. *Siemens et Halske* ont construit à cet effet un *électro-dynamomètre de torsion* qui mesure les intensités, tandis que leur galvanomètre de torsion mesure les potentiels.

La quantité et l'intensité se mesurent par les *phénomènes électro-chimiques* à l'aide des *voltamètres*. Tous les voltamètres traversés par le

1. La bobine bifilaire peut être indépendante de la bobine fixe et placée à distance avec son centre sur le prolongement de l'axe de la bobine fixe ou sur la perpendiculaire à cet axe menée par le centre de celle-ci; en d'autres termes, les axes des deux bobines peuvent être placés dans les positions relatives des *aimants de Gauss*. La théorie des appareils ainsi disposés, comme celle des galvanomètres et des bobines agissant à distance sur des magnétomètres, se déduit simplement de la théorie des aimants de Gauss, en remplaçant les bobines par leurs aimants équivalents.

même courant décomposent la même quantité d'électrolyte : leurs indications sont donc *absolues*, en ce sens qu'elles ne dépendent pas de l'instrument particulier dont on s'est servi, tandis que les instruments magnétiques ou dynamiques ont chacun leur constante propre. On s'est servi longtemps comme unité de courant du volume du gaz détonant, ou du volume de l'hydrogène seulement, ou du poids de ce gaz dégagé dans une minute dans un *voltamètre à eau acidulée*. Le poids dégagé dans un temps donné mesure alors la quantité d'électricité qui a passé pendant ce temps. Pour des expériences précises, il est préférable d'employer des *voltamètres à sulfate de cuivre* ou à *sels d'argent* avec des électrodes du métal correspondant, c'est-à-dire de cuivre ou d'argent, à raison de l'équivalent élevé de ces métaux. On prend l'accroissement de poids de l'une des électrodes, ou la diminution de poids de l'autre, ou mieux la moyenne des deux ; et connaissant l'équivalent électrochimique du métal, la mesure en webers s'obtient facilement.

Rappelons, mais pour mémoire, car ce n'est pas un procédé usuel, qu'on peut mesurer la force électro-motrice d'une pile par la chaleur de combinaison de ses réactions chimiques.

Les *phénomènes calorifiques* permettent de mesurer l'énergie d'un courant par les méthodes calorimétriques et l'emploi de l'équivalent mécanique de la chaleur. Connaissant le travail et la résistance, la formule de Joule donnera l'intensité en mesure absolue, et l'intensité entrant au carré dans cette formule, la méthode sera applicable aux courants alternatifs.

Étalons de résistance et de capacité.

Une *bobine de résistance* se compose d'un fil métallique de résistance connue, qu'on peut facilement introduire ou supprimer dans un circuit. Le fil est recouvert de soie, puis enroulé *en double*, c'est-à-dire en commençant par le milieu, afin que les courants induits qui circulent dans une moitié soient détruits par ceux qui circulent dans l'autre moitié.

Dans les *étalons* et les *copies de l'unité BA*, ce fil, le plus souvent en maillechort (argent allemand), quelquefois en platine-iridium ou platine-argent, a de 1 à 2 mètres de long et un diamètre de 0,5 à 0,8 millimètre. Ses extrémités sont soudées à des barres de cuivre : il est recouvert de deux couches de soie, puis noyé dans de la paraffine solide et enfermé dans une cage de laiton mince, afin de pouvoir être plongé dans l'eau et prendre rapidement la température pour laquelle la résistance est exactement d'une unité, température marquée d'ailleurs sur la bobine.

La résistance électrique des alliages choisis est peu affectée par les variations de température, elle est assez grande pour ne pas nécessiter trop de fil; elle ne s'altère pas par la cuisson, c'est-à-dire l'exposition prolongée à une haute température, ce qui est très important, car les alliages qui ne s'altèrent pas par la cuisson ne s'altèrent pas avec le temps; elle change peu par le recuit. Enfin ces alliages ne s'oxydent pas à l'air et sont très ductiles.

Les séries d'étalons gradués constituent des *rhéostats* ou *boîtes de résistance*. Les extrémités du fil de chaque bobine sont soudées à des plaques de cuivre séparées les unes des autres par des trous que l'on peut boucher avec des chevilles de laiton à tête isolante. On introduit une bobine dans le circuit en retirant la cheville du trou correspondant, on la supprime du circuit en enfonçant la cheville.

Les boîtes de résistance renferment le plus souvent 16 bobines, dont les résistances combinées entre elles donnent tous les nombres de 1 à 10 000. Dans d'autres appareils, on a 4 séries de 9 bobines chacune; les bobines de chaque série sont égales entre elles et représentent les unités, dizaines, centaines, etc. La résistance voulue est alors obtenue en introduisant une cheville par série. On peut encore prendre des bobines représentant l'unité et les puissances successives de 2 (système binaire): c'est le système qui exige le moins de bobines et qui permet la vérification la plus facile du rhéostat. Enfin, on obtient des résistances inférieures à l'unité en se servant de bobines disposées en *arcs parallèles* (ou en quantité): l'inverse de la résistance composée ainsi obtenue est la somme des inverses des résistances individuelles.

D'autres rhéostats ont la forme circulaire, et on fait varier les résistances en déplaçant un bras, mobile autour du centre, et dont l'extrémité vient appuyer sur des contacts placés aux points de jonction des bobines consécutives. Cette extrémité doit avoir une forme telle qu'avant de quitter un contact, elle touche le suivant afin de ne pas couper le circuit pendant qu'on fait varier la résistance.

Le *rhéostat à curseur* est un rhéostat composé de dix ou cent bobines égales dont les jonctions sont reliées à de petits blocs sur lesquels peut glisser successivement un *curseur* muni d'un contact. Mis dans le circuit d'une pile, ce rhéostat fournit une échelle de potentiels très utile dans certaines expériences.

MM. Thomson et Varley ont construit une échelle de potentiels, donnant tous les nombres de 1 à 10 000, avec deux rhéostats à curseur: l'un, contenant 101 bobines de 100 ohms chaque, forme le circuit principal; l'autre, composé de 100 bobines de 2 ohms, constitue un circuit dérivé qui peut relier deux points quelconques du premier, pourvu qu'ils soient séparés par deux bobines.

Le *rhéostat de Wheatstone*, composé d'un fil de diamètre uniforme,

enroulé partie sur un vis en ébonite et partie sur un cylindre métallique, donne une résistance qui peut varier d'une *façon continue* ; il est plus simple de se servir d'un fil résistant bien calibré, tendu sur une échelle divisée et sur lequel glisse un curseur muni d'un contact, qui fait varier sa longueur utile ou le rapport des deux résistances comprises entre le contact et les extrémités du fil.

La *balance* ou *pont de Wheatstone* est la méthode de réduction à zéro la plus employée dans la mesure des résistances. Concevons quatre résistances a, b, c, d , disposées suivant les quatre côtés d'un quadrilatère dont les diagonales sont occupées l'une par la pile, l'autre par le galvanomètre : aucun courant ne traverse celui-ci, si les résistances satisfont à la relation $ac = bd$; et réciproquement, si le galvanomètre ne dévie pas, c'est que la relation existe ; d'où, connaissant trois des quantités a, b, d , on aura, pour la quatrième $c = b \frac{d}{a}$. La méthode peut être appliquée de deux manières : tantôt la résistance de *comparaison* b est variable, et le rapport des *branches de proportion* $\frac{d}{a}$ est fixe ; tantôt la résistance de comparaison b est fixe et le rapport $\frac{d}{a}$ doit pouvoir prendre toutes les valeurs.

La première forme est la plus employée : on place souvent dans la même boîte un rhéostat de 1 à 10 000 unités qui forme la résistance de comparaison variable, et deux séries de trois bobines (10, 100, 1000) ; celles-ci forment les branches de proportion entre lesquelles on peut établir des rapports égaux à $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{10}$, 1, 10 et 100, en sorte que l'on peut mesurer des résistances comprises entre 0,01 et 1 000 000.

La seconde forme est ce qu'on appelle le *pont à curseur*, ou à *fil calibré*. Un fil métallique, très résistant et de diamètre bien régulier, est tendu sur une règle divisée ; ses extrémités sont reliées l'une à la résistance fixe de comparaison, l'autre à la résistance inconnue. Un curseur, mobile sur le fil et relié à l'une des bornes du galvanomètre, établit entre les deux parties du fil qu'il sépare un rapport qui peut prendre toutes les valeurs possibles ¹. L'usage d'un fil calibré est peu répandu dans la pratique courante, à cause des précautions nombreuses qu'il faut prendre pour éviter les causes d'erreur ; mais il est appliqué souvent dans le laboratoire, soit à la construction des copies de l'unité comme dans le *pont de l'Association Britannique*, où l'on étalonne par approximations successives ; soit dans la mesure des très petites résistances, comme dans la *double balance de Thomson* et dans celle de *Matthiessen et Hockin*. De même que, pour avoir des mesures de longueur exactes, on substitue le

1. Le rhéostat à curseur de Thomson et Varley peut remplacer le fil divisé.

mètre à *traits* au mètre à *bouts*, de même, dans ces deux dernières méthodes, on compare des résistances comprises entre deux traits, et l'on élimine les difficultés tenant à l'imperfection des contacts, soit en rendant les résistances de ces contacts négligeables par rapport à d'autres résistances auxiliaires (Thomson), soit en s'arrangeant de telle sorte que ces résistances fassent partie de la branche du galvanomètre, où elles sont sans influence sur la mesure, puisque, quand l'équilibre est établi, aucun courant ne passe dans cette branche (Matthiessen et Hockin).

Parmi les méthodes de réduction à zéro, il faut citer encore, pour la comparaison des forces électro-motrices, la méthode de *compensation* et celle du *potentiomètre de Clark*, qui est un perfectionnement de la précédente et où l'on opère par une double réduction à zéro.

Le *galvanomètre universel de Siemens* permet de mesurer, soit les résistances par un pont à fil calibré, soit les forces électro-motrices par la méthode de compensation.

S'il n'y a pas courant entre deux points, c'est que ces deux points sont au même potentiel : on peut donc remplacer le galvanomètre par un électromètre dans les méthodes de réduction à zéro.

Les trois méthodes de réduction à zéro, par le *galvanomètre différentiel*, par le *pont de Wheatstone* et par la *compensation de deux piles*, ont une importance pratique considérable ; car, outre leur application aux mesures, elles donnent *trois* solutions de la *télégraphie double*, ou transmission *simultanée* de deux dépêches en sens contraire.

Enfin, quand la résistance inconnue est trop grande pour être mesurée par le pont, on la met en circuit avec une pile et un galvanomètre, et on note la déviation, que l'on compare avec la *constante de sensibilité* du galvanomètre, c'est-à-dire la déviation fournie par la *même* pile dans un circuit d'une résistance connue, 1 megohm par exemple. Si le galvanomètre est à déviations proportionnelles, le rapport des déviations est inverse des résistances totales des deux circuits : d'où l'on déduit la résistance inconnue, connaissant les résistances de la pile et du galvanomètre.

L'*étalon de capacité* est un condensateur composé de feuilles d'étain superposées et séparées les unes des autres par des lames de mica ; on relie ensemble toutes les feuilles de rang pair, et toutes celles de rang impair, et on a les deux armatures que l'on fait aboutir chacune à un bloc de cuivre : pour décharger le condensateur, il suffit d'introduire une cheville métallique entre ces deux blocs. Sa capacité est d'un microfarad. Les condensateurs-étalons en usage sont formés quelquefois de 4 condensateurs, respectivement de 1, 2, 3 et 4 dixièmes d'unité, disposés dans la même boîte de façon à pouvoir être facilement assemblés en surface. On emploie beaucoup, dans la télégraphie sous-marine, des étalons de

$\frac{1}{3}$ microfarad, parce que la capacité d'un mille marin de câble ordinaire en gutta-percha a une valeur très voisine de celle-ci. Pour les condensateurs destinés à des mesures moins précises, tels que ceux employés dans la télégraphie double, on remplace le mica par du papier paraffiné.

Les condensateurs à diélectrique solide sont d'une construction assez simple et donnent une grande capacité sous un petit volume; malheureusement leur capacité n'est pas bien définie à cause des phénomènes de décharge résiduelle¹, et, comme la charge qu'ils prennent dépend de la durée de leur communication avec la source, il faut déterminer cette durée dans les expériences comparatives. L'air est le seul diélectrique sûr pour les étalons; mais il faut qu'il soit desséché et renfermé dans un vase bien clos, car les moindres poussières changent l'épaisseur de la couche isolante et établissent des dérivations entre les armatures. On a songé naturellement à prendre, comme étalons, les condensateurs *absolus*, c'est-à-dire d'une forme géométrique telle qu'on peut calculer rigoureusement leur capacité en mesure statique, en ayant leurs dimensions : la sphère isolée dont s'est servi Cavendish, ou les deux sphères concentriques de Faraday. Mais une sphère isolée a une capacité faible, et il est difficile d'obtenir deux surfaces bien sphériques et bien concentriques et de mesurer avec précision leur distance et leurs rayons. Les capacités des condensateurs à plaques parallèles et à cylindres concentriques peuvent être calculées approximativement; ces condensateurs sont précieux dans les expériences électro-statiques, car on peut faire varier leur capacité d'une façon continue, en changeant au moyen d'une vis micrométrique la distance des plaques des premiers ou la longueur des parties qui se recouvrent dans les seconds.

En assemblant des condensateurs en *surface* ou en *cascade*, on obtient des systèmes dont la capacité se calcule facilement; toutes les questions de condensateurs se ramènent d'ailleurs à des questions de résistances, en traitant un condensateur comme un conducteur dont la résistance aurait pour valeur l'inverse de la capacité. L'inverse de la capacité s'appelle la *résistance inductive*. Il est dès lors facile de comprendre l'application aux mesures de capacité des méthodes de réduction à zéro; par exemple, la substitution de condensateurs aux résistances dans deux des branches du pont, ou même dans les quatre. On compare aussi les capacités de deux condensateurs en déterminant la valeur des potentiels auxquels il faut les charger, l'un positivement, l'autre négativement, pour

1. Maxwell a démontré mathématiquement que tout diélectrique, qui n'est pas parfaitement homogène, doit donner lieu à des phénomènes de décharge résiduelle, quand bien même chacune des substances qui le composent n'en produirait pas si elle était seule.

qu'ils prennent des charges susceptibles de se neutraliser exactement. Ces expériences peuvent se faire, soit avec l'électromètre, soit avec le galvanomètre ; mais l'électromètre maintient la différence de potentiel qu'il constate entre deux points, tandis que le galvanomètre la détruit. Le premier donne donc des indications *permanentes*, tandis que celles du second sont *passagères*.

Le galvanomètre *balistique* permet de comparer les capacités par les quantités d'électricité que leur communique une même force électromotrice.

On compare enfin les forces électro-motrices par les charges qu'elles donnent à un même condensateur, et c'est là un des usages les plus fréquents des condensateurs dans les mesures électriques.

Instruments accessoires.

Les instruments accessoires employés dans la mesure électrique sont très simples et leur mécanisme est facile à saisir à la simple inspection. Ce sont :

Les *commutateurs-interrupteurs*, pour envoyer le courant ou le supprimer à volonté sur une direction ou sur une autre (commutateurs ronds à manette, ou carrés à chevilles) ;

Les *commutateurs-inverseurs*, pour changer le sens du courant, tantôt dans tout le circuit en intervertissant les pôles de la pile, tantôt dans le galvanomètre seulement en intervertissant les fils aux bornes d'entrée et de sortie (commutateurs à roulette, à chevilles, etc.) ;

Les *clés de court circuit*, mettant le galvanomètre ou une résistance hors du circuit, en ouvrant au courant un passage sans résistance ;

Les *clés de contact* (manipulateurs), pour envoyer le courant ; les *clés doubles ou à inversion* (manipulateurs à inversion), pour envoyer à volonté un courant positif ou négatif ; les *clés à trois ressorts*, pour établir et interrompre le contact de pile toujours avant celui du galvanomètre, et éviter ainsi le passage, dans l'instrument, des charges et décharges ;

Les *clés de décharge* (clés de Lambert, de Webb, de Sabine, etc.), qui établissent la communication du circuit avec la pile, ou avec la terre, ou qui l'isolent au contraire à la fois de la pile et de la terre.

VI. Conclusion.

L'emploi du système absolu a pour résultat de simplifier la solution des problèmes électriques qui se présentent dans la pratique, en supprimant les coefficients d'expérience qui compliquent les formules quand on se sert d'unités arbitraires. « Le mot *absolu*, dit le rapport du Comité de l'Association Britannique de 1862, n'implique nullement une précision plus grande dans la mesure, ni une construction plus

parfaite de l'unité employée : il signifie seulement que la mesure, au lieu d'être une simple comparaison avec une quantité arbitraire de la même espèce, est rapportée à certaines unités fondamentales que l'on admet en principe. L'utilité du système absolu se résume à éviter des coefficients en passant d'une espèce d'unité à une autre. Il est évident qu'on peut exprimer tous les rapports entre les diverses grandeurs à mesurer, quelque arbitraires et différentes que soient les unités, mais chaque opération nécessite l'introduction de facteurs ; et de plus *quand les rapports entre plusieurs espèces de mesure ne sont pas immédiatement évidents, l'usage du système absolu conduit beaucoup plus rapidement à une connaissance générale de ces rapports.* »

L'exactitude de cette assertion a été bientôt confirmée de la façon la plus brillante et la plus inattendue, et la connaissance des rapports entre les deux systèmes de mesure absolue a conduit à des résultats de la plus haute importance pour l'avancement de la science. Pour passer d'un système d'unités dérivées à un autre système, il est indispensable de connaître les *dimensions* de ces unités, c'est-à-dire les puissances à laquelle les unités fondamentales de longueur, temps et masse entrent dans l'expression algébrique de l'unité dérivée. En examinant ces dimensions, on voit immédiatement que le rapport entre les unités de quantité ou d'intensité, dans les deux systèmes, s'exprime par une vitesse, et que les rapports entre les autres unités s'expriment par l'inverse de cette même vitesse, ou par son carré, ou par l'inverse de son carré¹. La valeur numérique de cette vitesse a été obtenue expérimentalement de plusieurs manières, en mesurant une même grandeur électrique dans les deux systèmes, et on a trouvé qu'elle était d'environ trois cent millions de mètres par seconde, c'est-à-dire *sensiblement égale à la vitesse de la lumière*² : les divers nombres obtenus par les expérimentateurs ne diffèrent pas plus entre eux que ne diffèrent entre elles les différentes déterminations de la vitesse de la lumière.

1. Le rapport est indépendant de l'unité de masse et par suite resterait le même si l'on prenait le poids comme unité fondamentale.

2. En partant de cette idée qu'un corps électrisé animé d'un mouvement rapide doit produire les effets d'un courant électrique, Maxwell a pu donner une conception physique de la vitesse qui représente le rapport des unités. Imaginons deux plans indéfinis, parallèles, chargés d'électricité de la même espèce, et animés d'un mouvement uniforme dans la même direction ; leurs charges statiques tendront à se repousser, tandis que les courants résultant du mouvement tendront à s'attirer, et, pour une certaine vitesse, il arrivera que leur répulsion électrostatique sera équilibrée par leur attraction électro-dynamique : cette vitesse doit être précisément celle qui représente le rapport des unités, c'est la vitesse de la lumière.

Les expériences récentes de M. Rowland ont justifié cette conception. M. Rowland est parvenu en effet à faire dévier une aiguille aimantée par l'action d'un corps, chargé d'électricité statique, auquel il imprimait un mouvement très rapide, et à mesurer cette action pour les vitesses qu'il a pu réaliser. Or, partant du rapport des unités, on peut calculer quelle doit être l'action pour ces mêmes vitesses : il a fait ce calcul en donnant au rapport la plus grande et la plus petite des valeurs trouvées par les expérimentateurs, et il a constaté que l'effet observé était compris entre les effets calculés.

Venant après les faits de la polarisation rotatoire magnétique découverts par Faraday et développés par Verdet, ce résultat a jeté un jour nouveau sur les relations de l'électricité et de la lumière. Il a conduit Maxwell à une théorie électro-magnétique de la lumière, dont le point de départ est que l'induction électro-magnétique se propage dans l'espace avec la vitesse exprimée par le rapport des unités, et dont la conclusion est que le milieu par lequel s'effectue cette propagation est le même que celui qui transmet les vibrations lumineuses. Si cette conclusion est exacte, et sauf exceptions que la théorie devra expliquer pour être complètement assise, les bons conducteurs doivent être opaques et les diélectriques doivent être transparents. D'où cette conséquence que, dans les diélectriques transparents, l'induction électro-magnétique doit se propager avec la vitesse même de la lumière. Or ceci implique que leur capacité inductive spécifique doit être numériquement égale au carré de leur indice de réfraction. De là les nombreux travaux dont la capacité inductive spécifique des solides, des liquides et des gaz est l'objet depuis dix ans. L'étude des solides et des liquides présente de grandes difficultés, car les phénomènes de décharge résiduelle compliquent et troublent les mesures; on constate souvent des différences notables entre les nombres trouvés par divers expérimentateurs, et par suite la concordance avec le carré de l'indice de réfraction laisse en général à désirer. Mais l'étude des gaz a conduit à des résultats remarquables. Faraday croyait que l'air et les autres gaz avaient la même capacité inductive spécifique à toute température et à toute pression : on a établi qu'il n'en était point ainsi et que chaque gaz avait une capacité inductive qui lui était propre, dans des conditions déterminées de température et de pression; c'est donc au vide et non à l'air que cette propriété doit être rapportée, et les expériences se poursuivent encore aujourd'hui jusque dans les vides les plus reculés. Or les valeurs numériques obtenues jusqu'ici concordent très sensiblement avec les carrés des indices de réfraction.

Des découvertes récentes ont mis en évidence de bien des manières les relations de l'électricité et de la lumière : les découvertes du Dr Kerr concernant la propriété de biréfringence que le verre et certains liquides acquièrent sous l'influence de l'étincelle d'induction, et la rotation de la lumière réfléchie sur un aimant; celle de la polarisation rotatoire magnétique dans les gaz, enfin celle de l'action de la lumière sur la conductibilité électrique du sélénium, d'où est sorti le *photophone*. Chaque progrès de l'électro-optique tend en définitive à confirmer l'exactitude de la conclusion posée par Faraday à la fin de son mémoire touchant l'action des aimants sur la lumière (1845), à savoir que « ce grand pouvoir de la nature, qui se manifeste sous des formes particulières par des phénomènes particuliers, révèle une fois de plus son identité par les

relations directes de sa forme lumière avec ses formes électricité et magnétisme. »

Mais de tous les témoignages que l'on peut invoquer en faveur de cette communauté d'origine des phénomènes électriques et lumineux, dont la conception s'imposa à Faraday comme conséquence de sa *croissance énergétique* dans l'unité des forces, le plus important sans contredit est celui qui établit l'identité de l'éther électrique avec l'éther lumineux par l'identité des vitesses de la lumière et de l'induction dans l'air et dans les gaz.

Ce témoignage, nous le devons à la *mesure absolue des grandeurs électriques*, et par là se trouvent amplement justifiées les considérations qui ont déterminé l'adoption d'un système d'unités électriques dérivant des trois unités fondamentales de la mécanique.

J. RAYNAUD.

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

TÉLÉGRAPHIE, SIGNAUX

Transmettre la pensée à distance au moyen de signaux, tel est le but de la télégraphie.

La transmission de ces signaux peut se faire, soit par l'intermédiaire des vibrations sonores, soit par l'intermédiaire des vibrations lumineuses, soit enfin par l'électricité envoyée d'un point à un autre au moyen de fils conducteurs.

Le nombre des signaux élémentaires peut être très restreint et même être réduit à un seul, pourvu que, dans ce dernier cas, il puisse être répété à des intervalles différents; c'est alors la durée de ces intervalles qui constitue le signal. On transmet, par exemple, des dépêches au moyen de coups de canon produisant tous le même son, mais diversement espacés, ou au moyen d'une lumière que l'on fait paraître ou disparaître.

La télégraphie optique permet d'avoir une grande variété de signaux, puisqu'on peut modifier la position relative et même la couleur des objets qui servent à leur formation. Cette variété donne la possibilité de réduire notablement le nombre des signaux qui composent une dépêche, condition essentielle de succès lorsque l'on peut craindre les interruptions. C'est ainsi que l'ancien télégraphe aérien de Chappe donnait 96 signaux, produits par les angles que formaient deux bras mobiles, nommés *indicateurs*, avec une barre (*régulateur*) que l'on disposait horizontalement ou verticalement, et aux extrémités de laquelle ils étaient placés. De même, dans la marine, on obtient un grand nombre de signaux au moyen de pavillons de couleurs et de formes différentes, ou, pendant la nuit, au moyen de feux dont on fait varier la position et la couleur.

L'invention de la télégraphie électrique a réduit à des cas tout à fait spéciaux l'emploi des signaux acoustiques et optiques.

Dans le courant du siècle dernier, Lesage, Reiser, Bonald, Salva,

Betancourt, sont arrivés à transmettre des signaux à l'aide de la machine électrique; mais la production de l'électricité statique est si pénible, et son isolement si difficile, que le problème de la télégraphie électrique ne pouvait être considéré comme résolu.

En 1800, les expériences de Galvani conduisirent Volta à la découverte des courants électriques et de leurs propriétés chimiques et physiologiques. Une ère nouvelle s'ouvrit pour la science, et il devint possible de substituer une source d'électricité permanente aux machines électriques et aux bouteilles de Leyde employées jusqu'alors.

En 1811, Sæmmering imagina un appareil formé de trente-cinq fils isolés aboutissant à trente-cinq pointes d'or placées au fond d'une cuve pleine d'eau. Les lettres de l'alphabet et les dix premiers nombres étaient écrits en regard de ces pointes. Au moment où l'un des fils était mis en communication avec le pôle positif d'une pile voltaïque et un autre avec le pôle négatif, deux bulles, l'une d'oxygène et l'autre d'hydrogène, en se dégageant sur les deux pointes d'or correspondantes, indiquaient deux lettres.

En 1819, OErstedt fit connaître l'action des courants sur l'aiguille aimantée, et, dès la même année, Ampère, dans un mémoire à l'Institut, donna la description d'un appareil théorique de transmission télégraphique semblable à celui de Sæmmering, mais dans lequel le dégagement des bulles de gaz était remplacé par le mouvement de petites aiguilles aimantées.

La découverte de l'aimantation du fer doux sous l'influence de l'électricité et la détermination des lois de l'intensité du courant par Ohm et Pouillet, complétèrent la série des connaissances nécessaires au développement de la télégraphie.

La télégraphie électrique, comme toutes les grandes inventions, n'est donc pas l'œuvre d'un seul; elle a suivi la science dans ses différents développements et n'a pu passer dans le domaine de l'application que lorsque les lois et les propriétés principales de l'électricité étant connues, un besoin réel d'une communication instantanée vint provoquer de nouveaux efforts qui furent couronnés d'un succès complet.

En 1834, MM. Gauss et Weber établirent, entre l'observatoire et le cabinet de physique de Göttingue, une communication électrique et obtinrent des signaux par l'oscillation d'un petit barreau aimanté que le courant faisait dévier.

M. Steinheil, en 1837, construisit à Munich un télégraphe électrique entre deux points distants d'environ 5000 mètres, et se servit, le premier, de la terre pour compléter le circuit.

Morse présenta et fit breveter, en 1838, un appareil marquant sur une bande de papier des points et des traits, et dont l'invention remonte, paraît-il, à 1832. Cet appareil, qui est le premier où l'on ait fait usage

d'un électro-aimant, différait notablement, par la forme et la dimension des bobines, de celui qui est actuellement employé sous le nom du savant professeur américain.

Ce fut, sans contredit, M. Wheatstone qui contribua le plus à l'avancement de la télégraphie électrique. Après avoir fixé approximativement la vitesse de l'électricité, il détermina la meilleure forme à donner aux bobines des électro-aimants et galvanomètres, la valeur des constantes des piles voltaïques, inventa les relais, au moyen desquels on put remédier à la faiblesse du courant, et l'appareil à aiguille aimantée qui porte son nom.

Jusqu'en 1840, l'application de l'électricité à la télégraphie n'avait été considérée que comme une expérience curieuse, sans qu'on pressentît la possibilité d'en tirer un parti utile : il restait, en effet, une question importante à résoudre, celle de savoir s'il serait possible d'obtenir sur une grande longueur un isolement suffisant des fils conducteurs sans des dépenses trop considérables. On ne tarda pas à reconnaître que de simples fils de fer suspendus au moyen d'isolateurs en porcelaine ou en verre pouvaient transmettre le courant électrique avec une intensité suffisante pour faire fonctionner des appareils, et des Compagnies s'organisèrent en Angleterre ainsi qu'en Amérique pour l'exploitation de ce nouveau moyen de communication.

La France possédait un système de télégraphie aérienne bien organisé, suffisant à tous les besoins du Gouvernement; elle ne tarda pas cependant à entrer dans la nouvelle voie. M. Alphonse Foy, malgré des oppositions de tout genre, et alors que le succès était encore douteux, fit construire la ligne de Paris à Rouen. Ce fut la première grande ligne électrique; elle donna lieu à des expériences intéressantes, notamment sur l'avantage de la suppression du fil de retour et de son remplacement par une communication avec le sol aux deux stations extrêmes. Le succès de cette ligne contribua puissamment à l'avancement de la télégraphie électrique.

A partir de cette époque le réseau s'est rapidement développé dans tous les pays; les moyens de transmission se sont perfectionnés; le télégraphe a été mis à la disposition du public, et chaque année a vu de nouveaux progrès. L'un des plus importants a été l'établissement du télégraphe sous-marin de Calais à Douvres, inauguré le 13 novembre 1851, et dont l'honneur revient presque entièrement à M. Brett.

Depuis lors, de nombreux câbles ont été immergés avec succès dans toutes les mers, et un immense réseau de fils aériens, souterrains et sous-marins, relie entre elles toutes les parties de notre globe.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

Le courant électrique pouvant être envoyé à de grandes distances avec une vitesse prodigieuse, en conservant une intensité suffisante pour être observé, se prête admirablement à la transmission des signaux. Rien n'est plus simple, en effet, que d'envoyer un courant ou de l'interrompre, et, par conséquent, de faire varier à volonté sa durée, l'intervalle des émissions, sa direction et même son intensité. Ce dernier caractère, sur lequel est fondée la transmission téléphonique, n'est utilisé, dans la télégraphie ordinaire, que dans quelques cas particuliers.

Tout système de télégraphie électrique comprend un ou plusieurs conducteurs réunissant deux stations, et, à chacune de ces stations, une source électrique, un appareil servant à envoyer le courant (*manipulateur*), un appareil destiné à permettre d'observer ou d'enregistrer son passage, lorsqu'il est envoyé par l'autre station (*récepteur*), différents appareils secondaires ayant pour but d'assurer et de faciliter le service, et un fil relié à la terre, par laquelle se complète le circuit de chacun des conducteurs.

Fils conducteurs. — Les fils de ligne sont aériens, souterrains ou sous-marins.

Le fil de fer galvanisé (de 2 à 6 millimètres de diamètre), est généralement employé pour les conducteurs aériens, qui sont supportés par des isolateurs en verre ou en porcelaine.

Les fils souterrains ou sous-marins sont en cuivre; ils sont recouverts d'une matière isolante, gutta-percha ou caoutchouc, et sont le plus souvent protégés par une enveloppe métallique.

Source électrique. — La source électrique est ordinairement une pile voltaïque dont un des pôles est en communication avec la terre, soit d'une façon permanente, soit au moment de l'envoi des signaux, et dont l'autre pôle est mis en relation avec la ligne au moyen du manipulateur. On peut substituer aux piles des machines électro-magnétiques mises en mouvement par une force étrangère, et disposées de façon à développer une force électro-motrice constante par le mouvement relatif d'aimants et d'électro-aimants.

Quelquefois l'électricité est fournie par une petite machine électro-magnétique très simple, que l'employé fait mouvoir à la main pour produire des envois du courant suivant les signaux qu'il veut trans-

mettre. On doit, dans ce cas, tenir compte pour la formation des signaux que chaque courant transmis n'a qu'une durée très courte, et est suivi d'un courant de direction opposée. Lorsqu'on fait usage de ce mode de transmission, le manipulateur est supprimé, ou plutôt il se confond avec la machine électro-magnétique.

Manipulateur. — Le manipulateur sert à mettre à volonté le fil de ligne en communication avec la pile; il pourrait donc se composer simplement, lorsque le sens du courant émis ne doit pas changer, de deux pièces métalliques placées dans le circuit et qu'il suffirait de réunir ou de séparer pour envoyer ou interrompre le courant. Mais il est important, en général, qu'un poste ait la faculté d'interrompre la transmission de son correspondant en envoyant un courant qui fasse marcher le récepteur de ce dernier, au moins pendant l'intervalle des émissions.

On arrive à ce résultat en formant le manipulateur d'une tige métallique reliée à la ligne, et qui oscille entre deux heurtoirs; l'un, dit de repos, communique avec la terre, et l'autre avec la pile. On place le récepteur soit entre le heurtoir de repos et la terre, soit sur le parcours du fil de la ligne. Dans le premier cas, il ne marche que sous l'influence du courant du correspondant; dans le second, il fait toujours partie du circuit et fonctionne, quel que soit le côté d'où part le courant.

Certains récepteurs nécessitent pour fonctionner des courants de sens différents, soit qu'ils soient alternés à chaque émission, soit que cette inversion n'ait lieu qu'à la volonté de celui qui transmet; le manipulateur doit permettre de répondre à ces exigences en mettant, suivant les besoins, l'un des pôles de la pile en communication avec la terre et l'autre avec la ligne, et réciproquement.

Les manipulateurs varient d'ailleurs de forme suivant les récepteurs qu'ils sont destinés à desservir; ils doivent être disposés de manière à rendre le travail aussi facile que possible.

La manœuvre du manipulateur s'effectue ordinairement à la main. Elle est plus ou moins régulière, suivant l'habileté des employés, et sa rapidité est loin de correspondre au rendement qu'il est possible d'obtenir d'un fil. On peut remédier à ces deux inconvénients en rendant la manipulation automatique. On y arrive, par exemple, en découpant à l'avance sur une bande de papier des ouvertures qui correspondent aux émissions de courant à produire, et en faisant dérouler cette bande d'un mouvement rapide et uniforme, entre un cylindre et un ressort dont l'un correspond à la ligne et l'autre à la pile; le courant est émis chaque fois que le ressort passe sur un endroit perforé. On réalise aussi la transmission automatique au moyen de pièces métalliques présentant

des reliefs et des creux qui correspondent aux signaux, et sur lesquels on fait passer un style, dont le passage sur les reliefs ferme le circuit de la pile. On peut enfin disposer le manipulateur de façon à renverser le sens du courant à volonté.

Récepteurs. — Le courant possède plusieurs propriétés qui permettent d'observer son passage et qui par conséquent peuvent servir à donner des signaux. Les seules de ces propriétés dont on fait usage en télégraphie sont : l'action du courant sur les aimants, sur le fer doux et sur certains sels métalliques qui sont décomposés quand ils sont traversés par l'électricité

Ainsi une aiguille aimantée, librement suspendue par son centre à l'intérieur d'un cadre autour duquel est enroulé un fil, dévie de sa position dès qu'un courant parcourt ce fil, et constitue un appareil de réception.

Quand un courant traverse un fil enroulé autour d'un cylindre de fer doux (*électro-aimant*), ce cylindre s'aimante. Il se développe un pôle nord à l'une de ses extrémités et un pôle sud à l'autre, ou inversement suivant le sens du courant ; cette aimantation lui donne la faculté d'attirer une plaque de fer, ou *armature*, placée à une petite distance et de la maintenir dans cette position jusqu'à ce que le courant cessant, une force fixe, due à un ressort, dit de rappel, l'éloigne de nouveau, le jeu de cette armature étant d'ailleurs limité par deux butoirs convenablement disposés. Le fer doux conserve toujours, après son aimantation, des traces de magnétisme qui sont d'autant plus sensibles que cette aimantation a été plus forte ; aussi la tension du ressort de rappel doit-elle varier avec l'intensité du courant qui agit sur l'électro-aimant.

Quelquefois, l'armature est en acier et est aimantée, la tension du ressort de rappel doit alors être telle que cette armature reste éloignée lorsqu'aucun courant ne traverse l'appareil, et ne soit attirée que s'il se développe dans l'électro-aimant un magnétisme opposé.

Enfin souvent l'armature est aimantée et oscille entre les deux pôles d'un électro-aimant ; on change à chaque émission le sens du courant qui la fait mouvoir alternativement vers l'un ou l'autre de ces pôles.

Le mouvement de va-et-vient de l'armature est utilisé pour produire des signaux, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un mouvement d'horlogerie, et conduit, ainsi qu'on le verra plus loin, aux appareils les plus divers.

Enfin l'électricité, en traversant certains sels métalliques à peu près incolores, peut donner lieu à la formation de composés colorés qui peuvent être employés à la transmission de signaux sur un papier imprégné d'une dissolution de ces sels.

Appareils accessoires. — Ces appareils, commutateurs, relais, appareils de translation, sonneries et paratonnerres, ont pour but de faciliter et d'assurer la transmission.

Les commutateurs sont destinés à permettre de changer promptement et facilement les communications à l'intérieur des bureaux télégraphiques. Le plus simple consiste en un ressort recourbé auquel aboutit un fil conducteur et qu'on peut manœuvrer de façon à le faire appuyer sur l'une ou l'autre de plusieurs pièces métalliques dont chacune est reliée à un fil différent. Si l'on doit changer simultanément deux communications, on juxtapose deux de ces commutateurs qu'on rend solidaires.

Le plus souvent les commutateurs sont formés de lames fixées sur un socle isolant et qu'on fait communiquer entre elles, suivant les besoins, au moyen de chevilles métalliques ; leur forme varie suivant l'usage auquel ils sont destinés.

Les galvanomètres ordinaires de poste indiquent le passage du courant, et donnent une idée approximative de son intensité. Ils consistent en un cadre autour duquel est enroulé un fil conducteur qu'on intercale dans le circuit ; au centre de ce cadre est placée une aiguille aimantée mobile sur un pivot, qui dévie quand le courant passe. La déviation de l'aiguille est d'autant plus grande que le courant est plus intense.

Lorsque l'on veut faire des expériences précises, on se sert de boussoles comparées dont la forme et les dimensions sont connues d'avance.

Enfin pour l'étude des câbles souterrains ou sous-marins, on emploie des boussoles construites avec le plus grand soin, qui comportent un grand nombre de tours de fils et dont l'aiguille est suspendue par un brin de soie ; un miroir réfléchit sur une échelle graduée l'image d'un point lumineux, et fait connaître la déviation en l'amplifiant considérablement.

L'intensité du courant reçu à l'extrémité d'une longue ligne est toujours assez faible et peut ne pas avoir la force nécessaire pour faire fonctionner certains récepteurs peu sensibles ; on y remédie au moyen de *relais*. Le relais ordinaire se compose simplement d'un électro-aimant, qui reçoit le courant de la ligne et dont l'armature, lorsqu'elle se meut, vient toucher un butoir et ferme un circuit local comprenant l'appareil à signaux et une pile qu'on peut rendre aussi puissante que l'on veut.

Quelle que soit la sensibilité des relais ou des appareils de réception, il peut arriver que, par suite de l'isolement imparfait des lignes, ils ne puissent fonctionner lorsque les deux postes en communication sont très éloignés. Un relais fixé en un point intermédiaire pourrait y remé-

dier ; il marcherait sous l'influence du courant de l'un des deux postes extrêmes et mettrait, à chaque mouvement de l'armature, la prolongation du fil, et, par suite, le récepteur du second poste en communication avec une pile spéciale ; mais cette disposition ne permettrait pas au second poste d'envoyer un courant au premier. On a donc été amené à juxtaposer, au poste intermédiaire, deux relais dont chacun marche sous l'influence du courant qui vient de l'un des postes extrêmes et envoie un courant à l'autre ; l'ensemble de ces deux relais constitue un appareil de translation.

Tous les appareils qui fonctionnent par le mouvement d'une armature peuvent être accouplés de façon à donner la translation ; on utilise dans ce but les deux butoirs qui limitent la course de cette armature, et l'on établit les communications convenables.

Lorsque le mode de transmission exige le renversement du sens du courant, les relais qui servent à la translation doivent être modifiés de façon à reproduire les inversions qui émanent de chacun des postes extrêmes. Il suffit par exemple d'avoir pour chacun des électro-aimants deux armatures aimantées dont l'une en se mouvant envoie sur la ligne un courant positif et l'autre un courant négatif.

Les sonneries électriques fonctionnent soit par l'intermédiaire d'un mouvement d'horlogerie, soit directement sous l'influence du courant.

Les premières comportent une roue excentrique en relation avec le mécanisme d'horlogerie, et qui fait osciller un marteau. Cette roue, arrêtée par l'armature d'un électro-aimant, est dégagée au moment du passage du courant et le marteau vient frapper le timbre. La sonnerie est disposée de manière qu'à chaque émission de courant la roue tourne pendant un certain temps, afin que le nombre des coups soit suffisant pour l'appel et que le mouvement s'arrête de lui-même jusqu'à ce qu'un nouveau courant opère un nouveau déclenchement.

On obtiendrait aussi un système d'appel en fixant à une armature, disposée comme celle d'un relais ou d'un appareil ordinaire, un marteau qui viendrait frapper sur un timbre au moment du passage du courant ; chaque coup serait produit par une émission distincte et il faudrait un certain nombre de ces émissions se succédant rapidement pour produire un son persistant.

Il était naturel de faire produire les interruptions par l'instrument lui-même, ce qui a été réalisé en intercalant dans le circuit l'armature et son butoir de repos, ce dernier étant muni d'un petit ressort qui prolonge un peu le contact. On obtient ainsi une sorte de roulement qui dure tout le temps de l'émission. Ces instruments, qui sont d'un grand usage, sont dits *sonneries à trembleur*.

Les orages produisent sur les conducteurs télégraphiques une accumulation de fluide électrique dont la décharge dans les bureaux peut donner lieu à des étincelles, fondre les fils fins des boussoles, des électro-aimants et même occasionner des accidents plus graves. Pour mettre les appareils à l'abri et empêcher ces accidents, on dispose dans les stations, sur le parcours de chacun des fils, des instruments spéciaux nommés *paratonnerres*.

L'électricité atmosphérique ne peut être dangereuse que si elle a une tension assez considérable pour s'échapper des conducteurs qu'elle parcourt ou pour fondre les fils des récepteurs, et, à plus forte raison, pour passer d'un corps métallique à un autre très rapproché communiquant à la terre. On a donc été amené à former les paratonnerres de deux plaques munies de pointes en regard, l'une en communication avec la ligne et l'autre avec le sol, ou de deux plaques très rapprochées dont on empêche le contact par une feuille de papier ou de mica, qui est facilement traversée par la décharge.

On a aussi eu l'idée d'utiliser la propriété qu'ont les gaz d'offrir d'autant moins de résistance que leur densité est moindre, et de renfermer les deux conducteurs voisins dans un ballon à air raréfié (œuf électrique).

On diminue encore les chances d'accident en faisant traverser au courant, avant son arrivée aux appareils, un fil plus fusible que celui des bobines. Si la décharge est assez intense, elle fond ce fil et enlève la communication entre les récepteurs et la ligne; suivant la disposition adoptée, le fil de ligne est isolé ou mis en communication avec le sol.

Fil de terre. — Les récepteurs et les piles doivent être en communication avec la terre, par laquelle se complète le circuit. Il doit donc y avoir dans chaque bureau un fil conducteur établissant avec le sol une communication aussi parfaite que possible.

Remarques. — La force avec laquelle un électro-aimant agit sur une armature est proportionnelle à l'intensité du courant et, dans une certaine limite, au nombre de tours que forme le fil autour du fer doux. D'un autre côté, l'intensité du courant est en raison inverse de la résistance totale du circuit, en y comprenant celle de l'électro-aimant qui varie avec la section et la longueur du fil enroulé. On comprend donc que pour obtenir le maximum de force magnétique il doit exister une relation entre la résistance extérieure et celle des bobines des appareils.

Un calcul très simple montre que ce maximum correspond au cas où la résistance du fil de l'électro-aimant est égale à celle de la ligne. Les bobines doivent donc être formées de gros fil pour les appareils desti-

nés aux faibles distances, et de fil d'autant plus fin que les lignes auxquelles ils sont destinés sont plus longues.

Toutefois, dans la pratique, cette loi n'est pas absolue pour les lignes très longues, le courant n'atteignant généralement pas son maximum d'intensité pendant les transmissions télégraphiques. L'expérience a démontré que la résistance des bobines ne doit pas dépasser 200 à 250 kilomètres de fil de fer de 4 millimètres de diamètre (2000 à 2500 ohms).

Le courant électrique ne se transmet pas instantanément d'une extrémité à l'autre d'une ligne télégraphique. Lorsqu'un fil conducteur est mis en communication avec la pile, l'électricité se répand peu à peu dans ce fil qui prend une certaine charge, et le courant n'atteint son état définitif qu'au bout d'un certain temps, d'autant plus long que la ligne est plus longue. De même, lorsque après avoir envoyé le courant on l'interrompt, la charge s'écoule par les extrémités du fil, si l'isolement est assez parfait, et prolonge la durée du courant dans les appareils récepteurs.

Ces effets, qui sont insensibles sur les conducteurs de faible longueur, nuisent à la transmission sur les longues lignes et surtout sur les lignes souterraines ou sous-marines, pour lesquelles la charge est beaucoup plus considérable en raison de l'influence de l'enveloppe qui agit comme l'armature extérieure des bouteilles de Leyde.

Si toutes les émissions de courant et tous les intervalles avaient une égale durée, il s'établirait dans le fil un régime régulier, qu'on pourrait observer à l'aide d'appareils sensibles ; mais, dans la transmission télégraphique, il ne peut en être ainsi, puisque la formation des signaux entraîne forcément des inégalités dans les durées d'émission ou d'inter-rup-tion. Il en résulte une confusion des signaux qui impose une limite à la vitesse du travail.

On peut toutefois par différents moyens reculer cette limite, et augmenter le rendement des lignes. On y parvient par exemple en mettant après chaque émission, au poste de départ, le fil de la ligne en communication directe avec la terre pour en faciliter la décharge, ou mieux encore en le faisant communiquer pendant un instant avec une faible pile donnant un courant contraire. On peut aussi accroître la vitesse en alternant le sens du courant, ou, lorsqu'il doit avoir des durées inégales, en affaiblissant son intensité pendant la dernière partie des signaux qui correspondent aux longues émissions, etc.

PRINCIPAUX APPAREILS ET SYSTÈMES DIVERS DE TRANSMISSION

Nous allons passer en revue; en nous bornant à en indiquer le principe, les divers appareils de transmission. Ces appareils peuvent être divisés en plusieurs catégories.

Appareils à aiguille aimantée.

L'appareil avec lequel ont été faits, en Angleterre, les premiers essais de télégraphie électrique, comprenait cinq aiguilles aimantées, et exigeait six fils conducteurs, dont l'un servait de fil de retour. Mais M. Wheatstone réduisit bientôt le nombre des aiguilles et des fils à deux et même à un, et le fil destiné à compléter le circuit fut remplacé par une communication avec la terre aux deux extrémités de la ligne.

Dans l'appareil à une aiguille, le manipulateur est placé entre le récepteur et la terre; il consiste en un cylindre horizontal comportant plusieurs pièces métalliques sur lesquelles appuient des ressorts en relation avec les deux pôles de la pile, avec la ligne et avec la terre. Suivant que l'on incline à droite ou à gauche une poignée qui fait corps avec ce cylindre, on met le pôle négatif de la pile en communication avec la terre et le pôle positif avec la ligne, ou réciproquement. Lorsque la poignée est verticale, le courant venant de la ligne se rend directement dans le sol après avoir traversé le récepteur, qui n'est autre qu'un galvanomètre dont l'aiguille aimantée est maintenue verticale par un petit contrepoids.

Les signaux sont formés par la déviation à droite et à gauche de l'aiguille : deux déviations à droite se succédant rapidement forment par exemple la lettre A, deux à droite et une à gauche la lettre E, etc. Le maximum des émissions de courant nécessaires pour former une lettre est de quatre.

Quand l'appareil fonctionne avec deux fils, il comporte deux aiguilles, et chacune d'elles a son manipulateur distinct. La combinaison des déviations des deux aiguilles concourt à la formation des signaux, il en résulte que la transmission est notablement plus rapide.

Appareils écrivants.

Appareil Morse. — L'appareil Morse, employé d'abord en Amérique, est aujourd'hui universellement répandu.

Les signaux sont produits par des traits de longueur différente sur une bande de papier se déroulant d'un mouvement à peu près uniforme,

chacun d'eux étant produit par une émission de courant distinct. Afin d'éviter la confusion on est convenu de n'adopter que deux dimensions dans la longueur des traits : l'une très courte, produite par une émission brève de courant, l'autre, plus grande, correspondant à une durée d'émission à peu près triple. En combinant de diverses manières ces deux éléments, nommés *point* et *trait*, on peut former une infinité de signaux dont les plus simples représentent les lettres et les chiffres. La durée des émissions de courant n'est pas absolue car il suffit qu'on puisse reconnaître si elle est longue ou brève. Quant aux intervalles, on les maintient aussi constants que possible entre les éléments d'une même lettre, et on les rend un peu plus grands pour les séparations de lettres et de mots ; ainsi les intervalles des éléments d'une même lettre sont égaux au point, ceux qui séparent les lettres d'un même mot à un trait et enfin ceux qui séparent les mots à deux traits.

Voici l'alphabet tel qu'il est usité :

a	—	m	—
b	—	n	—
c	—	o	—
d	—	p	—
e	—	q	—
é	—	r	—
f	—	s	—
g	—	t	—
h	—	u	—
i	—	v	—
j	—	x	—
k	—	y	—
l	—	z	—
ch	—		

Les chiffres et les signes de ponctuation sont représentés par des combinaisons analogues, mais qui comprennent au moins cinq éléments, tandis que les lettres en comportent quatre au plus.

Le manipulateur, n'ayant pour fonction que de produire des émissions de courant brèves et longues, se compose ordinairement d'un levier relié au fil de ligne et qu'on met, en l'abaissant, en communication avec un des pôles de la pile dont l'autre est toujours relié à la terre. Dès que la pression cesse, ce levier revient, sous l'action d'un ressort, à sa position de repos et rétablit la communication entre la ligne et le récepteur. On comprend d'ailleurs qu'il soit facile de modifier la forme du manipulateur et notamment d'appliquer à l'appareil Morse le système de transmission automatique.

Le récepteur comporte un mouvement d'horlogerie que l'on déclanche, au moment de recevoir, et qui fait dérouler une bande de papier entre deux laminoirs ; un électro-aimant fait, à chaque passage du courant, osciller un levier armé d'un style qui vient marquer les signaux sur cette bande.

Dans les premiers appareils, le style consistait en une pointe sèche qui, en s'élevant, pénétrait dans une rainure et refoulait devant elle la bande de papier ; cette dernière, en se déroulant, emportait une empreinte en relief des signaux. Le gaufrage du papier exigeant une certaine force, que le courant de la ligne ne pouvait pas ordinairement donner, l'appareil comportait l'adjonction d'un relais.

L'impression en relief étant d'une lecture difficile, on a cherché par différents moyens à rendre les signaux plus visibles. C'est ainsi qu'on a essayé de remplacer la pointe sèche par une plume ou un tire-ligne imprégné d'encre, ou à faire presser la bande contre une feuille de papier noircie. L'emploi d'une molette a résolu complètement le problème : tantôt cette molette, animée par le mécanisme d'horlogerie d'un mouvement de rotation, plonge en partie dans une petite cuvette pleine d'encre et se meut contre le papier ; tantôt elle frotte contre un tampon imprégné [d'encre grasse, et, lorsque la bande est soulevée par un couteau mis en mouvement par l'armature de l'électro-aimant, il se produit une trace. La force nécessaire pour obtenir l'impression est alors considérablement diminuée, ce qui a permis de supprimer le relais, dont l'emploi était indispensable avec les appareils primitifs. Ce dernier perfectionnement a largement contribué à généraliser l'emploi de l'appareil Morse.

Parleur. — Les signaux élémentaires du Morse étant très simples, on arrive assez facilement à saisir à l'oreille les mouvements de l'armature entre ses deux butoirs, et à distinguer les signaux sans avoir besoin de lire la bande. Avec de la pratique, on peut donc lire les dépêches au son, aussi a-t-on été conduit à construire des appareils comprenant simplement un électro-aimant avec son armature. Dans quelques pays ce mode de réception au son est en usage d'une façon courante, dans d'autres on ne s'en sert que pour l'échange de quelques signaux réglementaires.

Appareils écrivants divers. — On a fait des appareils écrivants à deux styles en employant des armatures aimantées. Le manipulateur doit alors être disposé de façon à pouvoir envoyer à volonté un courant positif ou un courant négatif, afin de faire mouvoir l'un ou l'autre de ces styles qui marquent des signaux sur deux lignes parallèles. Avec ce appareils on réduit le nombre des émissions nécessaires à la forma-

tion des lettres ; malgré cet avantage, ce système n'a pas été adopté, du moins dans la pratique ordinaire.

Signalons encore l'appareil Froment, dans lequel les signaux sont marqués par les oscillations d'un crayon qui laisse constamment une trace sur une bande de papier, et l'appareil Dujardin qui fonctionnait à l'aide de courants électro-magnétiques, dont les signaux, composés uniquement de points, étaient produits par une plume plongée dans l'encre, qui venait toucher la bande de papier au moment du passage du courant.

Appareils à cadran.

On comprend sous cette dénomination générale tous les appareils dont les signaux sont indiqués par une aiguille mobile tournant en face d'un cadran sur lequel ils sont marqués. Ces signaux sont ordinairement les caractères de l'alphabet et le mouvement de l'aiguille est produit par une succession d'émissions de courant. Le manipulateur a donc pour but d'envoyer facilement le nombre d'émissions voulues pour amener l'aiguille du correspondant sur la lettre qu'on veut transmettre. Ordinairement il se compose d'une manivelle, articulée au centre d'un cadran portant les mêmes signes ou lettres que le récepteur et qu'on fait tourner à la main. Cette manivelle, par l'intermédiaire d'une roue à gorge sinueuse, fait osciller un levier entre deux heurtoirs ; le levier est relié à la ligne qu'il met en communication avec le récepteur ou avec la pile, suivant qu'il touche l'un ou l'autre des deux heurtoirs.

Le récepteur comprend un électro-aimant qui fait mouvoir une armature à chaque émission ou interruption de courant. Ce mouvement peut être utilisé pour actionner directement une roue montée sur le même axe que l'aiguille ; mais l'entraînement de la roue nécessite un certain effort, et par suite un courant relativement assez intense, aussi cette disposition n'est-elle pas généralement adoptée. On préfère obtenir la rotation de l'aiguille par un mouvement d'horlogerie qui la fait avancer d'une seule division à chaque émission ou interruption de courant. Ce résultat s'obtient par le jeu de l'armature qui agit sur une fourchette disposée en regard d'une roue d'échappement fixée sur le même axe que l'aiguille.

A l'état de repos, l'aiguille du cadran et la manivelle du manipulateur sont placées dans une position déterminée (blanc ou croix) ; si l'on amène la manivelle sur une lettre quelconque, le courant est envoyé et interrompu le nombre de fois nécessaire pour amener l'aiguille du récepteur correspondant sur la même lettre.

Ancien appareil français. — Lors de l'introduction de la télégraphie électrique en France, les lignes aériennes devant pouvoir se combiner

avec les lignes électriques, il était avantageux d'avoir un appareil reproduisant les signaux du télégraphe Chappe. On avait été, pour ce motif, conduit à modifier l'appareil à cadran en réduisant à huit le nombre des positions de l'aiguille, qui pouvait ainsi reproduire les différents angles utilisés par le télégraphe aérien. Afin d'avoir une analogie complète entre les deux systèmes de signaux on juxtaposait deux aiguilles indépendantes dont chacune fonctionne à l'aide d'un fil de ligne spécial.

Systèmes divers d'appareils à cadrans. — Il existe d'assez nombreux modèles d'appareils à cadran : quelquefois le passage d'une lettre à la suivante nécessite une émission et une interruption de courant ; dans d'autres systèmes, on se sert d'armatures polarisées qui oscillent entre les deux pôles de l'électro-aimant et le manipulateur est disposé de manière à changer le sens du courant à chaque émission ; d'autres fois on remplace la pile par une machine électro-magnétique qui est mise en mouvement par la manivelle du manipulateur. Enfin, on a construit des appareils à cadran basés sur le principe des sonneries à trembleur : les deux appareils correspondants font partie du circuit dans lequel sont intercalés les butoirs et les armatures qui, en oscillant, font tourner les aiguilles devant un cadran ; le mouvement des deux aiguilles étant le même, il suffit d'arrêter l'une d'elles pour interrompre le courant et produire l'arrêt de l'autre sur la même lettre.

Appareils imprimeurs.

L'idée d'imprimer directement les dépêches télégraphiques en caractères ordinaires est si naturelle, et la réalisation en est si simple, au moins en apparence, que le problème a été résolu depuis longtemps de bien des manières différentes. Il suffit en effet, pour imprimer des lettres, d'avoir une roue tournant en face d'une bande de papier et portant en relief tous les caractères de l'alphabet imprégnés d'encre par leur frottement contre un tampon chargé de couleur, et un marteau qui presse le papier contre le caractère à transmettre au moment où il arrive en regard. L'avancement de la bande doit d'ailleurs être commandé par le jeu du marteau pour que les lettres se suivent à des distances égales.

La roue des types peut être mise en mouvement par une série d'émissions de courant, comme l'aiguille des appareils à cadran. Quant à l'impression, on l'obtient par plusieurs procédés en faisant mouvoir le marteau, au moment opportun, soit directement soit par l'intermédiaire d'un mécanisme d'horlogerie. On a, par exemple, deux électro-aimants

à armatures aimantées dont l'un produit le mouvement de la roue des types, et l'autre celui du marteau; ce dernier fonctionne seulement au moment de l'inversion du sens du courant, au poste expéditeur. Ou bien, les deux électro-aimants sont inégalement sensibles, celui du marteau n'agissant que lorsque le courant a une certaine durée, c'est-à-dire lorsque avec le manipulateur on s'arrête sur la lettre à transmettre. Ou encore, le courant de la ligne ne traverse qu'un seul électro-aimant qui fait mouvoir la roue des types, et dont l'armature oscille entre un butoir et un ressort; la pression est faible quand les émissions se succèdent rapidement, mais, si le courant persiste un instant, le ressort cède et, en venant toucher une pièce fixe, il ferme un circuit local et produit l'impression. Celle-ci peut enfin être obtenue mécaniquement; la roue des types est munie de chevilles en nombre égal aux lettres qui soulèvent une pièce articulée et ne la laissent s'enfoncer que lorsque l'arrêt dure un instant, l'enfoncement de cette pièce dégage le mécanisme imprimeur.

Le manipulateur, qui a ordinairement la forme d'un cadran, doit d'ailleurs être disposé de façon que les émissions de courant correspondent aux effets à produire.

Les roues des types des deux appareils qui sont en communication peuvent être animées, au moyen de deux mécanismes d'horlogerie, de mouvements de rotation identiques, de façon à présenter toujours, l'une et l'autre, les mêmes caractères en face du marteau; il suffit alors, pour produire l'impression d'une lettre quelconque, d'envoyer de l'un des postes, au moment où la lettre à transmettre passe devant le marteau, un courant électrique qui, au poste d'arrivée, agit sur un électro-aimant, et presse le papier contre la roue des types. La difficulté principale pour la réalisation de ces appareils, dits à mouvements synchroniques, consiste dans la difficulté de maintenir assez longtemps le synchronisme des deux mouvements. MM. Vail et Theiler, qui ont fait les premiers appareils de ce genre, ramenaient après l'impression de chaque lettre les roues des types à leur position de départ, et il en résultait une perte de temps notable. M. Hughes a résolu le problème en rétablissant l'accord entre les deux roues des types à chaque impression et est ainsi arrivé à un appareil essentiellement pratique, dont nous allons indiquer sommairement les dispositions principales.

Appareil imprimeur de M. Hughes. — Chaque appareil comprend trois axes distincts qui sont mis en mouvement par le même mécanisme d'horlogerie.

Sur l'un de ces axes est fixée la roue des types portant en relief tous les caractères de l'alphabet et un espace vide.

Le second, qui constitue le manipulateur, est vertical ; il porte un bras horizontal tournant, avec la même vitesse angulaire que la roue des types, au dessus d'un disque percé de trous disposés circulairement. Chaque trou est traversé par une lame métallique ou *goujon*, qui est en relation avec une des touches d'un clavier sur lequel sont marqués les mêmes signes que ceux de la roue des types. Ces goujons sont reliés au pôle de la pile et le bras horizontal, qu'on nomme le *chariot*, au fil de la ligne. Quand on abaisse une touche, le goujon correspondant se soulève, et, au moment où le chariot passe au-dessus, un contact métallique s'établit, le courant est envoyé au poste correspondant.

Le troisième axe, destiné à produire l'impression, est mis en mouvement, par l'intermédiaire d'un électro-aimant, au moment du passage du courant. Cet axe porte des cames dont l'une soulève un petit marteau cylindrique et applique contre la roue des types une bande de papier qu'une seconde came fait avancer.

Malgré l'intermittence du mouvement de l'axe imprimeur, celui du chariot et de la roue des types n'est pas altéré grâce à l'addition d'un volant qui emmagasine la force vive et d'un régulateur à lame vibrante.

Deux appareils identiques sont placés aux extrémités d'une ligne, et les axes sont animés d'un égal mouvement de rotation. Si les positions des roues des types sont les mêmes, chaque lettre transmise à l'un des postes se reproduit à l'autre. L'impression a toujours lieu au point de départ en même temps qu'au point d'arrivée, afin que les conditions mécaniques des deux appareils soient identiques.

Les mouvements des deux roues des types ne peuvent être absolument synchroniques ; M. Hughes y a remédié en ne calant pas ces roues sur leurs axes, auxquels elles tiennent seulement par frottement. Au moment où l'axe imprimeur soulève le marteau, une came spéciale s'engage entre les dents d'une roue dentée, dite *roue correctrice*, solidaire de la roue des types, et fait avancer ou reculer cette dernière, sans rompre sa liaison avec le rouage moteur, de façon à amener exactement un caractère en face du marteau. La concordance entre les appareils placés aux deux extrémités de la ligne se trouve ainsi rétablie à chaque impression, pourvu que l'écart ne dépasse pas la moitié de l'espace qui sépare deux lettres.

Il fallait, de plus, pouvoir établir l'accord au commencement de chaque transmission entre les appareils en communication, sans arrêter le moteur. A cet effet la roue des types peut être desembrayée et arrêtée lorsqu'elle arrive dans une position fixe, toujours la même ; le premier courant qui traverse l'électro-aimant la remet aux prises avec le moteur. Chaque transmission doit donc commencer par l'abaissement de la touche correspondant à cette position fixe, qui est ordinairement le blanc. Au moment du passage du chariot sur le goujon relié à cette touche, le

courant est envoyé et produit l'embrayage de la roue des types, au départ aussi bien qu'à l'arrivée.

L'électro-aimant employé par M. Hughes n'a pas la forme ordinaire : il se compose d'un aimant permanent en fer à cheval dont chaque branche est surmontée d'un cylindre de fer doux entouré d'une bobine de fil recouvert. Une petite armature, également en fer doux, est fixée à l'extrémité d'un levier mobile et est maintenue au contact par le magnétisme que l'aimant communique aux cylindres ; elle tend à se soulever sous l'action d'un ressort de rappel qu'on règle à l'aide d'une vis.

Si le courant traverse les bobines de façon à développer dans les cylindres de fer doux une aimantation contraire à celle que leur communique l'aimant, il diminue l'attraction, et l'armature s'éloigne au moment où la force du ressort l'emporte. Dans ce mouvement, le levier fixé à l'armature laisse tomber un cliquet qui met l'axe imprimeur en relation avec le moteur ; cet axe effectue une révolution pendant laquelle il fait mouvoir les cames, produit l'impression, ramène l'armature au contact, et, par suite de la force acquise, fait monter sur un plan incliné, fixé au levier, le cliquet qui, se trouvant ainsi soulevé, rompt la relation qu'il avait établie.

On peut varier la vitesse en déplaçant une masse métallique fixée sur la lame vibrante. Pour obtenir le synchronisme entre les deux récepteurs, le poste qui reçoit règle sa vitesse sur celle de son correspondant. Dans ce but ce dernier envoie à chaque tour du chariot une même lettre, et à l'autre station on déplace la masse métallique jusqu'à ce que l'on reçoive toujours le même caractère.

Entre les divisions de la roue des types qui correspondent aux lettres se trouvent des caractères représentant les chiffres et les signes de ponctuation. Quand on veut imprimer ces derniers, on abaisse une touche spéciale ; le courant envoyé par le goujon relié à cette touche a pour effet de déplacer un peu la roue des types qui, au lieu des lettres, présente en regard du marteau les signes de la seconde catégorie. On revient à la position primitive en appuyant sur la touche blanche, dont l'abaissement doit toujours précéder la transmission.

L'électro-aimant de l'appareil Hughes, doit fonctionner aussi bien sous l'action du courant envoyé que sous l'influence du courant reçu, et il peut en résulter, sur les longues lignes, un trouble dans la transmission. On a cherché à éviter cet inconvénient, en produisant au départ le déclenchement de l'axe imprimeur par un moyen mécanique au moment du passage du chariot sur le goujon soulevé. Le courant est alors directement envoyé sur la ligne et ne traverse que l'électro-aimant du poste qui reçoit la transmission.

M. Olsen a modifié l'appareil Hughes en remplaçant l'armature

unique par deux armatures aimantées dont l'une ou l'autre est mise en mouvement suivant la direction du courant. Les touches de rang pair envoient, lorsqu'elles sont abaissées, le courant dans un sens, celles de rang impair l'envoient dans le sens contraire. Cette disposition permet d'obtenir une vitesse plus grande des axes de rotation, et par suite un rendement plus considérable, mais elle complique l'appareil.

Appareils électro-chimiques.

M. Bain a eu, le premier, l'idée d'utiliser les propriétés électro-chimiques du courant pour la production des signaux. Supposons qu'une feuille de papier, imprégnée de cyanoferrure jaune de potassium et maintenue un peu humide, soit en communication d'un côté avec le sol et de l'autre avec une pointe de fer, la pointe étant en relation avec le pôle positif d'une pile dont l'autre pôle communique à la terre, il se produira une action chimique et le sel se transformera en bleu de Prusse qui a une couleur foncée. Si donc deux postes sont reliés par un fil, et si à l'un d'eux la feuille de papier préparée se meut sous le style, toutes les émissions de courant longues ou brèves faites à l'autre poste se reproduiront sous forme de traits longs ou courts. Ces émissions et interruptions de courant peuvent être produites à l'aide du manipulateur de l'appareil Morse dont rien n'empêche de conserver l'alphabet.

L'appareil récepteur ne comportant d'autre mouvement mécanique que le déroulement de la bande, on comprend que la transmission des signaux puisse être extrêmement rapide, si on se sert d'un manipulateur automatique; toutefois sur les lignes un peu longues, on ne peut dépasser une certaine vitesse, parce que les signaux se confondent lorsqu'ils se succèdent trop rapidement.

M. Goodspeed a récemment présenté un appareil électro-chimique où ce dernier inconvénient est atténué par l'emploi de courants alternativement positifs et négatifs. Au point d'arrivée deux pointes de fer rapprochées et reliées l'une à la terre, l'autre à la ligne, appuient sur la bande de papier préparée, et l'une ou l'autre de ces pointes laisse une trace suivant le sens du courant envoyé; elles sont d'ailleurs disposées pour que les traces se trouvent sur deux lignes parallèles.

Au point de départ une bande de papier est perforée suivant deux lignes de trous qui représentent les signaux et se déroule entre un cylindre métallique relié à la ligne, et deux frotteurs en relation, l'un avec le pôle positif d'une pile et l'autre avec le pôle négatif d'une pile semblable, les pôles non reliés aux frotteurs étant à la terre. La bande en se déroulant présente les trous en regard des frotteurs, et par suite met la ligne en relation avec l'une ou l'autre des piles. Les trous se

succèdent sur la bande, de telle sorte qu'entre deux émissions il n'y ait pas d'intervalle sensible. Les signaux sont les mêmes que ceux du morse, mais on les groupe dans l'ordre où ils sont produits, sans tenir compte de la ligne sur laquelle ils se trouvent; on sépare les lettres et les mots par des traits plus longs. Avec ce système les éléments d'une même lettre se succèdent sans interruption, ce qui contribue à accroître notablement la vitesse.

La bande se découpe au moyen d'un appareil perforateur de forme spéciale ingénieusement combiné; chaque point est représenté par un trou et chaque trait par deux. Les deux courants successifs envoyés pour la formation des traits se confondent à l'extrémité de la ligne et produisent une seule marque sur la bande de papier préparée. Cette disposition, qui produit une charge moindre du fil, est avantageuse au point de vue de la vitesse de transmission.

Appareils autographiques.

Les appareils autographiques reproduisent à distance l'écriture ordinaire et en général tout ce qui peut être tracé à la plume.

Ce résultat pourrait être obtenu directement avec deux fils de ligne agissant, par l'intermédiaire de deux électro-aimants, sur un crayon de manière à lui faire décrire une ligne quelconque sur une surface, comme dans le pantographe.

On a résolu le problème d'une façon plus pratique :

À la station de départ, ainsi qu'à la station d'arrivée, un style décrit sur une surface une série de lignes parallèles très rapprochées, les deux styles étant disposés de façon à occuper toujours des positions semblables.

Supposons qu'au départ la dépêche soit écrite, avec une encre isolante, sur une surface métallique en communication avec la pile et que le style soit relié à la ligne, le courant sera interrompu chaque fois que ce dernier passera sur un point recouvert d'encre. On comprend que ces interruptions puissent agir sur le style du poste récepteur et reproduire les caractères par une série de hachures.

Au lieu d'envoyer le courant sur la ligne quand le style frotte sur le métal et de l'interrompre quand il passe sur l'encre, il est préférable d'adopter la disposition inverse. On y arrive facilement en reliant l'un des pôles de la pile au style et à la ligne, et le second pôle de la pile ainsi que la surface métallique à la terre : le circuit est fermé à l'intérieur du poste de départ tant que le style passe sur le métal, lorsqu'il traverse les traits marqués à l'encre isolante le courant est envoyé sur la ligne.

Dans l'appareil Caselli, le mouvement est communiqué au style par

un long pendule, au milieu duquel ce style est relié par un levier articulé et une vis sans fin qui le fait avancer à chaque oscillation; il parcourt une surface légèrement courbe sur laquelle est placé, au départ, le papier métallique portant la dépêche, et, à l'arrivée, un papier préparé au cyanure de potassium. Le mouvement du pendule est entretenu au moyen d'une pile locale : à cet effet une forte armature de fer doux est placée à sa partie inférieure et, lorsqu'il arrive près de l'une ou de l'autre des extrémités de sa course, il est attiré par un électro-aimant fixe parcouru, à ce moment, par le courant de la pile et reste dans cette position jusqu'à ce que le courant soit interrompu. Cette interruption est produite par le pendule d'un régulateur indépendant, à la marche duquel est subordonnée celle du grand pendule.

Le style est disposé de manière à ne toucher les surfaces courbes que pendant le mouvement du pendule dans un sens, mais on peut utiliser le mouvement inverse pour avoir une seconde transmission indépendante.

Pour régler le synchronisme, on trace, en dehors du texte, sur le papier métallique une ligne droite normale à la marche du style. Cette ligne doit se reproduire au poste d'arrivée dans la même position; dès qu'elle dévie, on accélère ou l'on ralentit la vitesse du régulateur.

Dans l'appareil Meyer, la dépêche est reproduite à l'encre sur une feuille de papier ordinaire. Cette feuille est disposée au-dessous d'un cylindre portant en relief un pas d'hélice, et avance un peu après chaque révolution.

L'hélice est imprégnée d'encre de sorte que, si le papier était maintenu soulevé, il emporterait la trace d'une série de lignes parallèles très rapprochées; mais ce soulèvement n'a lieu que lorsque le courant, traversant un électro-aimant spécial, agit sur une armature, et les traces faites sur une même ligne dépendent de la position de l'hélice au moment du passage du courant.

Au départ, le papier métallique portant la dépêche est enroulé sur un autre cylindre qui tourne d'un mouvement uniforme. Un style placé en regard du papier métallique le parcourt en décrivant une hélice à spires très rapprochées et envoie le courant sur la ligne lorsqu'il passe sur une partie recouverte d'encre. Le synchronisme entre les deux appareils correspondants est obtenu au moyen d'un pendule conique.

D'autres appareils autographiques ont été imaginés par MM. Cros, d'Arlincourt et Lenoir; ils sont fondés sur les mêmes principes. Dans celui de M. Lenoir, par exemple, le moteur à chaque poste est une petite

machine électro-magnétique, qui fait tourner un cylindre sur lequel est enroulé au départ le papier métallique et à l'arrivée une feuille de papier ordinaire destinée à recevoir la dépêche. Un chariot qui avance régulièrement, parallèlement au cylindre, présente, d'une part un style qui frotte sur le papier métallique, et de l'autre une plume imbibée d'encre actionnée par un électro-aimant, et qui laisse une trace sur le papier à chaque passage du courant. La ligne est parcourue par un courant intense quand le style transmetteur passe sur une partie encrée et par un faible courant de sens contraire, quand il touche le métal.

Le principal inconvénient des appareils autographiques consiste dans le grand nombre d'émissions de courant qu'ils nécessitent pour la reproduction des dépêches; aussi ne donnent-ils qu'une vitesse de transmission restreinte.

Appareils à transmission rapide.

On a été amené, par suite du grand développement qu'a pris la correspondance télégraphique et de la difficulté d'accroître indéfiniment le nombre des conducteurs, à rechercher les moyens d'augmenter le rendement des fils importants au moyen d'appareils spéciaux. On y est arrivé par deux méthodes différentes : 1° en rendant la vitesse de transmission plus rapide par l'emploi de manipulateurs automatiques; 2° en mettant successivement le fil de ligne en relation avec plusieurs appareils, dont chacun est desservi par un employé spécial, ce qui constitue la transmission multiple. De plus, par suite de la grande rapidité avec laquelle se succèdent les signaux, on s'est trouvé en face des difficultés de transmission signalées précédemment, et l'on a dû chercher à y remédier par une des méthodes dont nous avons parlé.

Appareils à transmission automatique. — Les appareils électro-chimiques, qui ne nécessitent d'autre mouvement mécanique que l'entraînement du papier sur lequel s'inscrivent les signaux, paraissent surtout convenir pour la transmission rapide; en effet, sur les lignes d'une faible longueur M. Bain d'abord puis plus tard MM. Chauvassaignes et Lambrigot ont obtenu des vitesses de transmission prodigieuses. La disposition imaginée par M. Goodspeed et décrite plus haut permet d'étendre ce mode de transmission à des lignes plus longues. Mais ces appareils ont l'inconvénient d'exiger, pour fonctionner régulièrement, des courants très énergiques, qu'il est souvent difficile d'obtenir lorsque les fils dépassent une certaine longueur et qui sont dangereux au point de vue de la conservation des câbles souterrains. On a donc été conduit à chercher la solution du problème dans une construction plus parfaite

de l'appareil ordinaire. M. Wheatstone est arrivé, en modifiant le récepteur Morse, à pouvoir lui permettre d'enregistrer environ 800 à 1000 signaux parfaitement distincts (points ou traits) par minute; il a de plus imaginé un transmetteur automatique qui fonctionne avec une régularité parfaite, et dont l'emploi donne d'excellents résultats.

Le récepteur comprend une armature aimantée qui oscille entre les pôles d'un électro-aimant, et agit directement sur une molette encrée, qu'elle approche contre la bande de papier ou qu'elle en éloigne suivant le sens du courant. Cette armature reste dans la position qu'elle occupe jusqu'à ce qu'un courant contraire l'en éloigne. On peut donc former les signaux, points ou traits, par une émission instantanée d'un courant positif, par exemple, et les intervalles par une émission instantanée d'un courant négatif, le temps écoulé entre deux émissions consécutives limitant la longueur du signal ou de l'intervalle. Mais en fait, le courant est émis tant que dure l'effet à produire.

Au départ, les signaux sont représentés sur une bande de papier par deux rangées de trous parallèles, l'une de ces rangées correspond aux émissions positives et l'autre aux négatives; cette bande se déroule au-dessus de deux aiguilles verticales animées alternativement d'un mouvement régulier de va-et-vient de bas en haut. Chaque fois que l'une des aiguilles n'est pas arrêtée dans son mouvement ascensionnel par la bande, c'est-à-dire chaque fois qu'elle se trouve en regard d'un trou, elle entraîne un levier qui agit sur un petit commutateur inverseur. Ce commutateur met le pôle positif en communication avec la ligne et le pôle négatif avec la terre; il reste dans cette position jusqu'à ce que l'autre aiguille, pénétrant dans un des trous de la seconde rangée, le ramène dans sa position primitive, c'est-à-dire inverse les communications en faisant succéder un courant négatif au courant positif.

Pour remédier aux inégalités de charge qui résultent de la différence de durée des émissions, M. Wheatstone introduit dans le circuit une résistance convenable pendant la dernière partie de la formation des signaux longs, c'est-à-dire des traits; l'introduction de cette résistance est obtenue par le jeu des aiguilles.

Appareils à transmission multiple. — Les appareils à composition préalable ne peuvent être utilement employés que si le travail est continu pendant un certain temps. Dans les systèmes à transmission multiple de MM. Meyer et Baudot, la ligne est mise successivement en communication avec plusieurs appareils, ce qui donne le temps de préparer à la main le signal à transmettre, et par suite rend inutile l'emploi d'une bande découpée; de plus, ils permettent de n'utiliser, sans rien changer au mode de transmission, qu'une partie du rendement que peut donner un fil.

Le passage de la ligne d'un appareil à l'autre aux deux stations s'effectue au moyen de deux disques pareils nommés distributeurs, divisés en autant de secteurs qu'on veut desservir de récepteurs (4 ou 6) et devant chacun desquels tourne une aiguille munie de frotteurs en communication avec le fil de la ligne.

Dans l'appareil Meyer, chacun des secteurs est subdivisé en douze parties métalliques isolées les unes des autres : la première correspond à un point, l'ensemble des deux premières à un trait ; la troisième est en communication avec la terre, elle a pour fonction de séparer les signaux d'une même lettre et de décharger le fil pendant le passage du frotteur. Cette disposition, répétée dans toute l'étendue de chaque secteur, donne le moyen de former quatre signaux, points ou traits. A cet effet les huit subdivisions du distributeur qui correspondent à des signes sont en communication avec la pile par l'intermédiaire de huit leviers qui laissent seulement passer le courant lorsqu'ils sont abaissés. Pour transmettre une lettre, il suffit d'appuyer sur un certain nombre de ces leviers de façon à former les signes élémentaires qui la constituent, et de maintenir ces leviers abaissés jusqu'au moment où l'aiguille du distributeur a traversé le secteur correspondant.

Les récepteurs se composent de cylindres qui sont animés du même mouvement de rotation que l'aiguille du distributeur, et dont chacun porte en saillie, dans le sens longitudinal, une hélice imprégnée d'encre correspondant au quart ou au sixième de la circonférence, suivant le nombre des appareils desservis ; ces cylindres sont montés sur un même axe.

Un électro-aimant placé à chaque poste entre le distributeur et la ligne est traversé par tous les courants envoyés ou reçus ; son armature, en se mouvant, ferme ou ouvre le circuit d'une pile locale qui a pour effet, par l'intermédiaire d'un autre électro-aimant, de presser contre chacun des cylindres une large bande de papier. Cette bande, sur laquelle les signaux d'une même lettre sont marqués sur une ligne normale au mouvement, avance un peu après chaque révolution du cylindre. L'impression n'a lieu que pour celui des récepteurs dont l'hélice est à ce moment en face de la bande.

Le mouvement est régularisé par un pendule conique, dont on règle la longueur par la condition que tous les signes émis par la première touche de l'un des claviers se reproduisent sur la bande à une égale distance du bord. Cette condition ne peut être remplie d'une façon absolue, et, pour éviter que les écarts puissent s'accumuler, une disposition particulière règle le synchronisme à chaque tour. A cet effet, un courant est émis par l'un des postes au moment du passage du frotteur sur un contact spécial du distributeur ; ce courant

en arrivant à l'autre station agit sur un électro-aimant qui produit, par l'intermédiaire d'un fil, l'élévation ou l'abaissement du poids pendulaire. Une petite partie de la circonférence du distributeur est donc utilisée pour la correction.

Dans l'appareil Meyer, les différents récepteurs sont reliés mécaniquement au distributeur, il en résulte que si l'un d'eux est dérangé, on ne peut y remédier qu'en suspendant momentanément tout travail. M. Grandfeld (de Vienne) a proposé, pour éviter cet inconvénient, d'employer des récepteurs distincts complètement indépendants les uns des autres au point de vue mécanique; des pièces de contact convenablement disposées sur le distributeur établissent la relation entre ce dernier et les récepteurs.

Enfin M. Willot, pour éviter la lecture assez fatigante de signaux écrits sur des lignes parallèles, a réussi à utiliser la bande Morse sur laquelle les traits et points se succèdent dans les conditions ordinaires.

Dans la transmission par l'appareil précédent, il y a une perte de temps, provenant de ce que l'on n'emploie pas toutes les combinaisons qu'il est possible d'obtenir à l'aide des touches.

M. Baudot, en n'en perdant aucune, a pu réduire le nombre des touches à cinq qui fournissent 32 combinaisons, dont une correspond à la position de repos; il est parvenu ainsi à accélérer notablement la transmission. Il a de plus réussi à faire reproduire, par ces différentes combinaisons, les lettres de l'alphabet.

Le distributeur est, comme celui de l'appareil Meyer, divisé en autant de secteurs que d'appareils à desservir, quatre ou six, chacun de ces secteurs ne comportant que cinq pièces de contact égales sur lesquelles passe successivement un frotteur en relation avec la ligne; au départ, les cinq contacts de chaque secteur sont reliés à cinq touches qui constituent le manipulateur, et à l'arrivée à cinq relais. En abaissant ces touches suivant une combinaison quelconque, on envoie successivement le courant dans les relais qui leur correspondent, et l'on reproduit ainsi à l'arrivée la combinaison du départ. On pourrait donc, en observant la position des armatures, ou en enregistrant leurs mouvements sur une bande, interpréter le signal émis, mais ce mode de lecture ne serait pas pratique. M. Baudot a réalisé un appareil extrêmement ingénieux, qui donne la traduction de ces différentes combinaisons en caractères imprimés, par l'intermédiaire d'un organe spécial appelé *combinateur*.

Le combinateur se compose d'une aiguille animée du même mouvement de rotation que la roue des types, à laquelle elle est reliée par l'intermédiaire de roues dentées, et qui sert d'axe à un chariot muni de cinq frotteurs parcourant ensemble cinq circonférences concentriques convenablement découpées : au moment où ces frotteurs rencontrent

ensemble cinq vides, le chariot bascule, et, en venant agir sur un anneau métallique, opère un déclanchement par suite duquel le papier est pressé contre la roue des types et avance en emportant l'impression d'un caractère.

Supposons que la première des circonférences parcourues par le chariot soit divisée en deux parties égales dont l'une présente une saillie et l'autre un creux; la seconde en quatre parties égales alternativement en saillie et en creux; la troisième en huit parties divisées de la même manière; la quatrième en seize, et la cinquième en 32. Il en résultera que la 32^e division parcourue par l'aiguille sera la seule qui présentera cinq vides et qui permettra au chariot de basculer lorsqu'il passera au-dessus.

Afin de pouvoir obtenir ce mouvement de bascule pour une quelconque des autres divisions, dont chacune correspond à une lettre ou à un signe, M. Baudot a doublé chacune des circonférences; la seconde série ayant ses reliefs et ses creux disposés d'une façon exactement contraire à la première série. Les cinq frotteurs peuvent d'ailleurs se déplacer un peu latéralement, ce qui leur permet de s'engager sur l'une ou l'autre des deux circonférences ou *voies* qui lui correspondent.

La voie, pour chaque frotteur, est commandée par une aiguille analogue à celle des chemins de fer, qui est mise en mouvement, lorsqu'il y a lieu, par un électro-aimant et une pile locale, dont le circuit est fermé par l'armature du relais de ligne, ce dernier n'ayant aucune autre fonction à remplir.

Ainsi, suivant que les relais de ligne sont ou non, sur contact, les frotteurs correspondants s'engagent sur l'une ou l'autre voie, et quelles que soient ces voies, une seule position de l'aiguille correspond à cinq vides et permet au chariot de basculer dans le cours d'une révolution.

Si par exemple le premier relais est seul sur contact, le premier frotteur change seul de voie, et il est facile de reconnaître que le chariot basculera à la seizième division; par suite le seizième caractère de la roue des types s'imprimera.

Pour transmettre, il suffit donc d'abaisser les touches de façon à obtenir les émissions de courant convenables pour disposer les voies de manière à réaliser le basculement du chariot au moment opportun.

Les armatures des relais sont polarisées et restent sur contact pendant la révolution à peu près entière du frotteur sur la circonférence du distributeur; c'est seulement un instant avant son arrivée sur le secteur correspondant qu'un courant local, de direction opposée à celui de la ligne, ramène les armatures à leur position normale.

L'impression de chaque lettre se fait pendant que le frotteur parcourt les autres secteurs dont chacun dessert un appareil spécial; elle ne retarde en rien la transmission.

La vitesse de rotation de la roue des types, est la même que celle de l'aiguille du distributeur, ce qui s'obtient facilement au moyen d'un contact spécial à chaque révolution de cette dernière. Quant au synchronisme entre les distributeurs de deux postes en communication, il est maintenu par un procédé analogue à celui qui a été adopté par M. Meyer.

Afin d'atténuer les effets de charge, la ligne est parcourue par un faible courant de sens contraire à celui qui fait mouvoir les relais, lorsque ces derniers doivent rester en repos. Enfin ajoutons que les reliefs et les creux des circonférences concentriques peuvent être disposés d'une façon différente de celle que nous avons supposée; il suffit en effet qu'à chaque combinaison des armatures des relais les frotteurs du chariot ne trouvent qu'une seule fois cinq vides suivant un même rayon. Les combinaisons des touches à abaisser pour la manipulation dépendent de la disposition adoptée.

Transmission sur les lignes sous-marines.

Sur les longues lignes sous-marines, la transmission télégraphique est ralentie par suite de la charge électrique que prend le fil pendant le travail, charge qui ne disparaît qu'au bout d'un assez grand intervalle de temps; de plus dans l'intérêt de la conservation des câbles, on ne se sert que de faibles forces électro-motrices. On a donc été amené à employer sur ces lignes des appareils très sensibles. On se sert ordinairement d'un galvanomètre dont l'aimant est suspendu et porte un miroir qui réfléchit sur un écran l'image d'un point lumineux. Un employé suit la marche de cette image et, avec une certaine habitude, arrive facilement à en déduire la valeur des signaux transmis. Ce mode de lecture est très fatigant; Sir William Thomson, auquel est dû ce système de transmission, s'est proposé de remédier à cet inconvénient au moyen d'un appareil (*siphon recorder*) qui enregistre les signaux sans frottement.

Un petit siphon en verre plonge, d'une part dans un bassin plein d'encre, et est placé d'autre part en regard et très près d'une bande de papier qui se déplace d'un mouvement uniforme; cette dernière extrémité du siphon oscille parallèlement au papier sous l'influence du courant de la ligne. L'encre du bassin reçoit, au moyen d'une machine électrique spéciale, une charge d'électricité constante qui ne peut s'écouler que par le papier contre lequel elle projette l'encre en y laissant une trace continue. Une bobine traversée par le courant de ligne est suspendue entre les pôles d'un puissant aimant; cette bobine est reliée au siphon qui en suit tous les mouvements.

M. Ailhaud a proposé de remplacer les traces à l'encre par une suite

de décharges électriques produites au moyen d'une bobine de Ruhmkorff. Enfin on pourrait encore enregistrer l'image du point lumineux en la recevant sur une bande de papier sensibilisé par les procédés photographiques, et que l'on développerait ensuite en l'immergeant dans un bain convenable.

On peut transmettre à travers les câbles sous-marins, sans que le courant de la pile traverse le conducteur, en reliant chacune de ses extrémités à l'une des armatures d'un condensateur dont l'autre armature est, au point d'arrivée, en communication avec la terre par l'intermédiaire de l'appareil récepteur (appareil à miroir, par exemple), et au départ avec un levier qui oscille entre deux contacts reliés aux pôles contraires de deux piles égales.

Si l'on met ce levier en communication avec le contact qui correspond au pôle positif, l'armature du condensateur à laquelle il communique prend une charge positive, et la seconde s'électrise négativement aux dépens de l'armature du second condensateur à laquelle elle est reliée par le conducteur de ligne. Cette dernière armature s'électrise positivement et réagit sur l'armature en relation avec la terre, qui prend une charge négative en repoussant le fluide positif dans le sol à travers le fil de l'appareil récepteur, et en produisant un signal de courte durée. Quand au départ le levier revient en contact avec le pôle négatif de l'autre pile, il produit un effet inverse. Les déviations de l'aiguille du récepteur dans l'un des sens représentent les points et celles qui ont lieu dans l'autre représentent les traits.

Cette disposition a l'avantage de mettre les appareils à l'abri des courants naturels continus qui traversent souvent les conducteurs des câbles sous-marins; les variations seules de ces courants, variations qui sont en général assez faibles, agissent sur ces instruments.

Transmission simultanée de plusieurs dépêches par un même fil.

Le problème de la transmission simultanée, dont les appareils multiples de MM. Meyer et Baudot ne donnent pas une solution directe, puisque dans ces appareils le passage des signaux s'effectue successivement, a été complètement résolu et donne d'excellents résultats, surtout lorsque les dépêches sont transmises en sens opposé.

Transmission simultanée de deux dépêches en sens contraire; duplex.—

La transmission simultanée de deux dépêches en sens contraire peut s'effectuer par deux méthodes différentes, applicables à tous les appareils à électro-aimants; nous nous bornerons à indiquer une des solutions, qui constitue la *méthode différentielle*.

Le récepteur est placé entre la ligne et le manipulateur dont les deux heurtoirs sont reliés l'un à la terre et l'autre à la pile; la bobine de l'électro-aimant comprend deux fils distincts enroulés en sens contraire et qui sont en relation d'un côté avec le manipulateur, tandis que de l'autre un des fils est relié à la ligne et le second est en communication avec la terre par l'intermédiaire d'une bobine de résistance.

Supposons que l'un des postes envoie seul le courant; l'électricité traversera en sens contraire les deux bobines de son récepteur, une partie ira sur la ligne et l'autre à la terre par le circuit local. Le récepteur restera en repos si les deux courants sont égaux, ce qu'on réalise en donnant à la bobine qui se trouve dans le circuit local une résistance équivalente à celle des conducteurs qui forment l'autre circuit (ligne et récepteur de l'autre poste).

Si le poste correspondant transmet seul, son courant ne traverse à l'arrivée qu'une seule des bobines et se rend directement à la terre par le manipulateur en faisant marcher l'appareil.

Enfin si les deux postes envoient ensemble des courants égaux et contraires, aucun courant ne passe sur la ligne, et les deux récepteurs fonctionnent sous l'influence des deux courants qui traversent les bobines en relation avec la terre. Il est facile d'ailleurs de reconnaître que la condition d'égalité des courants émis par les deux postes correspondants n'est nullement nécessaire, et que la transmission simultanée peut avoir lieu quel que soit le sens ou la direction de ces courants. On peut en effet admettre que chacun d'eux agit isolément sur l'électro-aimant; l'action du courant local est toujours nulle, et le courant envoyé par l'autre poste produit son effet comme s'il passait seul.

Pour que la transmission simultanée réussisse il faut que les conditions électriques de la ligne principale et de la bobine, qui constitue une ligne factice, soient à peu près identiques. Sur les longues lignes et surtout sur les lignes sous-marines, on est obligé d'ajouter à la bobine des condensateurs qui permettent de remplir cette condition.

La transmission simultanée peut être appliquée à tous les appareils; mais comme elle produit toujours un léger trouble, si faible qu'il soit, on comprend qu'elle réussisse mieux avec les appareils à signaux indépendants comme le Morse, qu'avec les appareils à mouvements synchroniques comme le Hughes.

Double transmission dans le même sens. — On peut réaliser la double transmission dans le même sens par plusieurs procédés, en disposant au départ deux manipulateurs qui envoient des courants de sens ou d'intensité différents, et à l'arrivée un certain nombre de relais qui, en fonctionnant sous l'influence de ces courants, font marcher deux appareils à signaux.

Voici un exemple de la manière dont peut être résolu le problème.

Supposons qu'au départ on ait deux piles inégales A et B, et deux manipulateurs dont un, lorsqu'il est manœuvré seul, envoie sur la ligne le courant de la pile A, tandis que le second envoie le courant de la pile B, et qu'enfin, par une disposition facile à imaginer, les deux piles s'ajoutant donnent une force électro-motrice $A + B$ quand les deux manipulateurs sont ensemble sur contact. Il suffira à l'extrémité de la ligne de faire marcher un seul des récepteurs avec les courants A et $A + B$, et l'autre avec les courants B et $A + B$.

On peut y arriver au moyen de trois relais inégalement sensibles, a , b , et c , dont un ne marche qu'avec des courants égaux ou supérieurs à ceux de la pile la plus faible, A, le second avec des courants au moins égaux à B et le troisième avec des courants aux moins égaux à $A + B$. Ces conditions peuvent être facilement remplies par une tension convenable des ressorts de rappel.

Si le relais a fonctionne seul, sous l'influence du courant A, il ferme par le jeu de son armature le circuit local par l'intermédiaire du premier appareil à signaux. Lorsque le courant est égal à B, il fait fonctionner les relais a et b , dont le dernier fait marcher le second récepteur en même temps qu'il rompt un contact et enlève la communication du premier récepteur avec la pile. Enfin si l'intensité est $A + B$, les trois relais fonctionnant, b fait toujours marcher le second récepteur, et l'armature du relais c rétablit la communication de la pile locale avec le premier récepteur, qui reçoit également les signaux.

Le système de double transmission dans le même sens peut être combiné avec la transmission simultanée en sens opposé, de sorte qu'on peut avec un seul fil arriver à transmettre en même temps quatre dépêches, deux dans un sens et deux en sens opposé.

Système harmonique de transmission. — Supposons qu'un diapason, à une ou deux branches, soit en vibration dans un poste télégraphique, et que son mouvement soit entretenu par un procédé quelconque, par exemple par la fermeture à chacune des vibrations d'un circuit local qui agisse sur l'une des branches par l'intermédiaire d'un électro-aimant; supposons, en outre, que ce diapason soit en communication avec une ligne télégraphique et qu'à chaque vibration il vienne toucher une pointe en relation avec l'un des pôles d'une pile dont l'autre pôle est à la terre. Il enverra une série de courants très rapprochés (de 200 à 500, suivant la note musicale à laquelle il correspond), qui se transmettront sur la ligne sous forme d'ondes électriques.

Si, à l'autre poste, le courant traverse un électro-aimant placé près de l'une des branches d'un diapason semblable au premier, il se produira une série d'attractions correspondant aux émissions, et si ce

diapason est d'accord avec celui du départ, il entrera en vibration et donnera la même note ; s'il n'y a pas accord, les effets ne s'ajouteront pas et le second diapason restera à peu près en repos. Si donc à l'arrivée on a une série de diapasons correspondants à des notes différentes et dont les électro-aimants sont tous placés dans le circuit, celui-là seul qui est d'accord avec le diapason de l'autre poste entrera en vibration.

La pile peut être introduite ou enlevée du circuit au poste de départ, à l'aide d'un manipulateur semblable à celui de l'appareil Morse qui permette d'envoyer des signaux ; ces signaux seront accusés à l'arrivée par les vibrations d'un seul diapason, tous les autres restant en repos. Ils peuvent être reproduits au moyen d'un parleur ou d'un récepteur Morse ordinaire, si la lame du diapason, en vibrant, vient fermer un circuit local comprenant cet appareil, malgré les interruptions entre deux vibrations successives qui sont trop courtes pour permettre à l'armature de revenir au repos.

On peut concevoir qu'on ait au départ et à l'arrivée un certain nombre de diapasons accordés deux à deux et dont chaque groupe corresponde à une note de l'échelle musicale. Si chacun de ces groupes est en relation au départ avec un manipulateur et à l'arrivée avec un récepteur, les signaux transmis par les différents manipulateurs se reproduiront sur les récepteurs correspondants.

Par ce procédé dont M. Elisha Gray a eu le premier l'idée, et dont nous ne faisons qu'indiquer le principe, on conçoit qu'on puisse avec un seul conducteur transmettre simultanément sept ou huit dépêches et même le double si on le combine avec le système de transmission *duplex* dont il a été question plus haut ; toutefois il n'est pas encore possible de dire le parti qu'on pourra tirer de ce mode de transmission dans la pratique.

Applications des divers systèmes de transmission.

Pour desservir les lignes télégraphiques dont le travail est considérable, on emploie suivant les cas soit l'appareil Morse en Duplex, soit l'appareil Hughes, soit un des systèmes à transmission rapide dont nous avons parlé.

La vitesse qu'on peut obtenir avec ces divers appareils dépend de la longueur des lignes desservies ; sur une ligne aérienne de 6 à 700 kilomètres on peut admettre approximativement les chiffres suivants, pour le nombre de dépêches qu'il est possible de transmettre en une heure, en supposant les dépêches composées de 20 mots et chaque mot de cinq lettres :

Appareil Morse.	25
id en Duplex.	45
Appareil Hughes.	60
id en Duplex.	110
Appareil Wheatstone à composition préalable.	90
id en Duplex.	160
Appareil Mayer 25 par clavier, soit pour 4 claviers.	120
id soit pour 6 claviers.	180
Appareil Baudot, 40 par clavier, soit pour 4 claviers.	160
id soit pour 6 claviers.	240

Sur les lignes secondaires, on emploie presque partout l'appareil Morse ordinaire, en subordonnant le mode d'installation aux exigences du service. Ainsi quelquefois chacun des bureaux est relié au suivant par un fil spécial, et, lorsqu'un bureau doit transmettre à une station avec laquelle il n'est pas directement en relation, il demande aux postes intermédiaires d'établir la communication, ce qui se fait aisément au moyen de commutateurs. D'autres fois, les appareils des postes intermédiaires sont tous dans le circuit et les dépêches envoyées par l'un quelconque de ces postes sont reçues à tous les autres. Enfin, dans certains cas, les divers appareils sont tous reliés à la ligne d'une part et de l'autre à la terre, et par conséquent chacun d'eux constitue une dérivation; le courant envoyé par l'un quelconque des postes se divise à chacun des points de bifurcation.

En France, les bureaux secondaires sont généralement groupés au nombre de deux seulement sur le fil qui les relie à une station principale, et, afin d'éviter les dérangements inutiles des employés de ces bureaux, on place à chacun d'eux un relais à armature aimantée qui reçoit le courant de la ligne et ne fonctionne que lorsqu'il a une direction déterminée, inverse pour les deux bureaux.

La télégraphie joue un rôle si important dans le service des chemins de fer, qu'on ne pourrait concevoir leur exploitation sans l'adjonction de lignes électriques, mettant en relation les différentes gares d'un réseau; toutefois, les dispositions doivent être prises pour que la sécurité ne soit pas compromise en cas d'interruption des communications. Deux fils conducteurs suffisent ordinairement: l'un d'eux relie entre elles les stations importantes, tandis que l'autre s'arrête à toutes les stations secondaires. Les appareils devant pouvoir être desservis par des employés peu exercés, on emploie généralement des appareils très simples tels que l'appareil à cadran ou l'appareil Morse.

En outre des communications télégraphiques ordinaires, on a imaginé un grand nombre de systèmes automatiques fondés sur l'emploi de

l'électricité et qui sont destinés à faciliter le service; ainsi les disques qui protègent les stations sont ordinairement disposés de façon à fermer, lorsqu'ils sont à l'arrêt, un circuit local qui fait marcher une sonnerie à trembleur, placée à l'intérieur des gares; quelquefois les aiguilles de changement de voie font, lorsqu'elles sont manœuvrées, fonctionner des sonneries qui donnent, à distance, l'assurance que leur jeu a été régulier; dans certaines compagnies un fil spécial permet d'avertir du départ des trains les gardes-barrières de la ligne au moyen d'un appareil très simple ne donnant que quelques signaux élémentaires (système Jousselin, par exemple); afin de prévenir en cas de brouillard le mécanicien de la mise à l'arrêt des disques, M. Lartigue a imaginé un appareil consistant en une brosse métallique qui frotte en passant sur une pièce isolée, et établit un contact métallique, ayant pour effet de fermer un circuit et de faire marcher le sifflet; on a aussi essayé de mettre les trains circulant sur une même voie en communication télégraphique entre eux au moyen de frotteurs établissant un contact avec un conducteur fixe, etc., etc.

Un certain nombre de ces systèmes sont simples et pratiques; toutefois ils peuvent faire défaut à un moment donné et ne peuvent fournir une sécurité absolue; aussi ne doivent-ils être considérés que comme des moyens de faciliter le service, et doit-on toujours être prêt à prendre les précautions ordinaires en cas de besoin.

Cette revue rapide montre tous les progrès qu'a faits la télégraphie électrique depuis qu'elle est appliquée c'est-à-dire depuis environ quarante ans; personne ne peut prévoir où ils s'arrêteront. Tous les jours il peut surgir une découverte ou une idée nouvelle qui entraîne la transformation complète de tous les systèmes actuellement employés; c'est ainsi, par exemple, que le téléphone, dont nous n'avons pas à nous occuper ici, peut, s'il devient possible de s'en servir à de grandes distances, être appelé à modifier profondément les relations télégraphiques.

E.-E. BLAVIER.

TÉLÉPHONIE, MICROPHONIE, PHOTOPHONIE

§ 1.

TÉLÉPHONIE. — MICROPHONIE.

De toutes les inventions des hommes, le téléphone est peut-être la plus merveilleuse. Ainsi que l'indique son nom, composé de deux mots grecs *τῆλε* loin, *φωνή* voix, le téléphone permet de transmettre la voix, la parole articulée à une distance considérable, qui peut un jour être sans limites, comme celle que franchit le télégraphe. Cette communication s'effectue par un fil électrique reliant le « transmetteur » devant lequel on parle au « récepteur » qu'on écoute. Dans ce récepteur, c'est une plaque mince de métal qui, en vibrant, reproduit avec ses inflexions et son timbre la voix de celui qui parle à l'autre extrémité du fil. Ainsi cette plaque a une voix humaine, celle d'un ami, d'une personne aimée, et on l'entend, on la reconnaît, quoique celui qui la possède soit à une distance considérable de celui qui l'entend.

Quoi de plus incroyable ! Quelle imagination vagabonde aurait jamais rêvé cette conversation entre deux individus séparés par une grande distance !

Et cependant cela est, et cela est réalisé par des moyens d'une simplicité extrême.

Quand on réfléchit à de tels résultats, on éprouve encore ce tressaillement de surprise, suivi bientôt d'admiration qu'excita dans le monde entier l'apparition du téléphone, lorsque M. Graham Bell, l'inventeur de cet appareil, le présenta pour la première fois en 1876 à l'Association scientifique de Boston. Mais l'enthousiasme du premier moment était à peine calmée que l'invention fut en butte à des critiques et même souleva des réclamations de priorité.

Ainsi que cela arrive presque toujours pour les grandes inventions, on trouva des devanciers à M. Graham Bell.

On se reporta aux travaux de Page qui, en 1844, avait découvert qu'une tige aimantée produisait un son lorsqu'on modifiait sa force magnétique en faisant passer un courant électrique variable à travers un fil enroulé en hélice autour de cette tige.

On rappela les essais de M. Ph. Reiss qui, avec un appareil muni d'un diaphragme en métal placé au-dessus d'un électro-aimant, réussit à transmettre à distance des sons musicaux avec leur intensité et leur hauteur.

Enfin la paternité de l'invention fut disputée plus sérieusement à M. Bell par M. Elisah Gray qui, après avoir inventé en 1874 le télégraphe harmonique, chercha à transmettre la voix à l'aide d'appareils à diaphragme métallique. C'est au cours de ces tentatives que M. Bell fit connaître et expérimenta publiquement son appareil qui fournissait d'emblée une solution aussi simple qu'ingénieuse de ce difficile problème. A ce double point de vue la disposition de M. Bell reste le chef-d'œuvre de cette série d'inventions admirables qui ont surgi à la suite de la découverte du téléphone.

Si la loi française des brevets n'a pu, dans son inflexibilité, maintenir au brevet Bell une validité que des erreurs de date avaient compromise, la France par la voix de l'Académie des sciences lui a décerné le prix Volta de 50 000 francs, fondé pour récompenser la plus grande découverte en électricité, et accordé seulement une fois vingt ans auparavant à M. Ruhmkorff, l'habile constructeur de la bobine d'induction.

Description du téléphone Bell.

Dans le système téléphonique de M. Bell, le transmetteur et le récepteur sont identiques et réversibles.

Ainsi que le montre la figure ci-contre qui suppose le téléphone coupé par le milieu, cet appareil se compose de trois parties essentielles : une plaque de fer très mince, sorte de membrane métallique, une tige d'acier aimantée dont l'un des pôles est en face de la membrane, et une bobine qui coiffe la même extrémité de l'aimant. Les fils de la bobine du transmetteur se prolongent par un double fil qui va rejoindre la bobine semblable du récepteur.

Lorsqu'on parle dans l'appareil, la membrane métallique vibre à l'unisson de la voix, dont le souffle lui communique fidèlement toutes les inflexions de la parole articulée. Cette plaque de fer, en s'approchant plus ou moins du pôle de l'aimant modifie son état magnétique, et cette modification engendre, par induction dans la bobine, des courants électriques, qui s'élancent dans le fil et vont jusqu'au récepteur. Là, les mêmes circonstances se répètent, mais en sens inverse. En traversant la bobine du récepteur, les courants font varier l'intensité

magnétique de l'aimant qui, influençant plus ou moins la membrane, la fait vibrer absolument dans les mêmes conditions que la membrane du transmetteur. La parole se trouve donc reproduite d'un bout à l'autre du fil conducteur.

Un phénomène qui doit frapper l'attention dans le fonctionnement du téléphone, c'est la naissance, sous l'action de la voix, de ces courants ondulatoires d'électricité qui traversent le fil téléphonique, et qui sont comme la traduction électrique des vibrations sonores et vocales.

Il y a deux sortes de téléphones : le téléphone magnétique, dont je viens d'esquisser la théorie, et le téléphone à pile, dont le principe a été aussi signalé par M. Bell. Dans les téléphones de cette catégorie, au lieu que ce soit la force de la voix qui fasse marcher l'appareil, c'est un courant électrique qui passe d'une manière continue dans le fil de communication, et la voix ne fait que modifier l'intensité de ce courant.

*Téléphones magnétiques dérivés
du téléphone Bell.*

L'invention du téléphone a ouvert le chemin à un grand nombre de chercheurs qui se sont essayés à modifier et à améliorer l'œuvre primitive. Pour les personnes qui désireraient suivre les étapes du progrès accompli dans cet ordre d'idées, on ne peut mieux faire que de les engager à consulter les ouvrages spéciaux qui ont été écrits sur la matière, et notamment le livre si complet de M. le comte du Moncel. On se bornera ici à signaler les systèmes qui ont donné des résultats pratiques en commençant par ceux qui procèdent du même principe que l'appareil de Bell.

Tel était à l'origine le téléphone, tel il est encore dans sa constitution fondamentale sous les divers types imaginés depuis, quand on l'emploie comme appareil récepteur.

Les innovations ont porté sur deux points principaux, le réglage et le renforcement. Dans le modèle de M. Trouvé l'adjonction d'une vis per-

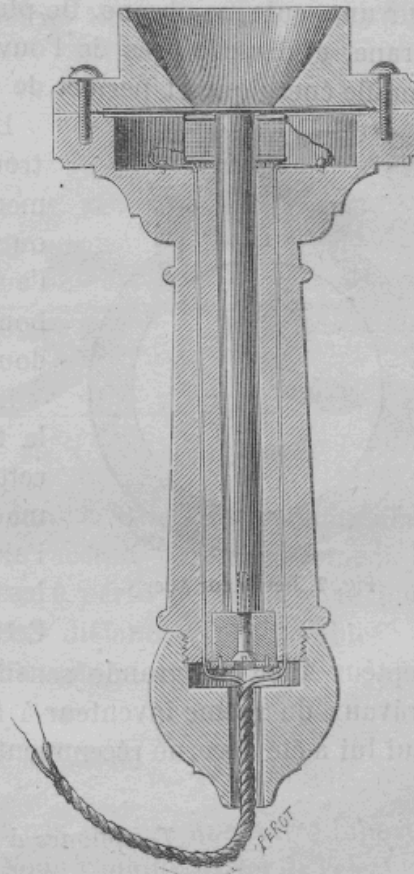


Fig. 1. Téléphone Bell.

met de régler l'écartement de la membrane du pôle voisin de l'aimant. Les types de Gray et de Phelps comportent deux membranes placées devant les deux pôles de l'aimant recourbé à cet effet.

Le système Gower, utilise les deux pôles en concentrant leurs effets sur une seule membrane. De plus, M. Gower perce le centre de la membrane, et dispose près de l'ouverture une anche qui vibre sous un souffle énergique et permet de transmettre un signal d'avertissement.

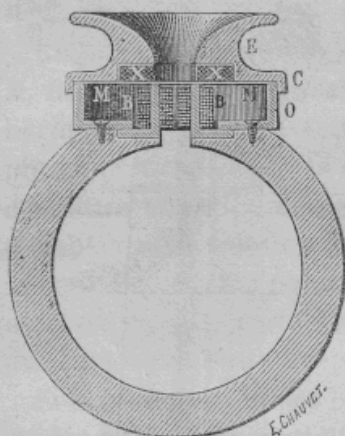


Fig. 2. Récepteur Ader.

Le principe des pôles concentrés se retrouve également dans les systèmes Siemens et Ader. Mais ce dernier présente, en outre, une particularité remarquable. De l'autre côté de la bobine B, près de l'embouchure E, est adapté un anneau en fer doux X appelé surexcitateur.

Le but de cet anneau est d'augmenter la force active de l'aimant, en raison de cette propriété très simple que possède la masse de fer doux d'attirer les pôles de l'aimant plus près de ses extrémités, et de les rapprocher ainsi de la membrane M.

Cette combinaison ingénieuse donne au récepteur Ader une grande sensibilité; elle a contribué avec les autres travaux du même inventeur à lui faire mériter le prix de 3000 francs qui lui a été décerné récemment par l'Académie des sciences.

Téléphones à pile, système Edison.

MM. Gray et Bell avaient reconnu que le magnétisme mis en jeu par le déplacement de la membrane ne produisait pas des courants ondulatoires assez puissants pour transmettre la voix à de grandes distances avec une intensité suffisante. Ils eurent alors l'idée de recourir à une pile pour lancer d'une manière continue dans le circuit un courant électrique, en ne demandant plus à l'oscillation de la membrane que de le transformer en courants ondulatoires. Ce fut là l'origine de la classe des téléphones à pile.

Cependant l'association du magnétisme rémanent de l'aimant et de la pile, n'avait pas fourni les résultats espérés, et l'on attendait pour la transmission téléphonique entre des points très éloignés une solution plus pratique. C'est M. Edison qui a eu le bonheur de la donner en 1877. Son téléphone est fondé sur cette propriété qu'un corps mauvais conducteur, tel que le charbon interposé dans un circuit, offre au passage du courant une résistance qui varie suivant les pressions auxquelles le dit corps est soumis. Prenant toujours la membrane métallique pour

recevoir les vibrations de la voix, M. Edison la met en contact avec une pastille faite avec du noir de fumée de pétrole.

La figure ci-dessous montre la disposition du transmetteur Edison. Cette propriété du charbon avait été étudiée par MM. Clairac et du Moncel, en France, mais M. Edison a le mérite de l'avoir appliquée à la téléphonie.

Le transmetteur Edison présente une autre particularité, qui réside dans l'adjonction d'une bobine d'induction. Le circuit primaire de cette bobine reçoit le courant électrique qui a traversé la pastille de charbon et a été rendu ondulatoire par la vibration de la membrane métallique, et ce sont les courants induits de l'hélice secondaire qui sont dirigés dans le câble de transmission. L'intervention de cette action inductive accroît considérablement la puissance de la transmission. Aussi est-ce à partir de la mise au jour de ce système que l'on a pu franchir des distances considérables, et que la téléphonie a commencé à se développer.

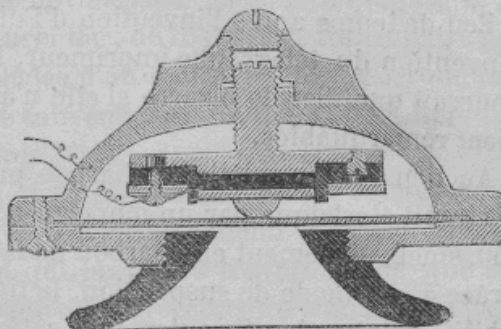


Fig. 3. Transmetteur Edison.

Electro-motographe d'Edison.

Avant de quitter M. Edison il ne faut pas oublier une autre innovation téléphonique du fécond inventeur. Nous voulons parler de l'électro-motographe ou métophone. C'est un récepteur destiné à permettre à un grand nombre de personnes réunies dans une même salle d'entendre toutes ensemble le chant ou la voix transmis par le téléphone.

Cet appareil par l'ensemble de sa construction présente une certaine ressemblance avec le phonographe. Il est formé d'un cylindre qui, en tournant, frotte contre l'extrémité d'une aiguille et la fait vibrer ainsi qu'une membrane métallique au centre de laquelle cette aiguille est fixée par son autre extrémité. Ce qui caractérise l'électro-motographe c'est le rôle électro-chimique que remplit le cylindre grâce à la matière spéciale dont il est construit. Cette matière est composée de craie en poudre agglomérée avec de l'acétate de mercure mélangée à une dissolution de soude ou de potasse caustique.

La surface du cylindre ainsi constitué est entretenue dans un certain état d'humidité, et elle jouit de la propriété d'ailleurs connue et appliquée déjà dans le « Recorder » de M. Thompson, de devenir rugueuse dans les parties où elle est traversée par un courant électrique. On com-

prend par là comment les courants ondulatoires qui viennent d'un Transmetteur téléphonique permettent, par l'entremise de l'aiguille vibrante, de faire chanter ou parler à haute voix la plaque métallique du « Métophone. »

Transmetteurs microphoniques.

Peu de temps après l'invention d'Édison, un homme déjà célèbre par l'invention du télégraphe-imprimeur, M. Hughes, eut une idée qu'on pourrait qualifier de bizarre si elle n'avait eu des conséquences vraiment remarquables.

Au lieu d'une rondelle de charbon pulvérisé, il imagina d'interrompre le circuit électrique par un morceau de charbon suspendu entre deux coussinets également en charbon de façon à être en équilibre instable. Grâce à son mode de suspension, la tige de charbon subit avec une sensibilité extrême les ébranlements extérieurs communiqués à son support, et ses pointes émoussées, qui sont traversées par le courant, offrent à ce dernier un passage d'une section incessamment variable produisant, comme dans le téléphone Edison, les courants électriques ondulatoires correspondant aux ondes sonores,

Tel est le principe du Microphone qui doit son nom à ce qu'il permet, en amplifiant grandement les sons, de faire entendre la voix et les bruits les plus faibles.

Il serait trop long d'énumérer ici les expériences curieuses auxquelles a donné lieu le Microphone pour le renforcement des sons les plus imperceptibles (le tic-tac d'une montre placée près de l'appareil, le bruit d'une mouche qui marche sur son support) et nous arrivons tout de suite aux appareils qui en dérivent et qui ont reçu le nom de transmetteurs microphoniques.

Parmi ceux que la pratique a adoptés, nous citerons les systèmes Crossley et Ader. Sauf des différences d'agencement, ils présentent la même composition. L'un et l'autre possèdent un certain nombre de baguettes de charbon appliquées librement contre une tablette en bois mince, et divisant le parcours offert au courant électrique pour lui opposer moins de résistance. L'appareil affecte dans les deux systèmes la forme d'un pupitre qui renferme à l'intérieur la bobine d'induction, le parafoudre, et autres accessoires qu'on retrouve dans le transmetteur Edison. Un système de transmetteur que l'on range aussi dans la classe des microphones, est l'appareil Blake, très en faveur en Amérique; il ne comporte qu'une petite pastille de charbon pressée par un ressort sur la membrane métallique.

Les dispositions des transmetteurs microphoniques peuvent être modifiées à l'infini. On doit signaler encore le microphone à contacts multiples de MM. P. Bert et d'Arsonval, la disposition de M. Lock-Labye et celle

plus récente de M. Maiche, qui remplace la tablette en bois par une cloche en verre. Celle-ci transmet ses vibrations à deux petites sphères en charbon intercalées dans le circuit électrique. Les auteurs de ces variantes semblent avoir eu pour objectif d'augmenter l'intensité du son transmis. C'est là, sans doute, une intéressante préoccupation, si l'on se propose de faire entendre à plusieurs personnes réunies dans une même salle un discours ou un chant produit au loin. Mais ce n'est pas là le rôle du téléphone dans l'usage journalier, où il s'agit de transmettre purement des communications verbales d'un caractère souvent confidentiel, ou de réaliser à distance une conversation intime qui ne doit pas tomber dans des oreilles étrangères.

Vers le milieu de l'année dernière d'autres modifications intéressantes ont été signalées par le Dr Herz. Il a réussi à obtenir la parole du Condensateur chantant de M. Pollard qui jusque-là n'avait donné que des sons musicaux. De plus il a fait voir que ce récepteur n'était aucunement sujet aux effets d'induction qui troublent les communications téléphoniques. Ce système expérimenté sur des lignes télégraphiques, aurait permis d'après l'inventeur de pousser la transmission jusqu'à des portées de 1100 kilomètres. Nous verrons si la pratique sanctionnera ces belles promesses.

Applications diverses du téléphone.

Les applications du téléphone ont pris des formes tellement variées qu'il serait trop long de les énumérer ici. A côté de celles qui ont un but d'utilité comme les échanges de conversations ou d'appels dans les villes, sur les chemins de fer, dans les mines, il en est qui n'ont d'autre objet que de procurer une distraction agréable. C'est là le caractère de la curieuse application qui a été faite dans cette Exposition, et qui consiste à avoir mis deux salles du Palais de l'Industrie en communication téléphonique avec l'Opéra et le Théâtre Français. Les visiteurs, qui entreront le soir dans ces salles « d'audition à distance », n'auront qu'à mettre le téléphone à l'oreille pour entendre chanter ou déclamer les acteurs aussi nettement que s'ils assistaient à la représentation. Il ne dépend que de la bonne volonté des directeurs de théâtres que ce plaisir soit accessible à tous les abonnés du réseau téléphonique de Paris.

Établissement des Réseaux téléphoniques.

Lorsque la découverte de M. Bell fut connue, il se rencontra des esprits sérieux qui contestèrent l'utilité du téléphone et se refusèrent à croire à son emploi pratique dans l'avenir. Très heureusement les résultats ont donné tort à ces pronostics fâcheux. Moins défavorisé que le

phonographe d'Édison son émule, resté jusqu'ici à l'état de curiosité scientifique et même relégué au rôle de jouet, le téléphone n'a pas tardé à trouver sa place à côté du télégraphe parmi les plus utiles et les plus fécondes applications de la science.

Ce succès rapide est dû non seulement au mérite de l'invention, mais à ce fait qu'elle était une de celles qui arrivent à leur heure, trouvant dans la télégraphie le terrain tout préparé pour se développer et arriver à sa pleine maturité.

C'est grâce au téléphone que les personnes habitant une même ville peuvent à tout moment de la journée échanger des conversations sans sortir de leurs demeures. Ce résultat est obtenu par des fils électriques reliant ces différents points et constituant un réseau téléphonique.

Le problème de l'établissement d'un réseau téléphonique présente certaines difficultés pratiques.

S'il n'existait qu'un petit nombre de points, il suffirait de les réunir les uns avec les autres en formant ce qu'on appelle le polygone étoilé. Mais ces lignes, dans une ville comme Paris, deviennent beaucoup trop longues et par suite trop dispendieuses pour les abonnés situés aux points extrêmes, dans les quartiers excentriques. Pour éviter ces inconvénients, au lieu d'une station centrale, on en prend plusieurs, et on forme une série de petites étoiles réparties le mieux qu'on le peut dans les régions de la ville. Ces stations ou mieux ces bureaux auxiliaires ainsi choisis, sont alors réunis entre eux. Cette réunion peut avoir lieu directement en formant le polygone étoilé ou par l'intermédiaire d'un bureau central.

C'est ce système de distribution qui a été adopté à Paris dont le réseau comprend neuf bureaux auxiliaires répartis dans les principales régions et communiquant avec le bureau central de l'avenue de l'Opéra.

Installation des lignes et pose des câbles.

Les lignes sont aériennes ou souterraines, quelquefois elles sont mixtes sur leur parcours, d'un abonné à son bureau auxiliaire.

Lignes aériennes. — Les lignes aériennes tendent à disparaître; elles sont construites d'après le même principe que les lignes télégraphiques. Elles consistent en fils d'acier supportés de distance en distance par des poteaux avec isolateurs. Ces poteaux sont fixés sur les toitures des maisons avec l'autorisation des propriétaires.

Lignes souterraines. — Les lignes souterraines sont établies avec un câble d'une structure spéciale. Dans les types principaux employés jusqu'ici par la Société des téléphones, le conducteur, composé d'un ou de plusieurs brins en cuivre, est isolé par une enveloppe en gutta-percha, puis recouvert d'un guipage de coton. Ces fils, ainsi constitués, sont en-

tourés d'une gaine protectrice en plomb. On les réunit au moins deux par deux dans le même tube de plomb, pour former le double fil qui dessert chaque abonné. Mais le plus souvent on groupe sous le même plomb sept doubles fils pour simplifier et économiser le câble de transmission.

Pour la construction des lignes téléphoniques souterraines à Paris on a été très heureux de pouvoir utiliser le magnifique réseau d'égouts dont la ville de Paris a été dotée par M. Belgrand. Les câbles longent l'égout près de la naissance de la voûte, et y sont supportés de mètre en mètre par des crochets en fer scellés dans le mur. C'est par le branchement particulier d'égout, qui correspond à la maison habitée par l'abonné, que le double fil est amené jusqu'à l'appareil téléphonique de ce dernier.

Les doubles fils partant des postes des abonnés convergent vers le Bureau central et sont groupés en un faisceau que l'on épanouit sur le mur intérieur de la cave pour les fixer suivant une circonférence en formant une rosace. De la périphérie de cette rosace, les fils sont dirigés sur les appareils qui doivent établir les communications et qu'on appelle « commutateurs ».

Agencement d'un bureau central.

L'appareil important d'un bureau central est le commutateur. Il est destiné à permettre d'établir des liaisons temporaires entre les fils qui y aboutissent suivant toutes les combinaisons deux à deux, résultant des communications que peut demander un abonné quelconque avec chacun de ceux qui sont reliés au même bureau.

Comme il faut que l'employé soit prévenu quand l'abonné désire être mis en communication avec tel autre, le tableau commutateur est accompagné d'un avertisseur ou annonciateur avec signaux optiques pour le jour et sonnerie pour la nuit. Le fil de chaque abonné, après avoir touché au commutateur, se rend à son annonciateur et de là à la terre ou bien se rejoint au fil de retour comme dans l'organisation récente qui est à circuit fermé.

L'annonciateur le plus employé se compose d'un électro-aimant, dont l'armature, lorsqu'elle est éloignée, retient un disque cachant le numéro qui désigne l'abonné. Quand celui-ci en appuyant sur le bouton d'appel de son appareil, lance le courant de sa pile locale dans la ligne, l'armature de l'électro-aimant de l'annonciateur est attirée et déclanche le disque qui tombe et découvre le numéro.

Deux systèmes de commutateurs sont en usage.

Le plus ancien, déjà appliqué en télégraphie, et désigné sous le nom

de commutateur suisse est fondé sur le principe d'un tableau à double entrée.

L'autre, dénommé commutateur américain, a pour organe essentiel un interrupteur dit « Jack-Knife », qui tire son nom de la forme de couteau qu'il affectait à l'origine.

C'est dans ces deux systèmes à l'aide de fiches ou de chevilles que l'on forme la liaison électrique entre les deux points du commutateur auxquels aboutissent les lignes des abonnés à mettre en communication.

La manière dont se fait le service des bureaux téléphoniques est des plus simples. Il est en outre des plus rapides, grâce à l'intelligente activité déployée par les demoiselles à qui est confié le service du réseau de Paris pendant le jour.

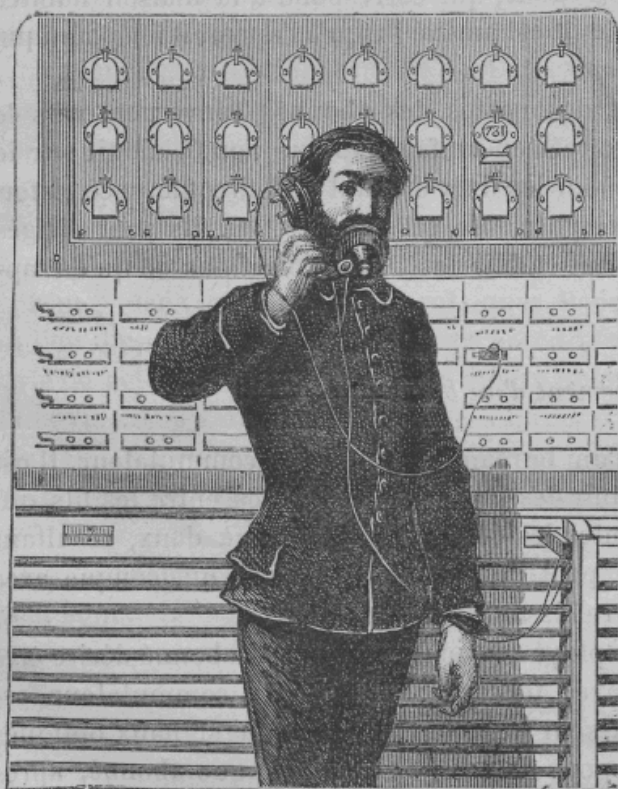


Fig. 4. Aspect d'un bureau central.

ASPECT D'UN BUREAU CENTRAL

Dans ce bureau où est installé un commutateur Jack-Knife on voit l'employé occupé à établir une communication demandée par l'abonné 731 et parlant avec celui-ci en se servant de l'appareil portatif

de bureau qui réunit le transmetteur Edison avec son récepteur.

EXPLOITATION DES RÉSEAUX TÉLÉPHONIQUES.

C'est en Amérique, berceau de l'invention du téléphone, que furent établis les premiers réseaux téléphoniques. Ils ont pris un grand développement à Boston, Philadelphie, Chicago et New-York. Dans chacune de ces dernières villes on compte plus de 3000 abonnés.

Les lignes sont aériennes; cette installation est défectueuse et entraîne surtout de graves inconvénients par suite de la construction

des maisons américaines, qui ont presque toutes leurs toitures en terrasse. En outre la multiplicité de ces câbles aériens au-dessus des rues et des places publiques finit par leur donner un aspect désagréable.

Partout on a adopté le principe des abonnements. A New-York, chaque abonné paye par an 120 dollars lorsque sa distance au prochain bureau auxiliaire ne dépasse pas un mille anglais.

La compagnie qui s'est créée en Angleterre pour exploiter le téléphone pensait, comme celle de l'Amérique, pouvoir fonctionner sous le régime de la liberté, lorsque vers la fin de l'année dernière le gouvernement anglais réclama pour le Post-Office le monopole de l'emploi du téléphone. La Compagnie résista, et un procès s'ensuivit qui fut porté devant la cour de l'Échiquier de Sa Majesté britannique. La compagnie a perdu son procès; mais par suite d'un arrangement elle est devenue fermière du gouvernement.

Actuellement le téléphone fonctionne dans plusieurs grandes villes d'Angleterre et d'Écosse. A Londres, le prix de l'abonnement est de 20 livres sterling.

En Allemagne, le gouvernement se charge de l'exploitation du téléphone. Des réseaux téléphoniques commencent à s'établir à Berlin, à Hambourg, Mulhouse, etc. Le prix de l'abonnement à Berlin est de 200 marcs ou 250 francs.

La Belgique a vu se développer assez rapidement l'exploitation du téléphone qui compte des réseaux importants à Bruxelles, Anvers et Liège.

En France, les réseaux téléphoniques sont exploités par la Société générale des téléphones, qui a été constituée le 30 octobre 1880. Cette Société est liée avec l'État, par le cahier des charges de l'arrêté du 26 juin 1879, par lequel M. le ministre des postes et des télégraphes, a autorisé l'installation et l'exploitation des communications téléphoniques.

Outre un cautionnement de 25 000 francs, la Compagnie concessionnaire paye à l'État, à titre de droit d'usage du téléphone, une annuité calculée à raison de 10 pour 100 des recettes brutes encaissées par l'entreprise.

Pour l'emplacement de ses fils dans les égouts, la Société paye à la ville une redevance dont le chiffre vient d'être arrêté par le traité soumis au Conseil municipal.

Le réseau souterrain, qui n'était que de 430 kilomètres au moment de la fusion des Compagnies, mesure aujourd'hui un développement de 1200 kilomètres.

Le nombre des abonnés reliés s'est élevé de 454 à 1500 sur lesquels 1110 sont reliés.

Le nombre des communications demandées en une semaine, qui

était de 4000 en octobre, a atteint le chiffre de 50 000; il a plus que décuplé.

Ces chiffres éloquents montrent le progrès que fait l'usage du téléphone. Auxiliaire du télégraphe, il entre tout à fait dans les mœurs. Aujourd'hui, il permet aux habitants d'une même ville de communiquer verbalement entre eux, à toute heure du jour ou de la nuit. Rien ne s'oppose à ce que d'ici à un temps peu éloigné, on puisse également parler d'une ville à une autre. Rien n'empêche que le réseau téléphonique, en s'étendant plus loin encore, ne couvre chaque continent, et, traversant les mers, n'embrasse le globe terrestre tout entier.

Lorsque ce jour sera arrivé, lorsqu'on pourra ainsi se parler d'un bout du monde à l'autre, lorsque, quelle que soit la distance qui les sépare, deux êtres chers l'un à l'autre pourront se faire entendre le timbre et même le souffle de leur voix, leurs rires comme leurs sanglots, ne pourra-t-on pas dire que le téléphone a véritablement supprimé l'éloignement, cette tristesse de la vie, et qu'à ce titre surtout, l'auteur de cette découverte doit être considéré comme un des bienfaiteurs de l'humanité.

§ 2.

PHOTOPHONIE.

Exposé.

C'est encore à M. Graham Bell qu'est due la découverte du photophone, appareil destiné à transmettre la voix à distance par la lumière. Il l'annonça vers le milieu de l'année dernière à l'Association scientifique de Boston.

Dans le photophone, le fil métallique est supprimé; il n'en est plus besoin, puisqu'au lieu de l'électricité, c'est la lumière qui est l'agent de transmission. Le transmetteur et le récepteur sont donc unis par un simple faisceau de rayons lumineux empruntés au soleil, ou à une source artificielle quelconque, lampe électrique, gaz, bougies, etc. C'est, selon l'expression de M. Bell, l'énergie radiante de ce faisceau qui est mise à contribution pour transporter la voix au loin. La voix s'entend finalement par un téléphone. Mais comment celui-ci est-il influencé par le faisceau lumineux, comment ce faisceau lui-même sera-t-il mis en état de vibrer comme la parole? Autant de questions que M. Bell avait à résoudre pour arriver à son but. La première exigeait l'emploi d'un corps à la fois sensible à la lumière et à l'électricité. Ce corps existait; c'est le sélénium.

Propriété du sélénium. — Le sélénium est considéré comme un métal-

loïde par les chimistes qui le placent à côté du tellure, dans la famille du soufre. Il a été découvert en 1817 par Berzelius et Gottlieb Gahn, qui l'ont isolé d'une pyrite de fer avec laquelle ils cherchaient à préparer de l'acide sulfurique.

Au nombre des propriétés du sélénium, Berzelius avait signalé celle qu'il possède d'être une substance isolante de l'électricité. Mais cette propriété était seulement inhérente à l'état amorphe et vitreux dans lequel il l'avait obtenu. Ainsi que le montrèrent successivement Knox, en 1837, puis Hettorf, le sélénium devient conducteur de l'électricité lorsqu'il est chauffé, ou lorsqu'après avoir été fondu il est refroidi lentement; il a alors changé d'état et est devenu cristallin.

Enfin, en 1873, M. Willoughby Smith fait connaître à la Société des ingénieurs télégraphistes de Londres, que la résistance du sélénium au passage du courant électrique est plus faible à la lumière que dans l'obscurité. Ces résultats sont confirmés par plusieurs physiciens, entre autres par le lieutenant Sale, par M. Adams et par lord Rosse. Ce dernier, par des expériences comparatives faites avec le sélénium et une pile thermo-électrique, chercha à démontrer que c'est la lumière seule, et non la chaleur, qui fait varier la résistance électrique du sélénium.

Quoi qu'il en soit, le sélénium est sensible à l'influence des radiations lumineuses. L'important pour M. Bell était d'accroître cette sensibilité en vue des effets qu'il en voulait tirer, c'est-à-dire de diminuer la résistance que le sélénium présente au passage de l'électricité. Il obtint un excellent récepteur téléphonique en augmentant la surface du sélénium par rapport à son volume et en réduisant le plus possible la longueur traversée par le courant.

Dispositions du photophone.

Tout d'abord M. Bell a construit son photophone pour l'appliquer seulement à la transmission des sons musicaux. L'interrupteur est une roue perforée intercalée entre la source lumineuse et le récepteur. Le sélénium sous la forme d'une tige, d'un cylindre, ou d'une spirale, est placé avec un téléphone dans un circuit électrique. Le faisceau lumineux provenant du soleil ou d'une lampe électrique est dirigé par un réflecteur sur une lentille au foyer de laquelle est placée la roue perforée. Lorsqu'on fait tourner cette roue, elle détermine sur le faisceau lumineux une succession d'éclairs et d'éclipses. S'il s'en produit 435 par seconde, il y aura autant d'émissions et d'interruptions du courant électrique et, par suite, la membrane du téléphone exécutera 435 vibrations, c'est-à-dire rendra la note du *la* normal.

Voilà pour le transport des sons. Arrivons maintenant à la transmission de la parole. Il ne suffit plus alors de déterminer des intermittences

d'éclairs et d'éclipses dans le faisceau lumineux, il y faut produire des vibrations se modifiant sans cesse dans leur vitesse et dans leur inten-

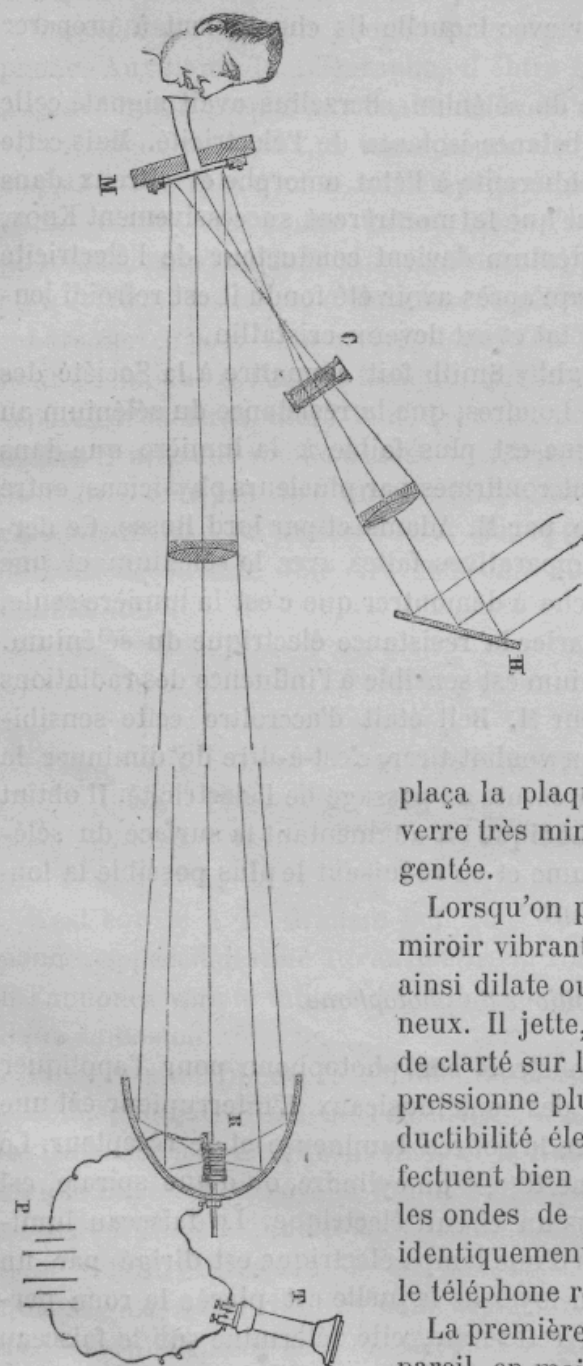


Fig. 5.

une distance de plus de 21 kilomètres. Ils employaient la lumière du soleil, comme d'ailleurs dans toutes les expériences auxquelles ils se livrèrent en Amérique. Ils eurent alors l'occasion fréquente de consta-

sité en concordance avec les vibrations qui caractérisent la voix. Le premier interrupteur imaginé dans ce but par M. Bell, est une sorte de transmetteur téléphonique, dont la membrane est reliée avec une plaque percée de fentes parallèles et superposées à une plaque percée de la même manière. Mais bientôt supprimant l'intermédiaire de ces plaques ajourées, M. Bell eut l'idée de faire agir directement la membrane vibrante comme interrupteur du faisceau lumineux. Pour cela il rem-

placa la plaque de fer par une feuille de verre très mince dont une des faces est argentée.

Lorsqu'on parle dans ce transmetteur, le miroir vibrant se bombe ou se creuse, et ainsi dilate ou contracte le faisceau lumineux. Il jette, de la sorte, plus ou moins de clarté sur le sélénium et, par suite, impressionne plus ou moins vivement sa conductibilité électrique. Ces variations s'effectuent bien en concordance parfaite avec les ondes de la voix parlée, puisque c'est identiquement celle-ci que l'on entend dans le téléphone récepteur.

La première expérience faite avec cet appareil, en mai 1878, a permis à MM. Bell et Tainter de causer à une distance de 218 mètres. Plus tard, ils purent correspondre à

ter des amoindrissements dans le son transmis, chaque fois que le soleil venait à être obscurci : ce qui leur permit de dire qu'avec le photophone on peut entendre passer les nuages devant le soleil.

Conséquences du Photophone.

En multipliant ces expériences, M. Bell est arrivé à des résultats d'une haute importance scientifique. La principale est que l'on peut même se dispenser du concours de l'électricité et entendre, en quelque sorte, la lumière vibrer sur le corps qu'elle vient frapper.

Pour le prouver M. Bell se sert d'un appareil semblable à son transmetteur, à cette différence près, que le tuyau dans lequel on parle se termine par un pavillon. En le portant à l'oreille, on entend résonner la plaque dès qu'elle est touchée par le faisceau lumineux mis en vibration au moyen de la roue perforée. Le bruit est faible, mais on s'en rend compte par contraste au moyen des silences qui se produisent lorsqu'on passe la main devant le faisceau de lumière.

M. Bell a fait cette expérience avec des plaques de différentes substances ; il a essayé tous les métaux, et chaque fois il a entendu le bruit provenant de la lumière scintillante qui tombait sur la plaque. Tous les corps sont donc susceptibles de résonner sous l'action d'un rayon lumineux vibratoire. C'est là, en quelque sorte, la révélation d'une nouvelle propriété de la matière, ou mieux une nouvelle confirmation de cette grande conception scientifique moderne, à savoir que : chaleur, lumière, électricité, sont les manifestations d'une même force de la nature qui est le mouvement.

Dans ces derniers temps et presque simultanément, M. Bell en Amérique et M. Mercadier en France, ont trouvé que les corps poreux tels que le charbon en poudre se prêtaient admirablement à la réception des radiations lumineuses et calorifiques. M. Mercadier a formé son récepteur radiophonique d'un simple tube de verre renfermant une lame quelconque, en mica par exemple, recouverte de noir de fumée. Cet appareil que son auteur a appelé « Thermophone » est susceptible de reproduire tous les sons de la voix humaine, le chant et aussi la parole articulée.

Mais dans ces expériences, l'électricité ne joue plus aucun rôle, et nous devons nous borner à l'indication de cette nouvelle branche de la science inspirée par le Téléphone et qu'on appelle la « Radiophonie ».

ARMENGAUD Jeune.

LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

§ 1. Généralités.

La section consacrée à la lumière électrique est une]des [plus importantes de l'Exposition. Elle est remarquable non seulement par le nombre des appareils venus de tous les pays, mais encore et surtout parce que ces appareils sont en mouvement et qu'ils produisent, chaque soir, la plus brillante illumination qu'on ait jamais vue.

Pendant la journée, le visiteur peut examiner, en détail, les machines qui engendrent l'électricité, les brûleurs qui l'utilisent, les mille accessoires qui la distribuent et la régularisent; puis, pendant la soirée, se rendre compte des effets de cette nouvelle lumière artificielle.

La lumière électrique peut être obtenue au moyen de l'*arc voltaïque* ou par *incandescence*.

Elle peut servir à l'éclairage permanent ou à la production de signaux. De là deux classes distinctes :

1° L'*éclairage* proprement dit et son application aux ateliers, aux travaux extérieurs, aux gares de chemins de fer, à la voie publique, aux magasins et aux usages domestiques;

2° Les *projections lumineuses* et leurs applications aux phares, à l'art militaire, à la marine et aux effets scéniques.

Dans presque toutes les installations on fait usage de l'arc voltaïque; il est donc utile de donner quelques renseignements sur sa découverte et ses propriétés.

En 1813, quatorze ans après la découverte de Volta, un des plus illustres savants de l'Angleterre, sir Humphrey Davy fit une expérience mémorable qui fut le germe de l'industrie nouvelle dont nous nous occupons. Il prit deux tiges de charbon de bois préalablement rougies, éteintes dans le mercure et taillées en pointes; il mit une de ces tiges en communication avec le pôle positif d'une pile et l'autre en communication avec le pôle négatif de la même pile. Cela fait, Davy approcha les deux pointes l'une de l'autre; dès qu'elles se touchèrent, il se manifesta au contact un échauffement considérable et une lumière assez

vive. En séparant lentement les pointes, la lumière prit une intensité extraordinaire et il se produisit instantanément, entre les deux charbons, une flamme légèrement convexe d'un aspect éblouissant. Cette flamme, dont l'éclat ne peut se comparer qu'à la lumière solaire, reçut le nom d'*arc électrique*, ou, plus communément, d'*arc voltaïque*, parce que c'est à l'aide de la pile de Volta qu'elle fut obtenue pour la première fois.

Avec 2000 couples, zinc et cuivre, de 2 décimètres carrés chacun, Davy obtenait un écart des charbons de 0,11 dans l'air et de 0,18 dans le vide. Quand il dépassait ces écarts, la lumière s'éteignait complètement et ne reparaisait que lorsqu'après avoir ramené les pointes au contact, il les éloignait à nouveau.

L'étude approfondie de ce phénomène démontra que l'arc voltaïque résulte de l'incandescence d'un jet de particules détachées des charbons et projetées dans toutes les directions. Cette projection a principalement lieu d'une pointe à l'autre et tout particulièrement du pôle positif au pôle négatif. Lorsqu'on produit l'arc voltaïque au moyen de piles ou de machines à courant continu, la pointe du charbon reliée au pôle positif atteint une température excessive, elle se taille en tronc de cône terminé par une calotte sphérique creuse et s'use deux fois plus vite que l'autre pointe. Lorsque l'arc voltaïque est obtenu avec des machines à courants alternatifs, les deux charbons conservent généralement une forme conique, ils s'échauffent et s'usent également.

Sans entrer dans la discussion du meilleur résultat obtenu, soit par l'emploi des courants continus, soit par celui des courants alternatifs, il convient de faire remarquer que la taille des crayons joue un grand rôle dans la distribution de la lumière produite. Avec les courants continus, la calotte sphérique du charbon positif agit comme surface d'émission et comme réflecteur; les rayons les plus intenses sont projetés perpendiculairement à la surface de cette calotte (sur le sol); avec les courants alternatifs, la surface d'émission est beaucoup plus restreinte et les rayons les plus intenses sont projetés normalement aux crayons dans un plan horizontal.

Jusqu'en 1844, les expériences sur l'arc voltaïque n'eurent aucune application pratique, parce que les piles n'étaient pas assez perfectionnées et que les charbons se consumaient très vite. A cette époque, Léon Foucault, tout en utilisant la pile à deux liquides de Becquerel père, que Bunsen venait de modifier, eut l'idée de substituer au charbon de bois, des baguettes taillées dans les dépôts de carbone qui se forment sur les parois internes des cornues à gaz. Il put ainsi combiner une lampe électrique assez parfaite pour obtenir, avec la lumière qu'elle produisait, des épreuves photographiques.

Nous verrons plus loin, lorsque nous parlerons des brûleurs modernes,

que le même savant a beaucoup contribué à la régularisation automatique de l'arc voltaïque.

§ 2. Générateurs de courants électriques.

La lumière électrique, pour se manifester, exige le concours d'un générateur d'électricité : pile ou machine magnéto-électrique ; d'un brûleur : régulateur, lampe ou bougie ; de charbons : agglomérés ou taillés dans les graphites des cornues ; et de conducteurs métalliques reliant les générateurs aux brûleurs. Les charbons sont quelquefois remplacés par des fils de platine chauffés à blanc, mais cette substitution est extrêmement rare lorsqu'il s'agit d'éclairage industriel.

Les générateurs d'électricité sont compris dans d'autres classes de l'Exposition ; nous n'en parlerons ici que pour spécifier les caractères distinctifs de ceux affectés à la production de la lumière.

Les éléments de pile se couplent en *tension* parce que l'arc voltaïque présente une grande résistance au passage du courant, et qu'on a souvent besoin d'éclairer à une assez grande distance de la pile. Le nombre des éléments varie avec l'intensité des foyers qu'on veut obtenir ; pour les fortes lumières, il y a intérêt à les augmenter. L'arc produit par une pile de 100 éléments Bunsen est quadruple de celui que produisent 50 éléments.

L'emploi des piles pour la lumière devient de plus en plus rare : cependant l'Exposition renferme plusieurs systèmes de piles bien combinées, pouvant être utilisées avantageusement, grâce à la facilité de leur chargement et de leur déchargement, à la constance de leurs effets et à la possibilité de les transporter sur les points où il serait difficile d'installer des moteurs et des machines. Nous recommandons spécialement l'examen des piles ne donnant lieu à aucune émanation désagréable ou dangereuse, de celles qui sont disposées pour produire un courant d'une grande constance pendant un temps relativement long, et surtout de celles qui sont réellement économiques.

Les machines magnéto-électriques et dynamo-électriques employées pour l'éclairage du palais sont aussi nombreuses que variées. Presque toutes sont à haute tension et sont installées de manière à éprouver le moins de vibrations possibles. La lumière qu'elles produisent est d'autant plus constante que leur vitesse est plus uniforme et que les charbons des brûleurs sont plus homogènes, plus denses et plus purs.

Parmi les machines, on peut facilement distinguer celles qui sont à *courant continu*, dont le prototype est la *machine Gramme*, de celles qui sont à *courants alternatifs*, dont la plus ancienne est connue sous le nom de *machine de l'Alliance*. Dans le groupe des machines dynamo-électriques à courants alternatifs, on remarquera celles qui ont

une petite machine séparée pour exciter leurs électro-aimants et celles qui sont *auto-excitatrices*, c'est-à-dire qui possèdent sur le même arbre le générateur principal et l'excitateur des électro-aimants.

§ 3. Régulateurs.

On nomme généralement *brûleurs* les appareils qui portent les charbons lumineux. Il y a trois sortes de brûleurs principaux, savoir : 1° les *régulateurs* dans lesquels la longueur de l'arc voltaïque est rendue à peu près constante à l'aide d'un mécanisme spécial; 2° les *bougies* qui sont formées de deux crayons parallèles ou obliques; 3° les *lampes à incandescence* qui, au lieu d'employer l'arc voltaïque, utilisent la propriété qu'ont certains corps d'atteindre une température extrêmement élevée lorsqu'ils sont traversés par un courant assez puissant.

En principe, les régulateurs électriques remplissent automatiquement deux fonctions capitales; ils écartent les charbons pour donner naissance à l'arc voltaïque, et, malgré la combustion des charbons, ils conservent à cet arc une longueur uniforme. Plusieurs d'entre eux maintiennent le foyer lumineux à une hauteur constante ou permettent d'établir plusieurs lumières sur un même circuit. Dans les premiers *porte-charbons*, le recul pour former l'arc et le rapprochement des pointes s'opérait à la main, ce qui était fort incommode pour les expériences d'une longue durée, ou lorsqu'on avait besoin d'une grande fixité; cependant ce moyen est encore en usage dans les fêtes publiques, dans les théâtres, dans la photographie, dans l'art militaire, dans la marine, etc., etc.; partout où il s'agit d'envoyer une vive lumière sur un point donné et de projeter des rayons suivant diverses directions sans s'arrêter longtemps sur les mêmes points. L'imperfection de ce procédé l'a fait abandonner pour l'éclairage ordinaire. Presque tous les électriciens font usage d'appareils basés sur l'application d'une idée des plus ingénieuses, qui a eu pour promoteurs, en 1848, Foucault en France, et, à la même époque, Staite et Petrie en Angleterre. Cette idée, qu'il serait difficile d'exposer avec un développement complet dans une simple notice, repose sur les deux observations suivantes : 1° lorsqu'on fait passer un courant électrique dans un fil métallique enroulé en spirale sur un petit cylindre en fer doux, on développe une aimantation dans ce petit cylindre qui peut, dès lors, attirer à lui une armature disposée *ad hoc*. Plus le courant est puissant, plus l'armature est attirée vers l'électro-aimant (on nomme ainsi le cylindre en fer, sa garniture en cuivre et son armature); de sorte que, si un ressort placé en opposition agit sur l'armature, celle-ci s'approchera ou s'éloignera de l'électro-aimant, suivant que l'aimantation l'emportera ou non sur le

ressort antagoniste; 2° lorsque l'arc voltaïque augmente de longueur, le courant qui le traverse diminue d'intensité.

Pour appliquer ces principes, il suffit d'établir un électro-aimant dans le régulateur et de placer devant lui une armature oscillante retenue par un ressort réglé convenablement. Les charbons s'avancent l'un contre l'autre par l'effet d'un ressort ou d'un poids moteur. Lorsque le régulateur ne fonctionne pas, les pointes des charbons se touchent. Dès qu'on fait passer le courant électrique, l'armature sollicitée par l'électro-aimant éloigne un des porte-charbons et l'arc jaillit immédiatement. En même temps, cette armature, au moyen d'un petit embrayage, neutralise l'effet du moteur. Quand la longueur de l'arc devient trop grande, le courant diminue d'intensité, et, par suite, la force attractive de l'électro-aimant diminue; le ressort antagoniste devient prépondérant et l'armature fait débrayer le moteur. Les charbons s'avancent alors l'un contre l'autre, l'arc reprend sa longueur normale, l'armature se remet en place et le moteur est enrayé de nouveau. Les choses se passent ainsi jusqu'à complète usure des charbons.

Le visiteur qui lira ces détails techniques en examinant les appareils exposés en comprendra facilement le sens.

Dans l'un des plus anciens systèmes de régulateurs, l'électro-aimant, au lieu d'embrayer un mécanisme, agissait sur un robinet donnant passage à un filet de mercure. En descendant d'un réservoir supérieur dans un petit cylindre, le mercure soulevait un piston auquel était lié le porte-charbon inférieur du régulateur. Il maintenait ainsi l'écart constant entre les deux pointes de charbon. (Cet appareil porte le nom de Lacassagne et Thiers, il figure à l'Exposition.)

Signalons encore une modification au principe que nous avons brièvement exposé. Au lieu d'électro-aimant, d'armature et de moteur, Archereau imagina d'introduire un porte-crayon en fer dans un solénoïde (on appelle ainsi un tube mince entouré de fil de cuivre en spirale) et d'équilibrer son porte-crayon par un contre-poids. En envoyant le courant dans le solénoïde, le porte-crayon inférieur se trouve attiré, il recule un peu et l'arc se forme; puis quand l'arc augmente, la force du solénoïde diminue et le crayon remonte. Ce système perfectionné est appliqué dans plusieurs installations, notamment dans la section belge.

On appelle *régulateur différentiel* celui qui renferme deux électro-aimants ou deux solénoïdes en opposition, l'un placé sur le courant principal et l'autre sur une dérivation de ce courant. L'électro-aimant ou le solénoïde, placé sur une dérivation, remplace le ressort antagoniste dont nous avons parlé. La première idée de ce système, qui permet d'installer plusieurs régulateurs sur un même circuit, est due à Lacassagne. Cette disposition est fort usitée en France, en Angleterre,

en Allemagne et en Russie. Dans quelques appareils l'électro-aimant, placé sur le courant principal, est supprimé.

En dehors des régulateurs basés sur l'emploi du courant électrique pour le maintien d'un arc constant, le visiteur rencontrera plusieurs dispositions fort intéressantes, mais d'un emploi plus restreint. Nous recommandons à son attention les appareils où les charbons butent sur des substances réfractaires, ceux où ils sont assujettis à conserver toujours la même position relative par l'effet d'une tige de dilatation, etc., etc.

§ 4. Bougies.

Nous avons vu que le rôle des régulateurs était d'écarter les charbons au moment de l'allumage et de conserver à l'arc voltaïque une longueur constante pendant toute la durée de l'éclairage. En 1876, M. Jablochkoff, frappé des inconvénients multiples que présentaient alors des appareils compliqués et imparfaits, chercha à obtenir le même résultat sans aucun mécanisme, et, après une série de tâtonnements, il parvint à résoudre le problème d'une manière aussi originale qu'ingénieuse.

Au lieu de laisser les crayons indépendants et de les placer comme l'avait fait Davy, en ligne droite, bout à bout, M. Jablochkoff les accoupla parallèlement en interposant entre eux une lame mince de substance minérale pouvant se vaporiser à une haute température. Il fit du tout une seule et même baguette, d'une manutention facile, à laquelle il donna le nom de *bougie électrique*. Pour l'allumage, l'inventeur trempa les pointes des crayons dans une pâte de charbon, créant ainsi une amorce qui s'allume instantanément au passage du courant. L'arc voltaïque succède à cette combustion et conserve naturellement une longueur invariable pendant toute la durée de la bougie.

La matière qui sépare les crayons est un mélange, par parties égales, de sulfate de chaux et de sulfate de baryte.

Pour un éclairage de longue durée, les bougies sont installées sur un chandelier; au moyen d'un commutateur, dès que l'une d'elles arrive à sa fin, on allume la suivante. Dans certains cas, les commutateurs à main sont remplacés par des appareils qui opèrent automatiquement le changement des bougies.

En mélangeant à l'isolant des parcelles métalliques, on est parvenu à rallumer des bougies après la combustion de l'amorce, mais ce perfectionnement est peu usité, parce qu'il complique la fabrication sans grande utilité pratique.

Les premières expériences de M. Jablochkoff furent exécutées avec des machines dynamo-électriques à courant continu, ce qui nécessitait des charbons d'inégales sections et donnait une lumière assez irrégulière. Avec des machines à courants alternatifs, l'inventeur put prendre

des charbons de même diamètre et la lumière devint plus belle et plus fixe. Toutes les bougies qui figurent à l'Exposition sont alimentées de cette manière.

L'invention de M. Jablochkoff est d'une simplicité et d'une sécurité remarquables; en outre, elle permet l'emploi de plusieurs foyers sur un même circuit. (Il existe des machines actionnant jusqu'à 60 bougies en 12 séries.) Ses propriétés exceptionnelles l'ont rendue rapidement populaire, et c'est grâce à elle que les voies publiques et les grands magasins ont, pour la première fois, pu être éclairés d'une manière pratique, suivie, permanente par l'électricité.

Quoique la bougie électrique soit de création récente, on compte déjà par millions le nombre d'exemplaires livrés à la consommation, près de 4000 foyers sont installés dans le monde entier, et le nombre des applications s'accroît chaque jour. Il y a là, sans contredit, un grand progrès industriel réalisé.

Il serait injuste de ne pas associer à la mention de ce succès les noms de MM. Gramme et Carré; car le premier, par une heureuse transformation de sa machine primitive, parvint à établir des générateurs d'électricité capables d'alimenter un grand nombre de bougies, et le second sut installer une excellente fabrication de crayons artificiels. M. Jablochkoff eut ainsi sous la main, dès la création de sa bougie, les éléments qui devaient la faire valoir; c'est-à-dire de bons crayons et une source régulière et économique d'électricité.

Peu de temps après la première application de la bougie électrique, on vit surgir une foule d'inventions similaires, plus ou moins ingénieuses, plus ou moins pratiques, mais toutes plus compliquées que celle dont nous venons de parler. Les nouveaux appareils conservèrent le nom de bougies, bien que plusieurs d'entre eux fussent de véritables régulateurs à charbons parallèles.

Parmi ces bougies, nous en connaissons deux qui méritent d'être citées: l'une est due à M. Wilde, électricien anglais très réputé, et l'autre à M. Jamin, le célèbre professeur français.

La bougie Wilde se compose en principe d'un support sur lequel sont placés les deux crayons et d'un électro-aimant agissant pour produire l'écart au début de la marche. Lorsque le courant ne traverse pas l'appareil, les crayons ont leurs pointes en contact; l'un d'eux est vertical, l'autre est légèrement oblique. Dès que le courant passe, l'électro-aimant attire une armature, celle-ci sépare les crayons et les rend parallèles, l'arc jaillit et la flamme ayant une certaine tendance à s'élever, reste constamment à la partie supérieure. Si on arrête momentanément le courant, ou lorsqu'une extinction se produit accidentellement, l'électro-aimant devient inerte, les pointes des crayons reviennent au contact et le rallumage a lieu sans la moindre difficulté.

La bougie Jamin, la plus employée après celle de Jablochkoff, est basée sur l'influence réciproque de deux courants placés dans le voisinage l'un de l'autre. L'arc voltaïque est un véritable courant; en l'entourant d'un cadre directeur, traversé lui-même par un courant, on parvient à maintenir le foyer lumineux à l'extrémité des crayons, sans intercaler entre ces crayons aucun isolant et quelle que soit d'ailleurs leur direction.

M. Jamin place ses deux crayons parallèlement, la pointe en bas, et il maintient constamment l'arc à leurs extrémités. La lumière est bien utilisée, puisqu'elle doit le plus souvent éclairer le sol. Un petit mécanisme ayant pour moteur la force attractive du cadre directeur, permet l'allumage au début et le rallumage instantané pendant la marche.

De tous les appareils à arc voltaïque, c'est ce dernier qui divise le plus le courant des machines; l'inventeur est parvenu à placer 60 foyers sur une machine Gramme auto-excitatrice, qui avait été combinée pour actionner 8 bougies.

Pour ne pas compliquer cet exposé, nous placerons, dans la catégorie des bougies électriques, l'appareil connu sous le nom de *lampe-soleil*, dont on voit plusieurs spécimens dans les sections française et belge.

La lampe-soleil est un appareil formé de deux charbons obliques, noyés dans des blocs en matière réfractaire. Les charbons traversent ces blocs et leurs pointes se trouvent en regard, grâce à deux orifices ménagés *ad hoc*. La lumière est d'une couleur légèrement dorée, elle est concentrée dans un espace restreint, et se projette sur le sol en presque totalité. Avec des courants continus, le fonctionnement est silencieux; avec des courants alternatifs, la combustion en plein air est accompagnée d'un bourdonnement assez intense.

Les inventeurs de la lampe-soleil ont récemment combiné des enveloppes très ingénieuses, ayant pour effet de faire disparaître ce bruit et d'envoyer une partie des rayons sur tous les points du local à éclairer.

§ 5. *Éclairage par incandescence.*

Tandis que l'éclairage par l'arc voltaïque prenait son essor dans l'industrie, un autre système de lumière électrique commençait à sortir de la période des essais, et parvenait à lutter, souvent victorieusement, avec les régulateurs et les bougies. Nous voulons parler de l'éclairage par *incandescence*.

La différence essentielle qui existe entre les deux systèmes consiste dans la disposition des corps rendus lumineux; pour obtenir l'arc, il faut nécessairement éloigner les charbons l'un de l'autre, et pour obtenir l'incandescence, il suffit de faire traverser par le courant un corps conducteur court et mince.

La température de ce conducteur atteint immédiatement un degré si élevé, que bien peu de corps résistent longtemps à son influence, de sorte qu'il est difficile d'obtenir une lumière réunissant les trois conditions essentielles d'un bon éclairage : intensité, régularité et durée. Aussi presque tous les inventeurs ont abandonné la recherche de la première de ces conditions et se sont bornés à l'étude des deux autres.

La première lampe à incandescence est due à M. Moleyns qui, en 1841, combina un appareil formé d'une spirale en platine, enfermée dans un globe et rendue lumineuse par le passage du courant d'une pile. Pour augmenter l'éclat du foyer, on faisait tomber sur la spirale, grain à grain, du charbon pulvérisé.

En 1845, M. Starr exécuta la première lampe à vide et obtint une belle lumière en chauffant à blanc une petite tige de charbon. Cette disposition fut employée treize ans plus tard, par M. de Changy, qui substitua au charbon le fil de platine.

Ces premiers essais demeurèrent infructueux, en raison du prix élevé de l'électricité et de l'usure rapide des conducteurs en ignition.

L'éclairage par incandescence était tombé, depuis longtemps, dans l'oubli, lorsqu'en 1873, M. Lodyguine présenta à l'Institut de Saint-Petersbourg une nouvelle édition de la lampe à vide et à charbon de Starr, qui fut considérée comme une invention tout à fait originale. Dans cette lampe, M. Lodyguine faisait usage de crayons d'une seule pièce en diminuant leur section au milieu de la longueur, et il plaçait deux charbons dans le même appareil. Malgré des perfectionnements réels que cette lampe reçut, principalement en Russie, son emploi ne s'est pas propagé.

Tout récemment, l'éclairage par incandescence a reçu enfin deux solutions pratiques qui figurent, toutes deux, à l'Exposition.

Dans l'une, les crayons brûlent dans l'air, dans l'autre, ils brillent dans le vide *sans se consumer*. L'antériorité des systèmes étant contestée, nous nous contenterons de désigner les appareils par leurs noms sans nous prononcer sur leur originalité.

Parmi les brûleurs de la première série, on remarquera les systèmes Reynier et Werdermann; nous signalerons au nombre des lampes à vide, les systèmes Edison, Maxim et Swan.

Dans les lampes fonctionnant à l'air, une longue baguette de charbon vient s'appuyer contre la périphérie d'un disque en charbon ou contre un gros crayon, ou bien encore sur une rondelle métallique, la baguette se taille en pointe, s'échauffe à blanc et produit une lumière d'une fixité remarquable.

Dans les appareils à vide, le crayon ordinaire est remplacé par un filament de carbone disposé en fer à cheval et renfermé dans une ampoule de verre scellée à la lampe. Au lieu de faire le vide, on empri-

sonne quelquefois dans l'ampoule une atmosphère *carburée* qui passe pour aider à la conservation du carbone éclairant.

Les données positives sur la durée du service de ces lampes font défaut ; quelques-unes ont fonctionné pendant des mois entiers sans interruption, d'autres ont été hors de service en quelques heures. Ce point important sera certainement éclairci pendant l'Exposition.

Nous pouvons, dès aujourd'hui, affirmer qu'une machine électrique unique alimente un très grand nombre de foyers, que la lumière est d'une fixité absolue, que l'installation de ces lampes dans un appartement est facile à faire, et enfin, que le prix de l'ampoule garnie est minime. Toutes ces questions ont pour contre-partie la grande absorption de travail moteur pour une intensité de lumière donnée.

Les organes spéciaux servant à distribuer le courant dans les lampes à incandescence et à enregistrer les quantités d'électricité consommées sont très curieux à étudier. Ils sont encore trop nouveaux pour donner lieu à une appréciation raisonnée.

§ 6. Charbons électriques.

Après avoir décrit rapidement les générateurs d'électricité et les divers systèmes de lampes, il nous reste à dire quelques mots des charbons ou crayons qui servent à former les foyers.

Nous avons vu que Davy faisait usage de baguettes de charbon de bois éteintes dans le mercure, et que Foucault employait des crayons taillés dans les dépôts de cornues à gaz. Ce dernier charbon est très dense et offre une grande résistance à l'action destructive des foyers électriques, mais il n'est pas homogène, il éclate quelquefois, s'use souvent d'une façon singulière et produit alors des variations d'éclat fort désagréables pour les yeux. En présence de ces inconvénients, les électriciens cherchent depuis longtemps un charbon plus pur ; les uns fabriquent des charbons agglomérés, les autres purifient simplement le charbon de cornue.

En 1846, Staite fit breveter un procédé de fabrication de crayons pour lumière électrique, qui avait pour base un mélange de coke pulvérisé, additionné d'une petite quantité de sirop de sucre. Dix ans plus tard, Lacassagne purifia les charbons de cornue en les plongeant à la température rouge et en les laissant digérer dans un bain de potasse et de soude caustique.

Plus récemment, MM. Archereau, Sautter et Lemonnier, Carré, Gauduin, Napoli, Siemens et Brush, pour ne citer que les plus connus, fabriquent des crayons en employant des charbons pulvérisés de diverses provenances, agglomérés avec du sucre ou du brai, en les triturant avec soin, en les comprimant énergiquement, en les passant à la filière et en

les faisant cuire à une très haute température. Ces crayons servent aujourd'hui à l'alimentation des régulateurs, des lampes à incandescence brûlant à l'air et à la fabrication des bougies.

Plusieurs industriels établissent des charbons creux et ils remplissent le vide avec une substance vitrifiable qui jouit de la propriété de fixer la lumière au centre même du crayon et de lui donner une plus grande stabilité. D'autres recouvrent l'extérieur des charbons d'une couche de cuivre ou de métal pour en augmenter la conductibilité et la durée. D'autres enfin les plongent dans une solution d'alun pour les empêcher de rougir sur une trop grande longueur, ce qui augmente en outre la durée.

Pour les lampes à vide, M. Edison prépare son charbon de la manière suivante. Il prend de petites bandes de papier de bristol ayant 0^m,05 de largeur sur 0^m,003 d'épaisseur, il les découpe à l'emporte-pièce en forme de fer à cheval et les place à l'intérieur d'un creuset en fer forgé, chauffé au blanc dans un fourneau à réverbère. La matière se décompose, et il reste un résidu charbonneux qui est introduit avec soin dans l'ampoule en verre. C'est ce charbon si frêle qui dure souvent plusieurs mois avant de tomber en poussière.

Les crayons exposés sont obtenus par l'un des procédés ci-dessus décrits ou d'une manière analogue. Il y a seulement, dans chaque fabrication, quelques tours de mains spéciaux qui différencient les produits et qu'il nous est impossible d'énumérer ici.

§ 7. *Projections lumineuses.*

Tout le monde connaît les effets splendides de l'arc voltaïque dans les représentations théâtrales où les projections lumineuses font ressortir les décorations, les principaux sujets, et produisent des illusions complètes. Il est donc inutile d'insister sur ces applications si variées et si attrayantes de la lumière électrique : il convient toutefois de noter, parmi les phénomènes physiques les mieux réussis qu'on ait jamais produits, les effets du soleil levant, de l'arc-en-ciel, des éclairs et des fontaines lumineuses jaillissantes.

La lumière électrique est employée avec succès dans les phares, sur les navires et pour les opérations de l'artillerie et du génie militaire. Elle rend visibles, la nuit, à des distances variant de 2 à 8000 mètres, des objets tels que balises, navires, côtes, maisons, hommes, etc., etc. Elle permet d'établir une correspondance, soit par transmission directe de la lumière, soit par réflexion, soit à l'aide du photophone, cette merveille scientifique.

C'est en 1863 que la lumière électrique fut, pour la première fois, appliquée à l'éclairage des phares. L'essai réalisé à l'aide d'une ma-

chine de l'*Alliance* au phare de la Hève, réussit pleinement, et permit de constater une augmentation sensible de la portée des feux, surtout par des temps un peu brumeux. On reconnut également que les navires pouvaient continuer leur marche et entrer au port la nuit, alors que cela eût été impossible avec un phare éclairé à l'huile. Ces avantages, définitivement consacrés par une expérience de dix-huit années, ont décidé plusieurs gouvernements à employer l'électricité d'une manière générale dans tous leurs phares.

Pour la marine militaire, les appareils photo-électriques sont appliqués de trois manières différentes : 1° sur les canots à vapeur et sur les torpilleurs pour un service de surveillance ou d'éclaireurs; 2° sur les cuirassés et les grands transports pour éclairer la route, transmettre des signaux et rechercher les torpilleurs; 3° d'une manière fixe à terre pour la défense des côtes. Dans tous les cas on fait usage de projecteurs afin de concentrer sur des objets plus ou moins éloignés, la plus grande quantité possible des rayons émanant de la source lumineuse.

Ces projecteurs sont de différents systèmes. Les plus simples et les plus anciens sont les réflecteurs paraboliques ou sphériques qui n'agissent que par réflexion. Puis est venu le projecteur lenticulaire de Fresnel qui agit par réflexion et par réfraction. La disposition la plus nouvelle est celle du miroir aplanétique du colonel Mangin.

Les projecteurs paraboliques et lenticulaires sont connus depuis fort longtemps : c'est celui du colonel Mangin, qu'on peut voir dans la section française qui, jusqu'à ce jour, a donné les meilleurs résultats.

Les régulateurs employés dans les opérations militaires sont tantôt automatiques, tantôt mus à la main. Les charbons sont en opposition, mais au lieu d'être placés rigoureusement dans le prolongement l'un de l'autre, ils ont leur axe éloigné de quelques millimètres, et ils chevauchent un peu l'un sur l'autre, de façon à renvoyer la plus grande somme de lumière possible sur le réflecteur.

Les moteurs les plus en usage pour la marine et la guerre, sont ceux de Brotherhood dont nous parlerons, classe 4 (mécanique générale).

Dans les installations industrielles, comme pour les applications à l'art militaire, les conducteurs qui relient les générateurs d'électricité aux brûleurs doivent être en cuivre de la plus haute conductibilité, parfaitement isolés et recouverts d'une enveloppe assez résistante pour ne pas s'altérer par les frottements. Leur section est proportionnelle à l'intensité du courant et à leur longueur. Plus la distance à parcourir est grande, plus, si l'on ne veut pas diminuer l'effet de la machine électrique, le câble conducteur doit être gros.

§ 8. Éclairage de l'Exposition.

L'éclairage du palais de l'Industrie a été étudié en vue d'offrir au visiteur l'occasion de voir en action tous les systèmes de machines et de brûleurs connus. La grande nef renferme des spécimens de chaque type, disséminés un peu partout et concourant tous à l'effet général. Les salles du premier étage, au contraire, sont éclairées chacune avec les appareils d'un même inventeur, ce qui permet d'établir facilement des comparaisons entre les divers moyens proposés pour la production et l'utilisation de la lumière électrique.

Les appareils suspendus aux fermes de la galerie supérieure suffisent à eux seuls pour éclairer toute la nef. Ce sont eux qu'on emploie généralement sur les chantiers et dans les usines.

Le nombre des salles éclairées au premier étage est de vingt-neuf; il est nécessaire de les visiter toutes, si l'on désire être complètement renseigné sur l'industrie nouvelle dont nous avons essayé d'esquisser les principales branches.

HIPPOLYTE FONTAINE.

MOTEURS ÉLECTRIQUES

§ 1. Moteurs électriques.

Les *moteurs électriques* sont des appareils qui produisent un travail mécanique au moyen de courants électriques. Dans ces moteurs, comme dans les moteurs à vapeur, il faut distinguer le *générateur* où prend naissance la force motrice et le *récepteur* qui permet son utilisation pratique. Le générateur d'un moteur à vapeur est la chaudière où l'eau se vaporise ; le générateur d'un moteur électrique est tantôt une pile, tantôt une machine dynamo-électrique.

Le récepteur porte généralement le même nom que l'appareil complet. Ainsi on dit : *machine à vapeur* pour désigner indifféremment la chaudière avec son mécanisme, ou le mécanisme isolé ; et, *moteur électrique*, lorsqu'il s'agit d'un générateur électrique et des organes qu'il fait mouvoir ou seulement de ces derniers.

Les générateurs d'électricité sont exposés dans les classes 2 et 3 : nous ne nous occuperons ici que des récepteurs proprement dits, auxquels nous conserverons, bien entendu, le nom de *moteurs électriques*.

C'est sur les phénomènes d'aimantation et de désaimantation instantanée des électro-aimants qu'est basée la construction de presque tous les moteurs électriques. Il importe donc de bien expliquer le fonctionnement des électro-aimants, dont nous avons déjà parlé à propos des régulateurs de lumière électrique.

Pour fixer les idées, nous admettrons qu'on ait enroulé en spirale, sur un barreau de fer, un fil métallique recouvert de soie et qu'on ait placé une plaque de fer doux très près de l'une des extrémités du barreau. Nous admettrons également que cette plaque puisse s'approcher ou s'éloigner du barreau, qu'elle soit à charnière, par exemple, et maintenue par un ressort à une distance de quelques millimètres. Les choses ainsi disposées, si l'on envoie un courant électrique dans le fil métallique, le barreau s'aimante et attire à lui la plaque. Cette attraction persiste tant que le courant traverse le fil ; mais si l'on vient à rompre le circuit, l'aimantation cesse et le ressort éloigne la plaque de

l'extrémité du barreau. L'expérience peut être répétée autant de fois qu'on le désire et les phénomènes se produisent avec une excessive rapidité. Les dimensions du barreau et la longueur du fil enroulé peuvent être telles que l'attraction produite soit suffisante pour mettre en mouvement un poids même considérable. Il n'y a qu'un élément qui ne puisse pas grandir au delà de limites assez étroites, c'est la distance de la plaque au barreau, le magnétisme étant surtout une force de contact dont l'action devient rapidement nulle dès que l'armature s'éloigne un peu trop de l'aimant.

Ce phénomène dont on a tiré un admirable parti en télégraphie, peut très facilement être utilisé dans les moteurs électriques. Il suffit pour cela de placer convenablement l'électro-aimant et son armature, et d'interrompre le circuit d'une manière périodique et régulière. On obtient ainsi un mouvement alternatif qui se transforme aisément en mouvement circulaire.

L'interruption du courant peut être déterminée par le moteur lui-même qui devient alors tout à fait automatique.

A la place d'un électro-aimant ordinaire, on fait souvent usage d'un barreau creux avec armature intérieure. L'organe moteur prend alors le nom de *Solénoïde* et l'appareil offre une certaine analogie avec une machine à vapeur dans laquelle le piston serait remplacé par une armature et le cylindre par une bobine creuse. Les effets d'un solénoïde sont identiques à ceux d'un électro-aimant : lorsque le courant passe, l'armature est attirée à une certaine profondeur à l'intérieur du tube, et, dès qu'il est interrompu, l'attraction cesse complètement. La seule différence entre les deux systèmes tient à ce que, avec la même intensité de courant, on peut obtenir plus de course et moins d'effort lorsqu'on emploie le solénoïde, plus d'effort et moins de course lorsqu'on fait usage de l'électro-aimant.

L'interruption du courant est réalisée, dans les deux cas, au moyen d'un appareil spécial appelé *commutateur*, qui brise le circuit périodiquement par l'interposition d'un corps mauvais conducteur, sur le trajet du câble entre le générateur et le récepteur.

Au lieu d'un seul électro-aimant, on peut en accoupler plusieurs et produire des effets plus considérables. On peut également placer les armatures et les électro-aimants sur des disques afin de supprimer les bielles et les manivelles nécessaires à la transformation du mouvement alternatif en mouvement continu ; mais dans toutes les dispositions, le principe des moteurs reste le même. Ce sont toujours des armatures qui, en s'approchant et s'éloignant alternativement des électro-aimants, produisent la rotation de l'arbre sur lequel on recueille le travail mécanique.

Les plus anciennes tentatives connues, faites en vue d'appliquer l'é-

lectro-magnétisme à la production du mouvement, datent de 1829. Elles furent réalisées simultanément en Allemagne, en Italie, en Angleterre et en Amérique, de sorte qu'il est bien difficile de décider quel fut le premier physicien qui s'en occupa. Cette recherche ne saurait avoir, d'ailleurs, aucune importance ; car personne, avant Jacobi, n'exécuta un moteur électrique capable de fonctionner convenablement.

L'appareil de Jacobi, formé de deux séries d'électro-aimants montés sur plateaux et actionnés par 128 couples Grove, fut essayé sur la Néva en 1839. Il donnait le mouvement aux roues à palettes d'une chaloupe montée par douze personnes et développait une puissance de trois quarts de cheval-vapeur environ. L'expérience ne réussit pas, mais elle montra à son auteur les difficultés du problème qu'il cherchait à résoudre et qui peut s'énoncer en ces termes : *trouver des moyens pratiques pour remplacer la vapeur par l'électricité dans la production des forces motrices.*

Depuis Jacobi, on a inventé des moteurs électriques par centaines ; plusieurs physiciens ont étudié la question sous toutes ses faces ; les conceptions les plus ingénieuses ont été réalisées par des artistes mécaniciens de premier rang ; une grande partie des défauts signalés au début dans la construction des organes a été supprimée ; — l'écueil principal n'a pu être évité, parce qu'il se rencontrait non pas dans le récepteur, mais bien dans la pile qui était jusqu'à ces derniers temps le seul générateur d'électricité connu.

La pile si commode pour une foule d'opérations où l'on a besoin de faibles quantités d'électricité, ne saurait convenir lorsqu'il faut produire beaucoup et à bon marché, ce qui est précisément le cas des moteurs électriques où le prix de revient joue le principal rôle. Il suffit d'indiquer ici qu'avec les meilleures piles et les meilleurs électro-moteurs, on n'est pas encore parvenu à produire un travail utile sans dépenser dix fois plus qu'avec les machines à vapeur, et l'on comprend alors combien les solutions proposées étaient loin d'être satisfaisantes.

Pour obvier à l'inconvénient d'une dépense exagérée, on a souvent proposé l'emploi de piles dont les résidus pourraient être utilisés dans l'industrie. Quelques personnes sont allées jusqu'à affirmer qu'on vendrait les résidus de leur pile à un prix supérieur à celui des matières premières dont ils proviennent : mais il n'y a rien dans ces propositions, ni dans ces affirmations, qui se soit jamais réalisé.

Si l'on ajoute au prix exorbitant de l'électricité les ennuis causés par la manipulation d'un nombre considérable d'éléments, par les odeurs âcres et délétères des acides, par l'encombrement d'un matériel fragile, on s'expliquera facilement pourquoi l'électricité n'a pas encore remplacé la vapeur dans les applications sérieuses.

Pour la production de très petites forces, les questions de prix et

d'encombrement disparaissent, et les moteurs électriques peuvent se prêter à des usages variés. C'est à ce titre que nous engageons les visiteurs à examiner les appareils fort ingénieux exposés dans diverses sections et parmi lesquels nous signalerons tout particulièrement les moteurs français Gramme, Deprez et Trouvé.

L'invention des machines magnéto-électriques à courant continu a puissamment contribué à jeter la défaveur sur les moteurs électriques. Du jour où une petite machine à courant continu a pu fournir un courant très intense avec une dépense minime de force motrice, les industriels, réduits jusqu'alors à l'emploi des piles, ont remplacé leur matériel encombrant par des machines simples et légères; ils y trouvent un grand bénéfice, malgré la nécessité d'actionner ces machines par des moteurs à vapeur. Presque tous les inventeurs de moteurs électriques ont dès lors suspendu leurs recherches, en se disant que, si la machine à vapeur peut produire l'électricité dans des conditions infiniment plus économiques que la pile, il était illogique de vouloir obtenir de la force en utilisant comme agent moteur l'électricité de la pile.

D'ailleurs, toutes les combinaisons antérieures se sont trouvées dépassées par les machines électriques à courant continu, qui sont, en réalité, les meilleurs moteurs électriques qu'il soit possible d'imaginer.

Ce dernier point est assez important pour mériter quelques explications.

Lorsqu'on fait tourner une machine magnéto-électrique, on obtient un courant qui traverse toute la machine et peut être utilisé extérieurement pour la galvanoplastie, la lumière, la télégraphie, etc. En prenant la même machine au repos, et en la mettant en communication avec une source d'électricité quelconque, le courant introduit dans la machine, la fait tourner en produisant un travail moteur d'autant plus grand que le courant est plus puissant. La bobine centrale étant bien équilibrée dans toutes ses parties, le mouvement se produisant sans commutateur et étant circulaire et continu sans exiger aucun mécanisme intermédiaire, aucune cause ne venant accélérer, ni ralentir la vitesse pendant une révolution complète de l'arbre, un seul organe étant mobile et tous les autres absolument fixes, l'appareil possède toutes les qualités indispensables à un bon récepteur.

Il convient de signaler une autre cause de la supériorité des machines à courant continu sur les autres moteurs électriques, c'est qu'elles peuvent produire des efforts dynamiques considérables. Tandis que les anciens moteurs ne pouvaient développer une force supérieure à quelques kilogrammètres, les machines magnéto-électriques, employées comme récepteurs peuvent être établies pour une force illimitée. Il existe dans la section française deux moteurs Gramme tout à fait nou

veaux : l'un développe un kilogrammètre et l'autre 20 chevaux de force. Des moteurs électriques de 50 et de 100 chevaux sont actuellement à l'étude : leur construction ne présente aujourd'hui aucune difficulté.

§ 2. *Transport de force.*

La transmission de la force motrice par l'électricité est une des plus brillantes conceptions qu'il soit possible d'admirer à l'Exposition. Son rôle dans l'industrie, limité pour le moment à quelques applications fort intéressantes, nous paraît devoir prendre un développement immense, dès qu'on connaîtra bien toute la variété de ses ressources et la multiplicité de ses avantages. Nous ne saurions donc trop engager les industriels à méditer sur les services qu'elle est appelée à leur rendre, ni trop attirer l'attention des visiteurs sur l'avenir réservé à cette branche nouvelle de l'activité humaine.

Les transmissions électriques sont basées sur l'emploi des machines dynamo-électriques *réversibles*.

On désigne ainsi les machines qui possèdent la propriété de transformer indifféremment soit le travail moteur en électricité, soit l'électricité en travail moteur. Toutes les machines à courant continu et un grand nombre de machines à courants alternatifs sont réversibles. Les machines à courant continu, pouvant seules fonctionner sans commutateur, sont exclusivement employées dans les transmissions.

Lorsqu'on prend deux machines de cette catégorie, qu'on les réunit au moyen d'un fil conducteur et qu'on met l'une d'elles en marche par un moteur quelconque, celle-ci engendre un courant électrique qui traverse le conducteur, arrive à l'autre machine et la met en mouvement. La deuxième machine ou *récepteur* qui tourne uniquement sous l'influence du courant développé par la première machine ou *générateur*, produit une force proportionnée à celle du moteur initial. Comme le fil conducteur peut, sans inconvénient, avoir une longueur de plusieurs kilomètres, on voit qu'il est possible, avec des appareils extrêmement simples, de transporter la force motrice à de grandes distances. En partant de ces données, on conçoit immédiatement la possibilité d'utiliser les innombrables chutes d'eau restées jusqu'ici sans emploi, à cause des difficultés d'accès qu'elles présentent, et les inquiétudes manifestées par les économistes au sujet de l'épuisement prochain des houillères se dissipent entièrement.

L'idée première d'employer les machines électriques réversibles au transport des forces à distance appartient à la Société Gramme, qui en fit l'application, dès 1873, à l'Exposition de Vienne. La machine génératrice était actionnée par un moteur à gaz ; la machine réceptrice, reliée à la première par un double câble d'un kilomètre de longueur,

faisait marcher une pompe centrifuge placée dans la galerie des machines; le fonctionnement ne laissait rien à désirer.

Depuis cette époque, beaucoup d'inventeurs s'occupèrent de la question et étudièrent un matériel convenable en vue d'applications diverses. Parmi eux, nous citerons M. Félix, de Sermaize, qui a entrepris d'introduire cette nouvelle application de l'électricité dans toutes les opérations agricoles, dans l'exploitation des mines, dans le transport et la manutention des marchandises, etc., etc., et MM. Siemens, de Berlin, qui ont établi plusieurs petits chemins de fer desservis par des locomotives électriques.

L'Exposition renferme une grande variété d'appareils destinés au transport des forces par l'électricité. Les uns se comprennent d'eux-mêmes parce qu'ils n'exigent aucun dispositif spécial; les récepteurs d'électricité tournent et communiquent directement leur mouvement à des outils de mécanicien, à des machines à coudre, à des pompes centrifuges, à des batteuses de graines, etc. D'autres sont plus compliqués et quelques indications sont nécessaires pour les faire bien comprendre : tels sont les treuils de labourage et les tramways électriques. Les appareils à labourer, créés par M. Félix, se composent de deux treuils roulants qu'on place, vis-à-vis l'un de l'autre, à chaque extrémité du champ. Les chariots et les roues sont entièrement métalliques : les machines électriques oscillent autour d'axes horizontaux, de manière à permettre leur embrayage et leur débrayage rapide. Lorsque les poulies des machines sont en contact avec les grandes roues du treuil, le tambour qui porte le câble de traction de la charrue tourne, le câble s'enroule progressivement et le travail s'effectue. Si l'on veut déplacer transversalement la charrue, il suffit de faire actionner par les machines électriques, au lieu du treuil principal, une poulie latérale qui communique le mouvement à l'un des essieux; la direction de ce mouvement est obtenue par un mécanisme très simple logé sur l'avant-train. Le déplacement s'exécute à volonté, en avant ou en arrière.

Le câble de traction est en acier : pendant qu'il se déroule sur le tambour de l'un des treuils, il s'enroule sur le tambour de l'autre. Les conducteurs électriques sont soutenus par des poteaux comme les fils télégraphiques : ils sont couplés en deux séries partant toutes deux du générateur électrique, et aboutissant l'une au premier et l'autre au second treuil. Au moyen d'un commutateur, on envoie le courant tantôt aux machines du premier, tantôt aux machines du second treuil et la charrue s'avance alternativement dans un sens ou dans l'autre. La machine motrice est située quelquefois à cinq kilomètres du champ à labourer. La charrue a un nombre de socs proportionné à la force dont on dispose et à la nature du sol qu'on travaille.

Dans les expériences exécutées à Sermaize, on se servait de la ma-

chine à vapeur d'une sucrerie pour le labourage des terres environnantes : les treuils se rendaient d'eux-mêmes à destination ; le travail était plus rapide, mieux fait et plus économique que par l'emploi des animaux. Les sillons avaient 0^m,275 de largeur et, en moyenne, 0^m,200 de profondeur. Avec deux socs, on labourait une surface de 20 mètres carrés à la minute.

Quant aux travaux qui s'exécutent à l'intérieur ou au voisinage immédiat de la ferme, comme le battage, le vannage, le triage, l'élévation pour les irrigations et l'alimentation des bestiaux, ils s'accomplissaient à l'aide d'une petite locomobile électrique dont M. Félix a su tirer un excellent parti et dont il a en voyé à l'Exposition un fort curieux spécimen.

L'application du transport des forces par l'électricité à la traction des véhicules sur voies ferrées, a été poursuivie activement par MM. Siemens depuis deux ans. Après différents essais sur des chemins de fer à voie étroite, essais très remarquables aux Expositions de Berlin et de Bruxelles, ces messieurs ont récemment établi, aux environs de Berlin, une ligne de 2500 mètres pour un service public. Sur cette première installation les rails sont isolés l'un de l'autre et servent de conducteurs au courant électrique. Les roues des véhicules sont également isolées électriquement des essieux, et, à l'aide de balais convenablement disposés, le récepteur est mis en communication constante avec le moteur.

Le générateur d'électricité, placé à l'une des extrémités de la ligne, est actionné par une machine à vapeur ; le courant passe par l'un des rails, arrive au récepteur placé sous la caisse de la voiture et fait retour par l'autre rail. Au récepteur le mouvement est transmis aux roues par des poulies et des courroies en acier. La vitesse moyenne de la voiture est de 15 kilomètres à l'heure.

La traction électrique présente des avantages marqués sur la traction à vapeur, surtout dans l'intérieur des villes où elle s'opère sans bruit, sans fumée, sans aucun des inconvénients inhérents à l'emploi d'un foyer : mais elle n'a pas encore reçu assez d'applications pour qu'il soit permis de se prononcer sur ses résultats économiques. Dans tous les cas, il est d'un intérêt primordial pour les municipalités des grandes villes, et notamment pour Paris, de faire poursuivre les études relatives à l'établissement des voies ferrées électriques aériennes, car la circulation des piétons et des voitures s'accroît tellement sur certains points qu'elle entraîne des accidents journaliers et qu'elle ne tarderait pas, si on laissait les choses en l'état actuel, à constituer un véritable danger public.

Le spécimen de tramway électrique, établi de la place de la Concorde à l'une des entrées du palais de l'Industrie, mérite, à ce point de vue, un examen approfondi. Au lieu d'isoler les rails l'un de l'autre, comme

à Berlin, MM. Siemens ont installé le conducteur électrique sur des poteaux placés de distance en distance. Ce conducteur amène le courant dans le récepteur électrique : les rails servent de fil de retour.

Le transport des forces peut encore avoir lieu au moyen d'*accumulateurs* ou *piles secondaires*, qu'on charge d'électricité et qui servent ensuite à actionner un récepteur placé soit sur une voiture pour la traction mécanique, soit dans un atelier pour faire mouvoir des outils.

L'idée d'accumuler l'électricité dans une pile appartient à M. Gaston Planté. Elle a été reprise tout récemment par M. Faure, qui est parvenu, dit-on, à augmenter le nombre de kilogrammètres emmagasinés dans un poids donné de piles.

HIPPOLYTE FONTAINE.

ÉLECTRO-PHYSIOLOGIE

ET

ÉLECTRO-THÉRAPIE

I

ÉLECTRO-PHYSIOLOGIE.

ORIGINES DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

C'est à une expérience physiologique, faite par un médecin, qu'est due la découverte de l'électricité dynamique. En 1786 Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, fit l'observation suivante : ayant suspendu une grenouille par un crochet de cuivre qui traversait la moelle épinière, il remarqua que les membres inférieurs de l'animal étaient agités de secousses convulsives chaque fois qu'ils venaient à toucher le fer d'un balcon auquel était fixé le crochet de cuivre. Cette observation a été le point de départ de toutes les merveilles que nous voyons réunies actuellement au palais de l'Industrie, bien qu'on semble l'avoir un peu oublié.

Galvani varia cette expérience de bien des manières en employant des arcs conducteurs de nature différente pour relier le nerf au muscle; chaque fois il obtint une contraction. Le célèbre médecin arriva à conclure que les nerfs et les muscles ont une électricité propre et que la grenouille peut être assimilée à une bouteille de Leyde dont les nerfs et les muscles constitueraient les armatures. Un professeur de physique de Pavie, Volta, contesta cette explication et prétendit que l'électricité prenait naissance au contact des deux métaux différents, fer et cuivre, qui constituaient l'arc de communication entre les nerfs et les muscles. Galvani riposta en obtenant la contraction *sans métaux* par le contact direct du nerf et du muscle. Volta n'en soutint pas moins son idée et en démontra l'exactitude en créant le merveilleux appareil qui porte son nom : la pile de Volta.

Comme il arrive bien souvent dans l'histoire des sciences, la vérité

était des deux côtés à la fois. L'imprudent qui pourrait douter de l'existence de l'électricité animale n'a qu'à toucher certains poissons, la torpille, le silure ou le gymnote : l'épouvantable décharge que lui enverra cette véritable bouteille de Leyde vivante dissipera rapidement et sans retour toutes ses hésitations. Ces animaux fabriquent en grand l'électricité ; mais tout être vivant, chaque cellule, pourrait-on dire, présente en petit des phénomènes analogues. Néanmoins c'est dans les muscles et dans les nerfs que cette fonction électrique se constate le plus aisément.

COURANT MUSCULAIRE.

Pour constater l'existence de ce courant, il suffit de mettre en rapport avec un galvanomètre sensible à fil fin un point quelconque de la surface du muscle et une de ses extrémités. On constate alors aisément l'existence d'un courant allant de la surface du muscle à son extrémité.

En un mot, la surface musculaire constitue le pôle positif, et son extrémité le pôle négatif de cet appareil électro-moteur vivant ; ce fait a été mis hors de doute par les expériences de Nobili, Matteucci, Duboys-Reymond, etc.

Nous ne pouvons décrire ici les procédés minutieux mis en usage et qui ne laissent aucun doute à cet égard. Plus récemment on s'est servi du téléphone pour faire cette démonstration. Le courant musculaire lancé dans l'instrument après avoir été *interrompu mécaniquement*, lui fait rendre un son très fort qui ne laisse aucun doute sur l'existence d'un courant électrique.

Des diverses expériences faites sur l'électricité du muscle on a tiré les conclusions suivantes :

1° Le courant propre de la grenouille constaté par Galvani n'est que le courant musculaire.

2° Chaque muscle forme une pile distincte.

3° Le courant musculaire constaté sur un muscle séparé ou non de l'animal, *mais vivant*, marche toujours de la région moyenne du muscle vers son extrémité tendineuse. L'intensité de ce courant diminue graduellement à mesure que les extrémités de l'arc conducteur se rapprochent également des extrémités du muscle.

4° La section transversale d'un muscle est toujours négative par rapport à sa surface, *si petit que soit le tronçon musculaire*. On en peut conclure que c'est l'élément musculaire lui-même qui constitue l'électromoteur.

Causes de ce courant. — M. Duboys-Reymond explique ce courant par une polarisation spéciale de l'élément musculaire ; M. Hermann, par une différence d'oxydation entre la surface du muscle et son intérieur ;

M. d'Arsonval, par des phénomènes électro-capillaires de l'ordre de ceux qui se passent dans l'électromètre de Lippmann ou dans les tubes fendus de Becquerel.

Quoi qu'il en soit de ces explications, le fait de l'existence d'un courant musculaire est aujourd'hui hors de doute, bien qu'on ne doive pas lui attacher une aussi grande importance qu'on l'a fait au début.

Variation négative. — Dubois-Reymond a découvert ce phénomène curieux : lorsqu'on fait contracter un muscle, en excitant son nerf par un procédé quelconque, le courant musculaire change de sens : la surface devient négative et l'extrémité tendineuse positive. C'est à ce changement de signe du courant propre que Dubois-Reymond a donné le nom d'*oscillation* ou *variation négative*.

Pour expliquer cette inversion on a invoqué les mêmes raisons que pour le courant propre.

M. Dubois-Reymond fait intervenir un autre genre de polarisation, et M. Hermann une modification dans les oxydations. M. d'Arsonval ne voit dans ce renversement du courant qu'un phénomène purement physique tenant aux variations de surface que la contraction fait éprouver au muscle. Il a montré en effet qu'on obtient à volonté cette variation sur des muscles morts depuis plusieurs jours, mais dont la rigidité a cessé.

Il a pu analyser ce fonctionnement d'une manière bien plus délicate et facile en se servant d'un microphone qu'il a inventé avec M. Paul Bert, et qui a été modifié spécialement pour cet usage. Avec ce *myophone* il a pu entendre le fonctionnement du muscle que le galvanomètre ne fait que montrer grossièrement. M. Boudet de Paris a appliqué cette méthode aux recherches cliniques, et a pu obtenir ainsi de précieuses indications sur le fonctionnement du muscle dans diverses maladies du système nerveux, notamment la paralysie agitante et l'ataxie locomotrice. Le même instrument modifié est devenu un *sphygmophone* à l'aide duquel on entend les bruits de la circulation sanguine que le meilleur stéthoscope serait impuissant à révéler. Ces divers instruments figurent à l'Exposition.

Contraction induite. — La variation négative produit une variation électrique suffisante pour exciter un nerf. Si l'on fait reposer l'extrémité du nerf d'une patte de grenouille sur un muscle dans lequel on produit la variation négative, cette *patte galvanoscopique*, comme on l'appelle, reçoit une excitation qui provoque une secousse.

C'est à ce phénomène facile à prévoir que Matteucci a donné le nom de *contraction induite*.

COURANT NERVEUX.

Le nerf possède comme le muscle un courant propre qui va de la surface à la section transversale. Ce fait a été prouvé par Duboys-Reymond. Ce courant est beaucoup plus faible que celui du muscle. On peut en donner la même explication.

Electro-tonus. — Duboys-Reymond a découvert également qu'un nerf qui est traversé par un courant devient plus excitable et produit un courant électrique. Il donna à cet état particulier du nerf le nom d'*état électro-tonique* et en arriva à l'expliquer par une propriété inconnue du nerf vivant.

Pflüger reprit ces expériences et créa la théorie l'*électro-tonus*.

Ramenons cette théorie dont on a fait un casse-tête chinois aux faits qui lui ont donné naissance. Les voici dans toute leur simplicité : si une certaine longueur de nerf est parcourue par un courant constant, ce courant crée deux zones dont l'excitabilité est très différente. La portion du nerf en contact avec le pôle négatif devient *plus* excitable, celle qui avoisine le pôle positif devient au contraire *moins* excitable.

De plus, si l'on met ces deux zones du nerf en rapport avec un galvanomètre, on constate l'existence d'un courant de même sens que le courant employé.

Les expériences de Matteucci ont surabondamment démontré l'existence de ce courant secondaire de polarisation. Quant à l'excitabilité différente de ces deux zones, elle tient vraisemblablement aux produits de l'électrolyse déposés sur le nerf, et qui sont des acides au pôle positif, des bases au pôle négatif.

DES APPAREILS D'EXCITATION ÉLECTRIQUE EMPLOYÉS EN PHYSIOLOGIE.

Les physiologistes emploient constamment l'électricité pour exciter les nerfs et les muscles.

L'appareil le plus employé pour ce genre de recherches est la bobine d'induction, modifiée par Duboys-Reymond, et que l'on désigne dans les laboratoires sous le nom d'*appareil à chariot*.

Cet appareil se compose d'une bobine d'induction dont le fil induit est mobile sur le fil inducteur, et qui peut s'en éloigner à une distance quelconque. Par ce dispositif on peut rendre graduellement le courant induit aussi faible qu'on le désire.

Cet appareil a néanmoins l'inconvénient de donner des courants dont l'intensité n'est pas comparable, même en se plaçant à la même distance de l'inducteur. Cela tient soit aux variations de la pile, soit aux varia-

tions de vitesse du trembleur amenant un changement dans la durée du passage du courant inducteur. Ce défaut a été corrigé par un dispositif nouveau de M. d'Arsonval (vitrine de M. Gaiffe).

Pour amener le courant aux nerfs ou aux muscles qu'il s'agit de mettre en action, les physiologistes se servent d'excitateurs de formes et de dimensions variées que l'on peut voir dans les vitrines de nos principaux constructeurs d'appareils médicaux.

Pour graduer les excitations, M. Chauveau de Lyon s'est servi d'un dispositif particulier de la pile à sulfate de cuivre.

M. Marey s'est servi d'un condensateur chargé par une pile.

Ces différents moyens ont l'inconvénient de produire une action chimique qui modifie rapidement l'excitabilité du nerf; avec les courants induits on évite cette cause d'erreur.

II

ELECTRO-THÉRAPIE.

L'électro-thérapie est l'application de l'électricité sous toutes ses formes comme moyen curatif de certaines maladies, particulièrement des systèmes nerveux et musculaire. — On a employé dans ce but l'électricité statique, l'électricité voltaïque ou dynamique, et l'électricité d'induction.

Supposons un accident ayant coupé le nerf qui se rend à un muscle : celui-ci est aussitôt paralysé. Au bout de quelques mois, le nerf se reconstitue et peut reprendre ses fonctions. Mais il arrivera souvent qu'à ce moment, le muscle paralysé s'est atrophié, faute d'exercice.

Dans ces cas, des applications électriques remplaceront l'excitation nerveuse normale qui faisait défaut; elles permettront de conserver le muscle en le faisant contracter artificiellement. Si ce muscle est déjà à demi atrophié, l'électricité permettra, en le faisant fonctionner, de lui rendre son volume primitif.

De même, dans certaines paralysies consécutives au froid, à des névralgies, à des rhumatismes, les excitations électriques empêcheront l'atrophie musculaire de se produire, ou la guériront. Enfin, elles agissent à distance sur la cause centrale du mal, et la font quelquefois disparaître.

Les courants électriques rendent aussi de grands services dans certaines lésions de nutrition, dans les névralgies, etc...; mais pour ces dernières maladies le rôle curatif est moins incontestable que dans le premier cas.

Quelques médecins recommandent certaines formes de l'électricité à

l'exclusion de toute autre. L'expérience condamne absolument cette manière de voir. Dans certaines maladies, les nerfs et les muscles perdent leur excitabilité pour certaines formes de l'électricité. Ainsi chez les malades qui ont des paralysies à la suite d'empoisonnement par le plomb, les peintres par exemple, les muscles ne sont plus excitables par les courants d'induction, tandis qu'ils le sont encore par le courant de la pile.

Il n'y a donc pas de règle absolue à formuler, et l'expérience a conduit à des résultats qui, si incomplets qu'ils soient encore, présentent un immense intérêt. Mais nous ne pouvons tenter de les énumérer ici, renvoyant aux traités de Becquerel, Onimus, Chéron, Arthuis, Tripier, Duchesne de Boulogne, de Lyon, etc.

L'électricité a une action incontestable sur le système nerveux, en dehors de l'excitation sensible que provoquent les courants d'inductions.

Tous les phénomènes étranges auxquels donnent lieu l'application de simples plaques de métal ou d'aimants sur la peau des hystériques, démontrent que le système nerveux est profondément impressionné par l'agent électrique ou magnétique. Les phénomènes découverts par Burcq et étudiés chez Charcot à la Salpêtrière ne sont certainement que l'exagération d'actions physiologiques normales.

Ces phénomènes curieux, pour être encore inexplicables, n'en sont pas moins incontestables. M. Brown-Séquard est d'ailleurs arrivé par des expériences sur les animaux à produire des exagérations considérables de l'excitabilité des nerfs et des muscles à l'aide de l'agent électrique.

PROCÉDÉS D'ÉLECTRISATION EMPLOYÉS EN ÉLECTROTHERAPIE.

L'électricité est appliquée sous ses trois formes :

- 1° *Statique*;
- 2° *D'induction*;
- 3° *Voltaïque*.

L'électricité statique a une très grande tension et peu de quantité; elle ne produit qu'une action mécanique sans action chimique. On emploie les machines à plateau de Ramsden, de Holtz, de Carré, etc....

On électrise : 1° par étincelles; 2° par secousses avec ou sans bouteille de Leyde; 3° par aigrettes; 4° par l'effluve.

Électricité d'induction. — Les appareils d'induction sont tous des dérivés de la bobine de Ruhmkorff. Ils donnent des effets différents suivant la grosseur et la longueur des fils qui les composent.

Électricité voltaïque. — Les appareils de cette catégorie sont composés de piles plus ou moins puissantes avec lesquelles on donne des courants continus ou interrompus.

Galvano-caustique chimique. — En employant un courant un peu fort les liquides de l'organisme sont décomposés; il se forme des bases au pôle négatif, des acides au pôle positif. Ces corps agissent alors comme caustiques et produisent de fortes cautérisations. Cette méthode de cautérisation due à Ciniselli de Crémone a été introduite en France par le docteur Tripier qui en a tiré un excellent parti pour la cautérisation des organes profonds, les voies génitales par exemple.

Galvano-caustique thermique. — La pile peut être assez forte pour rougir un fil de platine. Ce fil toujours maintenu à l'incandescence a permis d'enlever certaines tumeurs profondes et peut rendre des services dans certaines opérations.

On trouvera au catalogue l'indication d'instruments nombreux appartenant à ces diverses catégories; presque tous les constructeurs en ont inventé, avec ou sans la direction de médecins praticiens.

PAUL BERT.

ÉLECTRO-CHIMIE

Toutes les fois que l'équilibre moléculaire du corps est troublé par les affinités chimiques, il y a dégagement d'électricité. Réciproquement le passage de l'électricité au travers des corps susceptibles de produire des réactions chimiques, provoque celles-ci. L'ensemble de ces phénomènes constitue l'électro-chimie.

1° *Dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.* — Lorsque deux corps réagissent chimiquement l'un sur l'autre pour se combiner, celui qui joue le rôle de base prend l'électricité négative, et celui qui joue le rôle d'acide, l'électricité positive.

Inversement, lorsqu'un corps composé subit une décomposition chimique, le corps qui joue le rôle de base prend l'électricité positive, et le corps qui joue le rôle d'acide, l'électricité négative.

Ces phénomènes ne se manifestent que si les corps sont suffisamment conducteurs de l'électricité.

Dans la notice consacrée aux *piles électriques* on a vu de nombreux exemples du dégagement d'électricité qui accompagne les réactions chimiques. Les *forces électro-motrices* que l'on observe dans ces circonstances sont intimement liées à la nature des phénomènes chimiques; elles sont proportionnelles au travail moléculaire qui correspond aux diverses réactions. On possède, du reste, un autre moyen d'évaluer ce travail moléculaire : il consiste à déterminer les quantités de chaleur mises en jeu par les combinaisons ou les décompositions, et l'on reconnaît que ces quantités de chaleur sont proportionnelles aux forces électro-motrices observées, de sorte que l'un ou l'autre des phénomènes peut servir de mesure au travail moléculaire qu'ils accompagnent.

2° *Effets de l'électricité.*

Action des décharges électriques. — Lorsque des décharges électriques traversent un gaz composé ou un mélange de gaz pouvant se combiner mutuellement, elles donnent lieu à des combinaisons et à des décompositions chimiques. Ainsi quand des étincelles électriques éclatent dans l'air, elles déterminent la combinaison de l'oxygène et de

l'azote; il se forme des composés nitreux qui, en présence de l'eau, se transforment en acide azotique. Cette expérience a été faite par Cavendish.

Les décharges qui se font sous forme d'*aigrettes* entre des conducteurs entourés d'une substance isolante, et auxquelles on a donné le nom d'*effluves électriques*, sont particulièrement propres à manifester ces phénomènes.

Parmi les actions chimiques les plus intéressantes et que l'on observe dans ces conditions spéciales il convient de citer l'effet produit sur l'oxygène pur. Ce gaz, soumis à l'influence des étincelles ou des effluves électriques, diminue de volume; il subit une modification allotropique, jouit alors de propriétés oxydantes très énergiques, et acquiert une odeur particulière qui lui a fait donner le nom d'ozone. Dans l'industrie on commence à employer l'ozone comme agent d'oxydation.

Action des courants électriques. — Si l'on vient à plonger dans un liquide conducteur chimiquement décomposable deux lames métalliques inaltérables communiquant avec les pôles d'une pile, on observe que le liquide est décomposé par le courant électrique. L'eau est décomposée en oxygène et hydrogène. Cette expérience a été faite par Nicholson et Carlisle peu après la découverte de la pile par Volta.

D'une manière générale, lorsqu'un corps est ainsi décomposé, les métaux, les bases, l'hydrogène deviennent libres sur la lame qui communique avec le zinc de la pile, ou pôle *négalif*; les acides, l'oxygène, deviennent libres au pôle *positif*.

En soumettant à l'action de la pile la potasse ou la soude, Humphry Davy retira de ces corps le potassium et le sodium. On s'est servi des mêmes procédés pour préparer le magnésium, l'aluminium, et les métaux des bases alcalines et terreuses.

Lorsqu'on dispose à la suite les uns des autres des vases contenant divers liquides décomposables, et notamment des dissolutions de sels métalliques, si l'on fait traverser ces liquides par un même courant électrique, on observe que les quantités de substances décomposées sont proportionnelles aux *équivalents chimiques* des corps. Par exemple, si les vases contiennent de l'eau, du nitrate de cuivre, du nitrate d'argent, s'il y a 1 gramme d'hydrogène mis en liberté dans le premier vase, on trouvera dans le second 31^{gr},75 de cuivre, et dans le troisième 108 grammes d'argent. Cette loi des décompositions chimiques en *proportions définies* a été donnée par Faraday.

Si les sels décomposés sont formés de multiples ou de sous-multiples des équivalents des corps simples on observe qu'au pôle *positif* il se dépose des quantités chimiquement équivalentes de l'élément qui joue le rôle d'acide, tandis qu'au pôle négatif il se dépose la quantité de base

ou de métal qui, pour chaque corps, correspond à la quantité de l'élément déposé au *pôle positif*. (Ed. Becquerel.)

La quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un équivalent d'un corps quelconque, soit 1 gramme d'hydrogène, est donc constante et peut être appelée *équivalent d'électricité*; l'appareil de décomposition porte le nom de voltamètre. Lorsque le courant est fourni par une pile, le travail chimique dans chaque couple de cette pile est équivalent à celui d'un voltamètre placé dans le circuit, et pour 1 gramme d'hydrogène mis en liberté dans celui-ci, il se dissout dans chaque couple 1 équivalent, soit 32 grammes de zinc. Un couple peut même être assimilé à un voltamètre fonctionnant avec le courant même qu'il produit, courant qui à l'extérieur du couple va de la lame inaltérable au zinc, et qui dans le couple va du zinc au conducteur inaltérable, de sorte que l'oxygène se porte sur le zinc et l'hydrogène sur l'autre lame.

On voit quel lien intime existe entre le travail chimique qui donne lieu au dégagement d'électricité et le travail produit par l'électricité. En tous les points du parcours d'un courant électrique il y a équivalence complète. Ces observations donnent une importance nouvelle aux *équivalents* des corps tels que la chimie les détermine.

Dans la pratique, par suite de réactions secondaires que nous ne pouvons analyser ici, on observe qu'il se dissout dans la pile un peu plus de zinc que ne l'indique la théorie.

Les actions chimiques produites par les courants électriques ont été l'objet d'applications industrielles nombreuses. Nous citerons seulement pour mémoire le traitement électro-chimique des minerais d'argent (A.-C. Becquerel) (1836).

L'application la plus importante est la *galvanoplastie*, industrie qui comprend non seulement les dépôts métalliques en couches épaisses, utilisés pour la statuaire, l'orfèvrerie, l'ornementation, la typographie, la gravure, etc., mais encore les dépôts en couches minces qui constituent la dorure, l'argenture, le nickelage, le zingage, etc. Le procédé à l'aide duquel on peut obtenir un dépôt de cuivre, moulant exactement la forme de l'objet sur lequel il était déposé, a été publié en 1838 par Jacobi.

Si l'on fait traverser par un courant électrique une dissolution d'un sel de cuivre en prenant pour *électrode négative* un corps conducteur quelconque, par exemple un moule en plâtre ou en gutta-percha, rendu conducteur superficiellement par de la plombagine, il se dépose du cuivre sur ce corps. La dissolution s'appauvrit à chaque instant; pour remédier à cet inconvénient on forme l'autre *électrode* d'une lame de cuivre, et comme les éléments acides se portent sur cette lame, elle se dissout, perdant autant de cuivre qu'il s'en dépose sur l'autre électrode; le liquide conserve ainsi sa concentration.

Lorsque la dissolution est acide, on trouve qu'il se dissout au pôle positif un peu plus de cuivre qu'il ne s'en dépose au pôle négatif. Plus les dissolutions sont neutres plus l'on se rapproche de l'égalité théorique.

On obtient de la même manière le dépôt d'un grand nombre de métaux, mais suivant la nature des *bains* métalliques, la température et l'intensité du courant, les dépôts affectent des états de dureté et de malléabilité très divers.

On emploie comme source d'électricité soit une pile, soit une machine magnéto-électrique ou dynamo-électrique; souvent aussi on se borne à plonger dans le bain un vase poreux contenant de l'eau acidulée et une lame de zinc, que l'on met en communication avec les objets sur lesquels on se propose de faire le dépôt. On forme ainsi un couple à deux liquides auquel on a donné le nom d'appareil simple ou à dépôt immédiat (voir Piles).

L'industrie des dépôts en couches minces, notamment celle de la dorure et de l'argenture a été une des premières à se développer et a puissamment contribué aux progrès des applications électro-chimiques. Dès 1840 M. de la Rive montrait que l'on pouvait obtenir par la pile, sur divers métaux, des dépôts d'or adhérents. Depuis cette époque on a reconnu que le choix des dissolutions avait une grande importance, et notamment d'après les travaux de MM. Elkington et de Ruolz, qu'il fallait faire usage de dissolutions alcalines. Aujourd'hui, pour la dorure on emploie le plus généralement du cyanure d'or dissous dans du cyanure de potassium; on dore ainsi le platine, l'argent, le cuivre, l'étain, le maillechort, etc. Les mêmes précautions sont applicables à l'argenture. L'argent se dépose facilement sur l'or, le platine, l'étain et principalement le cuivre.

On dépose également le cuivre, le platine; les dépôts de zinc, de plomb et d'étain peuvent se faire au moyen des dissolutions des oxydes de ces métaux dans la potasse.

Le nickelage a pris dans ces dernières années une très grande extension. On fait usage de préférence de sels doubles de nickel et d'ammoniaque. Les dépôts de cobalt et de fer se réalisent par des procédés entièrement semblables; on peut même obtenir ces métaux en couches épaisses.

Les méthodes électro-chimiques permettent de recouvrir les métaux d'une couche mince d'un oxyde métallique, tel que le peroxyde de plomb ou le peroxyde de fer; les objets sur lesquels on fait le dépôt sont alors mis en communication avec le *pôle positif* de la pile. On fait usage d'une dissolution de protoxyde de plomb dans la potasse, ou de protoxyde de fer dans l'ammoniaque. La formation du peroxyde est due à l'oxygène qui se porte au pôle positif. Les dépôts peuvent être assez

minces pour produire les couleurs des anneaux colorés ; on s'en sert alors soit comme ornementation, soit pour couvrir les corps d'une enveloppe inaltérable à l'air.

Les phénomènes électro-chimiques dont nous venons de parler peuvent se manifester sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir des conducteurs métalliques. Lorsque deux liquides sont en présence dans un espace capillaire, au travers d'une fissure dans une paroi en verre, d'un diaphragme perméable, d'une colonne de sable, etc., la couche liquide qui adhère aux parois de cet espace joue le rôle de conducteur et les effets électriques qui se produisent donnent naissance à des phénomènes de réduction très intéressants.

Les courants électriques semblent agir sur la plupart des corps ; lorsque ceux-ci sont insolubles les effets immédiats paraissent faibles, mais en laissant l'action se prolonger des mois et des années, on obtient des phénomènes de décomposition très remarquables ; les produits sont généralement cristallisés, et l'on a pu reproduire ainsi artificiellement un très grand nombre de substances minérales cristallisées analogues à celles que l'on trouve dans la nature.

HENRI BECQUEREL.

INSTRUMENTS DE PRÉCISION

1. — On appelle *instruments de précision* des appareils qui servent à mesurer une quantité quelconque avec exactitude et qui, pour ce motif, exigent, dans leur construction, des soins particuliers.

A ce titre, un grand nombre d'appareils utilisés dans les usages habituels de la vie, tels que les mesures métriques, les balances et les horloges, peuvent recevoir ce nom; mais c'est surtout aux appareils employés dans les usages scientifiques et industriels que l'on donne les soins de construction qui en font de véritables instruments de précision.

Ce n'est d'ailleurs qu'à une époque relativement récente que le besoin d'instruments de ce genre est devenu général, par suite des progrès accomplis par les sciences et l'industrie.

D'une part, en effet, les savants modernes, en suivant la méthode nouvelle de Roger Bacon et substituant l'expérience à l'observation, dans l'étude des phénomènes de la nature, ont été conduits à soumettre à des mesures précises tous les éléments qui interviennent dans les lois physiques.

D'autre part, l'industrie, en cherchant un rendement plus avantageux dans ses fabrications et en substituant partout la production mécanique à la production manuelle, est arrivée à poursuivre de plus en plus la pureté dans les produits et l'exactitude dans les formes et, par suite, à réclamer l'emploi d'appareils de plus en plus précis, pour le dosage des substances employées, comme pour la vérification des dimensions des objets fabriqués.

Mais on peut dire que c'est surtout dans ces dernières années que les progrès des sciences exactes ont donné une grande importance à la construction des instruments de précision, lorsque les astronomes, ne se contentant plus de l'observation des mouvements généraux des astres, ont voulu aborder l'étude de leurs perturbations et lorsque les physiciens, allant au delà des lois simples qu'avaient trouvées les fondateurs de la physique expérimentale, ont voulu connaître les causes des anomalies apparentes que présentaient souvent les phénomènes

observés et ont été conduits ainsi à la mesure de quantités que l'on avait longtemps considérées comme négligeables et que l'on assimilait le plus souvent à des infiniment petits.

C'est alors qu'on a été amené à faire appel à l'électricité dans les opérations de mesure.

Du moment, en effet, qu'on abordait l'étude des variations produites par des phénomènes d'ordre moléculaire, la présence de l'observateur, dans le voisinage immédiat du corps à mesurer, causait des perturbations de l'ordre même des quantités qu'on avait à évaluer et il fallait trouver un moyen d'opérer ces mesures à distance.

L'électricité qui permet d'effectuer instantanément, à distance, à l'aide de certains organes spéciaux, des opérations mécaniques variées, donnait la possibilité de faire fonctionner les instruments de mesure hors de la présence de l'observateur, mais sous son contrôle constant.

Elle permettait même d'obtenir, dans l'exécution de certaines mesures, une précision supérieure à celle que donne l'observation directe, en venant en aide à l'imperfection de nos sens.

On sait, en effet, que les instruments de mesure ramènent habituellement l'opération finale à une observation visuelle, celle de l'affleurement ou du déplacement d'un index.

Car s'il s'agit d'une mesure de longueur, c'est l'affleurement d'un index devant une échelle ou devant un arc gradué que l'on doit observer.

S'agit-il d'une pesée, l'équilibre de la balance est indiqué par la position d'une aiguille en regard d'un index.

Est-il question d'une mesure de pression, faite au moyen d'un baromètre ou d'un manomètre, ou d'une mesure de température, opérée au moyen d'un thermomètre, c'est le déplacement du niveau d'une colonne liquide devant une échelle divisée que l'on doit apprécier, ou celle d'une aiguille devant un arc gradué, si l'on fait usage d'un appareil métallique.

Pour la mesure des temps, c'est enfin, dans les appareils usuels, horloges et chronomètres, le mouvement d'une aiguille devant un cadran qui fournit le moyen d'observation.

Or, quand on fait usage d'un courant électrique de faible intensité, on peut obtenir l'établissement de ce courant par le plus léger contact de deux petites pièces métalliques placées dans le circuit et en produire la rupture par un écartement excessivement faible de ces deux mêmes pièces. Ce déplacement, qui suffit pour provoquer à distance le fonctionnement d'organes mécaniques, peut être assez faible pour n'être pas perceptible à l'œil, car il peut rester inférieur à $1/500^{\text{e}}$ de millimètre.

En appliquant des contacts électriques aux pièces des instruments de mesure dont on doit déterminer l'affleurement, on peut donc suppléer

à l'imperfection de l'œil, sans être obligé de recourir à des moyens optiques, tels que le microscope ou les lunettes grossissantes qui ont l'inconvénient d'exiger une attention soutenue et de provoquer rapidement la fatigue visuelle.

L'électricité a, dans ce cas, l'avantage de venir doublement en aide à l'observateur, car elle diminue aussi la fatigue d'esprit qu'il peut éprouver ; elle peut même laisser à cet observateur une entière liberté, si on lui demande d'inscrire elle-même, sur un récepteur convenable, le signal qui indique que l'affleurement cherché a été obtenu.

Lorsqu'il s'agit de phénomènes qui sont fonctions du temps, cette dernière propriété permet de réaliser, au moyen de l'électricité, des appareils de mesure enregistreurs qui marquent automatiquement leurs signaux sur un récepteur chargé de mesurer les temps.

Ces appareils font connaître : soit les instants précis où les quantités à mesurer atteignent une valeur déterminée, et ils constituent alors ce qu'on appelle des *chronographes électriques* ; soit les valeurs successives de la quantité que l'on veut mesurer, pour des intervalles périodiques égaux, et ils forment alors la série extrêmement nombreuse des *appareils enregistreurs*, dont l'usage se répand de plus en plus ; soit dans les laboratoires scientifiques et spécialement dans les observatoires météorologiques ; soit même dans les établissements industriels.

2. — En résumé, on voit que l'électricité se prête, d'une façon admirable, au service des instruments de précision parce qu'elle peut servir d'organe de tact excessivement délicat, suppléer ainsi à l'imperfection de nos organes des sens et signaler l'établissement du contact auquel on peut ramener toute opération de mesure.

Elle peut transporter à distance ce signal, rendre ainsi possibles des observations délicates que la présence de l'observateur pourrait troubler, et elle peut aussi enregistrer des signaux successifs, dans l'ordre de leur production, de façon à remplacer même l'observateur par des enregistreurs automatiques.

Enfin, elle transmet des signaux à distance avec une rapidité telle que cette transmission peut être considérée le plus souvent, dans la pratique, comme instantanée, et par suite elle se prête, soit à la transmission simple de la mesure du temps, ce qui constitue l'*horlogerie électrique*, soit à la transmission simultanée de la mesure de quantités déterminées, variables en fonctions du temps, ce qui constitue la *chronographie électrique*.

3. — Tous les instruments de précision qui figurent à l'Exposition internationale d'électricité peuvent se rattacher à l'une ou à l'autre de ces propriétés de l'électricité, mais ils présentent encore d'autres caractères communs, d'après la nature des organes dont ils font usage pour produire leurs signaux.

Lorsqu'on veut, au moyen d'un courant de faible intensité, déterminer un effet mécanique, on sait que l'on peut avantageusement utiliser l'action provoquée par le passage de ce courant sur un corps aimanté voisin du fil qui le conduit, pourvu qu'on multiplie cette action en enroulant ce fil un grand nombre de fois autour du corps aimanté, de façon à constituer une bobine qui reçoit le nom d'*électro-aimant*.

Bien qu'on puisse, au moyen de l'électricité, produire d'autres effets mécaniques, c'est habituellement cet organe dont on fait usage, dans les appareils dont nous nous occupons, parce qu'on peut employer ainsi des dispositions plus commodes et des courants plus maniables que ceux qui sont nécessaires, par exemple, pour produire des étincelles.

On trouve donc, dans la plupart des instruments de précision, des électro-aimants qui en constituent les organes mécaniques principaux, mais ces organes mêmes peuvent présenter une grande variété de construction, suivant la nature de l'effet mécanique que l'on veut finalement leur faire produire, soit qu'ils doivent engendrer un signal simplement optique, devant l'observateur attentif, soit qu'ils doivent appeler plus énergiquement son attention par un signal acoustique, soit enfin qu'ils doivent déterminer un enregistrement automatique.

C'est dans ce dernier cas surtout que les électro-aimants appliqués aux instruments de précision peuvent présenter des particularités intéressantes, car de grands progrès ont été réalisés, dans ces dernières années, dans la construction de ces organes, pour assurer la rapidité et la régularité de leur fonctionnement.

On trouve à l'Exposition des instruments de précision non enregistreurs, des types déjà connus, tels que des instruments de mesure métrique : comparateurs, sphéromètres, compas d'épaisseur, etc., à palpeurs électriques ; des baromètres, manomètres et thermomètres à signal avertisseur ; des indicateurs de vitesse, etc. ; mais c'est surtout dans la série des appareils enregistreurs, dans celle de l'horlogerie électrique et dans celle de la chronographie que l'on peut trouver un vaste champ d'études.

4. — Le développement pris récemment, dans le monde entier, par les études météorologiques, la création de nombreux observatoires, le désir de soumettre à l'étude les phénomènes fugitifs et incessamment variables dont l'atmosphère est le théâtre ont conduit à l'établissement de nombreux appareils enregistreurs qui affectent les dispositions les plus variées et les plus ingénieuses et, l'on peut dire qu'il n'est plus actuellement de phénomène naturel, aussi complexe qu'on le suppose, qui ne puisse être analysé et décomposé, en ses éléments, par les appareils météorologiques qui font usage de l'électricité pour en enregistrer, d'une façon continue, les phases successives.

On rencontre, à l'Exposition, de nombreux appareils de ce genre : les anémographes enregistrant la force et la direction du vent ; les barométrographes et thermographes enregistrant les variations de la pression atmosphérique et de la température ; les marégraphes notant les mouvements de la marée ; les pluviographes relevant les quantités de pluies tombées, sans compter les appareils plus délicats encore, destinés à enregistrer l'intensité de la radiation solaire, la rapidité d'évaporation de l'eau, la proportion d'humidité contenue dans l'atmosphère, celle même de l'ozone, ainsi que les variations des constantes électriques.

5. — L'horlogerie électrique a pris aussi un grand développement. Partout on cherche à utiliser la précieuse propriété que possède l'électricité de pouvoir envoyer instantanément un signal à distance, au moyen d'un fil, pour arriver à transmettre, aux différents points d'une même ville ou même aux différentes villes d'un pays tout entier, la mesure du temps donnée par une horloge de précision.

On veut arriver ainsi, suivant l'expression récemment adoptée, à unifier l'heure, et là encore on trouve des dispositions variées à étudier, dispositions qui se rattachent à deux types principaux.

Tantôt, on cherche à commander constamment tous les cadrans que l'on veut faire marcher d'accord, au moyen de courants électriques envoyés fréquemment par l'horloge-type, par exemple toutes les secondes, en se servant de ces courants pour provoquer l'échappement d'une dent du rouage ou pour régler la marche du pendule ; tantôt on se contente d'opérer le réglage ou la remise à l'heure de chaque horloge à intervalles éloignés, toutes les heures par exemple, au moyen d'une transmission de courant opérée par l'horloge régulatrice.

On voit d'intéressants exemples de ces deux systèmes dans l'exposition de la Ville de Paris.

Le premier est appliqué à douze horloges, dites centres horaires, réglées directement par l'horloge conductrice placée à l'Observatoire.

Le second est appliqué aux horloges publiques distribuées sur les différents points de Paris et commandées par les précédentes.

Cette exposition comprend les différentes dispositions qui ont été mises en expérience pour opérer le réglage ou la remise à l'heure de ces horloges et l'on trouvera des détails complets sur ces appareils dans la notice spéciale publiée à ce sujet par la direction des travaux de Paris¹.

6. — Les chronographes électriques présentent aussi un sujet d'études étendu et varié. Leurs applications se sont multipliées à l'infini

1. Notice n° IV. Unification de l'heure à Paris.

dans ces dernières années, et la précision qu'ils permettent d'obtenir a atteint des limites inespérées.

On peut, en effet, au moyen d'enregistreurs électriques spéciaux, parvenir à évaluer des durées inférieures à $1/50,000^{\text{e}}$ de seconde et l'on peut aborder, avec l'aide de ces appareils, l'étude de phénomènes que l'on s'était habitué, jusqu'à ce jour, à considérer comme inaccessibles à nos moyens d'investigation, à cause de leur faible durée qui pouvait les faire regarder comme instantanés.

C'est ainsi que les phénomènes si brusques et si violents qui accompagnent la détonation des corps explosifs ou le tir des bouches à feu ont pu être abordés au moyen de chronographes électriques et que les recherches balistiques peuvent, avec l'aide de ces instruments, comprendre actuellement l'étude des mouvements des projectiles dans l'âme même des bouches à feu, pendant un trajet dont la durée totale atteint à peine $1/100^{\text{e}}$ de seconde, l'étude correspondante du mouvement de recul des canons et du fonctionnement des organes des affûts, enfin l'étude même des pressions développées dans l'âme par l'explosion de la poudre, pressions qui dépassent souvent 2000 atmosphères. On trouve dans l'exposition du Ministère de la Marine une collection nombreuse d'appareils destinés à ces recherches.

MARCEL DEPREZ ET SEBERT.

MOTEURS ET TRANSMISSIONS

Les machines motrices et les transmissions qui servent à donner le mouvement aux appareils électriques ne se rapportent pas directement aux industries dont il vient d'être question. Cependant comme elles jouent un rôle assez important dans la création des courants d'induction, elles méritent d'être examinées avec attention.

Pour faciliter cet examen, nous allons esquisser en traits généraux les conditions que doivent remplir les moteurs pour assurer une production régulière et économique d'électricité. Nous serons très bref, car les visiteurs étant presque tous familiarisés avec l'emploi des machines à vapeur et des moteurs à gaz, il nous paraît inutile d'entrer dans aucune considération théorique.

Lorsqu'il s'agit de faire une installation électrique dans un atelier de construction, dans une manufacture, partout où il existe des moteurs, on ne rencontre aucune difficulté. Les machines dynamo-électriques sont généralement peu encombrantes et très faciles à fixer sur le sol. Leur entretien se borne au graissage et au nettoyage, et comme elles n'exigent qu'un mouvement de rotation, il suffit de placer une poulie sur un des arbres de transmission de l'usine et d'actionner directement l'axe des machines électriques.

Pour les actions chimiques, la régularité de mouvement a peu d'importance, mais la continuité de marche qui doit se prolonger souvent des semaines entières nécessite l'emploi de quelques dispositions spéciales.

Pour l'éclairage il faut que la vitesse soit bien uniforme, sans cela il se produit dans l'intensité lumineuse des oscillations désagréables.

Lorsqu'il s'agit d'une installation dans un magasin, dans un hôtel, dans un théâtre, partout où il n'existe aucun moteur, le problème se complique parfois beaucoup. Dans chaque pays la législation intervient et les difficultés créées de ce chef peuvent devenir très grandes.

En France, les chaudières sont divisées en trois catégories. Cette classification est basée sur le produit du nombre exprimant en mètres cubes la capacité totale de la chaudière par le nombre exprimant en

degrés centigrades la température de l'eau au-dessus de 100 degrés.

Les chaudières sont de la première catégorie lorsque le produit est supérieur à 200, de la deuxième quand le produit dépasse 50 et de la troisième si le produit n'excède pas 50.

Les chaudières des première et seconde catégories sont formellement exclues des maisons habitées ; les chaudières de troisième catégorie peuvent seules y pénétrer.

En employant des chaudières à corps cylindrique et à bouilleurs on ne peut guère dépasser les forces de 4 à 6 chevaux sans sortir de la troisième catégorie ; tandis qu'en faisant usage de générateurs multitubulaires, ne contenant qu'un faible volume d'eau, on peut atteindre 50 et même 70 chevaux de force.

Cela explique pourquoi les principales chaudières exposées sont formées de faisceaux de tubes assemblés par séries et surmontés de petits réservoirs de vapeur. Ajoutons qu'au point de vue de la sécurité, il serait difficile de combiner un meilleur type de générateurs, car les explosions dangereuses sont matériellement impossibles avec des tubes contenant peu d'eau et pouvant résister à d'énormes pressions sans se briser.

Les grosses chaudières de l'Exposition sont complétées par des récupérateurs de chaleur ayant pour but d'échauffer l'eau avant de la soumettre à l'ébullition. Ces récupérateurs de chaleur procurent une économie réelle de charbon ; malheureusement leur prix élevé et la place qu'ils occupent ne permettent de les employer que pour de gros générateurs de deuxième et de première catégorie.

Les machines à vapeur proprement dites doivent dépenser le moins de vapeur possible pour produire une force donnée et avoir un mouvement très régulier. Ces deux conditions sont remplies par la plupart des machines exposées par la France, la Belgique et l'Amérique. Les machines anglaises sont généralement simples et peu coûteuses, mais elles paraissent (nous ne parlons, bien entendu, que des appareils exposés) consommer plus de vapeur que celles des autres pays.

La faible consommation de vapeur est obtenue par l'adoption, presque générale aujourd'hui, de distributeurs à déclic ouvrant et fermant brusquement les orifices d'entrée et de sortie de vapeur ou par l'adjonction d'un cylindre dans lequel s'opère la détente de la vapeur.

L'économie de vapeur n'est pas toujours la considération capitale qui doit guider l'acquéreur : elle est même, dans certains cas, considérée comme tout à fait accessoire.

Lorsqu'il s'agit par exemple d'une installation électrique pour diriger la marche nocturne d'un navire, la dépense de vapeur est insignifiante et la sécurité de marche est bien autrement utile à assurer.

A bord des navires, on commande quelquefois les machines élec-

triques par de petits moteurs ordinaires à vitesse modérée auxquels la vapeur est fournie par les chaudières du bateau. Dans ce cas on a soin d'employer des courroies larges peu susceptibles de se rétrécir et sur lesquelles il est bon de faire agir un tendeur ayant pour but d'empêcher tout glissement sur les poulies. Les courroies métalliques conviennent très bien pour ce service.

Pour les appareils militaires, il faut que la machine soit d'un entretien facile, qu'elle n'ait aucun organe délicat ni apparent et surtout qu'elle assure à l'instant même auquel on en a besoin la vitesse nécessaire à la machine dynamo-électrique.

Ce résultat ne peut être obtenu que par une commande directe, l'arbre de la machine électrique étant placé dans le prolongement de celui du moteur. La transmission par engrenages serait également sûre si elle était applicable aux vitesses dont on fait usage; mais il s'agit de vitesses qui sont au minimum de 500 tours par minute et qui dans certains cas atteignent 1600 tours. La transmission par courroie doit être écartée à cause des glissements qu'elle permet.

Le moteur Brotherhood à trois cylindres est très usité dans les applications de la guerre et de la marine. Les résultats qu'il donne sont satisfaisants, si l'on a soin d'assurer un bon graissage avec des huiles minérales non encrassantes. Nous pourrions citer plusieurs moteurs de ce genre que le ministère de la guerre français a mis en service depuis cinq ans et qui n'ont donné lieu à aucune réparation.

Quelques constructeurs ont placé leurs appareils électriques sur l'arbre même des machines à mouvement alternatif. Cette disposition est simple, mais elle présente quelques inconvénients. Les machines à vapeur pour faire un bon service, sans dépense exagérée de vapeur, ne doivent tourner qu'à des vitesses modérées, tandis que les machines dynamo-électriques, pour donner leur maximum d'effet utile, ont besoin d'être animées de très grandes vitesses. Il y a là deux conditions opposées qu'il est difficile de mettre d'accord lorsqu'on cherche à obtenir un service économique de longue durée, mais qu'on peut cependant, pour des cas spéciaux, amener à devenir pratiques en augmentant la vitesse de régime du moteur et en diminuant celle de la machine électrique. On obtient alors un très petit moteur et une machine électrique d'un volume considérable, mais on n'a plus à redouter les glissements et les ruptures de courroies.

On se sert très souvent, pour les petites installations de galvanoplastie et de lumière électrique, de moteurs à gaz. Ce sont surtout les moteurs Bisschop et les moteurs Otto qui se propagent dans ces applications. L'exposition est très bien garnie de ce genre d'appareils; plus de 200 chevaux de force sont obtenus ainsi.

Les moteurs à gaz présentent les avantages suivants : 1° Ils peuvent

être installés, quelle que soit leur puissance, dans les maisons d'habitation ; 2° ils ne présentent aucun danger d'explosion ; 3° ils n'exigent pour leur service d'un chauffeur expérimenté, un simple surveillant peut en faire fonctionner plusieurs à la fois ; 4° ils ne dépensent du gaz qu'autant qu'ils fonctionnent, ce qui les rend très convenables pour des travaux intermittents ; 5° ils se meuvent à l'instant même où l'on en a besoin, tandis que les moteurs à vapeur exigent un certain temps pour entrer en action.

L'avénient principal des moteurs à gaz réside dans la dépense d'entretien, qui est inférieure à celle à laquelle ils entraînent et qui, pour des forces un peu considérables, s'élève souvent à quatre ou cinq fois celle qui est exigée par les machines à vapeur fournissant un travail égal. Pour les petites forces la différence est moins sensible, aussi l'emploi des moteurs à gaz est surtout convenable dans les petites installations. Ajoutons que le gaz est vendu généralement bien au-dessus de sa valeur intrinsèque et qu'on peut le produire beaucoup plus économiquement, lorsqu'il est destiné uniquement à la production de la force motrice. Les courroies, les paliers, les arbres de transmission doivent naturellement être calculés pour résister aux efforts qu'ils ont à supporter et dans la production des courants d'induction, les vitesses sont souvent très considérables, il faut s'assurer de moyens de graissage tout à fait sûrs et abondants.

L'Exposition offre à l'étude des praticiens une série complète de courroies et de graisseurs de diverses provenances, d'appareils automatiques d'alimentation d'eau pour chaudières, d'appareils de sûreté pour générateurs de vapeurs, d'enregistreurs de pression et de mouvement, de compteurs de tours, de tachymètres, de cinémomètres, d'indicateurs de Watt, etc. On a rarement vu, réunie dans un même local, une aussi belle collection de transmissions de mouvement.

HIPPOLYTE FONTAINE.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
Électricité et Magnétisme (ED. BECQUEREL)	1
Électricité statique (MASCART).....	11
Piles électriques (HENRI BECQUEREL).....	27
Les machines magnéto-électriques (ANTOINE BREGUET).....	35
Transmission de l'électricité (H. CLÉRAC).....	39
Électrométrie (J. RAYNAUD).....	47
Applications de l'électricité. — Télégraphie, signaux (E.-E. BLAVIER).....	79
Téléphonie, Microphonie, Photophonie (ARMENGAUD jeune)	113
Lumière électrique (HIPPOLYTE FONTAINE)	129
Moteurs électriques (HIPPOLYTE FONTAINE).....	143
Électro-physiologie et Électro-thérapie (PAUL BERT)	151
Électro-chimie (HENRI BECQUEREL)	159
Instruments de précision (MARCEL DEPREZ et SEBERT).....	165
Moteurs et transmissions (HIPPOLYTE FONTAINE).....	171