

92

BI. 001. 072
2, Rue de la Liberté
LILLE

L'ÉLECTRICITÉ

Ses Phénomènes et ses Applications

Douze Conférences par

G. EISENMENGER

Agrégé de l'Université, Docteur ès-Sciences

PARIS

PIERRE ROGER & C^o, ÉDITEURS

54, Rue Jacob, 54

1913

DANS LA MÊME COLLECTION

PRÉCÉDEMMENT PARUS :

DU MÊME AUTEUR

LA PHYSIQUE : son rôle et ses phénomènes dans la vie quotidienne, 12 conférences par G. Eisenmenger. Un volume in-8 écu, avec 50 figures, broché. 4 fr.

LA GÉOLOGIE et ses phénomènes, 12 conférences par G. Eisenmenger. Un volume in-8 écu avec 82 gravures et 10 planches hors texte, broché. 4 fr.

LA CHIMIE dans la vie quotidienne, 12 conférences par le docteur Lassar Cohn, professeur à l'Université de Königsberg. 2^e édition. Un volume in-8 écu avec 30 figures, broché. 4 fr.

LE MACHINISME : son rôle dans la vie moderne, 12 conférences par Max de Nansouty, ingénieur civil. Un volume in-8 écu, avec 28 planches hors texte, broché. 4 fr.

LES VÉGÉTAUX, leur rôle dans la vie quotidienne, 10 conférences par D. Bois, assistant au Muséum, et E. Gadeceau. Un volume in-8 écu, broché. 4 fr.

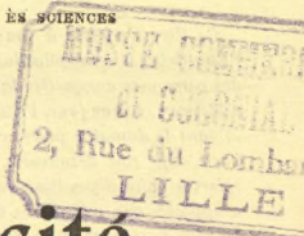
G. EISENMENGER



AGREGÉ DE L'UNIVERSITÉ, DOCTEUR EN SCIENCES

N-16

B-3



L'Électricité

Ses Phénomènes et ses Applications

12 CONFÉRENCES

N^o B. b. = 388480/-165037

80 GRAVURES

Amic 97

PARIS

PIERRE ROGER ET C^{ie}, ÉDITEURS

54, RUE JACOB, 54

1913

Tous droits de traduction et de reproduction rigoureusement réservés.

AVANT-PROPOS

Ce livre s'adresse à tous ceux qui, sans études spéciales, s'intéressent à l'Électricité, à ses applications, à ses progrès. Chaque jour s'accroît le nombre des personnes auxquelles la notion des principes électriques devient indispensable, car, chaque jour, l'Électricité s'implante davantage dans la petite industrie et dans le domaine privé, et, chaque jour, dans ce domaine si nouveau et si vaste déjà, une découverte vient en reculer les bornes. De toutes les forces mises à notre disposition par la Nature et la Science, l'Électricité est celle qui a apporté, aux conditions de la vie sociale et matérielle, les transformations les plus profondes et les améliorations les plus considérables. Aujourd'hui, les merveilles de l'Électricité ne se comptent plus; nous ne pouvons faire un seul pas sans les rencontrer, au dedans comme au dehors, dans nos voyages, nos plaisirs, nos travaux, comme dans nos occupations de tous les jours.

A côté des volumineux traités d'Électricité qui ne peuvent être lus que par les professionnels, des nombreuses monographies qui ne traitent que d'un point particulier et s'adressent aux spécialistes, des manuels rédigés suivant un plan invariable pour les élèves de nos établissements d'instruction et en vue de la préparation à divers examens ou concours, à côté des innombrables ouvrages de grosse vulgarisation capables tout au plus de satisfaire les esprits qui suppriment tout raisonnement et se contentent d'analogies vagues ou fausses, j'ai pensé qu'il y avait place pour un ouvrage simple, clair et précis, qui, tenu au courant des progrès purement scientifiques, et des progrès industriels, présente d'une façon logique et limpide l'état actuel de la Science électrique, décrive, en les reliant les uns aux autres, les phénomènes si curieux de l'Électricité, et donne un tableau d'ensemble raisonné des applications actuelles dans tous les domaines.

J'ai cherché à ce que le lecteur puisse atteindre les beaux fruits que porte l'arbre de la Science, en se haussant jusqu'à leur hauteur, plutôt que d'abaisser les branches jusqu'à lui, car il eût fallu les faire fléchir et les déformer. La théorie des électrons a permis d'employer dans cet ouvrage un langage clair, parlant à l'imagination, de fournir une explication simple des phénomènes mystérieux et si féconds de l'Électricité; d'autre part, grâce à un plan tout nouveau, les notions indispensables se présentent au moment où il est nécessaire de les acquérir. Chaque conférence constitue un tout indépendant, que l'on peut lire et comprendre sans qu'il soit nécessaire de parcourir les pages qui précèdent.

Ce livre, n'est qu'une suite de leçons de choses, mais de ces choses que le public sérieux est avide de connaître car nous les rencontrons à chaque pas sur notre route. Je serais heureux s'il pouvait répondre aux multiples questions que l'on ne manque de se poser tous les jours, et faire naître chez le lecteur, en même temps qu'une curiosité plus vive, le désir de s'instruire plus complètement à la Science électrique.

G. EISENMENGER,

MUSEE COMMUNE
et COLONIALE
2, Rue du Loup
LILLE

PREMIÈRE CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ D'AUTREFOIS

PHÉNOMÈNES LES PLUS ANCIENNEMENT CONNUS : ATTRACTION,
AIMANTATION, ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

I. L'énergie électrique. — Ses métamorphoses. — Son étude à travers les siècles. — Son domaine. — II. Phénomènes d'électrisation par frottement. — Tension électrique ou potentiel. — Pouvoir des pointes. — III. Phénomènes d'électrisation par influence. — L'étincelle électrique. — IV. Phénomènes fondamentaux du magnétisme. — L'attraction magnétique. — V. Phénomènes d'aimantation par influence. — L'hystérésis. — VI. Phénomènes dus au magnétisme terrestre. — La boussole. — VII. Phénomènes électriques de l'atmosphère : aurores boréales, orages.

I. L'énergie électrique. — Il suffit d'avoir assisté à un violent orage, d'être monté dans un tramway mû par l'électricité, ou d'avoir simplement poussé le bouton d'une sonnerie électrique pour avoir l'idée que l'Électricité est une source de puissance, de travail, en un mot, *une source d'énergie*. La notion d'énergie électrique est donc familière à tout le monde.

Pendant longtemps, l'énergie mécanique, comme celle d'une chute d'eau qui fait tourner une roue à aubes, l'énergie calorifique qui fait mouvoir les machines à vapeur et rouler avec rapidité les locomotives sur les voies ferrées, l'énergie chimique qui se transforme en énergie calorifique quand on fait brûler un morceau de charbon par exemple, ont été seules utilisées dans l'industrie. Or l'énergie électrique, qui est la dernière à laquelle on a eu recours, est précisément la plus précieuse de toutes.

En effet, toutes les formes anciennement connues de l'énergie peuvent se convertir avec la plus grande facilité en énergie électrique : énergie mécanique ou calorifique dans la dynamo, énergie chimique dans la pile. Inversement, l'énergie électrique peut se transformer sans difficulté en toutes les autres formes de l'énergie. C'est ainsi que l'électricité se transforme : en chaleur dans les filaments que renferment nos ampoules électriques, en travail quand elle fait tourner une dynamo et actionne des machines-outils ¹, en énergie chimique quand elle décompose le sulfate de cuivre dans la cuve à galvanoplastie. L'Électricité est donc un intermédiaire précieux entre les différentes formes de l'énergie ².

Il y a plus : cet intermédiaire peut se transporter d'un point à un autre, de sorte qu'il permet d'utiliser les sources naturelles de force, comme les torrents de nos montagnes. Au fond de la vallée, on recueillera le travail mécanique de la chute au moyen de turbines, on transformera ce travail en électricité dans les dynamos, on transportera cette électricité à 50, 60, 100 kilomètres et même davantage, jusqu'au lieu où elle sera transformée, suivant les besoins, en travail mécanique pour faire marcher des moteurs, ou en chaleur et lumière pour l'éclairage électrique ³.

Ainsi, avant toute étude des phénomènes électriques et en ne faisant appel qu'à des notions familières, l'Électricité apparaît comme un admirable agent de transformation et de transport de l'énergie.

Les métamorphoses de l'Électricité. — Ces deux propriétés : transmission facile et souple merveilleuse, dominent l'histoire de l'expansion électrique. A la première de ces qualités, l'Électricité doit son prix de vente économique ; à la seconde, elle doit la variété de ses métamorphoses et de ses applications.

C'est l'Électricité qui brille dans les ampoules de cristal de nos lampes à incandescence ou entre les charbons des arcs voltaïques pour répandre des flots de lumière dans les magasins, les rues et les boulevards ; c'est elle qui permet de réaliser les hautes températures qui ont été le point de départ de toute une métallurgie nouvelle ; c'est elle encore

qui fait mouvoir les ascenseurs de nos habitations, les monte-charges des maisons de commerce, les grues et les ponts roulants des quais d'embarquement, et qui nous transporte avec rapidité dans les tramways et les trains de chemins de fer. Tantôt, nous la trouvons occupée à déposer de l'or ou de l'argent sur les métaux qui lui sont confiés, à fabriquer du chlore, de la soude, des alliages ou des couleurs, tantôt, devenue précieuse auxiliaire de l'agriculteur, elle laboure la terre productive et rentre les récoltes abondantes. Ici, instrument de mort, l'Électricité foudroie sans pitié de malheureux ouvriers, là, remède salulaire, elle consent à revêtir mille formes diverses pour soulager les malades et souvent même pour les guérir. Par les rayons X, elle permet de voir à l'intérieur de notre corps ; par le télégraphe et le téléphone, devenue dépositaire de la pensée et de la parole humaines, elle les transmet fidèlement et instantanément à travers l'espace ; enfin, par les ondes qu'elle fait naître dans l'éther agité, elle nous apporte la voix des navires en mer et celle des hommes de l'autre bout du monde.

Grâce à ses multiples métamorphoses, l'Électricité se rencontre partout autour de nous et il n'est pas de circonstance de la vie moderne où elle n'apporte son utile concours. Un jour viendra où elle mettra à notre disposition non seulement l'énergie encore incomplètement utilisée de nos cours d'eau, mais encore celle des marées et des vents.

L'Électricité est véritablement une fée à notre service. Elle nous a déjà fait connaître bien des merveilles et, sans cesse, elle nous ménage de nouvelles surprises.

L'Électricité à travers les siècles. — Comment l'homme s'est-il rendu compte de l'existence de l'énergie électrique ? Quels sont les premiers phénomènes qui ont attiré son attention ? Comment a-t-il pu étudier l'Électricité dans ses diverses manifestations, arriver à la maîtriser et à la plier à ses besoins ?

Les premières manifestations connues de l'énergie électrique furent les phénomènes atmosphériques observés au cours des orages, et les phénomènes d'attraction exercés par les corps frottés ou par les aimants.

Six cents ans avant notre ère, THALÈS DE MILET, que l'on

peut considérer comme le plus ancien physicien grec, avait remarqué qu'un bâton d'ambre⁴ frotté acquérait la propriété d'attirer les corps légers, comme les pailles, les feuilles sèches, de petits morceaux de bois, etc. Quatre siècles avant lui, le berger grec MAGNÈS aurait constaté le pouvoir attractif de la pierre d'aimant⁵ sur le crochet métallique de sa houlette.

Il semble bien que les Chinois aient devancé les Européens dans la connaissance de ces phénomènes, car, vingt siècles avant notre ère, ils savaient qu'une lame frottée contre la pierre d'aimant en acquiert la propriété, et que cette lame, suspendue librement, se dirige toujours vers le même point de l'espace.

Les phénomènes produits par l'électricité atmosphérique semblent aussi avoir été étudiés de bonne heure. Les Etrusques connaissaient le pouvoir des pointes; et si, dans l'Écriture, nous ne trouvons nulle part mentionnée la chute de la foudre sur le temple de Jérusalem, c'est que ce temple était surmonté d'une série de flèches d'or aiguës et reliées à des cavernes pratiquées dans la colline. Enfin, quatre siècles avant notre ère, le poète latin CLAUDIAN parle de la propriété que possèdent les torpilles d'engourdir les autres poissons, et ARISTOTELE étudie, en son *Histoire des animaux*, les mœurs de la torpille.

Au moyen âge, l'aimant passionna beaucoup les esprits, et le mode de suspension des statues par un aimant fut fort à la mode vers la fin de l'empire romain⁶; mais les propriétés magnétiques étaient attribuées à une âme particulière. Par les Chinois, l'aiguille aimantée fut transmise aux Arabes et, à l'époque des croisades, ceux-ci la firent connaître aux Européens.

A partir du dix-septième siècle, avec DESCARTES et PASCAL, la méthode expérimentale se débarrassa de la scolastique d'antan. GILBERT, médecin de la cour d'Angleterre, découvrit la facilité d'électrisation d'un grand nombre de corps et OTTO DE GUÉRICKE, bourgmestre de Magdebourg, inventa une machine à frottement avec laquelle il put obtenir de très petites étincelles.

Le dix-huitième siècle ne fut pas seulement fécond en pensées et en systèmes philosophiques, mais encore en ten-

tatives d'explication des phénomènes observés et en recherches nouvelles. GRAY (1709), en Angleterre, distingua les corps bons conducteurs des corps mauvais conducteurs, et DUFAY (1735), prédécesseur de Buffon au Jardin du roi, s'aperçut qu'un corps électrisé au moyen d'un verre frotté avec de la laine repoussait un corps électrisé de la même manière et attirait un troisième, électrisé au moyen d'un bâton de résine frotté ; il reconnut par la suite que les corps frottés prennent soit l'électricité vitrée soit l'électricité résineuse, et que la matière qui sert à les frotter se charge d'une électricité de nom contraire. Pour expliquer ces faits, le physicien anglais SYMMER admit l'existence de deux fluides agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre ; ces deux fluides existeraient dans tous les corps à l'état de combinaison formant le fluide neutre ; la décomposition de celui-ci par le frottement ferait apparaître, en quantités égales, de l'électricité vitreuse (ou *positive*) et de l'électricité résineuse (ou *negative*). Vers le milieu du dix-huitième siècle, MUSSCHENBROEK inventa la **Bouteille de Leyde** et découvrit le principe des condensateurs, puis COULOMB démontra expérimentalement que les attractions et répulsions électriques suivent une loi analogue à celle de la gravitation universelle, enfin FRANKLIN se livra à ses recherches sur l'Électricité atmosphérique.

Jusqu'à ce moment, le frottement de deux corps était le seul moyen que l'on connût pour produire de l'électricité. Or, en 1786, GALVANI, professeur d'anatomie à Bologne, fut mis en présence d'un **phénomène indépendant de tout frottement** et qui fut le point de départ d'une ère nouvelle pour l'Électricité. GALVANI étudiait les régions lombaires de grenouilles, et il les touchait avec un scalpel pendant que jaillissaient, dans le voisinage, les étincelles d'une machine statique ; sa femme remarqua qu'au moment de l'étincelle, les pattes se contractaient au contact du scalpel. Ayant obtenu le même résultat avec une tige de zinc et de cuivre dont les deux extrémités étaient mises en contact avec les nerfs lombaires et les muscles cruraux, Galvani pensa qu'il s'agissait d'une manifestation de la force vitale, d'une *Electricité animale*. Cette expérience eut un grand retentissement et fut l'objet de discussions dans toutes les sociétés scientifiques

d'Europe. VOLTA, professeur de physique à Pavie, fut l'adversaire le plus acharné des idées de Galvani; il montra que les actions chimiques produites entre deux conducteurs fournissent une *Électricité dite métallique*. Il fut ainsi conduit à reconstruire la pile qui porte son nom, laquelle est formée de rondelles de cuivre et de zinc séparées par des rondelles de drap imbibées d'acide sulfurique (1800). Galvani et Volta avaient tous deux raison et — heureusement peut-on dire — ils ne s'en aperçurent pas. La lutte dura six ans et les travaux qui furent faits à cette occasion ont non seulement établi une nouvelle méthode pour produire de l'électricité, mais encore ont élargi considérablement les connaissances que l'on possédait à cette époque.

La pile était née. Cet appareil merveilleux fut perfectionné, modifié, et l'on en compta bientôt de nombreux modèles. CRUKSHANK put décomposer l'eau, et ce fut là l'origine de l'électrolyse, de l'électro-chimie, de l'électro-métallurgie qui devaient plus tard révolutionner l'industrie. On fit connaissance avec le *phénomène de polarisation* qui allait permettre la construction des **accumulateurs**.

Cette nouvelle forme de l'Électricité — **électricité de contact** — a ouvert à l'esprit humain la voie de progrès ininterrompus. FARADAY, AMPÈRE, OHM, JOULE, DAVY, ØERSTEDT, HELMHOLTZ, MAXWELL, ROENTGEN, HERTZ, dont les noms reviendront souvent dans ces conférences, ont apporté le concours de leur génie et doivent être cités parmi ceux qui ont donné à nos connaissances l'ampleur qu'elles ont aujourd'hui.

Les **phénomènes d'induction**, qui forment la base essentielle de toute la science électrotechnique moderne, ont été découverts et étudiés par le physicien anglais FARADAY, en 1820. Alors purent apparaître les *magnétos* et les *dynamos*; la *bobine de Ruhmkorff* date de 1851 et la première *machine Gramme* de 1870. Depuis, les travaux se sont multipliés avec la rapidité de l'éclair, pourrait-on dire, et l'application pratique des expériences de laboratoire s'est traduite par une bienfaisante révolution dans notre vie sociale. L'étude de l'aimantation par les champs magnétiques a conduit au *télégraphe*, les effets calorifiques des courants à l'*éclairage électrique*, l'induction au *téléphone* et au *microphone*, la décharge à travers les gaz raréfiés aux *rayons cathodiques* et aux

rayons X, les décharges oscillantes aux ondes hertziennes et à la télégraphie sans fil.

Il semble que les progrès qui restent à faire ne soient plus que des perfectionnements de détail. Il n'en est rien. De nouveaux horizons viennent de s'ouvrir devant les savants émerveillés, de vastes étendues, dont il est permis d'affirmer la fécondité, apparaissent à leurs yeux étonnés. Les recherches effectuées sur les phénomènes électriques dans les gaz raréfiés ont fourni des résultats de la plus haute importance pour la philosophie naturelle; et les hypothèses récentes et hardies, relatives à la constitution de la matière, sont de nature à modifier nos idées sur la nature de l'Électricité. Bien des problèmes qui, hier encore, ne se posaient pas sont actuellement à l'étude par les physiciens de la nouvelle école.

Et de même que la télégraphie et la galvanoplastie ont précédé les grands transports de force et les importants procédés de l'électrochimie, de même, le problème résolu par MARCONI et BRANLY, les essais de COOPER HEWITT et de tant d'autres, sont là pour nous montrer que la porte reste grande ouverte aux vastes entreprises et aux applications de plus en plus déconcertantes.

Vibrations et Phénomènes. — Qu'est-ce donc que cette énergie électrique qui a passionné tant de savants, qui a suscité tant de travaux et qui a donné lieu à tant d'applications merveilleuses? Quelle est son essence et quelles sont ses relations avec les autres formes de l'énergie?

Nous avons vu, dans les conférences de Physique⁷, que toutes les forces connues et inconnues ne diffèrent entre elles que par la rapidité et l'amplitude des vibrations qui caractérisent chacune d'elles. Depuis la simple vibration double jusqu'à la vibration d'ordre le plus élevé, on peut distinguer une série de périodes dont chacune correspond à une forme déterminée de l'énergie. La première période, de 2 à 16 vibrations par seconde (2^1 à 2^4) correspond à l'énergie mécanique, les vibrations y sont lentes et faciles à percevoir directement. Dès que le nombre des vibrations devient plus élevé, l'oreille nous accuse l'apparition de la période sonore (de 2^5 à 2^{15} soit de 32 à 32 768 vibrations par seconde) qui,

à ses limites extrêmes, se transforme en *énergie électrique* (environ 50 billions de vibrations par seconde) et en *énergie calorifique* (5 trillions de vibrations par seconde). En nous élevant encore d'un degré dans l'échelle des vibrations, nous atteignons la période de la *lumière* (de 450 à 750 trillions), puis nous passons à l'*énergie chimique* et aux *radiations ultra-violettes*. Après l'ultra-violet apparaissent les rayons X qui correspondent à environ 2^{60} vibrations soit 1150000 trillions par seconde. A partir de cette période, l'énergie ne s'extériorise plus et il n'existe pas d'organe susceptible de la recueillir et de l'analyser; nous pénétrons dans le domaine de l'énergie psychique, c'est-à-dire de celle qui régit la vie végétale et animale des êtres.

Le domaine de l'Électricité. — L'Électricité n'est donc qu'une partie du clavier des forces infinies de la Nature. Ce n'est que récemment qu'a été déterminé le rang qu'elle occupe dans l'échelle des manifestations de l'Énergie, et que la Science est arrivé à soulever un coin du voile qui masquait son origine et sa provenance à notre esprit avide de savoir.

Or, à mesure que nos méthodes d'investigation se perfectionnent et que nos connaissances s'élargissent, nous nous rendons compte combien il est difficile de la séparer des autres phénomènes de la Nature. L'Électricité se trouve en relations si étroites avec les autres agents physiques et en particulier avec la Lumière, que l'on considère aujourd'hui la Lumière comme une manifestation de l'Électricité.

Cette identité des phénomènes optiques et électriques, sur laquelle nous aurons à revenir en étudiant les phénomènes d'oscillation et les ondes hertziennes, a été établie au moyen du calcul par le savant anglais MAXWELL (1873), et démontrée expérimentalement, quinze ans plus tard, par le physicien allemand HENRI HERTZ. *Le domaine de l'Électricité est immense, il embrasse la Nature tout entière*; dans la science actuelle, tout se ramène à l'Électricité.

Qu'est-ce que l'Électricité? — Cette intime et multiple parenté entre l'Électricité et les autres phénomènes physiques et chimiques explique pourquoi il a fallu si longtemps pour arriver à l'étude précise et raisonnée de cette force mystérieuse.

L'éther nous enveloppe comme d'un vaste océan et il a semblé logique de considérer les phénomènes électriques comme des phénomènes de l'éther⁸. Mais d'un autre côté, on s'aperçut que l'Électricité ne peut s'expliquer uniquement par des vibrations de l'éther et, à la suite des travaux de Maxwell, de Hertz, de Röntgen et de bien d'autres, il a fallu admettre l'existence de corps matériels, atomes et molécules d'Électricité.

Cette double conception a empêché pendant longtemps de se faire une idée juste des phénomènes électriques. Comme nous le verrons, certaines propriétés de l'Électricité sont analogues à celle d'un courant, de sorte que l'on peut parler d'un fluide qui s'écoule; d'autres, au contraire, comme les propriétés magnétiques, semblent se rapporter aux phénomènes de l'éther. Le jour où l'on a pu séparer avec certitude les phénomènes électriques de l'éther des manifestations matérielles de l'Électricité, il a été possible d'étayer nos connaissances sur une conception rationnelle et de trouver ainsi la clef de nombreux mystères.

Aujourd'hui, *l'Électricité apparaît comme une sorte de matière qui se divise en petites particules absolument comme les autres matières*. Ces corpuscules appelés **électrons** sont liés d'une façon si étroite avec l'éther que tout mouvement d'un électron provoque un mouvement de l'éther, et réciproquement. Ce sont les électrons que projettent les substances radioactives avec une vitesse voisine de celle de la lumière, ou qui constituent les rayons cathodiques dans les tubes de Crookes; ces particules toujours identiques à elles-mêmes quelle que soit la substance qui leur donne naissance, semblent être des atomes d'électricité négative⁹. A côté de ces particules libres s'en trouvent d'autres, enfermées dans les corps pondérables et auxquelles on a donné le nom d'**ions**. Ce sont les ions qui, dans la matière inerte, en raison de leurs charges égales et contraires, neutralisent leurs effets, alors que sous l'action des phénomènes qui caractérisent l'état actif de l'énergie, ils se mettent en mouvement, se séparent, produisent l'ionisation et créent le courant électrique.

Nous aurons l'occasion, au cours de ces conférences consacrées à l'étude de l'Électricité, de revenir sur cette concep-

tion pour en faire l'application aux différentes manifestations de l'énergie électrique.

II. Phénomènes d'électrisation par frottement. — Au début de cette conférence, nous avons indiqué les phénomènes qui, en premier lieu, se sont présentés à l'étude attentive des hommes ; nous nous proposons de les reprendre, d'en fournir l'explication et de montrer comment, par une série de déductions, l'esprit humain, aidé seulement par quelques découvertes fortuites, est arrivé à maîtriser et à diriger à sa guise, la plus puissante des forces de la nature.

L'état d'électrisation d'un corps frotté a été mis en évidence par l'action qu'exerce ce corps sur des substances légères. Or, un bâton de cire frotté n'est pas au même état électrique qu'un bâton de verre frotté, car un corps léger amené au contact de la cire est repoussé par elle, alors qu'il est attiré par le verre. On dit que *les corps électrisés se différencient en corps électrisés positifs et en corps électrisés négatifs*. Il est facile de constater expérimentalement que *deux corps électrisés de même nom se repoussent, tandis que deux corps électrisés de noms contraires s'attirent*.

Deux corps frottés prennent toujours l'un de l'électricité positive, l'autre de l'électricité négative. La nature de l'électricité d'un corps dépend d'ailleurs non seulement de ce corps, mais aussi de celui qui est frotté contre lui : le verre dépoli, par exemple, s'électrise positivement, quand on le frotte avec de la flanelle, et négativement avec de la soie. Certains corps conservent leur électricité, ce sont les **corps isolants**, comme le verre, la cire, la porcelaine, la soie, la paraffine ; d'autres, au contraire, la propagent immédiatement aux corps avec lesquels ils sont en contact, ce sont les **corps conducteurs**, comme les métaux, le charbon, le corps humain. On conçoit que *les isolants servent à conserver les propriétés électriques des conducteurs*, et tout le monde a observé que les fils télégraphiques sont supportés par des isolateurs en porcelaine.

L'électrisation se manifestant par des attractions et des répulsions, nous définirons les **quantités d'électricité** par les forces qu'elles exercent dans des conditions déterminées sur un corps électrisé. Deux corps ont des charges électri-

ques égales si, placés à une même distance d'un troisième corps électrisé, ils éprouvent des répulsions ou des attractions égales. Un corps possède une charge électrique double, triple, quadruple de celle d'un autre si, ces deux corps étant placés à la même distance d'un troisième corps électrisé, la premier éprouve une répulsion ou une attraction double, triple, quadruple de celle éprouvée par l'autre. La quantité d'électricité ou charge électrique est donc mesurable : l'unité employée dans la pratique est le **coulomb**¹⁰.

COULOMB, en 1785, a établi que *les attractions et les répulsions qui s'exercent entre deux corps électrisés sont proportionnelles aux charges électriques et en raison inverse du carré de la distance*. Cette loi¹¹, qui est fondamentale en Électricité, ne peut manquer d'être rapprochée de celle de l'attraction universelle, énoncée par NEWTON.

Répartition de l'Électricité. Tension électrique ou potentiel. — Quand on électrise une région d'un corps conducteur, l'Électricité gagne tous les points de ce conducteur. Un grand nombre d'expériences simples ont permis de constater directement que *l'Électricité ne pénètre pas à l'intérieur du corps mais réside uniquement à sa surface*. Il n'est pas nécessaire même que la surface du conducteur soit continue pour qu'il n'y ait pas d'électricité à l'intérieur : on peut le montrer avec une cage d'oiseau. FARADAY¹² a pu s'introduire, sans être incommodé, dans une cage métallique à laquelle on communiquait une forte charge électrique.

L'idée que l'on se fait aujourd'hui de l'Électricité permet de donner une explication fort simple de ce phénomène : les particules de matière électrique se repoussent constamment et sont sollicitées à s'accumuler le plus loin possible ; toute la charge se répartit à la surface du conducteur que l'on peut considérer comme recouverte d'une couche d'électrons. Cette pellicule d'électrons est comparable à un ballon de caoutchouc ou à une bulle de savon que l'on gonfle, et de même que l'enveloppe de caoutchouc possède une tension définie équilibrant la pression de l'air emprisonné, de même la mince enveloppe électrique possède une tension qui équilibre exactement les forces de répulsions mutuelles.

On peut donc attribuer à chaque conducteur électrisé une

tension, ou comme l'on dit *un certain potentiel*, tension que nous nous représentons sous la forme d'une pellicule tendue. Si l'on communique à deux boules métalliques la même quantité d'électricité, il est évident que la tension sera plus faible pour la grosse boule que pour la petite; pour le même conducteur, la tension croît à mesure que l'on augmente la quantité d'électricité. De même que deux ballons de caoutchouc dans lesquels on aura réalisé la même force élastique ne renferment pas la même quantité d'air, parce que leurs capacités sont différentes, de même deux conducteurs métalliques auxquelles on a communiqué la même tension électrique (ou le même potentiel) ne possèdent pas la même quantité d'électricité, parce que leurs *capacités* électriques sont différentes. On appellera **capacité électrique** d'un corps le rapport entre la quantité d'électricité et la tension⁴³.

De même qu'il existe un appareil, le manomètre, pour comparer les forces élastiques des gaz, de même il existe un appareil, l'**électroscope**, pour comparer les potentiels entre eux. L'électroscope est un flacon de verre dont le bouchon en paraffine est traversé par une tige métallique terminée en haut par une boule, et en bas par deux feuilles d'or ou d'aluminium. Tout corps mis en communication avec la boule de l'électroscope abandonne une partie de son électricité et les feuilles d'or s'écartent l'une de l'autre. Le potentiel sera dit positif ou négatif suivant que les feuilles seront chargées positivement ou négativement. On a pris comme *potentiel zéro* celui de la Terre⁴⁴. Un corps aura un potentiel double d'un autre, quand il communiquera au même électroscope un écart double des feuilles.

Si l'on fait communiquer par un fil long et fin deux conducteurs à des *potentiels différents*, il y a écoulement d'électricité du conducteur au potentiel le plus élevé au conducteur dont le potentiel est le moins élevé, jusqu'à ce que ces deux conducteurs aient le même potentiel intermédiaire entre les deux potentiels primitifs. Cet écoulement d'électricité est extrêmement court et peut être considéré comme une véritable *décharge*, mais si l'on continue à électriser l'un des conducteurs, l'écoulement est continu et l'on obtient dans le fil un **courant électrique**⁴⁵. La force avec laquelle

s'écoule cette électricité est la **force électromotrice**; elle est d'autant plus grande que la différence ou *chute du potentiel* est elle-même plus grande. La différence de potentiel est à la chute d'électricité ce que la différence d'altitude est à une chute d'eau. L'unité pratique de potentiel est le **volt**, en mémoire du physicien **VOLTA**¹⁶; elle est telle qu'un coulomb tombant de la hauteur d'un volt fournit une quantité d'énergie égale à un **joule**¹⁷. On dira : tel générateur élève l'électricité à 100, 200, 300 volts comme on dit : telle machine élève l'eau à 10, 20, 30 mètres de hauteur.

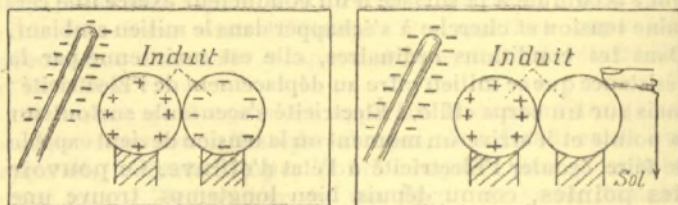
Déperdition de l'Électricité. Pouvoir des pointes. — L'Électricité qui s'accumule à la surface d'un conducteur exerce une certaine tension et cherche à s'échapper dans le milieu ambiant. Dans les conditions ordinaires, elle est maintenue par la résistance que ce milieu offre au déplacement de l'Électricité ; mais sur un corps effilé, l'Électricité s'accumule surtout sur la pointe et il arrive un moment où la tension devient capable de faire écouler l'Électricité à l'état d'**effluve**. Ce **pouvoir des pointes**, connu depuis bien longtemps, trouve une application importante dans le *paratonnerre*. L'écoulement de l'Électricité dans l'atmosphère produit un déplacement d'air ou *vent électrique* que l'on sent très bien en mettant la main devant une pointe placée sur un conducteur électrisé. Dans l'obscurité, on aperçoit à l'extrémité de la pointe une aigrette d'un bleu violacé ou un point brillant, suivant que l'Électricité qui s'échappe est positive ou négative¹⁸. Une flamme produit le même effet qu'une pointe : une bougie allumée, posée sur un conducteur électrisé ne tarde pas à le décharger.

III. Phénomènes d'influence. L'étincelle électrique. — Pour qu'un corps manifeste les propriétés électriques, il n'est pas nécessaire de l'amener *au contact* d'un corps électrisé : il suffit de le placer *au voisinage* de celui-ci. On dit qu'il y a **électrisation par influence**; le corps primitivement électrisé est l'*inducteur*, l'autre est l'*induit*. Si l'inducteur est chargé positivement, l'induit présente une plage négative vers l'inducteur et une plage positive sur la région opposée : si l'inducteur est chargé négativement, le contraire a lieu, mais toujours

l'électricité de même nom que celle de l'inducteur est repoussée le plus loin possible, tandis que l'électricité de nom contraire semble attirée par l'inducteur.

Il découle de là des faits importants :

1° Si l'on met l'induit en communication avec le sol, par un point quelconque de sa surface, il perd l'électricité la plus éloignée de l'inducteur. Soustrait à l'influence de l'inducteur, l'induit reste chargé d'électricité positive si l'inducteur est négatif, et inversement. Nous avons donc là un *moyen d'électriser un corps sans frottement ni contact*¹⁰. Il existe des machines électriques basées sur ce principe.



Les phénomènes d'influence.

FIG. 1. — Phénomène d'influence sur un conducteur isolé.

FIG. 2. — Phénomène d'influence sur un conducteur relié au sol.

2° Quand un corps léger est placé au voisinage d'un corps électrisé les forces attractives existant entre les plages chargées d'électricités contraires peuvent être suffisantes pour amener le corps léger au contact du corps électrisé. Ainsi s'explique l'attraction des corps légers, comme râpure de liège, petits morceaux de papier, etc., un des phénomènes connus par les premiers physiciens.

3° Si le corps influencé n'arrive pas au contact du corps influençant, la tension électrique peut devenir assez forte pour surmonter la résistance de l'air. Il y a passage de l'Électricité et l'on observe un trait de feu, une étincelle électrique accompagnée d'un petit bruit sec caractéristique. Cette étincelle est due à l'échauffement, par la décharge, de la couche d'air interposée entre les deux conducteurs. Après l'étincelle, l'induit est revenu à l'état neutre, l'inducteur

aussi, de sorte que toute l'énergie électrique s'est transformée en chaleur, en lumière et en bruit. Les divers aspects de l'étincelle ont été fixés par la photographie instantanée. Quand la longueur est de 4 à 5 centimètres, l'étincelle est *rectiligne* ; au delà elle prend la forme d'une *courbe irrégulière* présentant des ramifications très déliées ; pour les grandes distances, l'étincelle prend une forme en *zigzag*. La longueur de l'étincelle dépend de la différence de potentiel des deux conducteurs ; sa durée est toujours excessivement petite²⁰. Quand la décharge traverse des gaz raréfiés, il se produit des *lueurs* que nous étudierons plus loin ; dans le vide absolu, la décharge ne se fait pas.

IV. **Phénomènes fondamentaux du magnétisme. L'attraction magnétique.** — On trouve dans la Nature un minéral noir, la *magnétite*²¹, possédant la curieuse propriété d'attirer les poussières métalliques. Ce fait était connu des anciens, et l'on peut dire que c'est là le premier phénomène qui les a frappés, car ils ne connurent les propriétés de l'ambre frotté que plus tard et regardèrent la foudre comme un phénomène d'essence divine.

Si l'on frotte un barreau d'acier, une aiguille à tricoter, contre un morceau de pierre d'aimant (*aimant naturel*), le barreau devient lui-même un aimant (*aimant artificiel*). Suspendu de façon à pouvoir se déplacer dans un plan horizontal, l'aimant dirige l'une de ses extrémités sensiblement vers le nord. Cette extrémité, toujours la même, peut être appelée extrémité nord. Plongé dans la limaille de fer, le barreau accumule la limaille à ses deux extrémités comme si chacune d'elles présentait un centre d'attraction ; ce sont les **pôles** de l'aimant. Le pôle situé à l'extrémité nord est le *pôle nord*, l'autre est le *pôle sud*.

Si deux aimants sont suspendus ou posés sur des pivots de façon à pouvoir se déplacer dans un plan horizontal, on peut constater que *les pôles de même nom se repoussent, tandis que les pôles de noms contraires s'allirent*²². Tout le monde connaît en outre les phénomènes d'attraction produits par les aimants sur les plumes métalliques, les aiguilles à tricoter, de petits poissons en fer, etc.

Comment explique-t-on les phénomènes d'attraction produits

par les aimants? Pour répondre à cette question, faisons l'expérience suivante : saupoudrons de limaille de fer une feuille de papier posée sur un barreau aimanté ; on voit les grains de limaille dessiner une série de courbes régulières semblant partir de l'un des pôles pour aboutir à l'autre pôle. Ces lignes sont appelées *lignes de force* et la limaille ainsi déposée forme un **spectre magnétique**. Toute la région de l'espace qui entoure un aimant et qui est traversée par

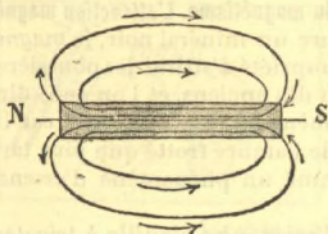


FIG. 3. — Champ magnétique d'un aimant. Lignes de force. Flux d'induction.

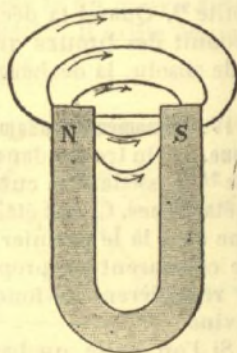


FIG. 4. — Champ magnétique d'un aimant en fer à cheval.

des lignes de force s'appelle un *champ magnétique*. Chacune des lignes de force part du pôle nord de l'aimant aboutit au pôle sud et rejoint le pôle de départ à l'intérieur de l'aimant ; ces lignes complètes portent le nom de *lignes d'induction*. On voit que ces lignes sont très serrées à l'intérieur de l'aimant puisqu'elles y passent toutes, alors qu'à l'extérieur elles s'épanouissent et sont plus ou moins espacées. Si, sur chaque ligne d'induction, on figure par une flèche le *sens* de cette ligne, on est suggéré par l'idée d'un *flux* qui irait du pôle nord au pôle sud à l'extérieur de l'aimant, et auquel on a donné le nom de *flux d'induction*²³. Les mêmes considérations s'appliquent aux aimants en fer à cheval, mais la forme des lignes est changée ; les pôles étant rapprochés, les lignes de force sont plus resserrées dans la partie du champ

comprise entre ces pôles et plus ou moins espacées dans la région environnante.

Les figures montrent que si deux pôles de noms contraires sont en regard, les lignes de force partent de l'un des pôles pour aboutir à l'autre ; elles semblent avoir pour effet de *rapprocher* les deux aimants ; si les pôles en regard sont de même nom, les lignes de force émanées d'un pôle sont repoussées par celles qui émanent de l'autre pôle, et semblent avoir pour effet de *repousser* les deux aimants.

Plaçons maintenant un morceau de fer doux entre les pôles d'un aimant en fer à cheval. Le spectre montre que les lignes de force vont passer à travers le fer parce que le fer offre moins de résistance que l'air au passage des lignes de force (on dit qu'il est plus *perméable*²⁴). Ces lignes tendent à se raccourcir et amènent le fer doux contre les pôles.

La force nécessaire pour séparer l'armature de l'aimant mesure la **force portante** de l'aimant²⁵. Les bons aimants en fer à cheval portent de 15 à 20 fois leur poids ; les gros, de 6 à 12 ; les petits, jusqu'à 40 fois. La force portante d'un aimant droit n'est que le quart de celle d'un aimant en fer à cheval de même section et de même induction.

Les anciens **procédés d'aimantation** par frottement ne s'emploient plus ; on se sert maintenant des champs produits par les courants électriques, comme nous aurons à le voir bientôt. Cependant, quand il s'agit de petits aimants, d'aiguilles de boussoles, par exemple, on peut faire usage d'un aimant permanent en fer à cheval dont le flux est suffisant pour *saturer* le barreau d'acier. On fait glisser plusieurs fois dans les deux sens le barreau sur les deux pôles, une de ses extrémités sur chaque pôle, puis on l'arrache normalement aux surfaces polaires.

JAMIN a indiqué un mode de fabrication de l'aimant en fer à cheval qui donne une intensité plus considérable que celle

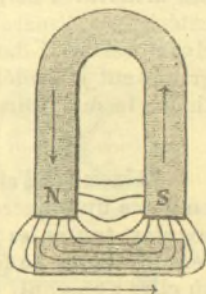


FIG. 5. — Attraction du fer doux par un aimant en fer à cheval.

acquise par un aimant d'une seule pièce. Les aimants Jamin sont formés de plusieurs lames minces d'acier aimantées séparément et juxtaposées ensuite²⁶.

Les barreaux aimantés en acier perdent peu à peu leur magnétisme. Pour les conserver, on les accouple par deux, parallèlement entre eux, les pôles de noms contraires en regard et l'on applique en travers, contre leurs extrémités, des armatures de fer doux. Dans ce cas, les lignes de force extérieures disparaissent et l'on réalise un circuit magnétique fermé²⁷ dans lequel l'aimantation se conserve intégralement et indéfiniment. La notion des circuits magnétiques fermés nous servira dans l'étude des dynamos.

V. Phénomènes d'aimantation par influence. Hystérésis. — Quand on place un morceau de fer dans un champ magnétique, il acquiert toutes les propriétés d'un aimant : du côté où arrivent les lignes de force il présente une plage sud, et du côté où elles s'en vont, une plage nord. C'est ainsi que se disposent les grains de limaille de fer dans le spectre magnétique. Cette aimantation par influence n'est pas permanente : quand le champ inducteur cesse, elle diminue et s'évanouit si le barreau est en fer doux. Avec un barreau d'acier, l'aimantation ne disparaît pas complètement, on dit qu'il reste du magnétisme rémanent; l'aimant est alors *permanent*²⁸.

Sous l'action du même champ, le fer s'aimante plus fortement que l'acier et celui-ci plus fortement que la fonte. L'induction augmente d'abord très vite, puis atteint un maximum qui est d'environ 16 000 gauss pour le fer et l'acier. On dit alors que le fer et l'acier sont aimantés à *saturation*.

Pour supprimer l'aimantation d'un barreau d'acier, il ne suffit pas de supprimer le champ inducteur; puisque l'acier conserve du magnétisme rémanent, il faut faire agir un champ de sens contraire dont la valeur dépend de l'intensité du magnétisme rémanent à supprimer. Ainsi, l'aimantation d'un barreau d'acier aimanté oppose une *résistance* au changement d'aimantation qu'on veut lui faire subir. On désigne ce phénomène sous le nom d'*hystérésis*²⁹ : il a été très étudié dans ces dernières années parce qu'il consomme une certaine quantité d'énergie et intervient dans les ma-

chines dynamos où certains organes de fer sont soumis périodiquement à des aimantations contraires.

VI. Phénomènes dus au magnétisme terrestre. La Boussole. — Au voisinage de la Terre, une aiguille aimantée mobile autour de son centre de gravité s'oriente dans une direction déterminée absolument comme une petite particule de fer au

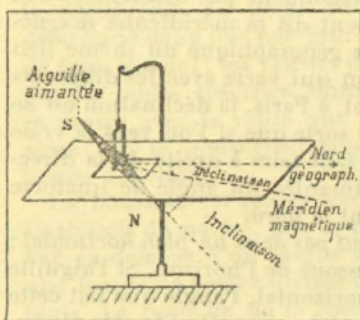


FIG. 6. — Orientation de l'aiguille aimantée dans la direction du champ terrestre.

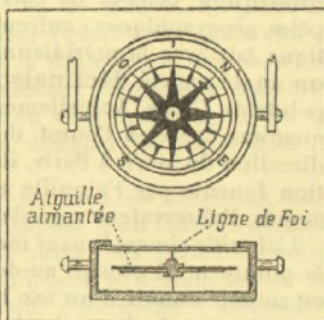


FIG. 7. — Boussole marine.

voisinage d'un aimant. *La Terre développe un champ magnétique* et depuis longtemps elle a été assimilée à un aimant puissant qui aurait un pôle dans l'hémisphère nord et l'autre dans l'hémisphère sud. Les lignes de force du champ terrestre s'épanouissent en sortant du pôle magnétique austral terrestre, tournent autour de la Terre et rentrent par le pôle magnétique boréal terrestre. Cette *assimilation de la Terre à un aimant* est ancienne, mais d'après des considérations nouvelles on peut la remplacer par l'hypothèse d'un courant terrestre allant de l'est à l'ouest.

Puisque la Terre développe un champ magnétique, elle doit aimanter les objets en fer situés à sa surface ; depuis longtemps le fait a été constaté pour les limes des serruriers accrochées au mur des ateliers, pour les tiges des paratonnerres, etc. ; les vaisseaux en fer, quand ils sont à l'ancre, prennent la

direction de l'aiguille aimantée et se trouvent transformés en véritables aimants.

L'action exercée par la Terre sur l'aiguille aimantée est purement directrice, car elle ne peut ni se ramener à une force verticale puisqu'un barreau n'augmente pas de poids par l'aimantation, ni se ramener à une force horizontale, car une aiguille aimantée flottant à la surface de l'eau n'est pas entraînée. L'aiguille aimantée se dirige vers les **pôles magnétiques**; ceux-ci ne correspondent pas exactement aux pôles géographiques; autrement dit la méridienne magnétique fait avec la méridienne géographique du même lieu un angle appelé **déclinaison** qui varie avec les différents points du Globe. Actuellement, à Paris, la déclinaison est de quatorze degrés à l'ouest, de sorte que si l'on veut la vraie direction du nord à Paris, il faut faire à droite de la direction fournie par l'aiguille aimantée un angle de quatorze degrés, l'observateur regardant le nord.

L'aiguille aimantée ne se meut pas dans un plan horizontal: la pointe nord plonge au-dessous de l'horizon. Si l'aiguille est mobile autour d'un axe horizontal, l'angle que fait cette aiguille avec la ligne horizontale s'appelle l'**inclinaison**. Elle vaut actuellement soixante-cinq degrés à Paris. Il est évident que, dans l'hémisphère sud, c'est le pôle sud de l'aiguille qui plonge vers le bas³⁰.

La propriété de l'aiguille aimantée de se diriger vers un point déterminé de l'espace a été connue dès la plus haute antiquité. Vingt siècles avant notre ère, les Chinois s'en servaient pour se guider dans les déserts de la Tartarie: l'aiguille était mise à flotter dans un verre d'eau au moyen de deux petits fétus de paille. Plus tard, ils possédaient de petites voitures pourvues d'une statuette pivotante dont le bras étendu contenait une pierre d'aimant et indiquait le chemin aux armées. Par les Chinois, l'aiguille aimantée fut transmise aux Arabes et, à l'époque des croisades, ceux-ci la firent connaître aux Européens. Ce n'est qu'au quinzième siècle qu'on eut l'idée de la poser sur un pivot.

Dans les **boussoles modernes**, l'aiguille aimantée occupe le centre d'un cercle divisé en trois cent soixante degrés, sur lequel on a porté les indications de la *rose des vents*. La pointe sud est lestée de façon que l'aiguille se

meuve dans un plan horizontal; la pointe nord, bleutée, donne la direction du nord.

C'est surtout en mer que l'on se sert de la boussole à laquelle les navigateurs ont donné le nom de *compas*. Le problème de la navigation consiste à suivre la route tracée sur la carte marine. Si cette route fait un angle α avec les méridiens, elle devra faire avec la direction de l'aiguille aimantée un angle égal à celui-ci augmenté de la valeur de la déclinaison au point où l'on se trouve. Ce point est déterminé deux fois par jour par l'officier de quart chargé de *faire le point*; les valeurs de la déclinaison sont fournies par des tables spéciales. Connaissant l'angle que doit faire le navire avec la route que l'on se propose de suivre, on agira sur le gouvernail pour ramener le navire dans la bonne direction.

La boussole est placée sous les yeux du timonier, dans l'*habitacle* du navire. Elle se compose d'un barreau aimanté fixé au-dessous d'un disque de mica, sur lequel est collée une feuille de papier divisée en degrés et portant la *rose des vents*. La branche de la rose qui correspond à l'extrémité nord du barreau est marquée d'une croix et de la lettre N. Sur la boîte de cuivre qui contient l'instrument, sont tracés deux traits indiquant la direction de l'axe du navire, c'est ce qu'on appelle la *ligne de foi*. Une suspension à la *Cardan* permet au pivot de l'aiguille de rester toujours vertical malgré les mouvements de tangage et de roulis³¹.

L'acier et le fer qui entrent dans la constitution des navires modernes acquièrent une aimantation qui agit sur la boussole; aussi est-il nécessaire de compenser par des aimants et des masses de fer doux ces influences perturbatrices.

Phénomènes électriques de l'atmosphère. — L'atmosphère est constamment le siège de phénomènes électriques. Les orages, les aurores boréales, en sont des manifestations bien connues; mais en dehors de ces phénomènes accidentels, il existe d'une façon permanente un champ électrique dans l'atmosphère. Dans un lieu découvert, un jour de beau temps, on dresse verticalement une longue tige métallique isolée terminée en haut par une pointe. La tige est reliée à

un électroscope. On voit les feuilles de l'électroscope diverger et atteindre un écart correspondant à plusieurs centaines de volts : elles sont d'ailleurs chargées positivement.

L'explication est simple : la tige s'est chargée par influence ; l'électricité positive a été repoussée dans les feuilles tandis que l'électricité négative s'écoulait par la pointe. On en conclut qu'il y a dans l'atmosphère un champ électrique dont les lignes de force sont dirigées vers le sol. La Terre se comporte comme un conducteur chargé négativement. Le potentiel croît quand on s'élève au-dessus du sol, d'environ 10 à 100 volts par mètre, suivant l'état hygrométrique de l'air et les circonstances locales ; en temps d'orage, on a noté des différences de potentiel de 400 volts par mètre et quelquefois plus. En plaine, les surfaces de niveau ou *équipotentiell*es sont des plans horizontaux : au-dessus des montagnes, des maisons, des arbres, les surfaces de niveau suivent les reliefs de ces élévations et se rapprochent les unes des autres tandis qu'elle s'écartent dans les rues et les vallées. Ces surfaces équipotentielles sont en mouvement constant et, par les temps orageux, les personnes nerveuses ressentent bien ce remuement incessant.

A quoi est due cette *Électricité atmosphérique* ? Bien des causes ont été invoquées : frottement de l'air sec ou humide contre la surface des terres et des mers, évaporation continue de l'eau sous l'action du soleil, condensation de la vapeur d'eau dans les hautes régions de l'atmosphère. Récemment, la *théorie des ions* est venue donner une solution plus satisfaisante. Voici en quoi elle consiste : les rayons ultra-violets du spectre solaire divisent les gaz en particules très ténues appelées *ions* qui sont susceptibles de tensions positives et négatives considérables. Sous l'action des rayons ultra-violets qui accompagnent les rayons lumineux du soleil, l'air *s'ionise*, et comme ce rayonnement spécial est le plus puissant dans les couches supérieures de l'atmosphère, la masse des ions augmente à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol³². L'air atmosphérique contient un grand nombre de ces particules chargées d'électricité positive et d'électricité négative ; ces deux électricités sont évidemment soumises à des variations et les phénomènes électriques de l'atmosphère ont pour résultat de leur *rendre leur équilibre*.

Selon les circonstances, ces phénomènes sont chroniques ou violents : dans le premier cas, ils se manifestent sous forme d'aurores boréales ou par un écoulement d'électricité qui se traduit par les petites aigrettes que les marins aperçoivent au sommet des mâts et auxquelles ils ont donné le nom de feu **Saint-Elme**.

Aurores boréales et feux Saint-Elme. — Les aurores boréales sont des phénomènes extrêmement remarquables apparaissant fréquemment dans les régions polaires et probablement dans les deux hémisphères. Ce sont des aigrettes gigantesques, des draperies lumineuses aux couleurs diverses, des arcs étincelants qui brillent au firmament des pays glacés, serpentent, ondulent, s'agitent avec un bruissement d'ailes et provoquent l'admiration et l'enthousiasme des explorateurs qui ont pu les contempler dans toutes leurs splendeurs. Ces lueurs violacées, rappellent de très près celles que donne la décharge électrique dans un tube de Geissler contenant de l'air sous faible pression. Les aurores polaires sont donc comme la dernière expression de l'Électricité atmosphérique qui, s'échappant vers les pôles magnétiques du globe terrestre, va fuser en longs rubans de feu vers les espaces éthérés³³.

Les feux **Saint-Elme** qui jaillissent en aigrettes lumineuses des paratonnerres, des mâts, des vergues des navires et parfois s'échappent des éminences du sol en répandant une lumière diffuse, sont restés jusqu'au dix-huitième siècle un sujet d'étonnement et de frayeur. Ils sont dus à un écoulement lent d'Électricité rétablissant l'équilibre entre l'atmosphère et la Terre. Pendant longtemps on a donné à ces feux une signification appropriée aux circonstances³⁴. On voit parfois des aigrettes se former au bout des doigts et entourer d'une auréole lumineuse la tête des personnes.

Les Orages et leurs phénomènes. — L'orage est un phénomène électrique qui se manifeste au sein des nuages. Les orages sont toujours liés à une formation rapide de nuages qui prennent ordinairement naissance à une hauteur de 1000 à 1500 mètres. Un nuage peut être considéré comme une masse plus ou moins conductrice, mais sa charge se

répartit dans toute la masse, à l'intérieur comme à l'extérieur, puisqu'elle siège dans les gouttelettes d'eau qui forment le nuage. Ce dernier doit s'électriser par influence dans le champ électrique de l'atmosphère et présente de l'électricité négative sur sa face supérieure et de l'électricité positive sur sa face inférieure. Si la partie inférieure vient à se résoudre en pluie, ou bien si elle arrive au contact d'une montagne, il y aura déperdition de l'électricité positive dans le sol et le nuage restera chargé d'électricité négative. Tous ces nuages n'ont pas le même potentiel électrique ; ceux qui possèdent



FIG. 8. — Éclair
d'après une photo-
graphie.

le potentiel le plus élevé réagissent sur les autres. Le même phénomène d'influence se produit sur la Terre, et ces charges d'électricités contraires n'attendent plus que le moment favorable pour rétablir leur équilibre par une décharge. Lorsque la pluie commence, on constate un redoublement de coups de foudre entre les nuages et le sol ; les éclairs suivent la voie humide qui leur est tracée, puis diminuent d'intensité lorsque l'Électricité des amas nuageux s'est dissipée par les décharges et par la pluie³⁵.

Quand deux nuages chargés d'électricités contraires arrivent assez près l'un de l'autre, une étincelle éclate entre eux : c'est l'éclair. Le bruit de l'étincelle constitue le tonnerre. D'autre part, les charges énormes portées par les nuages exercent des effets d'influence considérables. La région du sol placée sous le nuage se charge par influence d'électricité de signe contraire à celle du nuage. Quand l'influence est suffisamment forte, une étincelle éclate entre le nuage et le sol : on dit que la foudre tombe. La lumière de l'éclair est blanche dans les basses régions et violacée dans les hautes régions de l'atmosphère ; sa durée est toujours très faible : parfois $\frac{1}{10000}$ ^e de seconde. Les éclairs peuvent franchir 15 à 20 kilomètres, car l'intervalle compris entre les nuages est généralement occupé par un brouillard

formé de gouttelettes liquides. Il existe des *éclairs en nappe* qui illuminent le nuage dans toute sa masse et constituent une décharge calme d'électricité; des *éclairs rectilignes* que l'on observe entre les nuages très rapprochés; des *éclairs en zigzags* ou plus exactement *en spirales* car la perspective nous fait voir des angles là où il y a des courbes; des *éclairs ramifiés* dans lesquels la photographie instantanée a permis de compter jusqu'à cinquante ramifications et qui expliquent comment plusieurs personnes peuvent être frappées à la fois



Phénomènes électriques atmosphériques.

FIG. 9. — Éclair
sinueux.

FIG. 10. — Aurore
boréale.

FIG. 11. — Éclair
ramifié.

d'un même coup de foudre; des *éclairs en chapelet* qui servent de transition entre les éclairs ordinaires et une catégorie très curieuse d'éclairs, les *éclairs en boule*. Ceux-ci affectent la forme d'une boule pouvant atteindre la grosseur de la tête; elle se déplace lentement et disparaît, tantôt sans laisser de traces, tantôt en produisant une formidable explosion, suivant la conductibilité de l'air et la tension électrique du nuage qui l'a formée. La formation de l'éclair en boule est encore discutée; on admet qu'elle provient directement d'un nuage à la suite d'un éclair ou bien qu'elle s'est formée par influence, de loin, par une nuée fortement électrisée, au-dessus d'une petite couche d'air sèche et isolante³⁰.

Quant aux *éclairs de chaleur*, ils proviennent de la réflexion d'orages plus bas que l'horizon, dont les éclairs sont réfléchis par les nuages supérieurs de l'atmosphère.

Les anciens réservaient leurs craintes superstitieuses au

phénomène bruyant du tonnerre ; encore maintenant, le déchirement strident que les échos transforment en roulements sonores n'est pas sans effrayer un grand nombre de personnes. Il faudrait au contraire se rassurer, puisque la détonation démontre que le danger est, une fois de plus, écarté. En effet, le tonnerre n'est que le bruit provoqué par la décharge électrique : la foudre vaporise instantanément sur toute la longueur de son parcours les molécules d'eau qu'elle rencontre, et le fracas résulte de cette multitude d'explosions. Le roulement du tonnerre est dû à la production de décharges entre plusieurs nuages, placés à des distances différentes de l'observateur, ou à des phénomènes d'écho sur le nuage lui-même. Quand la forme de l'éclair se rapproche d'un arc de cercle ayant pour centre l'observateur, les ondes sonores arrivent en même temps à l'oreille et produisent l'effet d'une détonation violente et brusque. C'est d'ordinaire ce qui se passe quand la foudre tombe sur le sol. Le bruit du tonnerre ne parvient à l'oreille que quelques secondes après l'apparition de l'éclair, en raison de ce que le son exige une seconde pour parcourir 340 m. ; on peut d'après cela calculer très facilement la distance à laquelle on se trouve d'un orage³⁷.

Les effets de la foudre sont très puissants et très redoutés. Elle peut fondre et même volatiliser des barres métalliques, allumer des incendies, fendre les rochers les plus durs, briser et couper les arbres, renverser les monuments, tuer ou paralyser les êtres vivants, tantôt en déterminant des lésions graves, tantôt sans lésion apparente. En France, au cours du dix-neuvième siècle, dix mille personnes ont été tuées par la foudre.

Les *précautions à prendre pendant un orage* sont simples : en rase campagne, ne pas courir ; se débarrasser au plus vite des objets métalliques que l'on tient à la main ; éviter de s'abriter sous les arbres qui, en vertu du pouvoir des pointes accumulent à leur extrémité l'électricité contraire attirée par l'influence du nuage orageux ; surtout ne pas s'appuyer contre le tronc, car si la foudre tombe sur l'arbre, elle quitte le tronc à la hauteur de la tête de la personne pour passer à travers son corps, meilleur conducteur que le bois. On est plus en sûreté à l'intérieur d'une maison que dehors

surtout quand les murs sont mouillés par la pluie et rendus conducteurs ; éviter le voisinage de la cheminée car la suie est bonne conductrice. Dans les caves, on est en sécurité absolue³⁸.

L'homme et les animaux peuvent être foudroyés sans être directement atteints par l'étincelle électrique, c'est le phénomène du choc en retour. On explique ce phénomène par l'influence produite par le nuage orageux sur les animaux : l'électricité de nom contraire à celle du nuage s'accumule dans l'animal et, si le nuage se décharge brusquement, l'animal revient brusquement à l'état neutre, ce qui équivaut à une décharge³⁹.

Afin de protéger les édifices des dangereux effets de la foudre, on se sert de paratonnerres dont le principe est le pouvoir des pointes découvert par Franklin. Le *paratonnerre de FRANKLIN*⁴⁰ est une tige de fer de 10 mètres de longueur, terminée par une pointe de cuivre et mise en communication avec le sol par un câble de fer qui vient se perdre dans un puits : à ce conducteur sont réunies les pièces métalliques de l'édifice. Franklin pensait que le paratonnerre soutire l'électricité du nuage orageux, c'est l'inverse qui a lieu. Quand un nuage orageux passe au-dessus du paratonnerre, l'électricité de même espèce que celle du nuage est repoussée dans le sol et l'électricité contraire, s'échappant par la pointe neutralise le nuage. Dans ce cas, la foudre n'éclate pas et le paratonnerre a joué un rôle *préventif*. Si le flux d'électricité qui s'échappe par la pointe est insuffisant, une étincelle jaillit entre la pointe et le nuage, la décharge suit le câble sans endommager l'édifice : le paratonnerre a joué dans ce cas un rôle *préservatif*. On admet qu'un paratonnerre protège les corps placés à l'intérieur d'un cercle ayant pour rayon le double de sa hauteur⁴¹.

Les paratonnerres ont d'abord été adoptés en Amérique. En Europe, le premier paratonnerre fut érigé en Moravie, en 1754 ; le premier monument officiel qui reçut un paratonnerre fut la Tour Saint-Jacques, de Hambourg, en 1769.

Le paratonnerre du professeur MELSSENS, de Bruxelles, repose sur le principe de la cage de Faraday. L'édifice est entouré d'un réseau de fils de fer galvanisés, analogues aux fils télégraphiques et dissimulés le long de la façade ; sur le

toit, on dispose un certain nombre de faisceaux de pointes de faible longueur qui augmentent la sécurité. Ce mode de protection appliqué d'abord à l'Hôtel de ville de Bruxelles, se généralise de plus en plus.

Dans les villes, les girouettes, tuyaux de cheminées, pointes de toutes sortes qui se dressent dans les airs constituent autant de paratonnerres naturels qui empêchent souvent une accumulation trop grande d'Électricité. De plus, les brouillards remplis de poussières métalliques qui flottent sur nos cités modernes sont encore de bons conducteurs pour l'Électricité atmosphérique qui s'écoule ainsi quelquefois sans décharges; aussi, les orages deviennent-ils plus rares dans les grandes villes, et quand ils se forment leur violence est plus atténuée qu'autrefois. Le plus beau paratonnerre qui existe au monde est la Tour Eiffel, avec sa carcasse entièrement métallique reliée à la Seine par plusieurs câbles conducteurs.

Dans cette conférence où nous avons étudié, comme introduction à l'étude générale des phénomènes électriques, les manifestations les plus anciennement connues de l'Électricité, nous avons rencontré une masse de faits complexes, en apparence isolés les uns des autres. Il sera intéressant de voir, au cours de ces conférences, comment, au point de vue pratique, cette même Électricité, qui était aux temps préhistoriques un objet d'épouvante et de terreur, est devenue la servante complaisante de l'homme, et l'une des forces de la civilisation; comment la petite aiguille aimantée qui se tourne imperturbablement vers le nord a permis d'observer l'induction et de construire les machines électriques qui nous procurent tant de merveilles; comment le fer, dont la découverte fut peut-être la cause des premiers progrès de l'humanité dans la voie de la civilisation, est devenu aujourd'hui le protagoniste nécessaire dans l'admirable spectacle que nous présente l'industrie contemporaine.

Dans la prochaine conférence, nous étudierons la *production du courant électrique par les machines à influence, les piles et les accumulateurs.*

NOTES DE LA PREMIÈRE CONFÉRENCE

1. Le wattman de nos tramways électriques, en reliant les pôles de la dynamo calée sur l'essieu de sa voiture avec la canalisation électrique tendue le long de la voie, détermine la propulsion du tramway par le courant ; c'est là un exemple familier de transformation d'énergie électrique en énergie mécanique.

2. On peut même faire remarquer que, sans elle, certaines transformations seraient fort difficiles à réaliser ; par exemple, la transformation directe du travail en chaleur pour obtenir de la lumière.

3. En raison de la tendance générale de l'énergie à prendre la forme calorifique, c'est-à-dire à se dégrader, toutes les transformations d'énergie sont nécessairement accompagnées d'un certain déchet : l'énergie utile recueillie est un peu moindre que l'énergie dépensée.

4. En grec *électron*, d'où le nom d'*électricité* à la cause spéciale du phénomène observé.

5. Cette pierre est assez abondante en Asie-Mineure où les anciens allaient la chercher, principalement aux environs d'une ville qui fut appelée *Magnésia*. La propriété que possède la pierre d'aimant est le *magnétisme*.

6. CASSIODORE (468-562) parle, en effet, d'une statue de Cupidon, suspendue dans le merveilleux temple de Diane à Éphèse, l'une des sept merveilles du monde. Même fait signalé pour la statue de Sérapis à Alexandrie.

7. G. EISENMENGER. *La Physique* (même collection).

8. Voir, au sujet de l'éther, G. EISENMENGER. *La Physique* (même collection). Première conférence.

9. On n'est pas arrivé jusqu'à présent à isoler l'élément d'électricité positive dont l'existence paraît certaine à bien des physiciens.

10. En l'honneur de COULOMB (1736-1806), officier du génie, membre de l'Académie des Sciences, qui fit des expériences importantes sur les attractions et répulsions électriques et magnétiques. Le *coulomb* est très considérable par rapport aux quantités d'électricité que nous développons ordinairement sur les corps. On a calculé que deux charges de 1 coulomb, placées à 100 mètres l'une de l'autre, se repousseraient avec une force de plus de 90 tonnes.

11. Soient m et m' les charges exprimées en coulombs, d la distance en centimètres, K un coefficient qui dépend de la nature du milieu isolant, la force attractive ou répulsive F , exprimée en dynes, sera fournie par la formule $F = (K/d^2) mm'$.

12. FARADAY (1791-1867), physicien anglais dont les beaux travaux ont constitué la théorie de l'électromagnétisme ; il découvrit la loi fondamentale de l'électrolyse et les phénomènes d'induction.

13. Si l'on représente par Q la quantité d'électricité, par C la capacité et par V le potentiel, on aura la relation $Q = CV$.

14. La Terre mise en communication avec l'électroscope ne fait pas diverger les feuilles, ce qui concorde avec la théorie, la Terre étant considérée comme un conducteur de dimensions infinies. En pratique, les tensions inférieures à une cinquantaine de volts ne donnent pas un écart appréciable aux feuilles de l'électroscope. On mesure les faibles potentiels avec l'électromètre de LORD KELVIN, les potentiels compris entre 1000 et 100 000 volts avec l'électromètre-balance. L'électromètre capillaire de LIPPMANN sert à vérifier l'égalité de deux potentiels.

15. Les piles, que nous étudierons dans la conférence suivante, ont précisément la propriété de faire naître et de maintenir entre deux de leurs parties constitutives (pôles) une différence de potentiel, de sorte qu'un fil métallique réunissant les deux pôles est parcouru par un courant électrique.

16. A VOLTA (1745-1827) on doit, comme on l'a vu, la découverte de la pile (1800) et par suite celle du courant électrique.

17. JOULE (1818-1889), physicien anglais, a étudié en particulier les transformations de l'énergie. Le terme *joule* a été proposé en 1882 et rapidement adopté. 1 joule = 1/9,81 kgm. ou 0 kgm. 102. Donc 1 volt \times 1 coulomb = 1 joule = 0 kgm. 102.

18. Il résulte de ces faits qu'un conducteur sur lequel on veut conserver une charge électrique ne doit pas porter de pointes ou d'arêtes vives.

19. La charge que possède l'induit est égale à la charge de l'inducteur. Pour diminuer les pertes par défaut d'isolement, il faut se servir de paraffine et expérimenter dans une atmosphère sèche.

20. A une différence de potentiel de 5 000 volts correspond une longueur d'étincelle de 1 millimètre; à 25 000 volts, 1 centimètre; à 100 000 volts, 15 centimètres. La longueur de l'étincelle semble donc croître plus vite que la différence de potentiel, et l'on peut penser que les éclairs, qui sont des étincelles atteignant parfois plusieurs milliers de mètres, ne correspondent pas à des différences de potentiel, entre les nuages et le sol, beaucoup plus grandes que celles que nous savons produire. Lorsque l'induit est en communication avec le sol, l'étincelle est toujours plus éclatante et jaillit à une distance plus grande.

21. La magnétite est l'oxyde magnétique de fer Fe^3O^4 ; elle forme des dépôts immenses au milieu des terrains de cristallisation.

22. Coulomb a démontré que l'action mutuelle de deux pôles d'aimant varie en raison inverse du carré de la distance qui les sépare.

23. Le flux d'induction peut être mesuré et exprimé en nombres. L'unité a reçu le nom de *maxwell*, en mémoire de l'illustre mathématicien et physicien anglais (1831-1879) MAXWELL. Le rapport du flux d'induction à la surface traversée s'appelle l'*induction*; l'unité d'induction est le *gauss*, en mémoire du mathématicien et physicien allemand GAUSS (1775-1855), à qui l'on doit d'importants travaux sur l'Électricité et le Magnétisme. 1 gauss est l'induction qui existe dans un milieu traversé par un flux de 1 maxwell par centimètre carré. Les champs magnétiques les plus intenses que nous sachions produire ne dépassent guère 40 000 gauss.

24. C'est l'analogie entre un flux de liquide et un flux magnétique qui fait concevoir comment on a pu appliquer le mot de *perméabilité* aux propriétés magnétiques du fer.

25. Si l'on désigne par S la surface de la section droite du barreau exprimée en centimètres cubes, par B l'induction exprimée en gauss, la

force attractive F mesurée en dynes aura pour valeur $F = B^2S/8\pi$. Pour obtenir la valeur de F en kilogrammes, il faut diviser par 981 000.

26. Le grand aimant Jamin qui a figuré à l'Exposition universelle de Paris en 1867 a porté 800 kilogrammes, mais depuis le premier arrachement il n'en porte plus que 500.

27. La condition n'est qu'imparfaitement remplie, car les surfaces de fer en contact ne sont pas rigoureusement ajustées.

28. Les phénomènes généraux de l'aimantation par influence se produisent aussi avec la fonte, le nickel, le cobalt, mais à un degré faible. FARADAY a montré que le magnétisme constitue une propriété générale des corps.

29. On peut comparer ce phénomène à celui que présente une lame élastique qu'on a courbée trop fortement et qui conserve une déformation permanente. Pour la redresser, il faut exercer un effort qui, agissant sur une lame neuve, l'aurait courbée en sens inverse.

30. Pour les variations et la distribution du magnétisme terrestre, voir G. EISENMENGER, *la Physique* (même collection), neuvième conférence.

31. Sur les petits bâtiments et les embarcations, la stabilité de l'aiguille est insuffisante; pour enrayer les oscillations anormales, on immerge l'ensemble dans un mélange d'eau et d'alcool; l'aiguille pèse alors moins sur son pivot et éprouve un frottement amortisseur: c'est la *boussole* ou *compas liquide*. Sur les grands paquebots, on utilise le compas perfectionné de lord Kelvin qui se compose de huit petites aiguilles aimantées ayant la forme de petites aiguilles à tricoter; elles sont fixées à un disque d'aluminium qui porte une rose des vents. Le tout est extrêmement mobile.

32. Les études récentes ont montré que les gaz ionisés facilitent la condensation de la vapeur d'eau sursaturée. Les ions atmosphériques apparaissent comme des facteurs de la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

33. Voir à l'étude de la radioactivité (conférence IX) les explications données récemment du phénomène des aurores boréales.

34. Les anciens les regardaient comme des présages heureux ou malheureux. Christophe Colomb encouragea ses matelots terrifiés, en leur montrant les feux qui couronnaient les mâts de sa caravelle.

35. On peut démontrer avec un électroscope que les nuages passant au-dessus d'une pointe mise en communication avec lui, sont chargés tantôt positivement, tantôt négativement. La nature électrique du phénomène des orages a été mise en évidence par les expériences célèbres de DE ROMAS à Nérac, et de FRANKLIN à Philadelphie (1753), au cours desquelles on put extraire de l'électricité, obtenir de fortes étincelles, en lançant un cerf-volant muni d'une pointe métallique, dans la direction des nuages orageux.

36. Les ondes électriques, dont l'étude a permis de jeter tant d'aperçus nouveaux sur les phénomènes électriques, sont utilisées par M. Turpain, pour la prévision des orages.

37. La plus grande distance à laquelle on peut entendre le bruit du tonnerre est variable; elle semble dépendre des conditions atmosphériques, de l'orographie de la région, et paraît être de 45 kilomètres (le bruit du canon s'entend de beaucoup plus loin).

38. On croit encore, dans certaines campagnes, éloigner la foudre par le son des cloches, tandis que cet ébranlement de l'air dirige souvent la décharge vers la masse métallique en mouvement et tue le sonneur. En trente-trois ans, la foudre a frappé, en France, cent trois sonneurs.

39. Les personnes frappées par la foudre ne sont souvent qu'à l'état de mort apparente : il faut les traiter comme les noyés et tâcher de rétablir la circulation. Les *tractions rythmées* de la langue donnent les meilleurs résultats, à condition de les poursuivre pendant longtemps. Il peut arriver que la foudre ne fasse aucun mal et se contente de priver sa victime de tout métal : or, argent, bijoux, clous, boutons, etc.

40. FRANKLIN (Benjamin) 1706-1790, philosophe, physicien et homme d'Etat américain, fut membre de la Société royale de Londres et de l'Académie des Sciences de Paris. Il donna la véritable explication de la plupart des phénomènes physiques connus jusqu'alors, et fit entrer dans la bonne voie l'étude de l'Electricité.

41. Pour qu'un paratonnerre soit efficace il faut qu'il soit en bon état, c'est-à-dire que la communication avec le sol soit parfaite et la pointe non émoussée. Il est nécessaire de s'assurer de temps en temps qu'il en est bien ainsi.

DEUXIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ D'HIER

LE FROTTEMENT, L'INFLUENCE ET L'ÉNERGIE CHIMIQUE COMME SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Machines à frottement et à influence. — Phénomènes de condensation; condensateurs et bouteille de Leyde. — Le courant électrique. — La loi d'Ohm. — Électricité de contact. — La pile électrique. — Phénomènes de polarisation. — Piles hydro-électriques. — Piles sèches. — Phénomènes et piles thermo-électriques. — Les accumulateurs. — Inconvénients de ces divers générateurs.

Dans la conférence précédente, nous avons vu qu'un corps est susceptible de s'électriser dans différentes conditions : quand on le frotte (résine, verre, etc.) ou quand on le place au voisinage d'un aimant ou d'un corps préalablement électrisé, et qu'enfin le contact de deux corps hétérogènes établit entre eux une différence de potentiel capable de donner naissance à un courant électrique.

Nous nous proposons maintenant de rechercher *comment la connaissance de ces faits a été utilisée pour obtenir des sources électriques puissantes*, et, chemin faisant, nous ferons connaissance du *courant électrique* et de ses différentes modalités.

D'une manière générale, on appelle sources électriques ou **générateurs électriques**, ou encore **électromoteurs des machines capables d'établir et de maintenir entre un conducteur et le sol, ou plus généralement entre deux conducteurs qu'on appelle les pôles de la machine, une différence de potentiel constante**. Ces machines utilisent soit du travail mécanique, soit de l'énergie chimique, pour augmenter l'énergie

électrique d'un conducteur déterminé ; ce sont donc, comme toutes les machines, des *transformateurs d'énergie*.

Les machines à frottement et à influence. — Dès que l'on connut les propriétés acquises par les corps frottés, on construisit des machines électriques qui furent évidemment des **machines à frottement**. Celle d'OTTO DE GUÉRICKE, bourgmestre de Magdebourg¹, consistait en une boule de soufre fixée à un axe qu'on tournait d'une main tandis que l'autre servait de frotteur. Successivement, on remplaça la boule de soufre par une boule de résine, puis par un cylindre de verre (1709). BOSE recueillit l'électricité sur un tuyau de laiton, inventant ainsi le conducteur de la machine électrique, tandis que WINCKLER, de Leipzig (1740), ajoutait les coussins frotteurs. PLANTA (1755) remplaça le cylindre de verre par un plateau de verre, et grâce à RAMSDEN de Londres qui perfectionna encore cette machine, les physiciens purent bientôt engendrer de grandes quantités d'électricité. C'est avec ces machines que furent établis, au dix-huitième siècle, les principes de la théorie de l'Électricité, et que furent réalisées les expériences intéressantes de cette époque. Parmi celles-ci, nous citerons : la *danse des pantins*, attraction de corps légers ayant cette forme et qu'une personne *isolée* avait l'air de diriger de la main, les faisant réellement se démener par le fluide qui la recouvrait ; l'*expérience de la bouteille de Leyde* qui causa tant de frayeur à son involontaire inventeur, et que l'abbé NOLLET² fit ressentir, pour la grande joie des assistants, à une compagnie de gardes françaises.

Ces machines³ n'ont plus aujourd'hui qu'un intérêt historique, car leur rendement est très mauvais ; elles ont été remplacées par les **machines à influence** dans lesquelles il y a création d'un champ électrique et où se fait *par influence* la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les unes comme les autres fournissent de l'Électricité qui persiste à la surface des corps tant qu'ils ne sont pas reliés au sol, c'est-à-dire de l'*électricité statique* (de *stare*, rester). Si un corps chargé d'électricité statique est relié au sol par un fil métallique, cette électricité *s'écoule* par ce fil : on a alors l'*électricité dynamique* douée, par son courant,

d'une certaine puissance (*dunamis*). L'Électricité *statique* ou *franklinienne* est quelque peu dédaignée aujourd'hui, en présence des prodiges de sa sœur cadette, l'Électricité *dynamique* ou en mouvement, qui a bouleversé l'industrie et la face du monde en moins d'un siècle⁴.

Les machines à influence sont de beaucoup plus puissantes que celles à frottement. Leur peu d'encombrement, leur facile fonctionnement, leur prix peu élevé ont rendu très général leur emploi en électrothérapie.

Dans ces machines, on utilise l'influence sur un conducteur isolé. Soit P un corps chargé positivement; sur un conducteur C, placé au voisinage, se développeront deux plages d'électricités contraires, la plage négative étant la plus rapprochée de la source; si un conducteur voyage depuis la plage négative jusqu'au contact d'un conducteur isolé N, la charge négative sur ce conducteur ira en augmentant. P et N sont les pôles positif et négatif de la machine. La machine de **Wimshurst**, très employée en électrothérapie, appartient à ce groupe. Les pôles P et N sont constitués par deux rangées de pointes devant lesquelles tournent une ou plusieurs paires de plateaux en ébonite; ces plateaux portent des secteurs en étain jouant le rôle de conducteurs voyageurs sur lesquels frottent les balais d'une tige métallique représentant le conducteur isolé C. Pour mettre la machine en activité, on approche au contact les boules qui terminent les arcs polaires, puis on fait tourner les plateaux; dès que l'on entend un bruissement particulier, on écarte les boules et il se produit entre elles une série d'étincelles.

On reconnaît les deux pôles de la machine en observant qu'une pointe tenue à la main et approchée du collecteur offre une *aigrette* en face du pôle négatif et une *étoile* en face du pôle positif; une bougie placée entre les deux boules est comme *soufflée* par un vent qui semble partir de la sphère positive, alors qu'elle va *lécher* la sphère négative. La **décharge** se fait: soit par de magnifiques *étincelles*, soit par *aigrette*, au niveau d'une pointe chargée positivement, soit par *souffle* au niveau d'une pointe chargée négativement. Enfin quand la décharge électrique se produit entre deux conducteurs rapprochés et recouverts sur leurs faces en regard d'une mince couche d'émail, on n'obtient plus d'étin-

celles, mais une lueur violette et homogène à laquelle on a donné le nom d'effluve.

Ces générateurs d'électricité ne peuvent être utilisés dans la pratique industrielle, d'une part, en raison de leur rendement dérisoire (8 p. 100 environ), d'autre part, en raison de ce que la quantité d'électricité débitée est très faible (quelques dix-millièmes de coulombs par seconde) et se trouve portée à une tension exagérée (100 000 volts)⁵. La

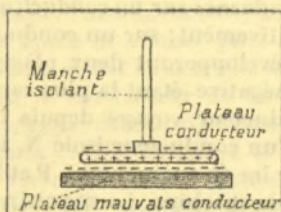


FIG. 12. — Électrophore de Volta.

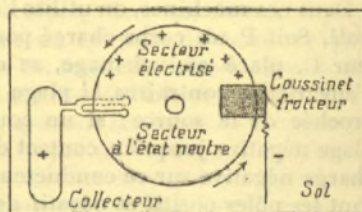


FIG. 13. — Schéma d'une machine à influence.

puissance de ces machines est de l'ordre de 1 watt⁶, soit 1/1000^e de cheval. Le moindre moteur d'automobile consomme une puissance équivalente à plusieurs milliers de ces machines. On a donc été obligé de chercher d'autres procédés pour obtenir des quantités plus notables d'électricité et sous des conditions de tension et d'intensité qui rendent leur emploi plus facile. La *pile* et les *dynamos* permettent d'arriver à ce résultat.

Phénomènes de condensation. La Bouteille de Leyde et les Condensateurs. — En 1745, VON KLEIST, évêque de Poméranie, ayant voulu électriser du mercure contenu dans une fiole de verre prit ce vase d'une main et présenta une tige de fer qui plongeait dans le mercure, au conducteur d'une machine électrostatique en activité ; ayant approché son autre main de la tige de fer, il reçut une forte secousse dans les bras et dans la poitrine, secousse incomparablement plus forte que celles auxquelles la machine l'avait habitué. MUSSCHENBROEK, qui refit cette expérience à Leyde, reçut une secousse si forte

« qu'il crut que c'en était fait de lui et assura qu'il ne voudrait pas recommencer pour le royaume de France⁷ ».

Que s'était-il donc passé dans la fiole de verre ? Remarquons que nous avons en présence deux conducteurs : le mercure et la main, séparés par une lame isolante : le verre. Nous avons vu, dans la première conférence, ce qu'on entend par capacité d'un conducteur⁸ ; or, la capacité d'un conducteur n'est pas une qualité intrinsèque de ce conducteur, elle dépend bien de sa forme et de ses dimensions, mais aussi de l'influence qu'il exerce sur les corps qui l'environnent. Quand un conducteur électrisé (le mercure de l'expérience précédente) exerce son influence sur un autre conducteur (la main de l'opérateur), la capacité du conducteur influençant augmente, et elle est maximum quand le conducteur influencé communique avec le sol (ce qui est le cas de l'expérience). Il en résulte qu'une nouvelle charge peut passer de la source sur le corps influençant. Les deux conducteurs en présence se trouvent à des potentiels différents, donc si on les met en communication ils se déchargent brusquement. C'est cette décharge qu'ont si bien ressentie les deux opérateurs précités. Tout se passe comme s'il y avait eu condensation de la charge, d'où le nom de condensateur donné à l'ensemble des deux conducteurs séparés par une lame isolante.

Le condensateur qui venait d'être inventé reçut le nom de Bouteille de Leyde. On lui donne aujourd'hui la forme d'une bouteille renfermant, non du mercure, mais des feuilles d'or ou d'étain chiffonnées constituant, avec la tige qui y plonge, l'armature intérieure ; sur l'extérieur de la bouteille et jusqu'aux trois quarts de sa hauteur, on a collé une feuille de papier d'étain qui constitue l'armature extérieure. Pour charger la bouteille, on la tient par l'armature extérieure qui communique ainsi avec le sol et l'on met la tige en communication avec une machine en activité. L'armature intérieure se charge de la même électricité que la source, tandis que l'armature extérieure se charge d'électricité de nom contraire. Si l'on réunit les deux armatures d'une petite bouteille, la commotion se fait sentir jusque dans l'épaule ; avec une bouteille de grande surface, on peut tuer des rats et même des chats.

La capacité d'un condensateur est d'autant plus grande

que sa surface est elle-même plus grande et l'épaisseur de la lame isolante plus faible⁹. Aussi, pour obtenir des effets puissants, prend-on de grandes bouteilles appelées *jarres* que l'on accouple pour former une **batterie**.

La bouteille de Leyde est un condensateur peu pratique : elle occupe un grand volume pour une faible quantité d'électricité emmagasinée. L'industrie utilise des condensateurs



FIG. 14. — Bouteille de Leyde.

peu encombrants et de grande capacité dont le principe est le suivant : des feuilles d'étain étant séparées par des feuilles de mica, les feuilles d'étain paires qui dépassent d'un côté sont réunies entre elles pour former une des armatures, les feuilles d'ordre impair constituent l'autre armature. Un condensateur ainsi composé et placé dans une boîte cylindrique d'une quinzaine de centimètres de hauteur peut avoir

une capacité équivalente à celle de 1 000 bouteilles de Leyde ordinaires.

Les condensateurs sont employés à augmenter la capacité des machines électrostatiques ou des bobines d'induction. On les utilise aussi pour le réglage de certains courants alternatifs et dans la télégraphie sans fil pour accorder les circuits en télégraphie sous-marine ; le fil conducteur est l'armature interne d'un condensateur dont l'isolant est constitué par de la gutta et l'armature extérieure par l'eau dans laquelle est immergé le câble. Enfin, ce sont les décharges obtenues avec des batteries de condensateurs qui ont permis d'étudier les effets produits par l'étincelle, les aspects que prend la décharge dans les gaz raréfiés, ce qui a conduit aux rayons cathodiques et aux rayons X.

L'étude des condensateurs montre le rôle joué par les **corps isolants**. La capacité d'un condensateur à lame d'air devient cinq fois, huit fois plus grande, suivant qu'on remplace la lame d'air par une lame de verre ou une lame de mica ; les nombres cinq et huit sont les **constantes diélectriques** du verre et du mica. Les *isolants* jouent donc, dans les phénomènes d'influence, un rôle d'une importance

capitale ; aussi les appelle-t-on *diélectriques*. Par la première désignation, on met en évidence leur propriété d'isoler ; par la seconde, on rappelle l'influence qu'ils peuvent exercer sur la distribution de l'électricité. La nature des diélectriques influe sur le voltage limité du condensateur ; dès qu'on dépasse cette limite, une étincelle éclate entre les deux armatures qui se déchargent au travers du diélectrique ; si celui-ci est solide, il est percé et mis hors d'usage. Un condensateur à lame d'air peut supporter 4000 volts par millimètre d'épaisseur ; avec une lame de verre, on peut atteindre 20000 volts par millimètre ; avec le mica, 200000 volts par millimètre.

Le courant électrique. — Nous avons vu, dans la première conférence, que si l'on joint, par un fil métallique, deux points entre lesquels il existe une différence de potentiel, l'équilibre s'établit instantanément ; cet équilibre instable est appelé **décharge**. Si, au moyen d'un dispositif quelconque (piles, dynamos), on maintient constante la différence de niveau électrique, ce n'est plus une décharge instantanée qui s'opère à travers le conducteur reliant les deux points, *mais une suite de décharges infiniment rapprochées qui se traduisent sous la forme d'un courant électrique et qui en sont la définition.*

Ce phénomène est l'analogie du courant d'eau qui parcourt momentanément le tube de jonction de deux récipients où le liquide s'élève à des niveaux différents. Mais, qu'il s'agisse du phénomène hydraulique ou du phénomène électrique, on peut dans l'un des cas comme dans l'autre, obtenir un *courant persistant* à la condition d'entretenir constamment la *différence de niveau* qui le produit, c'est-à-dire alimenter sans cesse la région d'où part le flux et d'épuiser celle où il arrive. Le rôle du générateur (pile ou dynamo) n'est pas de *créer* de l'électricité, mais d'*élever* cette électricité à un certain potentiel, tout comme le rôle de la machine hydraulique n'est pas de *créer* de l'eau, mais de l'*élever* à une certaine hauteur. Une pile ou une dynamo ne sont pas des appareils producteurs d'électricité, mais bien des appareils producteurs d'*énergie électrique*.

L'électricité ainsi *élevée*, ayant acquis une certaine quan-

tité d'énergie *tombe* d'un potentiel élevé à un potentiel moins élevé, ce qui lui permet de faire fonctionner un appareil quelconque (récepteur), puis elle revient au générateur. Il y a donc deux points importants à considérer, celui par où s'en va l'électricité et celui par où elle revient : le premier, qui correspond au niveau électrique le plus élevé, est le *pôle positif*; l'autre, qui correspond au niveau le moins élevé, est le *pôle négatif*. A l'extérieur du générateur, il y a *chute de potentiel* et dans cette chute il y a transformation de l'énergie électrique en une autre espèce d'énergie; tandis qu'à l'intérieur du générateur, il y a *élévation de potentiel* aux dépens de l'énergie fournie à ce générateur.

De même que pour conduire de l'eau de A en B, il faut établir entre ces deux points un tuyau capable de maintenir le liquide, de même en Électricité, il faudra établir un *fil* de A en B où le fluide électrique sera maintenu par la couche d'air qui l'entoure. Ce fil devra être évidemment bon conducteur de l'électricité, il est généralement en fer ou en cuivre; chacun connaît les fils tendus au-dessus des rails de nos tramways (*fils de trolley*) ou ceux qui aboutissent aux sonnettes électriques ou aux lampes à incandescence de nos appartements. Pour empêcher le courant de s'égarer dans un chemin autre que celui qui lui est tracé, on entoure le fil conducteur de substances mauvaises conductrices ou *isolantes*, on le pose aussi sur des supports isolants: ainsi, les fils de nos sonneries électriques sont entourés de gutta-percha; les fils télégraphiques sont posés sur des supports en porcelaine.

Caractères du courant électrique. — Ce *courant* électrique qui fait résonner les sonneries, allume des lampes, fait tourner des moteurs, etc., n'est pas constitué par une circulation de matière; nos sens ne le perçoivent pas comme un courant d'air ou un courant d'eau. On peut reconnaître son existence à ce que, par le fait même de son passage, le *fil acquiert des propriétés nouvelles* :

1° *Le courant chauffe les conducteurs.* Un fil traversé par un courant s'échauffe. On peut reconnaître cet échauffement en plongeant le fil dans un *calorimètre*¹⁰; la température de l'eau s'élève. Si le fil est assez fin, il peut être porté à l'in-

candescence : c'est ce qui arrive dans les lampes à incandescence.

2° *Le courant dévie les aimants.* Une boussole approchée de l'un des fils d'une sonnerie est déviée quand le courant passe ; on utilise cette propriété dans les *galvanomètres* à aimant mobile pour reconnaître le passage d'un courant.

3° *Le courant produit des décompositions chimiques.* Si, dans une canalisation électrique, on intercale une cuve contenant une dissolution d'un sel métallique, la dissolution traversée par le courant est décomposée. C'est le phénomène de l'*électrolyse* que nous étudierons plus tard.

Les trois propriétés précédentes, propriété calorifique, propriété magnétique, propriété chimique, sont caractéristiques du passage du courant électrique. Elles apparaissent dans toute canalisation qui réunit les pôles d'un générateur quand on *ferme* le circuit ; elles disparaissent dès qu'on interrompt la canalisation en un point, c'est-à-dire dès qu'on *ouvre* le circuit. Elles définissent le passage d'un courant dans un conducteur.

Sens du courant. — Quand on intervertit les connexions du conducteur avec les pôles de la pile, les actions magnétiques et les actions calorifiques changent de sens, c'est-à-dire que si l'aiguille était déviée à droite de l'observateur, dans le premier cas, elle est déviée à gauche dans le second cas ; de même le corps qui se déposait autour de l'un des fils, lorsque le courant traverse une dissolution d'un sel métallique, se dépose sur l'autre fil dans le second cas. On dit que *le sens du courant a changé*. On adopte pour **sens du courant**, le sens dans lequel il faut se déplacer le long du fil pour aller du potentiel le plus élevé au potentiel le moins élevé ; c'est le sens qui, à l'extérieur de la pile va du pôle positif au pôle négatif.

Grandeurs caractéristiques d'un courant. — Nous avons vu, dans la conférence précédente, que le courant est engendré par une force spéciale dite **force électromotrice** qui s'évalue en volts. Au point de vue pratique, le volt est suffisamment bien représenté par la force électromotrice d'un élément Daniell dans lequel on verse quelques gouttes d'acide sulfurique¹¹. Les fils des secteurs d'éclairage présentent géné-

ralement une différence de potentiel de 110 volts ; les fils de trolley des tramways présentent ordinairement une différence de 500 volts ⁴² avec le rail qui sert de fil de retour.

Nous savons aussi que l'unité de quantité d'électricité est le **coulomb** ; nous nous ferons une idée de sa grandeur en disant qu'il passe 30 coulombs en une minute dans une lampe à incandescence de 16 bougies (lampe ordinaire des appartements). Tandis que les machines statiques fournissent une très faible quantité d'électricité à un potentiel très élevé, les piles et les dynamos fournissent une quantité très grande d'électricité à un potentiel peu élevé ; on peut comparer les premières à un appareil qui laisserait tomber un mince filet d'eau d'une grande hauteur, les autres à un torrent d'eau tombant d'une faible hauteur.

La quantité d'électricité que transporte un courant en une seconde est l'**intensité** de ce courant ; l'intensité est la même en tous les points du circuit. L'unité d'intensité est l'intensité d'un courant qui transporte un coulomb par seconde ; cette unité a reçu le nom d'**ampère**, en souvenir du physicien et mathématicien AMPÈRE ⁴³, qui a fondé l'Électromagnétisme. On peut prendre comme notion primordiale, soit la quantité d'électricité en coulombs, soit l'intensité en ampères ; il y a, d'ailleurs, entre la quantité d'électricité et l'intensité d'un courant, la même relation qu'entre l'espace et la vitesse. En pratique, on adopte l'*ampère-heure*, qui est la quantité d'électricité transportée par un courant de 1 ampère pendant une heure. L'ampère-heure vaut 3 600 coulombs. Cette unité de quantité vulgaire est fréquemment employée à propos de la capacité des piles ou accumulateurs, c'est-à-dire de la quantité d'électricité qu'ils peuvent débiter. Ainsi une pile d'une contenance de 3, 4, 5 ampères peut donner un courant de 3, 4, 5 ampères pendant une heure ; un accumulateur de 90 ampères-heure est un accumulateur qui peut fournir un courant de 90 ampères pendant une heure, ou 45 ampères pendant deux heures, et ainsi de suite.

Quand 1 kilogramme d'eau tombe d'une hauteur de 1 mètre, il rend disponible une certaine quantité d'énergie qui est le *kilogrammètre* : de même 1 coulomb tombant d'une hauteur de 1 volt rend disponible, sous une forme quelconque, une quantité d'énergie qu'on appelle un *joule*.

Si cette énergie de 1 joule est fournie en une seconde, elle prend le nom de **watt**. Ainsi, le *watt* est la puissance d'une machine capable de produire 1 joule à la seconde. Dans la pratique, on emploie une unité mille fois plus grande, le *kilowatt*. Comme unité secondaire pratique de puissance, on emploie le **watt-heure** (w-h) : c'est le travail que fournit par heure une machine ayant une puissance de 1 watt; l'*hectowatt-heure* (hw-h) et le *kilowatt-heure* (kw-h) sont aussi employés d'une manière courante¹⁴.

Soient E la force électromotrice entre les deux bornes du générateur, I l'intensité; W la puissance disponible sera $W = EI$ watts.

Les deux quantités, différence de potentiel et intensité, suffisent pour définir complètement un courant; la grandeur que nous allons maintenant introduire sous le nom de **résistance** caractérisera un conducteur. Quand un courant d'eau circule dans un tube, il éprouve une certaine *résistance* à son mouvement; cette résistance provient, par exemple, des frottements qui s'exercent entre l'eau en mouvement et les parois. On peut dire, d'une manière analogue, que l'électricité éprouve une certaine résistance à son mouvement dans les conducteurs, qu'il s'exerce un véritable frottement entre l'électricité et le fil, et ce frottement explique le dégagement de chaleur dont le fil est le siège. La résistance d'un conducteur est d'autant plus grande que le fil est plus long et que sa section est plus faible: toutes choses égales d'ailleurs, la résistance varie avec la nature du fil: elle est plus grande pour le charbon que pour le fer, plus grande pour le fer que pour le cuivre¹⁵. L'unité de résistance est l'*ohm*, du nom du physicien allemand¹⁶ qui a, le premier, entrevu les lois du courant électrique.

La loi d'Ohm. — Si l'on posait le problème suivant: Deux bassins présentent une différence de niveau de 20 mètres, quel débit peut-on obtenir dans un tuyau reliant ces deux bassins? tout le monde répondrait que le débit variera avec la nature du tuyau employé, parce que les différents tuyaux, suivant leur longueur, leur section, l'état de leur surface interne, opposent au courant d'eau des résistances différentes; chacun, en effet, se représente immédiatement le mince filet d'eau que

donne le robinet d'un lavabo et les 10 à 15 litres par minute que fournit le robinet de la salle de bains. De plus, il apparaît bien clairement que pour un tuyau donné le courant obtenu sera d'autant plus fort que la différence des niveaux sera plus grande.

Une relation semblable existe en Électricité entre la force électromotrice et l'intensité d'un courant, d'une part, et la résistance du conducteur traversé par le courant, d'autre part. OHM a montré que *l'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice et inversement proportionnelle à la résistance du circuit*, ce que l'on exprime par la formule suivante : I (ampères) = E (volts) : R (ohms). Cette formule est d'une grande importance pour tout ce qui va suivre¹⁷.

Ces notions générales sur le courant électrique étant acquises, nous pouvons commencer l'étude des **générateurs d'énergie électrique**.

L'électricité de contact. — La conférence précédente nous a montré comment GALVANI reconnut l'état électrique d'un corps qui n'avait pas été frotté. Physiologiste, Galvani crut voir dans son expérience une manifestation de la force vitale qu'il cherchait depuis longtemps; physicien, VOLTA montra qu'il fallait, pour réussir l'expérience, mettre au contact *deux métaux différents et former un circuit fermé* avec ces deux métaux et la cuisse de grenouille, c'est-à-dire que si l'on prenait du zinc et du cuivre, le cuivre devait être en contact d'un côté avec la cuisse et de l'autre avec le zinc, de même le zinc devait toucher le cuivre d'un côté et la cuisse de l'autre. Quel était le rôle de la cuisse de grenouille? était-elle indispensable à la production du phénomène, comme le croyait Galvani, ou bien ne servait-elle qu'à montrer, comme le prétendait Volta, que quelque chose d'anormal se passait dans l'arc métallique? Volta, à la suite d'une série d'expériences mémorables, montra que *le phénomène de Galvani est dû à ce qu'il existe un circuit fermé composé d'une solution et de deux métaux différents*. Pour lui, le fait de mettre au contact deux métaux différents et une solution saline comme celle qui imprègne la cuisse de grenouille suffit pour faire naître une différence de tension, un courant électrique

que rend manifeste la contraction de la cuisse de grenouille. De là le nom d'*Électricité de contact* donné par Volta; ce nom est resté, bien que nous sachions maintenant que ce n'est pas un contact inerte, mais les actions chimiques qui ont lieu au contact des métaux et du liquide, qui donnent naissance, ici, à l'Électricité.

Les idées de Volta le conduisirent à plonger dans un vase contenant une solution d'acide sulfurique dilué, une lame de zinc et une lame de cuivre; en réunissant ces deux lames, on doit obtenir un courant électrique dans le fil de jonction. C'est, en effet, ce que l'on constate : le contact du fil avec la main montre que le fil s'échauffe; en son voisinage, une aiguille aimantée est déviée; enfin le liquide du vase est décomposé. Ce sont bien là, comme nous l'avons vu précédemment, les caractères de l'existence d'un courant électrique.

Ainsi se trouva réalisé, sous sa forme la plus simple, un **élément voltaïque**. Les extrémités des métaux plongeant dans la solution sont les *bornes* ou *pôles* de l'élément; le fil qui les réunit constitue le *circuit*; et comme le courant va du cuivre au zinc à l'intérieur de ce fil, nous dirons que le *cuivre* est le *pôle positif*, le *zinc* constituant le *pôle négatif*. La plaque de *cuivre* est l'*électrode positive*, la lame de *zinc* est l'*électrode négative*. La différence de potentiel entre les deux bornes est la **force électromotrice de contact**, elle est de 1 volt environ.

La pile électrique. — Volta imagina d'associer un très grand nombre d'éléments en empilant les unes sur les autres une rondelle de cuivre, une rondelle de zinc, une rondelle de drap mouillé d'acide sulfurique étendu et répétant cet *empilement* avec le soin scrupuleux de ne pas intervertir l'ordre. On donna par suite le nom de **pile électrique** à l'assemblage ainsi constitué; aux deux extrémités cuivre se manifeste une différence de potentiel d'autant plus grande que l'assemblage précédent est répété un plus grand nombre de fois.

Mais la disposition donnée par Volta à sa *pile* était tout ce qu'il y a de plus incommode et d'insuffisant; aussi conçoit-on que les physiiciens se soient efforcés, dès que l'invention du

savant italien fut connue, d'améliorer cette disposition, en même temps que d'augmenter la durée du fonctionnement et la quantité d'électricité engendrée.

Avant de voir quels ont été ces perfectionnements et quelles sont les différentes piles auxquelles ils ont conduit, demandons-nous quelle est l'origine de l'énergie dans la pile.

Dans le cas d'une machine électrique, cette énergie est empruntée au milieu extérieur lui-même et la machine rend, sous la forme électrique, le travail mécanique dépensé pour l'actionner. Mais, dans le cas d'une pile, on ne dépense ni

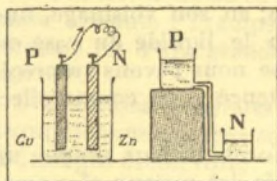


FIG. 15. — Analogie des deux pôles d'une pile avec deux réservoirs d'eau placés à des hauteurs différentes.

chaleur ni travail pour produire le courant, et, dès lors, l'énergie que représente celui-ci est nécessairement empruntée à l'énergie potentielle de la pile elle-même.

Considérons l'élément voltaïque cuivre-zinc-eau acidulée-cuivre. Un tel système est le siège d'actions chimiques qui s'accomplissent avec dégagement de chaleur : le zinc se dissout

dans l'eau acidulée en déplaçant l'hydrogène et la réaction est exothermique¹⁸ : si l'on a mis un excès d'acide, le système possédera une certaine énergie chimique proportionnelle au poids de l'électrode en zinc. Le calorimètre montre que la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique est accompagnée de la production de 24 800 calories pour chaque gramme d'hydrogène mis en liberté ; d'autre part, à l'intérieur de l'élément, 5 000 calories seulement sont mises en liberté par gramme d'hydrogène, c'est-à-dire à peu près 1/5 seulement de 24 800 ; les 4/5 restants doivent donc être considérés comme représentant l'équivalent en chaleur de l'énergie chimique consommée dans l'élément de Volta, et transformée en énergie électrique.

L'énergie électrique fournie par le courant de la pile a sa source dans les réactions chimiques dont la pile est le siège. Ainsi, dans la pile comme dans la machine à vapeur, on prend comme point de départ l'énergie chimique : nous

brûlons du charbon dans la machine à vapeur, alors que l'on brûle du zinc dans la pile.

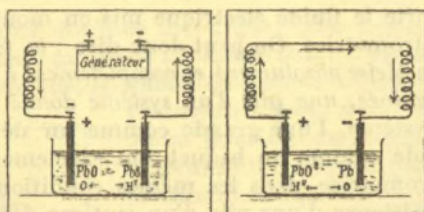
Une pile hydro-électrique quelconque est formée d'un métal, presque toujours du zinc, plongeant dans un liquide qui agit chimiquement sur lui ; à une petite distance est un métal différent non attaqué, ou même un autre corps, mais bon conducteur de l'électricité, comme le charbon, sur lequel se porte le fluide électrique mis en mouvement par la force électromotrice. On peut donc dire : *la force électromotrice caractérise absolument et complètement à une température déterminée, une pile d'un système donné.* Deux piles de même système, l'une grande comme un dé à coudre, l'autre grande comme un baquet, ont exactement la même force électromotrice dans les mêmes conditions. Au contraire, la résistance d'une pile d'un système donné dépend de toutes les modifications que l'on peut faire subir à la forme des électrodes, à leur distance, à leur grandeur, à la quantité des liquides, à la nature des cloisons poreuses ; *la résistance ne caractérise que la pile dans l'état actuel et non pas le système.*

Ajoutons ici que le zinc du commerce employé à la fabrication des piles se dissout même quand la pile ne débite pas ; pour empêcher cette perte inutile de zinc, il suffit de l'amalgamer, c'est-à-dire de le recouvrir d'une mince couche de mercure. Dans ce cas, le zinc ne se détruit que si la pile fonctionne.

Phénomène de polarisation. — Le courant d'une pile cuivre-zinc-eau acidulée ne tarde pas à s'affaiblir et à cesser complètement ; on dit que la pile est polarisée. Ce fait est dû à ce que l'hydrogène, mis en liberté par l'action de l'acide sulfurique sur le zinc, se porte sur la lame de cuivre et l'entoure d'une gaine gazeuse qui bientôt l'isole du liquide environnant ; de plus, cet hydrogène est à l'état naissant, et, dans cet état, il a une grande tendance à brûler ; il se comporte un peu comme le zinc et engendre aussi une force électromotrice de sens opposé à la première. Cette force électromotrice inverse ou *force contre-électromotrice* est un nouvel obstacle au passage de l'électricité. C'est presque uniquement au pôle positif de la pile que se produit ce

phénomène ; l'autre pôle est attaqué, ses surfaces de contact se renouvellent incessamment et son état ne se modifie pas d'une manière sensible. L'existence d'une force contre-électromotrice montre qu'il s'est formé de nouveaux pôles, d'où le nom de **polarisation** donné à ce phénomène¹⁹.

Pour avoir une pile utilisable, il faut donc empêcher



Application de la polarisation. Les accumulateurs.

FIG. 16. — Charge d'un accumulateur. FIG. 17. — Décharge d'un accumulateur.

l'hydrogène de se déposer sur l'électrode positive ; un nettoyage mécanique de cette électrode serait insuffisant, il faut avoir recours à un *nettoyage chimique*. On arrive à ce résultat en plongeant l'électrode positive dans un liquide ou un solide appelé **dépolarisant**. Les dépolarisants les plus employés sont : 1° le sulfate de cuivre (pile Daniell et ses modifications) ; 2° l'acide azotique (pile Bunsen et ses modifications) ; 3° l'acide chromique (pile Poggendorf et ses modifications) ; 4° le bioxyde de manganèse (pile Leclanché) ou le bioxyde de cuivre (pile Lalande et Chaperon). Ces dépolarisants sont des oxydants énergiques capables d'être réduits par l'hydrogène à la température peu élevée des piles en fonctionnement. D'après la nature du dépolarisant, on peut distinguer deux groupes de piles : les unes à *dépolarisant liquide*, les autres à *dépolarisant solide*.

Piles à dépolarisant liquide. — Ces piles sont en assez grand nombre ; elles donnent toutes un voltage assez élevé, ce qui les rend très utilisables dans la pratique pour l'éclairage privé et les expériences de laboratoire.

La pile Daniell²⁰ se compose d'un vase en verre conte-

nant de l'eau acidulée au dixième par de l'acide sulfurique et dans lequel plonge une lame de zinc enroulée en cylindre (électrode négative). Le liquide dépolarisant, qui est du sulfate de cuivre dissout à saturation dans l'eau, est contenu dans un vase poreux intérieur dans lequel plonge un cylindre de cuivre (électrode positive). L'hydrogène traverse le vase poreux où il rencontre les ions²¹ SO^4 provenant de la décomposition, par le courant, du sulfate de cuivre SO^4Cu . Il se forme de l'acide sulfurique SO^4H^2 et la polarisation est évitée. Sur la lame de cuivre se dépose une couche de cuivre pur : la dissolution s'appauvrit constamment en sulfate de cuivre et il est nécessaire d'ajouter souvent de nouveaux cristaux. Le liquide exciteur, au contraire ne s'appauvrit pas, puisque l'acide sulfurique formé reste dans le vase de verre. La force électromotrice est voisine de 1 volt ; la résistance de la pile, qui dépend du degré de concentration des liquides, varie de 0 ohm 2 à 0 ohm 8.

Les modifications de la pile Daniell sont nombreuses : on y a supprimé le vase poreux ; les deux liquides ayant des densités différentes restent superposés, le sulfate de cuivre étant au fond (*pile Callaud*). Dans la *pile Minotto*, les deux liquides sont séparés par une couche de sable. Les modifications de la pile Daniell sont utilisées en télégraphie et en téléphonie, à cause de leur courant à peu près constant.

La pile de Bunsen²² possède comme liquide exciteur une solution de 1/20 d'acide sulfurique et comme liquide dépolarisant de l'acide azotique à 36°-40° Baumé, dans lequel plonge un prisme de charbon de cornue (le cuivre s'y dissoudrait). Quand le circuit est fermé, l'électrolyse de l'acide sulfurique donne des ions H^2 qui traversent la cloison poreuse ; l'électrolyse de l'acide azotique donne des ions AzO^3 qui se combinent au travers de la cloison poreuse pour régénérer l'acide azotique, tandis que les ions H vont réduire l'acide azotique avec formation de vapeurs d'oxyde perazotique désagréables et dangereuses à respirer. La pile de Bunsen possède une grande force électromotrice : 1 volt 9, la résistance intérieure n'est que de 0 ohm 1. On l'emploie quand on a besoin de courants intenses. Malheureusement, elle s'affaiblit rapidement et les vapeurs qu'elle dégage rendent l'air irrespirable.

Dans la pile de Poggendorf²³, le liquide dépolarisant est une solution de *bichromate de potassium* dans l'eau, mélangée d'acide sulfurique, que l'on verse dans un vase poreux; on y plonge le charbon de cornue. Le liquide excitateur est comme dans les piles précédentes, de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique. L'hydrogène est brûlé par l'acide chromique. La force électromotrice est de 2 volts.

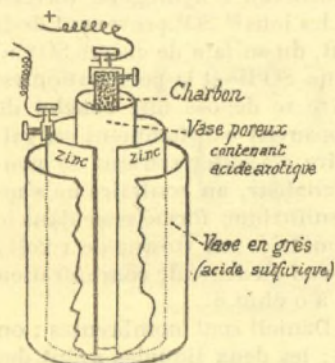


FIG. 18. — Pile de Bunsen.

Dans la pile de Radiguet, les deux liquides ont changé de place: le bichromate est à l'extérieur avec un cylindre de charbon²⁴. Cette pile dite *pile domestique* est toujours prête à fonctionner; elle est très pratique. Sa force électromotrice dépasse 2 volts. Avec un élément de 21 centimètres de hauteur, on peut

avoir 2 ampères 5 pendant 10 heures. On emploie souvent la pile Radiguet pour les petites installations d'éclairage.

L'emploi de deux liquides différents dans une pile est évidemment un inconvénient et l'on a cherché à revenir à un seul liquide tout en évitant la polarisation. Deux moyens permettent d'atteindre le but: — ou bien on mélange les deux liquides (*pile Grenet*), — ou bien on emploie un dépolarisant solide (*pile Leclanché*).

La pile de Grenet comprend une bouteille à large col, dans laquelle on introduit le mélange du dépolarisant et du liquide excitateur formé de: eau, 1000 grammes; bichromate de potassium, 100 grammes; acide sulfurique, 300 grammes. L'électrode positive comprend deux lames de charbon assez rapprochées, fixées au couvercle d'ébonite et communiquant avec une borne de cuivre (borne positive). L'électrode négative est une lame de zinc que l'on abaisse lorsque la pile doit fonctionner. Le mélange de bichromate et d'acide sulfurique fournit de l'oxygène qui, en se combi-

nant à l'hydrogène polariseur, donne de l'eau. La polarisation est évitée, mais l'alun de chromé, qui vient former ses cristaux d'un rouge violacé foncé, encrasse la pile et le voltage baisse assez rapidement. La force électromotrice est voisine de 1 volt 9. Cette pile est employée dans les laboratoires pour l'électrolyse des sels et de l'eau; elle ne dégage ni odeur, ni vapeurs acides.

La **pile Trouvé** est une réunion de six éléments Grenet disposés les uns à côté des autres dans une caisse en bois. Chacun est constitué par un vase en verre contenant le liquide et par deux plaques de charbon entre lesquelles se trouve la plaque de zinc. Un treuil, auquel sont suspendues les lames, permet de faire plonger celles-ci à volonté dans le liquide.

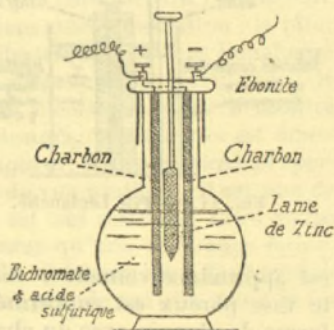


FIG. 19. — Pile Grenet.

Piles à dépolarisant solide.

— La lame positive est plongée dans la substance dépolarisante. Ces piles ont deux représentants principaux : le type Leclanché, et le type Lalande-Chaperon.

Dans la pile **Leclanché**, le liquide excitateur est une

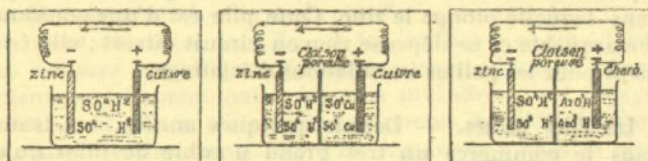


FIG. 20. — Phénomènes chimiques dans les piles.
Pile de Volta. Pile de Daniell. Pile Bunsen.

dissolution concentrée de chlorure d'ammonium ou sel ammoniac, dans laquelle on plonge un bâton de zinc amalgamé. Le dépolarisant est du bioxyde de manganèse, contenu

dans un vase poreux, et dans lequel plonge un prisme de charbon. La dépolarisation se produit de la façon suivante : le zinc attaque le sel ammoniac en donnant du chlorure de zinc, de l'ammoniac et de l'hydrogène qui va réduire le

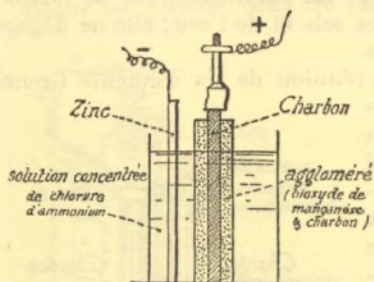


FIG. 21. — Pile Leclanché.

bioxyde de manganèse²⁵. Cette pile est d'une longue durée, seulement elle se polarise facilement par un fonctionnement un peu prolongé. C'est pourquoi on ne l'emploie guère que pour des courants intermittents, par exemple dans les sonneries, la téléphonie, les horloges électriques.

La force électromotrice est approximativement 1 volt 5. Dans les modèles récents, le vase poreux est supprimé ; on fait des agglomérés en forme de plaques avec du charbon et de bioxyde du manganèse : la lame de charbon est alors placée entre deux lames dépolarisantes. Dans l'élément *Leclanché-Barbier*, le bâton de zinc se trouve dans l'axe d'un cylindre dépolarisant.

La *pile Lalande et Chaperon* emploie, comme dépolarisant solide, du bioxyde de cuivre qui entoure l'électrode positive (cuivre) et dont le rôle est toujours le même. Le liquide excitateur est une dissolution de potasse caustique dans laquelle plonge le zinc. Cette pile est d'une constance remarquable et ne dépense rien en circuit ouvert ; elle convient pour les petites installations d'éclairage.

Les Piles sèches. — Depuis quelques années, on trouve dans le commerce un très grand nombre de piles qu'on appelle improprement **piles sèches**, et qui sont en réalité des *piles à liquide immobilisé*. Ces éléments dérivent en général de la pile Leclanché, le liquide est simplement retenu par une substance poreuse qu'il imbibé : de la sciure de bois par exemple (*pile Étoile*), de la tourbe (*pile Hydra*). Dans certaines piles sèches, le liquide dépolarisant est versé

dans la pile, mélangé à des matières colloïdes qui lui donnent l'apparence d'une sorte de gelée. Toutes ces piles sont facilement transportables et n'exigent pas d'entretien ; elles sont utilisées pour l'allumage de gaz explosibles, au moyen d'une bobine de Ruhmkorff, dans les motocyclettes et automobiles.

Résistance d'un circuit. — Il existe une assez grande analogie entre le courant électrique qui parcourt un conducteur et un courant d'eau circulant dans une canalisation ; la pile, organe générateur d'énergie électrique, devient l'analogue d'une pompe rotative : elle entretient la circulation de l'électricité dans la canalisation électrique. OHM a montré que, pour un fil de substance donnée, *la résistance est directement proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la section.* Au point de vue pratique, il est bon de se rappeler qu'un fil *long et fin* est très résistant, alors qu'un fil *gros et court* peut ne présenter qu'une résistance faible. Toutes choses égales d'ailleurs *la résistance d'un fil dépend de sa nature*, elle est neuf fois plus grande environ pour le fer que pour le cuivre.

Le courant ne circule pas seulement à l'extérieur, mais aussi à l'intérieur de la pile. Celle-ci, considérée comme un conducteur, doit donc présenter une résistance au passage du courant ; celle-ci varie avec la forme, la dimension, la distance des pôles et avec la concentration du liquide. L'intensité du courant fourni par la pile dépend de la **résistance totale** du circuit, laquelle est égale à la résistance du fil augmentée à celle de la pile²⁶.

Quand on utilise des piles, il faut veiller à ce que toutes les surfaces métalliques formant contact dans le circuit soient parfaitement nettoyées. La moindre trace d'oxyde entre deux pièces métalliques augmente considérablement la résistance. Si deux points d'un conducteur dont la résistance est assez grande se trouvent réunis par une résistance faible, on dit que ces deux points sont en **court-circuit** ; presque tout le courant passe par la communication ainsi établie.

Rendement des Piles. — Le rendement d'une pile est le rapport entre la puissance extérieure disponible et la puissance totale produite. On démontre que le rendement s'approche d'autant plus de l'unité que l'intensité est plus faible, ce qui revient à dire que, une pile étant donnée, avec une même dépense de zinc, on obtiendra d'autant plus de travail extérieur que le courant sera plus faible.

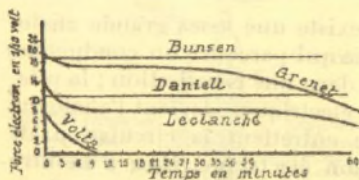


Fig. 22. — Courbes de force électromotrice de diverses piles.

Mais souvent, on cherche à obtenir le maximum de puissance extérieure sans tenir compte de la dépense. Dans ce cas il faut que la différence de potentiel aux bornes soit justement la moitié de la force électromotrice de la pile; le rendement est alors de 50 p. 100.

On n'utilise alors, sous forme d'énergie disponible, que la moitié de l'énergie chimique du zinc; le reste demeure confiné sous forme de chaleur à l'intérieur de la pile.

Couplage des éléments. — Un seul élément de pile est en général insuffisant pour la plupart des applications; on est alors amené à en accoupler plusieurs. Dans le **montage en série (ou en tension)**, on réunit les éléments par leurs pôles de noms contraires : zinc à cuivre, par exemple : les éléments se trouvent placés à la suite les uns des autres et la chaîne se termine d'un côté par un cuivre (pôle positif) et de l'autre par un zinc (pôle négatif). Les forces électromotrices s'ajoutent ainsi que les résistances intérieures. Ce groupement est avantageux quand on a une *grande résistance extérieure*, comme en télégraphie; il est analogue à une série de machines hydrauliques élevant l'eau par degrés successifs. Dans le **montage en batterie (ou en quantité)** on réunit tous les pôles positifs d'un côté et tous les pôles négatifs de l'autre. La force électromotrice de l'ensemble est la même que dans celle d'une pile, mais la résistance intérieure est divisée par le nombre d'éléments; on adopte ce groupement quand la *résistance du circuit extérieur est*

faible. Enfin, si la résistance à vaincre est moyenne, on donne la préférence au **montage mixte** : on réunit un certain nombre d'éléments en tension, puis chacun de ces

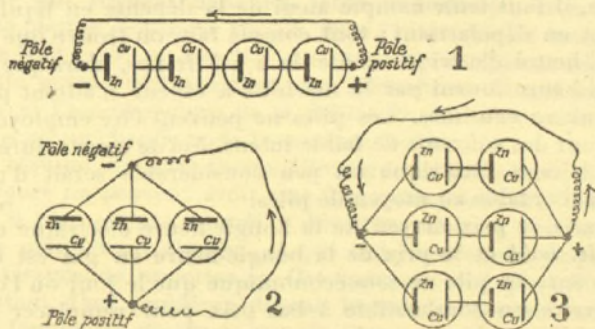


FIG. 23. — Montage des piles.

1. En série ou en tension. — 2. En batterie ou en quantité.
3. Montage mixte.

groupes, considéré comme une pile unique, est réuni aux autres en batterie. Ainsi, avec douze éléments de piles, on pourra faire : deux groupes de six éléments en tension, ou trois groupes de quatre éléments en tension, ou quatre groupes de trois éléments en tension, etc.; ces groupes étant ensuite réunis en batterie. Le groupement est loin d'être indifférent car l'intensité du courant obtenu dépend de ce groupement : il est bon de se rappeler que la plus grande intensité de la pile a lieu lorsque la résistance de l'ensemble des éléments est égale à la résistance extérieure²⁷.

Prix de l'énergie électrique des piles. — La pile est une machine dans laquelle le combustible employé est le zinc au lieu d'être le charbon ; elle utilise l'énergie chimique du zinc se combinant à l'acide sulfurique de la même manière que la machine à vapeur utilise l'énergie chimique du charbon se combinant à l'oxygène de l'air. *Le prix de l'énergie électrique des piles est élevé.* Cela tient à ce que le zinc, en brûlant, dégage moins de chaleur que le charbon

et que son prix est vingt fois plus élevé que celui du charbon. Ce fait est d'autant plus regrettable que le rendement d'une pile se tient entre 70 et 80 p. 100, tandis que celui de la machine à vapeur est inférieur à 10 p. 100. Dans la pile, il faut tenir compte aussi de la dépense en liquide actif et en dépolarisant ; tout compte fait, on trouve que le cheval-heure électrique coûte de 2 à 3 francs, alors que le cheval-heure fourni par la machine à vapeur n'atteint pas souvent 10 centimes. Les piles ne peuvent être employées que pour des courants de faible intensité et de courte durée ; un éclairage électrique un peu considérable serait d'un prix inabordable au moyen de piles.

A Paris, le prix moyen de la bougie-heure électrique est de 0 fr. 0044 et le prix de la bougie-heure au gaz est de 0 fr. 0021. La pile ne sera économique que le jour où l'on découvrira un combustible à bas prix pour remplacer le zinc ; si l'on arrive à transformer directement la chaleur de combustion du charbon en énergie électrique avec un rendement de 50 p. 100, les machines à feu disparaîtront. On connaît déjà des piles transformant directement la chaleur en énergie électrique, ce sont les piles thermo-électriques.

Phénomènes et piles thermo-électriques. — Les recherches de VOLTA nous ont montré que le contact de deux métaux produit une différence de potentiel : pourtant si l'on forme une chaîne de métaux différents soudés bout à bout et dont les extrémités sont formées par le même métal, il ne se produit pas de différence de potentiel²⁸. Il en est autrement si l'on chauffe l'une quelconque des soudures de façon à rompre l'égalité de température le long du circuit, celui-ci devient le siège d'un courant : une partie de la chaleur fournie par le foyer à la soudure chaude est alors transformée en énergie électrique²⁹. Les forces électromotrices ainsi obtenues sont très faibles : avec le bismuth et l'antimoine la force électromotrice est relativement considérable et dépasse à peine 5 millièmes de volt pour l'intervalle 0°-100°. Les **piles thermo-électriques** ont peu d'applications industrielles : le courant auquel elles donnent naissance permet, en agissant sur l'aiguille du galvanomètre, de faire

connaître de faibles différences de température (*pile de Melloni, aiguille thermo-électrique* de Becquerel, etc.). Le *pyromètre* de M. Lechatelier permet de mesurer les températures élevées qui règnent dans les fours industriels ; avec le couple platine + platine rhodié, dans l'intervalle de température 500°-1200°, on constate une proportionnalité presque parfaite entre l'accroissement des indications du galvanomètre et l'accroissement de la différence des températures de la soudure chaude et de la soudure froide.

En résumé, les *piles thermo-électriques* et les *piles hydro-électriques* ne peuvent avoir que des applications très limitées ; il n'en est pas de même des *accumulateurs* que nous allons maintenant étudier, et qui ont rapidement acquis une très grande importance. Ces appareils ont permis la résolution d'un problème devant lequel les savants sont restés longtemps désarmés, savoir l'emmagasinement d'un travail momentanément inutilisable pour l'employer ultérieurement.

Application des phénomènes de polarisation : Les accumulateurs.

— On a vu que la polarisation des piles consiste en une accumulation d'hydrogène autour de l'électrode positive ; les gaz étant mauvais conducteurs de l'électricité, la résistance intérieure de la pile se trouve accrue et l'intensité du courant diminue. Or, cette polarisation, qui est un inconvénient dans les piles, est précisément le **principe des accumulateurs** (voir fig. 16 et 17, page 48).

Supposons que l'on fasse passer un courant électrique dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, au moyen de deux lames métalliques *identiques*, l'une P par laquelle entre le courant sera l'électrode positive ; l'autre N par laquelle sort le courant, sera l'électrode négative. On observe un dégagement gazeux autour de N. Au bout d'un certain temps, supprimons le courant et mettons en communication les lames N et P ; *on obtient un courant électrique* et ce courant est *inverse* du précédent. Tout se passe comme si nos deux lames métalliques avaient *accumulé* l'énergie électrique qui leur avait été fournie précédemment, d'où le nom d'*accumulateur* donné à cet appareil. Un accumulateur joue donc à lui seul deux rôles distincts : lorsqu'il est

traversé par un courant, il transforme par la polarisation des électrodes l'énergie électrique qui lui arrive en énergie chimique ; il est alors *récepteur*. Au contraire, quand on interrompt l'arrivée du courant et qu'on réunit les deux électrodes par un fil conducteur, il transforme cette énergie chimique en énergie électrique et devient *générateur*. Au courant de *charge* fait suite un courant de *décharge*. La polarisation, en altérant les électrodes superficiellement, a fait naître deux pôles, donné naissance à une force contre-électromotrice et entraîné la production d'un courant.

Cette propriété est commune à toutes les électrodes polarisables, mais PLANTÉ a reconnu qu'elle est spécialement marquée lorsque les électrodes sont des lames de plomb immergées dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ; de plus, les électrodes de plomb polarisées *ne se dépolarisent pas en circuit ouvert* ; si l'on isole soigneusement leurs pôles, elles pourront se maintenir chargées pendant plusieurs semaines, restant ainsi prêtes à donner du courant quand on réunira ces deux pôles. Le premier accumulateur, celui de Planté, était formé de deux feuilles de plomb à grande surface. Ces feuilles sont toujours un peu oxydées superficiellement ; or, quand on fait passer le courant, l'hydrogène qui se dégage sur l'électrode négative réduit l'oxyde de plomb en donnant une couche de plomb métallique spongieux, tandis que l'ion SO_4 qui, à l'électrode positive, décompose l'eau, donne de l'oxygène qui transforme le protoxyde de plomb en peroxyde de couleur brune. Lorsque les réactions sont achevées, l'hydrogène et l'oxygène, au lieu d'être absorbés par les électrodes, se dégagent sous forme gazeuse ; à ce moment, l'accumulateur est polarisé à *refus*. Si l'on réunit les deux pôles par un fil conducteur, il y passera un *courant de dépoliarisation*, et les électrodes reviendront à leur état initial. En répétant un grand nombre de fois la charge et la décharge de l'appareil, on arrive à rendre les lames spongieuses à leur surface et à leur faire absorber une grande quantité d'oxygène d'une part et d'hydrogène d'autre part. La durée du courant de charge va en augmentant et il en est de même de la durée du courant secondaire qui peut être réalisé.

Cette formation d'un accumulateur est longue (envi-

ron deux mois) et exige une grande dépense de courant. PLANTÉ a montré que l'on avait avantage à mettre tremper les plaques pendant un jour ou deux dans l'acide azotique, ce qui les rend poreuses, avant de les soumettre à la série de charges et de décharges (formation Planté). A ce procédé de *formation autogène*, FAURE a proposé de substituer la *formation hétérogène* en recouvrant les plaques positives d'une couche de minium malaxé avec de l'acide sulfurique, et les plaques négatives d'une pâte de litharge et du même acide ; pour assurer l'adhérence de la pâte, elle est déposée dans des rainures ou dans les trous d'un grillage obtenus en fondant les plaques dans un moule approprié. Ces accumulateurs ont une durée moins grande que les premiers, car les matières ajoutées sont moins adhérentes. Dans la plupart des bons accumulateurs, les plaques positives sont à formation Planté, tandis qu'on réserve la formation rapide pour les plaques négatives.

La plupart des accumulateurs sont formés de plaques rectangulaires de plomb pur ou allié à un peu d'antimoine. Chaque électrode est constituée par plusieurs plaques parallèles et reliées à une tige unique. Les plaques + et — sont alternées, une plaque positive étant toujours placée entre deux plaques négatives³². Il convient d'assurer un bon isolement des accumulateurs, à cet effet chacun d'eux est posé sur des supports isolants.

Comme types caractéristiques d'accumulateurs, citons : *l'accumulateur Tudor*, approprié aux batteries fixes, robuste et lourd ; — *l'accumulateur Fulmen*, approprié à la traction électrique, où les électrodes en plomb grillagé sont enfermées dans un sac en celluloïd ; — *l'accumulateur Edison* où les plaques en tôles d'acier renferment dans leurs alvéoles un mélange de fer en poudre et de graphite pour les négatives, et de l'oxyde de nickel mélangé à du graphite pour les positives. Cet accumulateur est moins lourd et plus résistant que les accumulateurs au plomb.

La *force électromotrice* d'un accumulateur monte lentement pendant la charge jusqu'à 2 volts 5 pour redescendre ensuite, spontanément, à 2 volts 1. Pendant la décharge, la force électromotrice reste peu éloignée de 2 volts, elle baisse seulement vers la fin. Il faut recharger l'accumulateur dès

que sa force électromotrice est tombée à 1 volt 85. Si l'on poussait la décharge plus loin, l'accumulateur serait détérioré. Pour la bonne conservation des accumulateurs, il importe de ne pas les charger ni les décharger trop vite, c'est-à-dire de ne pas utiliser des *courants* trop intenses ; en moyenne, les courants utilisés atteignent rarement 3 ampères par kilogramme de plaques. La *capacité* utilisable d'un accumulateur est la quantité d'électricité qu'il peut fournir à la décharge ; elle est pratiquement égale à 10 ampères-heure (36 000 coulombs) par kilogramme de plaques. L'*énergie* disponible à la décharge est égale au produit de la force électromotrice moyenne pendant la décharge par la capacité, soit : $36\,000\text{ c} \times 2\text{ V} = 72\,000\text{ joules}$ par kilogramme de plaques. Le *rendement en quantité* d'un accumulateur est le rapport de la quantité d'électricité qu'il restitue à la décharge à la quantité d'électricité qu'il faut lui fournir pendant la charge : ce rendement est d'environ 80 à 90 p. 100.

Les usages des accumulateurs sont très nombreux et très variés. On les groupe généralement en *série*, ce qui constitue une *batterie* ; dans ce cas, les forces électromotrices s'ajoutent. Une batterie de trente accumulateurs représente une force électromotrice de $30 \times 2,1 = 63$ volts. On peut ainsi réaliser une force électromotrice quelconque qui reste sensiblement constante. Les accumulateurs jouent le rôle de *réservoirs d'énergie*. Toute station électrique distribuant l'éclairage et la force est pourvue d'une batterie d'accumulateurs, dite *batterie-tampon*, servant à régulariser la force électromotrice de la dynamo génératrice ; cette batterie joue le même rôle que le réservoir placé sur une canalisation d'eau ou de gaz. Les accumulateurs servent à *capter les forces intermittentes* : l'énergie dépensée par l'action du vent sur les arbres d'une turbine atmosphérique, par exemple, par l'intermédiaire d'une dynamo qui charge une batterie d'accumulateurs. On utilise encore de petites batteries d'accumulateurs pour faire marcher des *automobiles électriques*²² et même des *tramways* sur des parties de leurs parcours où ils ne peuvent s'alimenter de courant à une canalisation générale. En plongée, les *hélices des sous-marins* sont reliées aux arbres des moteurs qui reçoivent le courant

d'accumulateurs. Enfin, les accumulateurs servent dans la *petite industrie* pour la galvanoplastie, dans les *laboratoires* en médecine, chirurgie, art dentaire, pour faire rougir des cautères de platine, etc. De petits accumulateurs servent à éclairer des bijoux ou des jouets électriques : d'autres illuminent des lanternes de bicyclettes, d'automobiles, etc. Les accumulateurs peuvent jouer un second rôle, celui de *transformateurs d'énergie* ; ils distribuent le courant dans les conditions requises par le consommateur ; mais, pour cet usage, il existe des appareils qui résolvent plus simplement la question et auxquels on réserve le nom de *transformateurs* (voir quatrième conférence).

Les accumulateurs occupent une place importante dans l'industrie moderne ; ce sont en somme des *piles qu'il est possible de régénérer*. Malheureusement, ils sont difficilement transportables et extrêmement lourds ; enfin ils s'usent très rapidement et demandent quelquefois à être remplacés au bout de cinq ou six ans.

En résumé, cette conférence nous a montré comment, en utilisant le frottement, l'influence, l'énergie chimique, on a pu obtenir des sources d'électricité ; mais en même temps nous avons vu les inconvénients de chacune d'elles. Les *machines électrostatiques*, qui fournissent de faibles quantités d'électricité à un potentiel très élevé, sont généralement inutilisables et ne trouvent d'applications que dans l'Electrothérapie ; les *piles* restent des générateurs de luxe et leur emploi se limite aux cas où la question de prix de revient est insignifiante, par exemple pour les sonneries, les appareils téléphoniques et télégraphiques ; enfin les *accumulateurs* ont de graves inconvénients qui restreignent beaucoup leurs applications. De toutes les formes d'énergie, celle que nous savons produire au meilleur compte, c'est l'énergie mécanique : la machine à vapeur nous fournit le cheval-heure à un prix qui ne dépasse pas 10 centimes, et les cours d'eau permettent de l'obtenir à un prix très inférieur. Aussi, l'industrie électrique n'a-t-elle pu commencer à se développer sérieusement que le jour où l'on a découvert le moyen de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette transformation s'effectue à l'aide de générateurs mécaniques que l'on appelle *machines dynamo-élec-*

triques ou simplement *dynamos* et dont l'étude fera l'objet de la conférence suivante.

NOTES DE LA DEUXIÈME CONFÉRENCE

1. OTTO DE GUÉRICKE (1602-1686) a été l'expérimentateur le plus audacieux et le plus important qui ait jamais existé. Le premier, il obtint une étincelle et pensa que cette étincelle pouvait bien être de même nature que l'éclair d'orage.

2. Abbé NOLLET (1700-1770), physicien français, fut professeur de physique expérimentale au collège de Navarre. A laissé un grand nombre de travaux sur l'électricité.

3. Les grands modèles ordinaires de machines de Ramsden donnent des étincelles de 6 centimètres au plus. Le Conservatoire des arts et métiers, l'Institut polytechnique de Londres, possèdent une machine dont les plateaux ont 2 mètres de diamètre et qui fournit des étincelles de 65 centimètres de longueur.

4. On appelle *électrodynamique* l'étude de l'électricité dynamique, et *électrostatique*, l'étude de l'électricité statique.

5. La plus grande machine électrostatique, construite par M. Roycourt sur les indications de MM. Abraham et Villard, possède vingt plateaux; elle donne une différence de potentiel de plusieurs centaines de milliers de volts et une intensité de 3 à 4 milliampères.

6. Le *watt* est la puissance d'une machine capable de produire 1 joule à la seconde. (Pour le joule, voir première conférence, page 30, note 17.) WATT (1736-1819), ingénieur et mécanicien anglais à qui l'on doit surtout les perfectionnements de la machine à vapeur.

7. La curiosité fit recommencer maintes fois l'expérience : ALLAMAN en fut étourdi; WINCKLER crut avoir un accès de fièvre chaude; sa femme essaya le choc électrique et fut huit jours ayant à peine la force de se mouvoir. On attribua ces propriétés au verre d'Allemagne, mais l'abbé Nollet apprit à ses dépens que le verre de France les possédait aussi.

8. C'est le quotient de la charge par le potentiel. L'*unité de capacité* est le *farad* (abréviation de Faraday), c'est la capacité d'un corps tel que, si on le charge avec 1 coulomb, il prend un potentiel égal à 1 volt; car si dans la formule $Q = CV$ on fait $C = 1$; $V = 1$, on trouve $Q = 1$. Cette unité est énorme, elle est équivalente à la capacité d'une sphère de 9 millions de kilomètres de rayon. Dans la pratique on emploie le *microfarad* qui vaut un millionième de farad. On trouve dans le commerce des *condensateurs* dont la capacité est de plusieurs microfarads.

9. Dans la *théorie des électrons*, les propriétés diélectriques des isolants s'expliquent en supposant que chaque petite particule d'un diélectrique possède toujours une charge positive et une charge négative, donc deux *pôles*. Pour expliquer l'effet d'un diélectrique sur les phénomènes d'in-

fluence, la capacité d'un condensateur par exemple, on admet que les atomes positifs d'une molécule d'un diélectrique sont attirés plus fortement vers la plaque négative, les atomes négatifs vers la plaque positive; l'ensemble de ces deux actions a pour effet de faire tourner plus ou moins les molécules et d'orienter celles-ci en lignes plus ou moins parallèles, tandis que, normalement, elles se trouvent toutes dans des directions quelconques. Nous verrons plus tard que les effets électriques se transmettent à travers les isolants avec une vitesse égale à celle de la lumière. On doit donc admettre que la substance matérielle des isolants est le support des électrons, et que la transmission des actions électriques des électrons s'effectue par une substance très ténue et élastique, matière identique à celle dont on a admis l'existence pour expliquer les phénomènes lumineux, c'est-à-dire par l'éther.

10. Voir G. EISENMENGER. *La Physique*, même collection (sixième conférence).

11. La force électromotrice d'un élément Daniell est de 1 volt 9, l'acide sulfurique ajouté la fait descendre à 0 volt 99.

12. Dans le langage électrique, on considère comme synonymes les expressions : force électromotrice, différence de potentiel, chute de potentiel, tension électrique; par abréviation, on dit aussi *voltage* et ce terme revient à chaque instant dans le monde industriel.

13. AMPÈRE (1775-1836), professeur à l'École polytechnique, membre de l'Institut. Ses travaux en électricité sont d'une importance capitale.

14. Un kilogrammètre vaut 9,81 joules : donc le cheval-vapeur, qui équivalait à 75 kilogrammètres, vaut $9,81 \times 75 = 736$ joules-seconde ou 736 watts. Par suite, le kilowatt vandra 1 000 : 736 = 1,36 cheval-vapeur. Le watt-heure vaut 3 600 joules, soit 0 kgm. 102 \times 3600 = 367 kgm. 2.

15. Soient : L, la longueur en mètres du conducteur; S, la section en millimètres carrés; A, un certain nombre qu'on appelle *résistivité*; la résistance R, en ohms, sera exprimée par la formule : $R = (A \times L) : S$.

16. OHM (1787-1854), physicien allemand, fut professeur de physique à l'Université de Munich, puis directeur de l'École polytechnique de Nuremberg.

L'ohm est la résistance d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centimètres de longueur à la température de 0°; c'est approximativement celle de 50 mètres de fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, de 100 mètres de fil télégraphique. La résistance à chaud d'une lampe de 16 bougies est de 200 ohms.

17. Si, dans cette formule, on fait $E = 1$ volt et $I = 1$ ampère, on a $R = 1$ ohm. L'ohm est donc la résistance d'un fil dans lequel 1 ampère entretient 1 volt.

18. L'action chimique dans la pile revient, en définitive, à la transformation du zinc en sulfate par la réaction SO^4H^2 (acide sulfurique) + Zn (zinc) = $SO^4 Zn$ (sulfate de zinc) + H^2 (hydrogène). On peut recueillir l'hydrogène en recouvrant la lame de cuivre d'une éprouvette; il est facile de constater que la lame de zinc diminue de poids et que le liquide contient du sulfate de zinc en dissolution.

19. Volta pensait que cet affaiblissement était dû à la desiccation des rondelles, aussi mit-il les lames de zinc et de cuivre dans un vase conte-

nant de l'eau acidulée. La cause de la polarisation fut découverte par Becquerel en 1826.

20. DANIELL (1790-1845), physicien et chimiste anglais, professeur au King's College, a laissé des travaux remarquables.

21. Faraday a donné le nom d'ions aux produits de la décomposition d'un sel métallique par un courant. La décomposition du sulfate de cuivre SO^4Cu donnera des ions SO^4 et des ions H^2 .

22. BUNSEN (1811-1899), chimiste et physicien allemand, professeur à l'Université de Heidelberg, a publié des travaux très nombreux et très importants.

23. POGGENDORF (1796-1877), physicien allemand, professeur à l'Université de Berlin.

24. Pour un litre d'eau mettre : bichromate 120 grammes ; eau 750 grammes ; acide sulfurique 250 grammes.

25. Les réactions secondaires donnent de l'oxychlorure de zinc ; ce dernier sel peu soluble se forme quand la pile ne fonctionne pas ; il s'attache au zinc. Il faut gratter le zinc au bout d'un certain temps. Pour cette raison, on emploie une dissolution concentrée de chlorure d'ammonium, parce que l'oxychlorure est plus soluble dans cette dissolution. Une pile contenant un litre de solution saturée pourra fournir 130 ampères-heure avant son épuisement théorique. La lame circulaire de zinc est préférable au simple bâton de zinc ; quatre éléments de cette sorte, hauts de 10 cm. environ, peuvent alimenter les sonneries de tout un grand appartement. Avoir soin de maintenir constant le niveau du liquide.

26. Soient r la résistance intérieure d'une pile, R la résistance extérieure, E sa force électromotrice, l'intensité du courant fourni par cette pile est

$$\text{donnée par la formule } I = \frac{E}{R + r}.$$

27. Soient : E , force électromotrice d'un élément ; r , sa résistance intérieure ; R , la résistance extérieure. Pour le montage en série de n éléments l'intensité totale est fournie par la relation $nE = I(nr + R)$. Pour le montage en quantité de n éléments, l'intensité sera fournie par la formule $nE = I(nR + r)$. Pour le montage mixte de t éléments en tension formant q

groupes en quantité, on aura $tE = I\left(R + \frac{tr}{q}\right)$.

28. Ce fait est conforme au principe de la conservation de l'énergie, car autrement, en réunissant les extrémités de la chaîne, le circuit serait parcouru par un courant dont la production ne correspondrait à aucune dépense d'énergie.

29. D'après LORD KELVIN (Sir William Thomson), les forces électromotrices ne sont pas localisées seulement aux soudures et toute portion de métal homogène le long de laquelle la température est variable intervient aussi.

31. En réalité, les réactions chimiques sont plus compliquées que nous ne l'avons imaginé ici ; l'acide sulfurique se combine partiellement à l'oxyde de plomb, pour former du sulfate de plomb ; cette sulfatation est surtout sensible quand la décharge est poussée trop loin ; les électrodes se

recouvrent alors d'une croûte blanche de sulfate qui nuit au bon fonctionnement des accumulateurs.

32. La borne positive est d'habitude colorée en rouge, la négative en noir. Les plaques positives se reconnaissent facilement quand l'accumulateur est chargé : elles ont la couleur brune du peroxyde de plomb PbO_2 ; les plaques négatives restent de couleur blanc grisâtre.

33. La voiture automobile électrique est encore peu répandue en France. En Amérique, les stations électriques vendent à bon compte l'électricité de la journée, car à ce moment la demande est faible. Les fabricants « standardisent » leurs machines afin de rendre les accumulateurs interchangeables.

TROISIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ D'AUJOURD'HUI

LES PHÉNOMÈNES D'INDUCTION ET LES DYNAMOS MESURE DES COURANTS

Phénomènes magnétiques produits par le courant électrique. — Phénomènes d'aimantation dus aux champs magnétiques. — Explication des phénomènes magnétiques. — Les phénomènes d'induction. — Phénomènes de self-induction. — Les machines d'induction. — Les dynamos à courants continus. — Les dynamos à courants alternatifs ou alternateurs. — Les dynamos à courants triphasés. — La loi de Joule et les courants dérivés. — Mesure des courants continus et des courants alternatifs. — Les compteurs d'électricité.

Dans les conférences précédentes, nous avons étudié les *aimants* et les *courants* : nous nous proposons d'étudier maintenant les *relations qui existent entre les aimants et les courants*. Nous serons ainsi conduits à reconnaître que les courants produisent des champs magnétiques analogues à ceux que la limaille de fer a rendus visibles pour les aimants ; et ensuite, qu'il est possible d'obtenir des courants au moyen des aimants. Cette étude est d'une grande importance, car elle va nous conduire à celle des **dynamos** qui sont les générateurs industriels de l'électricité.

Phénomènes magnétiques produits par le courant électrique. — Le courant qui passe dans un conducteur crée autour de lui un **champ magnétique**. ARAGO¹, en trempant dans la limaille de fer un fil de cuivre parcouru par un fort courant, vit que la limaille adhère au fil tant que le courant subsiste, et s'en détache dès que le courant cesse. On peut, d'ailleurs, obtenir le

spectre d'un courant d'une manière analogue à celle qui nous a servi à former le spectre d'un aimant. Si l'on saupoudre de limaille une feuille de carton percée d'un trou pour laisser passer un gros fil de cuivre parcouru par une dizaine d'ampères, on voit se former autour du fil des circonférences concentriques d'autant plus nettes et plus serrées qu'on les considère plus près du centre. *Le sens des lignes de force ainsi produites est celui dans lequel on devrait tourner un tire-bouchon pour le faire progresser dans le sens du courant (Règle de Maxwell²)*. Considérons un courant horizontal ; il crée un champ magnétique dont les lignes de force sont situées dans des plans verticaux ; si l'on place au voisinage de ce fil une aiguille aimantée, les lignes de force, en raison de la perméabilité de l'acier, se déformeront pour la traverser et agiront pour l'amener dans leur direction, soit dans un *plan perpendiculaire à la direction du courant*. Les pôles de cette aiguille se disposent de façon que les lignes de force puissent pénétrer par le pôle sud en suivant le plus court chemin. C'est l'expérience que fit OERSTED³ en 1819. Pour retenir la position des pôles par rapport au courant, on se sert de la **Règle dite d'Ampère**. *Si on suppose un observateur regardant l'aiguille et couché le long du fil de façon que le courant lui entre par les pieds, le pôle nord de l'aiguille se trouve porté à la gauche de l'observateur.*

La considération des lignes de force permet de s'expliquer pourquoi *deux courants parallèles et de même sens s'attirent, tandis qu'ils se repoussent quand ils sont dirigés en sens inverse* : dans le premier cas, les lignes ont même direction, se soudent et ne forment qu'un seul faisceau tendant à rapprocher les fils ; dans le second cas, les lignes se heurtent, se resserrent pour passer entre les deux fils qui se trouvent repoussés.

Si le courant, au lieu d'être rectiligne comme précédemment, est contourné de façon à constituer un **cadre rectangulaire** ou **circulaire**, le spectre magnétique se montre constitué par des lignes de force circulaires au voisinage immédiat du fil, mais se transformant en boucles fermées sur elles-mêmes et enfilées sur le cadre. L'ensemble de ces boucles forme un paquet serré à l'intérieur de ce cadre et épanoui à l'extérieur. L'ensemble de ces lignes de force constitue un *flux de force magnétique*. Si le fil est enroulé en

hélice et forme une bobine, les lignes de force internes sont sensiblement parallèles entre elles et à l'axe de l'hélice ; aux deux extrémités de cette hélice, elles s'épanouissent pour se fermer sur elles-mêmes à travers l'espace extérieur.

Cet effet est encore plus accentué lorsqu'on prend une hélice à pas très court faite

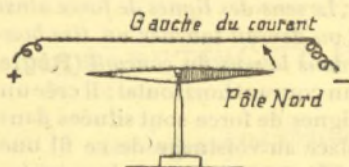


FIG. 24. — Action d'un courant sur l'aiguille aimantée.

en enroulant sur un tube de verre cylindrique un fil conducteur recouvert d'isolant : on obtient ainsi un solénoïde. Les lignes de force sont, à l'intérieur du solénoïde, parallèles entre elles, et par conséquent perpendiculaires aux spires : leur sens est celui

dans lequel progresse un tire-bouchon placé suivant l'axe du solénoïde et qu'on fait tourner dans le sens du courant dans les spires : ces lignes sont sensiblement équidistantes les unes des autres, de sorte que le champ est uniforme ou moins sur les $\frac{2}{3}$ de la longueur de la bobine². On peut constituer un solénoïde fermé en enroulant le fil conducteur sur toute la périphérie d'un anneau ; dans ce cas, les lignes de force sont toutes intérieures au solénoïde : il ne s'en échappe pas une à l'extérieur.

Analogie d'un solénoïde et d'un aimant. — Un solénoïde droit ou courbe produit extérieurement à lui le même spectre magnétique qu'un aimant de même forme ; fermé sur lui-même, il ne produit pas plus de champ extérieur qu'un aimant dont les pièces interpolaires sont réunies par une armature en fer. On peut donc appeler pôle nord d'un solénoïde l'extrémité par laquelle s'échappent les lignes de force et pôle sud l'extrémité par laquelle elles rentrent.

Les solénoïdes possèdent toutes les propriétés des aimants : ils s'orientent comme l'aiguille aimantée, dans le plan du méridien magnétique, la face nord tournée vers le nord géographique ; le pôle nord d'un solénoïde repousse le pôle nord d'un autre solénoïde ou d'un aimant, tandis qu'il attire les pôles sud ; enfin, les solénoïdes tendent à se mettre en

croix avec un courant rectiligne disposé dans leur voisinage, la face nord se portant à la gauche du courant conformément à la règle d'Ampère. Toutes ces propriétés, établies par AMPÈRE, montrent l'analogie profonde des solénoïdes et des aimants. Voici pourtant une différence : un barreau de fer approché d'un solénoïde ayant un solide noyau en bois serait aimanté et attiré par le solénoïde tout comme il le serait par un aimant ; mais si l'intérieur du solénoïde est creux, le

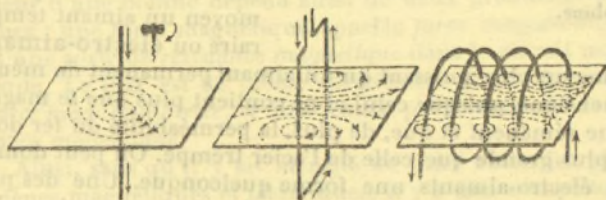


FIG. 25. — Champs magnétiques produits par un courant rectiligne, un cadre, une bobine.

barreau de fer s'enfonce dans la bobine jusqu'à ce que les actions exercées sur ses deux pôles par les deux pôles du solénoïde se fassent équilibre. Cette *aspiration magnétique* de noyaux de fer par les bobines est assez fréquemment appliquée en Électrotechnique ; nous en verrons un emploi pour le réglage automatique des lampes à arc.

Phénomènes d'aimantation produits par les champs magnétiques.

— Il résulte de ce qui précède qu'une substance magnétique placée dans le champ d'un solénoïde s'aimantera par influence ; les résultats seront plus marqués si on l'introduit à l'intérieur de la bobine, où le champ est plus intense et plus uniforme. Il se produira un pôle nord du côté du pôle nord du solénoïde, un pôle sud à l'opposé : cela résulte immédiatement du sens des lignes de force. Si le corps magnétique est en *acier trempé*, une partie du magnétisme ainsi produit est *rémanent*, c'est-à-dire que le barreau d'acier restera aimanté quand on le retirera de la bobine ou lorsqu'on coupera le courant. Ce procédé est le meilleur de ceux qu'on peut employer pour obtenir des aimants permanents : il

donne une aimantation régulière, quand les spires de la bobine magnétisante sont enroulées uniformément et que la tige à aimanter est toute entière à l'intérieur de la bobine⁵.



FIG. 26. — Aimantation d'un barreau d'acier placé à l'intérieur d'une bobine.

Si le noyau introduit dans la bobine est en fer doux, son aimantation disparaît presque entièrement quand on coupe le courant : on réalise par ce moyen un aimant temporaire ou électro-aimant, beaucoup plus puissant qu'un aimant permanent de mêmes dimensions, puisque celui-ci ne contient plus que le magnétisme rémanent et que, de plus, la perméabilité du fer doux est plus grande que celle de l'acier trempé. On peut donner aux électro-aimants une forme quelconque. Une des plus employées est celle en fer à cheval : sur les deux branches d'un barreau ainsi recourbé, on enroule un fil de cuivre isolé, de telle façon que le sens de l'enroulement soit continu ; il se forme à l'une des extrémités du noyau un pôle nord et, à l'autre extrémité, un pôle sud. Les électros sont généralement complétés par une armature en fer doux qui est attirée par les pôles quand le courant passe. Après l'arrêt du courant, l'armature conserve une certaine adhérence et ne retombe pas. Cette aimantation rémanente peut atteindre une valeur notable quand le fer n'est pas pur ; pour l'éviter, il faut empêcher le circuit magnétique de se fermer sur lui-même, résultat auquel on parvient en collant sur les surfaces polaires une feuille de papier qui constitue un entrefer. Les électro-aimants utilisés dans les applications sont formés de noyaux reliés, au moyen de vis, par une pièce de fer appelée culasse⁶ : les armatures sont formées par des lames de fer doux. On utilise les électros soit pour

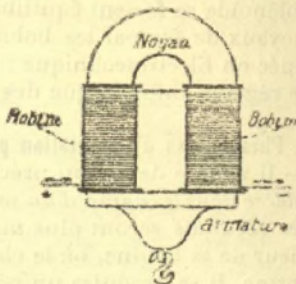


FIG. 27. — Électro-aimant.

produire des attractions ou des mouvements au moyen de leur armature, soit pour créer des champs magnétiques intenses ainsi que nous le verrons dans la suite.

Comparaison entre phénomènes électriques et phénomènes magnétiques. — La loi d'Ohm nous a montré que l'intensité d'un courant électrique est directement proportionnelle à la force électromotrice qui l'entretient, et inversement proportionnelle à la résistance du circuit. La valeur du flux à l'intérieur d'une bobine dépend aussi de deux grandeurs analogues : une force magnétique appelée *force magnétomotrice*, et une sorte de *résistance magnétique* dans le circuit magnétique. Le flux est de même *directement proportionnel à la force magnétomotrice, et inversement proportionnel à la résistance magnétique*.

Ainsi, sans qu'il y ait identité de fond entre les phénomènes magnétiques et électriques, il y a une complète analogie de forme entre les propriétés des circuits magnétiques et des circuits électriques. Les termes se correspondent de la façon suivante :

<i>Phénomènes magnétiques</i>	<i>Phénomènes électriques</i>
Circuit magnétique	Circuit électrique
Force magnétomotrice	Force électromotrice
Résistance magnétique	Résistance électrique
Flux d'induction	Flux d'électricité ou intensité.

Mais tandis que l'existence d'un courant entraîne nécessairement un dégagement de chaleur, le flux magnétique se maintient indéfiniment sans dégagement de chaleur, c'est-à-dire sans dissipation d'énergie. De plus, il n'y a rien en Électricité qui corresponde à l'aimant permanent : un tel aimant maintient un flux magnétique sans aucune spire magnétisante, c'est-à-dire sans force magnétomotrice.

Explication des phénomènes magnétiques. — AMPÈRE, se fondant sur la similitude des solénoïdes et des aimants, imagina une théorie du magnétisme permettant d'*expliquer par des courants tous les phénomènes magnétiques*. Il suppose que,

tout autour des molécules qui constituent un barreau d'acier, préexistent des courants dirigés, les uns dans un sens, les autres dans un sens opposé, de manière que leurs actions extérieures s'équilibrent quand l'acier n'est pas aimanté. Par l'aimantation, les courants moléculaires s'orientent dans le



FIG. 28. — Les aimants doivent leurs propriétés à des courants circulant autour de leurs molécules.

même sens et forment un *faisceau de solénoïdes élémentaires* placés les uns à côté des autres et présentant chacun deux pôles contraires situés vers les extrémités du barreau ; ces solénoïdes, en raison de leurs actions mutuelles, s'épanouissent au voisinage des extrémités du barreau, de sorte que *les pôles de l'aimant se trouvent à une certaine distance des extrémités*. Si l'on regarde en face le pôle sud d'un aimant, le courant du solénoïde auquel l'aimant est assimilable paraît circuler dans le sens des aiguilles d'une montre. Dans le *fer doux*,

l'orientation des courants moléculaires cesse avec l'action magnétisante extérieure, et le *fer doux* perd instantanément ses propriétés magnétiques.

Cette conception de la *constitution d'un aimant comme système de courants parallèles* permet de ramener à des actions électrodynamiques tous les phénomènes électromagnétiques qui paraissent, au premier abord, complètement étrangers à l'Électricité⁷.

Jusqu'à présent, nous avons constaté que chaque action produite par un courant et dépendant de la direction de ce courant peut, en sens inverse, donner naissance à un courant électrique. On peut penser que les phénomènes étudiés au cours de ces premières conférences sont capables de produire des courants électriques ; or, c'est précisément ce que nous allons voir maintenant. Un courant aimante le fer, or l'aimantation du fer peut produire un courant électrique. Les aimants sont mis en mouvement par des courants, or le déplacement de ces aimants donne naissance à un courant. Un courant mobile est déplacé par un courant galvanique fixe, or le simple déplacement d'un courant galvanique donne naissance à des courants. En un mot, *tous les phénomènes dont nous avons fait connaissance sont réversibles ;*

les effets auxquels ils donnent naissance ont été groupés sous le nom de **phénomènes d'induction**. Ce sont eux que nous devons maintenant étudier.

Les phénomènes d'induction. — Les phénomènes d'induction auxquels on doit le développement prodigieux de l'industrie électrique contemporaine ont été découverts par le savant anglais FARADAY dont la hardiesse de conception égalait l'habileté expérimentale et dont le génie, non content d'explorer presque complètement les lois fondamentales de ces phénomènes, lui permit d'émettre les idées essentielles qui dominent dans les hypothèses des physiciens modernes. Par des expériences mémorables, Faraday, en 1831, s'aperçut que *si l'on déplace un circuit fermé dans un champ magnétique, ce circuit est parcouru par un courant, auquel il donna le nom de courant induit ; de plus, la durée de ce courant est égale à celle du déplacement imprimé au circuit.*

Que se passe-t-il quand on déplace un circuit fermé, une spire de cuivre par exemple ? On modifie le flux de force magnétique qui le traverse. C'est cette *variation du flux d'induction* qui est la cause de l'apparition du courant induit. D'une manière générale, on peut dire : *Toutes les fois qu'on modifie le flux de force magnétique traversant un circuit fermé, il naît dans ce circuit un courant induit qui a la même durée que la variation du flux de force magnétique.* Le circuit fermé, ou plus généralement le conducteur dans lequel le courant induit prend naissance, s'appelle **conducteur induit** ou simplement **induit** : le système qui produit le flux s'appelle le système **inducteur** ou simplement **l'inducteur**.

On fait varier le flux inducteur qui traverse un circuit, de bien des façons ; en approchant ou en éloignant du circuit un aimant ou une bobine produisant le champ magnétique ; en établissant ou en supprimant le courant dans un circuit voisin ; en diminuant ou en augmentant la résistance magnétique du milieu. Dans tous les cas, si le flux inducteur augmente, le flux induit est de sens contraire ; si le flux inducteur diminue, le flux induit est de même sens ; on peut donc dire que *le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la cause qui le produit (Loi de Lenz⁸)*. C'est là, d'ailleurs, une loi très générale dans la Nature ; celle-ci

semble toujours résister le plus possible aux déformations que l'on veut lui faire subir : c'est ainsi que lorsqu'on comprime brusquement de l'air, cet air s'échauffe, tendant de cette façon à augmenter de volume, c'est-à-dire à résister à la compression qu'on lui fait subir ; de même, si l'on veut le détendre brusquement, il se refroidit pour une raison analogue. Il est commode, pour trouver le sens du courant induit, d'appliquer la **règle du tire-bouchon** : on place un tire-bouchon dans le sens des lignes de force qui traversent l'induit ; si le flux diminue, on tourne le tire-bouchon dans le sens des aiguilles d'une montre, ce qui le fait progresser comme des lignes de force : si le flux augmente, on

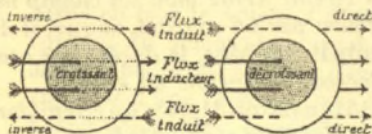


FIG. 29. — Sens du flux induit, suivant que le flux inducteur est croissant ou décroissant.

tourne dans le sens inverse : dans les deux cas, le sens du courant induit est celui dans lequel on a tourné le tire-bouchon.

Les lois de l'induction sont en accord avec l'Électromagnétisme. Le courant induit renferme une certaine énergie ; il est capable de faire mouvoir une aiguille aimantée, d'échauffer un fil, de produire des actions chimiques. Cette énergie ne peut pas être produite gratuitement : elle est la transformation d'une énergie équivalente ; l'opérateur a été obligé de dépenser du travail mécanique, c'est ce travail mécanique qui se retrouve, transformé en énergie électrique, dans le courant induit. L'origine de ce travail se trouve dans les forces électromagnétiques exercées entre le champ magnétique et le circuit, forces qui sont répulsives.

Soient : R la résistance de l'induit, I l'intensité du courant, le produit RI est la **force électromotrice d'induction** ; elle s'exprime en volts. On démontre que la **force électromotrice moyenne du courant induit est égale au quotient de la**

variation de flux par le temps mesuré en secondes et par le nombre 100 000 000 (10⁸). Il en résulte que, pour obtenir de grandes forces électromotrices d'induction, il faut réaliser très rapidement de grandes variations de flux. Or les variations de flux sont grandes : quand les ampère-tours inducteurs sont nombreux; quand le circuit magnétique contient du fer; quand les spires de l'induit sont nombreuses. Les variations de flux sont rapides quand les mouvements relatifs de l'inducteur et de l'induit sont rapides. Nous prévoyons donc que les machines fondées sur l'induction seront formées de bobines inductrices et induites à nombreux tours de fils et à noyaux de fer; de plus, les organes de ces machines devront être animés d'un mouvement très rapide.

Phénomènes de self-induction. — Une pile et son circuit intermédiaire constituent un *circuit conducteur fermé* : par conséquent, au moment de la rupture ou de la fermeture de ce circuit, il doit s'y produire des phénomènes d'induction. FARADAY a montré qu'en effet, au moment de l'établissement du courant dans le circuit, il se développe un courant induit ou *extra-courant de fermeture* de sens contraire au courant lui-même : cet extra-courant diminue l'intensité du courant principal et s'oppose à son établissement. De même, au moment de la rupture du circuit, il se développe un courant induit ou *extra-courant de rupture* de même sens que le courant lui-même : l'extra-courant de rupture augmente l'intensité du courant principal. On peut comparer les phénomènes de self-induction à ceux qui se produisent dans une conduite d'eau : quand on ouvre le robinet, le liquide ne prend pas tout de suite sa vitesse d'écoulement définitive, et inversement, si l'on ferme brusquement le robinet, le liquide qui est à une certaine distance de celui-ci ne s'arrête pas brusquement, il se produit un choc particulier appelé *coup de bélier*⁹. Quand on veut éviter la self-induction dans une bobine de fil, un artifice très simple consiste à replier ce fil en deux, et à enrouler sur la bobine le fil double : les spires sont parcourues deux à deux, par des courants de sens contraire, et le flux engendré est nul.

Phénomènes d'induction à l'intérieur des masses métalliques. — Les courants induits ne se produisent pas seulement dans les conducteurs linéaires, mais aussi dans toute masse métallique traversée par un flux magnétique variable. Que la variation de flux provienne d'un mouvement de la masse métallique ou d'un déplacement du champ magnétique, des *courants induits* apparaissent lesquels s'opposent au mouvement qui leur a donné naissance. Ces courants sont suffisants pour arrêter le mouvement d'un corps qui se déplace entre les pôles d'un électro-aimant. On leur a donné le nom de **courants de Foucault**, du nom du physicien français qui les a étudiés. Ils sont capables de prendre une grande intensité, parce qu'ils ne rencontrent sur leur chemin qu'une faible résistance et donnent naissance à un dégagement de chaleur notable. Ces courants sont une cause de *fuite d'énergie*, aussi, dans les induits de dynamos, emploie-t-on, non des noyaux pleins, mais des faisceaux de fils de fer ou des piles de plaques de tôle séparées par une couche de vernis.

Importance des phénomènes d'induction. — Les phénomènes d'induction revêtent, en Électricité théorique aussi bien qu'en Électricité pratique, une importance considérable. La connaissance de la loi fondamentale de l'induction, loi déduite d'un principe universel, permet d'aborder tous les problèmes qui se posent aujourd'hui à l'ingénieur électricien.

FARADAY, le génial savant à qui nous devons la connaissance de l'induction, a le premier pensé que la source des manifestations électriques est moins dans les conducteurs que dans le milieu diélectrique qui les sépare. Plus tard, MAXWELL fit voir qu'en chaque point du champ magnétique, il y a de l'énergie localisée sous une forme telle que le déplacement d'un fil conducteur placé en ce point ne peut se faire sans dépense de travail. Plus récemment, M. POYN-
TING a montré que le milieu qui entoure un conducteur parcouru par un courant électrique peut être considéré comme le siège principal des actions. La conception de Faraday a porté des fruits magnifiques, puisqu'elle a amené HERTZ à ses belles expériences sur la propagation des phé-

nomènes d'induction et à la découverte des oscillations électriques. En partant de la connaissance des phénomènes d'induction, on pourrait remonter à ceux produits par le courant électrique, et reconstruire les beaux chapitres de l'Électromagnétisme et de l'Électrodynamique. En somme, *l'induction peut être considérée comme le phénomène électrique fondamental*¹⁰.

D'autre part, l'industrie contemporaine est née de la découverte des phénomènes d'induction. Nous avons déjà vu qu'avec les machines à influence, les piles et les accumulateurs, il ne peut être question de véritable installation industrielle. Ce sont des courants d'induction que fournissent les usines électriques en transformant l'énergie mécanique en énergie électrique, et l'on comprendra l'essor qu'ont donné à l'industrie électrique les *machines d'induction*, si l'on considère que l'énergie mécanique est celle que nous obtenons au meilleur compte et que sa transformation se fait presque intégralement en énergie électrique. Enfin, non seulement les phénomènes d'induction fournissent industriellement l'énergie électrique, mais encore ils ont changé les conditions dans lesquelles se présente l'énergie électrique, en nous faisant connaître les *courants alternatifs*.

Les machines d'induction. — Dans ces machines, on déplace des circuits dans un champ magnétique intense : *les variations de flux produisent des courants*. Les premiers générateurs mécaniques d'électricité se composaient d'une double bobine recouverte d'un long fil métallique et qu'une manivelle faisait tourner devant les deux branches d'un grand aimant en fer à cheval fixe. Puis, pour développer des courants intenses, on édifia des appareils comportant un grand nombre d'aimants, disposés sur une ou plusieurs rangées et suivant les rayons d'une roue. On eut ainsi la **magnéto-électrique** à aimants permanents qui fut employée pendant bien des années pour alimenter les lampes électriques des phares. Plus tard, on obtint des champs inducteurs plus intenses à l'aide de puissants électro-aimants ; la machine devint alors une **dynamo-électrique** ou simplement **dynamo**.

Les mouvements employés dans les machines d'induction

étant des mouvements circulaires, le flux qui traverse les pièces mobiles varie dans un sens, puis dans l'autre, il en résulte que les courants sont alternatifs. A l'aide de dispositifs convenables, on peut redresser ces courants et obtenir des courants continus, toujours de même sens. Les courants alternatifs sont très employés surtout à l'état de courants triphasés; les courants continus sont les seuls utilisables pour l'électrolyse; les uns et les autres peuvent servir pour l'éclairage et le transport de l'énergie.

Les magnétos, toujours de faible puissance, ne sont pas employées dans l'industrie : on les utilise pour certains appels téléphoniques et sur les automobiles pour actionner la bobine dont l'étincelle allume le mélange combustible. Les dynamos ont, au contraire, une importance considérable et nous leur consacrerons la seconde partie de cette conférence. Il y a lieu d'examiner les dynamos à courants continus et les dynamos à courants alternatifs.

Les dynamos à courants continus. — Une dynamo à courants continus comprend essentiellement trois parties : l'*inducteur* qui consiste généralement en un puissant électro-aimant et fournit le champ magnétique; l'*induit* qui tourne très rapidement autour de son axe entre les pôles de l'électro et qui porte les fils subissant l'induction; le *collecteur* qui recueille la totalité des courants développés dans chacun des éléments de l'induit et les transmet au circuit extérieur par des balais métalliques frottant sur la périphérie de ce collecteur.

L'**électro-aimant inducteur** comprend une partie magnétique en fonte ou en acier coulé, composée d'une *culasse*, de *noyaux* sur lesquels sont enfilées les *bobines magnétisantes*, et de *pièces polaires* dont l'épanouissement est établi de façon à permettre la rotation de l'induit et à assurer la distribution la plus avantageuse du champ magnétique. Les types les plus courants sont les types *Gramme*, *Edison* et *Manchester*. L'**induit** est muni d'une *armature* en fer doux servant à canaliser le flux; cette armature est faite non d'un seul bloc qui serait soumis aux courants de Foucault et s'échaufferait considérablement, mais bien de disques de tôle découpés à l'emporte-pièce et

séparés par du papier ou du vernis. Les induits répondent à plusieurs types (induit en anneau de GRAMME ; induit en tambour de SIEMENS ; induit en disque de DESROZIERS ; induit sphérique de THOMSON-HOUSTON). Nous prendrons comme exemple l'induit en anneau de Gramme le premier qui,

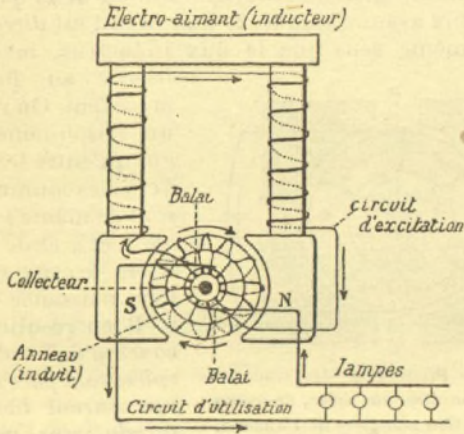


FIG. 30. — Schéma de dynamo Gramme.

grâce à un enroulement spécial du fil induit, permet de recueillir du courant continu⁴¹. Sur cette armature est enroulé le fil induit, toujours dans le même sens, et de façon à constituer un circuit entièrement fermé sur lui-même.

Que va-t-il se passer dans ce circuit fermé quand on le mettra en rotation entre les pôles de l'électro-aimant ? Considérons la figure 31 où les lignes interrompues représentent la distribution générale du champ magnétique. Le flux engendré par l'inducteur se divise en deux courants égaux, canalisés dans l'armature de fer de l'induit. Supposons que l'induit tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Entre les positions 1 et 2 les spires sont traversées par un flux qui diminue, donc le flux induit est direct, c'est-à-dire de même sens que le flux inducteur. Connaissant le sens du flux,

la règle du tire-bouchon permet de trouver facilement le sens du courant dans la spire. Entre les positions 2 et 3, le flux *augmente*, les induits sont *inverses*, mais comme le flux pénètre dans les spires par l'autre face, ils sont de *même sens* que celui des spires précédentes. En 3, le flux est maximum, mais il redevient nul en 4, et dans l'intervalle, le flux ayant *diminué*, le flux induit est *direct*, c'est-à-dire de même sens que le flux inducteur, mais de sens

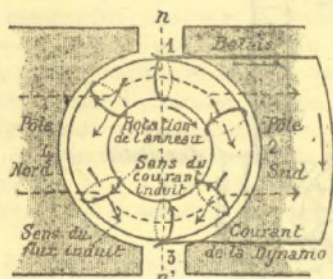


FIG. 31. — Production des courants d'induction dans une spire, au cours d'une rotation complète de l'anneau.

inverse au flux induit précédent. On verrait par un raisonnement analogue qu'entre les positions 4 et 1, les courants induits sont de même sens qu'entre 3 et 4 et de sens contraire à ceux qui prennent naissance entre 1 et 2. Il en résulte que, au cours d'une rotation, les spires sont parcourues par un courant induit d'un certain sens pendant la première moitié de la ro-

tation et par un courant de sens inverse dans la deuxième moitié. La ligne neutre nn' partage l'anneau en deux moitiés dans chacune desquelles sont engendrés des courants opposés et égaux.

La force électromotrice induite totale dans les spires de droite est égale à la force électromotrice induite totale dans les spires de gauche. Or, toutes les spires, ou plutôt toutes les bobines d'un même côté, peuvent être assimilées à un ensemble de piles électriques de forces électromotrices différentes et réunies *en série*, c'est-à-dire en joignant le pôle positif de l'une au pôle négatif de la suivante. On sait que si l'on dispose deux séries de piles et que l'on réunisse les deux pôles positifs extrêmes à l'extrémité d'un fil conducteur et les deux pôles négatifs extrêmes à l'autre extrémité, le fil conducteur est parcouru par un courant dont l'intensité est égale à la somme des intensités des deux séries. Il en est de même dans la dynamo. On dispose en 1

et en 3 des **balais** conducteurs frottant sur les spires qui passent dans la ligne neutre ; les courants induits de droite et de gauche s'ajoutent dans un conducteur extérieur qui réunit les balais. En réalité, les balais, formés le plus souvent de charbon conducteur, ne frottent pas sur les spires elles-mêmes, mais bien sur un ensemble de lames de cuivre isolées de l'axe et les unes des autres, et formant par leur réunion un cylindre concentrique à l'axe (fig. 32) ; l'induit compte autant de bobines qu'il y a de lames à cet organe dit **collecteur**, et à chaque lame on soude l'extrémité d'une des bobines et le commencement de la suivante. Ce sont les lames reliées aux bobines placées sur la ligne neutre qui sont en contact avec les balais.

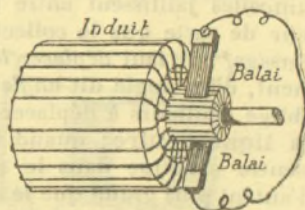


FIG. 32. — Collecteur d'une dynamo à courant continu.

La force électromotrice d'une dynamo à courants continus est proportionnelle au nombre des spires, au nombre de tours de la machine et au flux utile qui traverse l'induit. Avec un inducteur engendrant un flux de 400 000 unités, un induit comptant 1 374 tours de spire et tournant à raison de 1 200 tours par minute, la force électromotrice est de 110 volts⁴². On comprend la nécessité d'électro-aimants puissants et des vitesses considérables. Pour réaliser de grandes vitesses on serait amené à donner à l'anneau des dimensions exagérées : on tourne la difficulté en produisant le champ magnétique, non avec deux pôles, mais avec 4, 6, 8, ... pôles alternés ; pour des anneaux de 4 m. 50 de diamètre, le nombre des pôles peut aller jusqu'à 22. Dans ces machines multipolaires, quand une spire passe d'un pôle nord au pôle sud suivant, la variation de flux est la même que pour un demi-tour de l'anneau dans la machine à deux pôles. Il faut autant de balais que de pôles ; tous les balais d'ordre impair sont reliés ensemble et forment l'un des pôles de la machine ; ceux d'ordre pair, également reliés ensemble constituent l'autre pôle. Parmi les machines multipolaires les plus employées dans les stations centrales, citons : les

machines GRAMME à 10 pôles fournissant 45 ampères sous 110 volts ; les *machines* SIEMENS dont un type fonctionnant à Berlin fournit 2 000 ampères sous 140 volts ; un autre type qui a figuré à l'Exposition de 1900 à Paris possède 16 pôles et fournit 2 780 ampères sous 550 volts avec une vitesse ne dépassant pas 200 tours à la minute.

Nous avons supposé les balais posés suivant la ligne neutre c'est-à-dire suivant le diamètre de l'anneau qui joint les régions de flux maximum. Or, quand il en est ainsi, des étincelles jaillissent entre les balais et les lames du collecteur de sorte que le collecteur serait rapidement mis hors d'usage¹³. Il faut *déplacer les balais* dans le sens du mouvement, d'un angle dit *angle de calage*. Un autre phénomène oblige d'ailleurs à déplacer les balais, c'est le **décalage de la ligne neutre** ; quand la dynamo fonctionne, la ligne neutre s'incline dans le sens de la rotation d'un angle d'autant plus grand que le courant est plus intense, ce qui entraîne à déplacer les balais du même angle pour obtenir entre ces balais le voltage maximum que la dynamo est susceptible de fournir.

Le champ magnétique, avons-nous dit, est obtenu au moyen d'électro-aimants ; or, ceux-ci nécessitent un courant. Le premier moyen qui se présente à l'esprit est d'employer un courant distinct (**excitation séparée**) fourni par des accumulateurs ou par une magnéto. Bientôt, on s'est rendu compte qu'il suffit d'envoyer dans les bobines magnétisantes une partie du courant induit. Le noyau de l'électro-aimant inducteur possède toujours une aimantation faible due au magnétisme rémanent ou produite par le champ terrestre ; cette faible aimantation suffit pour donner naissance, dès que la rotation commence, à un courant induit qui développe lui-même dans l'électro-aimant une aimantation de plus en plus grande, jusqu'au moment où la machine atteint son régime régulier. Toutes les dynamos actuelles sont *auto-excitatrices*, mais l'excitation peut se faire de plusieurs manières. Si les électros sont actionnés par la *totalité* du courant induit, la machine est dite **excitée en série** (le fil est alors gros et court) et l'on a une **dynamo-série** ; si une *fraction* seulement du courant induit passe dans les électros, la machine est dite **excitée**

en dérivation (le fil est long et fin), et l'on a une **dynamo-shunt** ; enfin on peut réaliser une *excitation mixte*, mi-série mi-dérivation, en ajoutant à l'enroulement dérivé quelques tours de gros fil en série sur le circuit extérieur, c'est l'**excitation composée**, et l'on a une **dynamo-compound**. Les dynamos-shunt sont les plus employées dans les stations centrales.

Le **rendement industriel d'une dynamo** est le rapport entre le travail électrique qu'elle fournit à ses bornes et le

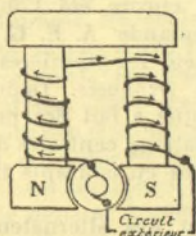


FIG. 33. — Dynamo excitée en série (dynamo - série).

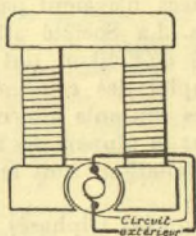


FIG. 34. — Dynamo excitée en dérivation (dynamo - shunt).

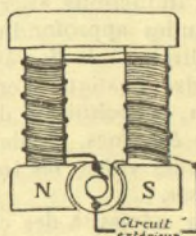


FIG. 35. — Excitation composée (dynamo - compound).

travail mécanique qu'elle absorbe. Ce rendement est évidemment inférieur à l'unité, car il se produit des pertes d'énergie dues à l'hystérésis dans l'induit, à l'échauffement du circuit induit et du circuit inducteur, à la production des courants de Foucault dans l'armature, aux frottements inévitables. Ces pertes ne dépassent pas 20 p. 100, de sorte que le rendement, pour une bonne génératrice, n'est pas inférieur à 80 p. 100 ; on construit des dynamos pour lesquelles le rendement atteint 95 p. 100. *La dynamo est donc un excellent transformateur d'énergie*.

Parmi les dynamos bipolaires les plus répandues, nous citerons les *machines GRAMME* dont le type commun fournit 40 ampères sous 100 volts et fonctionne à 1 400 tours par minute ; les *machines SIEMENS*, dont certaines sont très répandues en Angleterre et fournissent 450 ampères sous 250 volts à raison de 300 tours par minute ; les *machines*

EDISON convenant particulièrement à l'éclairage à incandescence et dont le rendement atteint 96 p. 100 ; on en construit qui donnent 1 250 ampères sous 640 volts ; les machines de la Société alsacienne ont aussi un rendement de 95 p. 100¹⁴.

Les dynamos à courants alternatifs ou alternateurs. — Pendant longtemps, et d'une manière très générale, les *dynamos à courants continus* furent les seules employées dans l'industrie. Les courants alternatifs, bien que naissant directement des inductions alternées, n'avaient pas encore été l'objet d'études approfondies. La Société allemande A. E. G. à Berlin¹⁵ et la Société d'Oerlikon ont été les premières à rendre pratique l'emploi des *courants triphasés*. Depuis 1891, la technique des courants alternatifs a fait des progrès énormes, et, dans la plupart des stations centrales des grandes villes, les installations sont faites en courants triphasés.

La nécessité des courants triphasés et des alternateurs s'est imposée le jour où l'on a cherché à transporter et à distribuer économiquement l'énergie électrique. Ce transport est d'autant moins coûteux que l'intensité du courant est plus faible et la tension plus élevée. Or, s'il est impossible de réaliser pratiquement des dynamos continues à haute tension, on obtient très facilement avec les alternateurs des tensions de 10 000 volts et même davantage. A cette utilité, les alternateurs joignent une grande simplicité de construction. *L'alternateur est, en réalité, la forme la plus simple et la plus naturelle de la dynamo* : chaque bobine au cours d'une rotation est parcourue par deux courants alternatifs, et GRAMME dut imaginer son enroulement en anneau pour obtenir un courant continu. Si donc on fait tourner un certain nombre de bobines de fil devant une série de pôles alternés, il se produit dans les bobines des impulsions de courants alternativement de sens opposé ; il suffira de réunir convenablement ces bobines entre elles, sans qu'on soit obligé de faire les connexions d'une manière absolument définie, pour recueillir un ou plusieurs courants alternatifs. Enfin les alternateurs possèdent la même puissance que les dynamos continues et leur rendement atteint aussi 95 p. 100.

Ce qui précède nous fait entrevoir de quoi se compose une dynamo à courants alternatifs : le *collecteur* devient *inutile* et c'est là un gros avantage. Le courant est recueilli par des frotteurs métalliques appuyant sur les bagues reliées à l'induit qui est tantôt à l'intérieur, tantôt à l'extérieur de l'inducteur, fixe dans certaines machines, mobile dans d'autres. Il importe peu, en effet, au point de vue de l'induction produite, que les bobines tournent dans un champ magnétique fixe ou que le champ magnétique tourne par rapport à l'induit immobile¹⁶.

La figure 36 représente un alternateur à *anneau de Gramme*. Au centre de la figure on voit, disposées comme les rayons d'une roue, des bobines présentant un noyau de fer doux. Les enroulements sont tels que, si un courant circule dans les bobines, elles constituent des électroaimants dont deux pôles consécutifs sont de noms contraires. L'ensemble de ces bobines constitue l'appareil *inducteur*, il est mobile et fixé à un arbre actionné directement par le moteur. La machine devant produire des courants alternatifs ne peut utiliser ces courants pour son excitation ; aussi a-t-on recours à du courant continu produit par une petite dynamo dite *excitatrice* qui, souvent, est montée sur le même axe de rotation que l'alternateur. Le courant exciteur arrive à deux bagues isolées, fixées sur l'arbre et communiquant chacune avec l'une des extrémités de l'enroulement inducteur. L'*induit* est constitué par une couronne en fonte douce entourant l'inducteur et sur laquelle sont enroulées les bobines induites formant anneau ; elles sont en nombre égal à celui des pôles inducteurs. L'enroulement de deux bobines consécutives est de sens inverse, et les extrémités de l'enroulement induit aboutissent aux *bornes* de la machine.

Le fonctionnement est facile à comprendre. Supposons chaque pôle inducteur en face d'une bobine induite ; le flux magnétique va d'un pôle nord à un pôle sud à travers la couronne de fonte. Faisons tourner l'inducteur dans le sens des aiguilles d'une montre ; le flux inducteur se déplace et il est coupé par les bobines ; il y a donc dans celles-ci production d'une force électromotrice induite. Deux bobines consécutives sont traversées en sens inverse par le flux, mais

comme ces bobines ont leurs enroulements contraires, les courants induits y sont de même sens : les bobines sont assemblées *en série* et les forces électromotrices induites s'ajoutent dans le circuit induit. Quand le pôle qui était en face de la bobine 1 se trouve en face de la bobine 2, le sens du courant change dans toutes les bobines ; quand il passe en face de la bobine 3, le courant change de sens à nouveau et reprend les mêmes valeurs qu'à partir de la bobine 1. Le

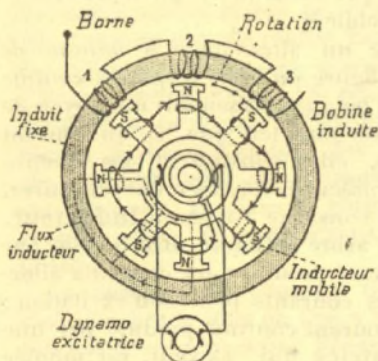


FIG. 36. — Alternateur à anneau de Gramme.

circuit extérieur recueille donc bien un *courant alternatif*, il est *périodique* car son intensité varie et repasse par les mêmes valeurs au bout d'intervalles de temps égaux. La *période* est le temps mis par un pôle inducteur pour aller de la bobine 1 à la bobine 3 ; le nombre de périodes par seconde est la *fréquence* du courant. L'alternateur représenté par la figure ayant 8 pôles, il y a 4 périodes par tour ; si l'inducteur

fait 20 tours par seconde, la fréquence sera 4×20 ou 80. Quand les périodes sont peu nombreuses, 150 à 200 à la seconde, le courant est dit à **basse fréquence** ; quand les périodes sont très nombreuses, 150 000 à 200 000 et plus, le courant est appelé **courant de haute fréquence**. Nous aurons à l'étudier au cours de ces conférences.

Il existe de nombreux modèles d'alternateurs. Parmi les **alternateurs monophasés**, c'est-à-dire ceux chez lesquels le nombre des bobines est égal au nombre des pôles inducteurs nous citerons : les *alternateurs GRAMME* pouvant atteindre 1 000 volts et servant à l'éclairage à arc ; les *alternateurs ZEPERNOWSKY* fournissant jusqu'à 5 000 volts avec 42 périodes par seconde ; les *alternateurs PATIN* dont le voltage est de 2 000 volts et servent à l'éclairage public à arc dans un assez

grand nombre de villes de France ; les *alternateurs à induit mobile*, comme ceux de SIEMENS, de FERRANTI, de WESTINGHOUSE, de LABOUR qui donne 2000 volts et 10 ampères et convient pour l'alimentation des transformateurs ; enfin les *alternateurs à fer tournant* chez lesquels l'inducteur et l'induit ne forment qu'un seul bloc immobile et où l'induction résulte des variations de résistance magnétique du noyau.

Représentation graphique des courants oscillatoires. — Avant d'étudier la production des courants triphasés, qui ont acquis dans l'industrie moderne une si considérable importance, nous préciserons par une représentation graphique les notions générales sur les courants oscillatoires.

Un *courant oscillatoire* est un courant qui varie d'une façon continue sans jamais atteindre l'état permanent. Si l'on convient de porter le temps sur un axe horizontal et l'intensité sur un axe vertical, la figure 2 représentera un *courant oscillatoire*, de même que la figure 1 représente un *courant continu*. Le *courant périodique*, dont l'intensité varie de la même façon et repasse par les mêmes valeurs au bout

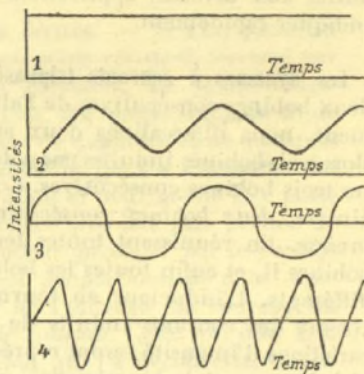


FIG. 37. — Représentation graphique des courants.

1. Courant continu. — 2. Courant périodique. — 3. Courant alternatif à basse fréquence. — 4. Courant alternatif à fréquence élevée.

d'intervalles de temps égaux, se trouve représenté par la figure 3 ; la partie de la courbe comprise entre deux points semblablement placés est la *période*. Si cette période comprend deux demi-périodes égales, mais de valeurs contraires, le *courant est alternatif*. Le plus simple des courants alternatifs est le *courant sinusoïdal* (figure 3). On entend par **courants polyphasés** des courants périodiques, alternatifs, composés de périodes qui courent les unes après les autres sans

jamais s'atteindre ; la deuxième période commence un certain temps après la première, et l'on appelle *différence de phase* ou *décalage* la fraction de période qui sépare deux points symétriques de deux périodes successives. La figure 45 est celle de deux courants diphasés décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de période. Les courants triphasés sont des courants polyphasés composés de trois courants décalés les uns par rapport aux autres d'un sixième de période.

Comment obtient-on ces courants polyphasés, et en particulier les courants triphasés qui se prêtent mieux que les autres aux diverses applications ? C'est ce que nous allons indiquer rapidement.

Les dynamos à courants triphasés. — Supposons que, entre deux bobines consécutives de l'alternateur étudié précédemment, nous intercalions deux autres bobines : nous aurons alors trois bobines induites par pôle inducteur. Soient I, II, III, ces trois bobines consécutives. Comme pour l'alternateur ordinaire, deux bobines consécutives sont enroulées en sens inverse. En réunissant toutes les bobines I, puis toutes les bobines II, et enfin toutes les bobines III, on a trois circuits différents. L'inducteur en tournant produira dans chaque circuit des courants induits de même période et dont les variations d'intensité seront représentées par des graphiques identiques ; mais les périodes ne commenceront pas en même temps dans les trois circuits. La différence de phase est ici $\frac{1}{3}$ de période ; comme on a trois courants présentant une différence de phase, on les appelle **courants triphasés** et la machine qui les produit est un **alternateur triphasé**.

Il semble au premier abord que la transmission des courants triphasés doive exiger trois lignes, c'est-à-dire six fils ; il n'en est rien, car l'on peut transporter avec *trois fils seulement* les courants triphasés. En effet, l'un des courants est inverse des deux autres, et l'intensité de ce courant est la somme des intensités des deux autres ; il en résulte que le courant qui circule dans l'un des fils peut être considéré comme le courant de retour des deux voisins. Dans la pratique, on adopte comme dispositifs soit le *montage en étoile*, soit le *montage en triangle*.

Les principales dynamos à courants triphasés sont cons-

truites aux ateliers de Brown-Boveri et d'Œrlikon (Suisse), à ceux de la Société A. E. G. à Berlin ; et à Pittsburg (États-Unis) ; en France, par la Société Schneider du Creusot, la Compagnie de Fives-Lille, la Société Gramme¹⁷, etc.

Ces trois premières conférences nous ont montré *comment on obtient l'électricité*, depuis les procédés les plus primitifs jusqu'aux dynamos actuelles. Il nous reste à voir, pour terminer cette conférence, quelques *propriétés générales du courant électrique* dont nous rencontrerons plus loin les applications, et à nous rendre compte de la *façon dont on peut mesurer les différents courants* que nous connaissons.

La Loi de Joule et les courants dérivés. — Si l'on place un thermomètre dans l'axe d'un solénoïde résistant traversé par un courant, on constate une élévation de température. Celle-ci est plus manifeste si l'on fait passer dans un fil de ferro-nickel de 2/10 de millimètre de diamètre et de quelques centimètres de longueur, le courant de 3 à 4 éléments au bichromate : le fil devient brûlant et peut même être porté à l'incandescence. Des expériences précises ont permis de constater que *la quantité de chaleur produite par le passage d'un courant dans un circuit est proportionnelle à la résistance R du circuit, au carré I^2 de l'intensité du courant, au temps t pendant lequel passe le courant*. Cette loi, dite **Loi de Joule** du nom du physicien qui l'a découverte, a reçu des applications fort importantes que nous aurons à étudier dans une conférence spéciale.

Il arrive souvent qu'un courant parvenu en un certain point se bifurque pour suivre deux chemins différents qui se rejoignent ensuite ; tel un cours d'eau à courant rapide qui abandonne une partie de son eau à un petit canal spécial où l'on utilisera au moyen de roues à aubes ou à turbines l'énergie potentielle qu'elle recèle. La canalisation spéciale ainsi construite et utilisée est une **dérivation**. Les lois qui régissent ce partage sont très simples : 1° *La somme des intensités dans les deux branches dérivées est égale à l'intensité dans la branche principale* ; 2° *les intensités dans les branches dérivées sont en raison inverse des résistances de ces branches (Lois de Kirchoff¹⁸)*. Il en résulte que si la résistance de l'une des branches est 9 fois plus grande que la résistance

de l'autre, il passera dans la première un courant dont l'intensité sera $\frac{1}{9}$ de l'intensité du courant qui traverse la deuxième, soit $\frac{1}{10}$ de l'intensité totale. On pratique une dérivation lorsque l'on veut n'utiliser qu'une partie déterminée du courant. Ce cas se présente souvent dans la pratique.

Souvent aussi, dans l'industrie électrique, on a besoin de *faire varier l'intensité d'un courant*. Pour cela, on intercale dans le circuit des résistances appropriées. L'appareil qui sert à cet usage est un **rhéostat**. Les résistances sont constituées par des fils de maillechort, de ferro-nickel ou d'autres alliages de résistivité assez grande, enroulés en spirale et dont chaque extrémité est reliée à une borne métallique ou *contact*. A l'aide d'une manette, on peut mettre dans le circuit des résistances variables, ce qui modifie l'intensité du courant conformément à la loi d'Ohm dont il a été question antérieurement.

Les principes exposés jusqu'ici constituent les lois fondamentales du courant galvanique et nous connaissons maintenant complètement les relations entre l'*intensité*, la *résistance*, la *force électromotrice*. C'est au moyen de ces lois que l'on arrive à évaluer les différents facteurs qui interviennent dans les courants. Nous allons maintenant indiquer *comment on mesure l'intensité*, la *force électromotrice*, la *résistance*, la *puissance* et *comment on peut enregistrer automatiquement la quantité d'électricité* dépensée en un temps donné.

Mesure des courants continus. — Trois grandeurs sont à considérer dans un courant galvanique : la *force électromotrice*, la *résistance* et l'*intensité*. Ces grandeurs se mesurent à l'aide d'appareils spéciaux.

Pour mesurer l'**intensité** des courants, on se sert de **galvanomètres** dans lesquels le courant dévie un aimant ou une bobine (*galvanomètres électromagnétiques*), ou chauffe un fil qui s'allonge et dont on amplifie la dilatation (*galvanomètres thermiques*). Les galvanomètres électromagnétiques reposent sur les actions mutuelles entre courants et aimants ; l'expérience d'Oerstedt nous a montré

qu'un courant rectiligne sollicite l'aiguille à se mettre en croix avec lui parce que les lignes de force circulaires qu'il engendre se trouvent dans des plans perpendiculaires au fil conducteur. La force qui agit sur l'aiguille est d'autant plus grande que le champ magnétique est plus intense, par suite elle augmente avec l'intensité du courant. Dans certains galvanomètres, *l'aimant est mobile* et la déviation est indiquée soit par le déplacement d'une aiguille devant un cadran (NOBILI), soit par une méthode optique¹⁹ (THOMSON); généralement les constructeurs préfèrent rendre *l'aimant fixe* et le *courant mobile* en utilisant la rotation d'un cadre parcouru par le courant à mesurer dans un champ magnétique fixe; certains de ces *galvanomètres à cadre mobile* sont capables de déceler des courants de un dix-millionième d'ampère. Pour rendre la lecture plus rapide, on amortit les oscillations de l'aiguille en utilisant les courants de Foucault; ces galvanomètres sont dits *apériodiques* (DEPREZ et d'ARSONVAL).

Les **ampèremètres** sont des galvanomètres industriels gradués par comparaison qui donnent, par une simple lecture, la valeur en *ampères* de l'**intensité** d'un courant. Ils sont tous basés sur les actions produites par un champ créé par le courant sur un barreau ou palette de fer doux, ou sur l'action d'aimants sur un champ créé par un cadre galvanométrique. Les ampèremètres sont *montés en série* avec le courant. L'Électrothérapie ne faisant usage que de fractions d'ampères, utilise des **milliampèremètres** gradués en millièmes d'ampères. Ces appareils sont *shuntés* pour plusieurs sensibilités²⁰.

Les **voltmètres** sont des galvanomètres à grande résistance (de 2 000 à 20 000 ohms), gradués en *volts* et servant à mesurer des **différences de potentiel**. Ils sont construits comme les ampèremètres, mais le fil de la bobine entraînant l'aiguille est long et fin, et n'absorbe qu'une faible portion de l'intensité totale du courant²¹. Les voltmètres se montent *en dérivation* sur le circuit principal. On utilise beaucoup aujourd'hui des **ampèremètres** et des **voltmètres thermiques**, fondés sur l'échauffement et par suite la dilatation d'un fil métallique que traverse un courant continu ou alternatif. La quantité de chaleur dégagée (et par suite l'allongement du fil) est proportionnelle au *carré de l'intensité*; la

dilatation commande les mouvements d'une aiguille indicatrice.

Un ampèremètre étant monté en série et un voltmètre en dérivation sur un circuit, on obtient ainsi la mesure de l'intensité et de la force électromotrice du courant qui passe dans ce circuit. En multipliant les deux indications, on trouve la **puissance du courant**. Il existe des appareils qui donnent directement la puissance en *watts*; ce sont des **électrodynamomètres** ou **wattmètres**. Ils se composent de deux bobines, l'une est intercalée *en série* sur le circuit étudié, tandis que l'autre est à forte résistance et se trouve disposée *en dérivation*. La déviation de l'aiguille est proportionnelle au produit du débit par le voltage, c'est-à-dire à la puissance cherchée.

Les **résistances**, exprimées en *ohms*, se mesurent à l'aide de boîtes contenant des bobines de résistance connue, que l'on intercale dans le circuit à mesurer au moyen de clefs en métal. Avec un petit nombre de bobines, on peut réaliser toutes les résistances depuis 1 ohm à 1 million d'ohms.

Mesure des courants alternatifs. — Les ampèremètres destinés aux courants alternatifs ne doivent pas renfermer d'*aimants permanents* à cause du *changement continu* de sens des courants, et, par suite, de la *polarité* de l'aiguille ou du barreau aimanté. On utilise alors, soit des galvanomètres où il n'entre pas d'aimant permanent, mais seulement du fer doux : ce sont les *ampèremètres*; soit des galvanomètres où il n'entre que des bobines parcourues par le même courant, et où il se produit une action électrodynamique : ce sont les *électrodynamomètres*.

Les **ampèremètres** (de FABIUS-HENRION, d'EVERSHED) offrent l'avantage de pouvoir servir indistinctement aux deux sortes de courants : ils donnent l'*intensité moyenne* des courants alternatifs. Les **électrodynamomètres** (de WEBER, de SIEMENS-HALSKE, de PELLAT, etc.) donnent l'*intensité efficace*²² des courants alternatifs.

Les **voltmètres** à courants alternatifs ne possèdent pas non plus d'aimants permanents, mais sont pourvus seulement de *fer doux* comme les ampèremètres correspondants ou fondés sur l'*échauffement d'un fil* par le passage d'un

courant. Les premiers donnent la *force électromotrice moyenne*, les seconds la *force électromotrice efficace*.

On sait que la fréquence est le nombre de périodes par seconde : on la mesure à l'aide d'un *tachymètre* qui donne le nombre de révolutions de la machine par unité de temps.

Compteurs d'électricité. — L'énergie électrique est vendue aux abonnés comme le gaz et comme l'eau, d'où la nécessité d'un appareil spécial, d'un *compteur* correspondant aux compteurs à gaz ou aux compteurs d'eau, et capable de mesurer le courant utilisé. Le genre de compteurs le plus généralement adopté est le **compteur moteur**. On peut donner une définition élémentaire de cet appareil en disant qu'il se compose d'inducteurs fixes (deux grosses bobines de fil gros, traversées par le courant total de la ligne) et d'un induit mobile dont le fil très fin est branché en dérivation sur le circuit à mesurer. La vitesse de rotation est proportionnelle à la puissance utilisée dans l'installation²³.

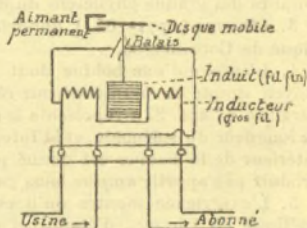


FIG. 38. — Compteur d'électricité.

Le nombre de tours est enregistré par une minuterie faisant déplacer des aiguilles sur des cadrans, ou faisant apparaître des chiffres sauteurs. On lit ainsi en kilowatts, hectowatts et centièmes, l'énergie consommée. Le **compteur E. Thomson** est le plus répandu des compteurs actuels ; il convient aux courants alternatifs et aux courants continus et indique l'énergie dépensée en hectowatts-heure²⁴.

Dans la prochaine conférence, nous verrons comment on *transforme* le courant électrique pour les besoins de la pratique, comment on le *transporte* et comment on le *distribue*.

NOTES DE LA TROISIÈME CONFÉRENCE

1. ARAGO (1786-1853) fut l'un des plus illustres savants du dix-neuvième siècle. Reçu à l'Académie des Sciences à l'âge de vingt-trois ans, directeur de l'Observatoire de Paris, il a laissé des travaux importants en Optique et en Electricité.

2. MAXWELL, physicien anglais (1831-1879), fut professeur de physique au King's Collège de Londres. Ses travaux sur l'Electricité le classent au nombre des grands physiciens du dix-neuvième siècle.

3. ØERSTED (1771-1851), physicien danois, directeur de l'École polytechnique de Copenhague.

4. L'emploi d'une bobine dont l'enroulement est régulier constitue un moyen simple et commode pour réaliser un champ uniforme de direction parallèle à l'axe. Si n représente le nombre de tours de spire par centimètre de longueur du solénoïde, et i l'intensité du courant en ampères, le champ intérieur de la bobine est donné par la formule $H = 1,25 \times n \times i$. Le produit ni s'appelle *ampère-tours par centimètre*.

5. L'expérience montre qu'il est utile, pour obtenir la saturation magnétique du barreau, d'établir et d'interrompre plusieurs fois le courant magnétisant. Si, en des points quelconques du solénoïde, on change le sens de l'enroulement de l'hélice magnétisant, on produit dans le barreau aimanté des *points conséquents*, c'est-à-dire que le barreau aimanté présentera des pôles non seulement à ses extrémités, mais encore aux points où l'enroulement de l'hélice change de sens.

6. Cette disposition a pour but de diminuer la force coercitive impossible à faire disparaître avec les noyaux d'une seule pièce.

7. La *théorie des électrons* permet de se représenter d'une manière très simple les courants moléculaires qui doivent circuler autour de chaque molécule magnétique. Il suffit de supposer qu'un électron tourne autour de chaque molécule, comme la Lune autour de la Terre. Par suite, le magnétisme des corps se ramène aux phénomènes de mouvements des électrons.

8. LENZ (1804-1885), physicien russe, qui n'est plus guère connu que par cette loi à laquelle son nom est resté attaché.

9. La self-induction apparaît donc comme une sorte d'inertie : dans la théorie de Maxwell, l'induction n'est autre que l'inertie de l'éther.

10. Dans les théories modernes, celle de LORENTZ par exemple, les phénomènes d'induction apparaissent comme la conséquence des variations de vitesse des électrons.

11. GRAMME (1826-1901), né en Belgique, commença ses travaux de découverte en électricité par l'invention, en 1867, de machines à courant alternatif; en 1869, il imagina les machines à courants continus et, en 1872, sa dynamo réellement industrielle. En réalité, l'âme de l'induit n'est pas un *anneau*, mais bien un cylindre plus ou moins allongé. La découverte de cet induit revient à un Italien, Pacinotti, mais c'est Gramme qui en a généralisé l'emploi.

12. Soient Φ le flux inducteur, N le nombre de tours de spire, n le nombre de tours par seconde, la force électromotrice est donnée par la formule $E = \Phi N n / 10^8$. Pour connaître l'intensité du courant obtenu, il faut connaître la résistance intérieure de la machine et celle du circuit extérieur. Avec une résistance intérieure de 0 ohm 5 et une résistance extérieure de 10 ohms 5, soit une résistance totale de 11 ohms, l'intensité du courant serait 10 ampères.

13. Ces étincelles sont des étincelles de rupture. Elles sont dues à la self-induction mise en jeu quand le courant change de sens dans une section du circuit induit au moment où cette section traverse la ligne neutre.

14. Le prix d'une dynamo varie avec sa puissance, son poids, son induit et son inducteur. Une dynamo Gramme fournissant 500 ampères sous 120 volts vaut 6 300 francs, alors qu'une autre dynamo fournissant 1 500 ampères sous 125 volts atteint 20 000 francs. Le prix de revient du watt diminue quand la puissance de la machine augmente : il est de 2 francs pour une dynamo de 100 watts et de 0 fr. 10 pour une machine de 60 000 watts. Les dynamos pour électrochimie se vendent d'après le nombre d'ampères débités, faisant varier le prix de l'ampère depuis 8 fr. 75 (40 ampères) à 1 fr. 85 (1 500 ampères). Enfin, la maison Fabius-Henrion, de Nancy, vend 335 francs une dynamo multipolaire fournissant 11 ampères sous 115 volts; 600 francs pour 37 ampères; 1 400 francs pour 115 ampères; 8 800 francs pour 950 ampères, etc.

15. La Société A. E. G. (Allgemeine Electricität Gesellschaft) est l'une des plus puissantes de l'Allemagne, elle possède de nombreuses succursales en France.

16. Cette seconde solution est préférable au point de vue de la sûreté des connexions: un induit fixe permet des contacts fixes avec le circuit extérieur. En tout cas, on ne retrouve pas dans les alternateurs cette pièce délicate qu'était le collecteur des dynamos continues. De plus, il est avantageux que la pièce mobile soit placée à l'extérieur, non seulement pour faciliter les réparations, mais aussi pour que l'attraction magnétique attire les parties en mouvement et se retranche de la force centrifuge.

17. Les alternateurs usuels fournissent du courant dont la fréquence reste comprise entre 25 et 100 périodes par seconde. L'alternateur *Alexanderson* fournit 100 000 périodes par seconde. L'emploi des courants alternatifs à haute fréquence présente, comme nous le verrons, un vif intérêt pour certaines applications médicales (D'Arsonvalisation), la télégraphie et la téléphonie sans fil. Dans l'alternateur *Alexanderson*, construit par la General Electric Co de Schenectady, 600 bobines inductrices montées à l'intérieur d'une armature en fer, induisent 300 bobines montées à la périphérie d'un disque tournant; celui-ci est mû par un moteur électrique et fait 20 000 tours par minute. Huit de ces alternateurs sont destinés aux services télégraphiques et téléphoniques entre New-York et Boston.

18. **KIRCHOFF** (1823-1887), physicien allemand, professeur de physique à Heidelberg et à Berlin, membre de l'Académie des Sciences de Berlin.

19. Un miroir qui se déplace avec l'organe mobile reçoit un faisceau lumineux; quand aucun déplacement ne se produit, le faisceau réfléchi arrive en un certain point A d'une règle graduée; si un courant passe,

le miroir est entraîné, tourne d'un certain angle α , le faisceau réfléchi tourne de 2α et vient rencontrer la règle en A'. Connaissant AA' et la distance du miroir à la règle on peut en déduire l'angle 2α .

20. On appelle *shunt* une dérivation placée sur un circuit principal aux deux bornes d'un instrument. Cette dérivation est faite d'un fil moins résistant que l'instrument lui-même, de sorte que le courant passe plus volontiers par le circuit dérivé que par le circuit principal. Le courant se partage en obéissant à la loi de Kirchoff.

21. Malgré le courant très faible qui passe dans la bobine, le champ magnétique de la bobine peut atteindre une valeur appréciable en raison du nombre de tours de fil. Il y aura donc déviation de l'aiguille.

22. L'intensité et la force électromotrice efficaces d'un courant alternatif sont égales à l'intensité et à la force électromotrice du courant continu qui produit dans le même circuit, le même effet Joule.

23. Le couple moteur, qui s'exerce entre le champ induit par les grosses bobines, est proportionnel au produit du courant dans celles-ci, par le courant qui traverse l'induit. Or, celui-ci est proportionnel à la différence de potentiel; le couple produit est donc proportionnel au produit EI et le nombre de tours de l'induit peut servir à mesurer ce produit EI, donc la puissance qu'il s'agisse de courant continu ou de courant alternatif. En effet, si le courant est renversé dans la deuxième demi-période, il l'est dans les bobines inductrices et dans l'induit; le sens de la rotation reste le même.

24. Le prix de ce compteur (courants continus) varie de 75 francs (pour 2 ampères) à 500 francs (500 ampères) sous 150 volts; il augmente avec le voltage, le nombre de fils dans la canalisation. Pour courants polyphasés, il coûte de 285 francs (10 ampères) à 470 francs (150 ampères).

QUATRIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ D'AUJOURD'HUI

(Suite)

TRANSFORMATION, TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

- I. La transformation des courants et les transformateurs. — La bobine de Ruhmkorff. — Les usines électriques modernes. — II. Reversibilité des dynamos. — Transport de force par l'électricité. — Les transports à haute tension et à grandes distances. — III. Distribution de l'énergie électrique. — Systèmes employés. — Rôle des transports de force.

I. La transformation des courants. — Les conférences précédentes nous ont appris comment on *obtient* l'énergie électrique, et nous connaissons maintenant les différents états sous lesquels se présente le courant : *continu, alternatif, monophasé, diphasé, triphasé*. En vue d'une application déterminée, la nature du courant n'est pas indifférente non plus que ses constantes, intensité et tension. De plus, l'utilisation de l'énergie électrique se fait souvent à une certaine distance du lieu de production et, dès lors, il y a lieu de rechercher sous quelle forme le courant électrique sera le plus économiquement transportable. Ainsi se présente à nous la nécessité de *transformer un courant électrique donné en un autre courant plus utilisable pour l'usage qu'on lui destine*.

Nous avons vu que tout courant électrique possède une certaine *puissance*, laquelle s'évalue en faisant le produit EI de la tension en volts E , par l'intensité en ampères I . Il en résulte que deux courants peuvent posséder la *même puissance*, bien que leur tension et leur intensité soient totalement différentes ; ainsi un courant de 1000 volts et de $1/2$ ampère à une puissance identique à celle d'un courant de 2 volts et de 250 ampères, car, dans les deux cas, le produit est de 500 watts. Il en

résulte qu'on peut élever la tension d'un courant aux dépens de son intensité ou élever l'intensité aux dépens de la tension; on peut aussi transformer un courant alternatif en un courant continu ou en un autre courant alternatif. Les appareils qui permettent d'opérer cette transformation sont des **transformateurs**; leur construction est très simple, ils ne nécessitent aucune surveillance et fonctionnent presque sans déperdition d'énergie.

Les *accumulateurs* que nous avons étudiés dans la deuxième conférence sont déjà des transformateurs; ils utilisent comme intermédiaire l'énergie d'affinité chimique, mais chez eux, le temps d'utilisation est séparé du temps de production. Les **transformateurs d'induction** que nous allons examiner, sont des *transformateurs immédiats*, c'est-à-dire des appareils dans lesquels l'utilisation se fait au moment même de la transformation.

Principe des transformateurs. — Considérons deux circuits enroulés sur un même anneau de fer. Si un courant alternatif traverse le circuit à fil gros et court (*circuit primaire*),

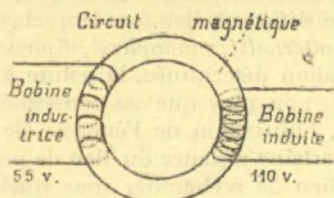


FIG. 39.
Principe des transformateurs.

un flux de force magnétique alternatif se développera dans l'anneau et, traversant le circuit à fil fin et long (*circuit secondaire*), y fournira par induction un courant alternatif de même période que le premier. La variation du flux magnétique est la même pour chaque spire des deux en-

roulements : les forces électromotrices aux extrémités de ces enroulements seront donc dans le même rapport que les nombres respectifs de leurs spires¹. *La puissance disponible reste la même*, une élévation de voltage entraînant une diminution d'intensité, et inversement. Supposons, par exemple, que le circuit primaire ait 200 tours et le secondaire 20 000 tours. Soit un courant primaire de 120 volts et 500 ampères (puissance $120 \times 500 = 60\,000$ watts); le courant secondaire aura un voltage de 12 000 volts et une intensité de 5 ampères. La puissance

recueillie sera, aux pertes près, égale à 60 000 watts, mais le voltage a centuplé, tandis que l'intensité a été réduite au centième. Pour le transport de l'énergie électrique à grandes distances, on a intérêt à élever le voltage, tandis que pour l'utilisation on opère la transformation inverse. On comprend dès lors le très grand rôle des transformateurs dans l'industrie électrique moderne. Le rendement² des transformateurs atteint d'ailleurs 98 p. 100.

Transformateurs industriels. — Dans tous les transformateurs, le fer qui forme le circuit magnétique est continu dans le sens des lignes de force, mais subdivisé dans le sens perpendiculaire pour empêcher les courants de Foucault : on emploie, à cet effet, des plaques de tôle empilées. Les formes très nombreuses des transformateurs peuvent se ramener à deux types principaux, suivant que le fer est à l'intérieur et le cuivre à l'extérieur (*transformateur à noyau*), ou que le fer est extérieur et le cuivre intérieur (*transformateur à manteau*). Dans le premier type, les enroulements primaire et secondaire sont juxtaposés et les bobines réunies en tension ou en parallèle ; dans le second, les circuits sont superposés ou juxtaposés. Dans une bonne installation, on évitera d'employer un trop grand nombre de transformateurs, ce qui augmenterait la perte par échauffement dans les circuits : il y a donc avantage à employer de *grands transformateurs*.

Les **transformateurs à courants monophasés** sont, les uns, à *circuit magnétique ouvert* (bobine de RHEMKORFF, transformateur GAULARD et GIBBS) ayant l'inconvénient de présenter une forte résistance magnétique ; les autres à *circuit magnétique fermé*.

Les **transformateurs à courants polyphasés** sont formés d'autant de noyaux de fer doux disposés parallèlement et verticalement qu'il y a de circuits dans les courants polyphasés à transformer ; ces noyaux sont réunis entre eux. Ainsi le *transformateur triphasé Lahmeyer et Cie* (Francfort-sur-le-Mein), est formé de trois colonnes verticales serrées entre les deux blocs formant le circuit magnétique : il fonctionne de 2 000 à 10 000 volts, et la puissance varie de 1 000 à 200 000 watts.

Les **transformateurs polymorphes** transforment les courants continus en courants diphasés ou triphasés, ou inverse-

ment; on transforme ainsi des courants triphasés de 2 500 volts en courants continus à 550 volts pour la traction des tramways électriques. Ces appareils sont souvent appelés **convertisseurs**. Les **transformateurs isomorphes** transforment le courant continu en un autre courant continu; ils sont généralement constitués par deux dynamos reliées par embrayage et possédant le même inducteur. Si la transformation se fait à *distance*, les deux dynamos sont reliées par un fil conducteur; le rendement atteint à peine 60 p. 100 dans le cas d'une distance de 8 à 10 kilomètres entre les deux dynamos. Aussi, quand il s'agit de transporter l'énergie électrique à distance, s'adresse-t-on à des courants alternatifs.

Bobine de Ruhmkorff. — Le premier transformateur construit fut la **bobine d'induction**, connue sous le nom de **Bobine de RUHKORFF**³. Imaginée par MASSON, professeur au Lycée Louis-le-Grand, en 1836, elle fut construite par BRÉGUET, puis perfectionnée par FIZEAU et FOUCAULT, en France. RUHKORFF isola soigneusement le fil induit et donna à la bobine d'induction sa forme définitive.

Cette bobine transforme un courant continu de bas voltage en courant alternatif à voltage très élevé. Les hautes tensions obtenues sont caractérisées par la production d'étincelles entre les deux extrémités du circuit secondaire; une petite bobine donne des étincelles de 5 centimètres correspondant à une tension de 45 000 volts; les grosses bobines, qui donnent des étincelles de 15 centimètres et plus, produisent des tensions de 60 000 à 100 000 volts. La bobine de Ruhmkorff se compose essentiellement de deux circuits concentriques. L'un, le circuit intérieur ou *circuit primaire*, reçoit du courant continu produit par une pile ou par des accumulateurs; il est à fil gros et court; il constitue la *bobine inductrice* dont le noyau de fer doux est formé par un faisceau de fils de fer isolés afin d'empêcher la production des courants de Foucault. L'autre, le circuit extérieur ou *circuit secondaire*, constitue la *bobine induite*; il est à fil fin ($1/10$ de millimètre) et long (plusieurs kilomètres⁴). Les courants induits ne prennent naissance qu'à l'ouverture et à la fermeture du courant primaire d'où la nécessité d'une autre pièce essentielle, *l'interrupteur*, destinée à ouvrir et à fermer le circuit primaire d'une façon automa-

tique et périodique. Il existe de nombreux types d'interrupteurs. Le plus connu repose sur le même principe que le trembleur des sonneries; il se compose d'une lame de fer doux fixée à un ressort et reposant sur la pointe d'une vis quand la bobine ne fonctionne pas.

Quand le courant de la pile traverse le circuit primaire, le noyau de l'inducteur s'aimante et attire la lame de fer doux,

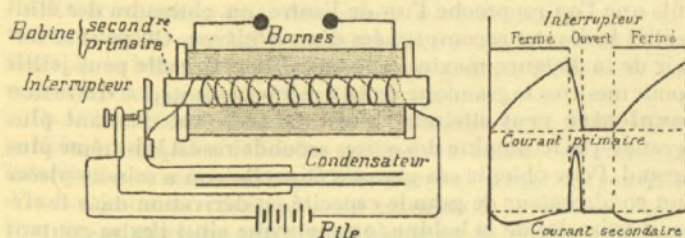


FIG. 40 et 41. — Schéma de la bobine de Ruhmkorff et diagramme des courants dans la bobine.

ce qui interrompt le courant; le noyau perdant son aimantation, la lame de fer doux revient contre la vis et le courant passe de nouveau. A chaque ouverture et à chaque fermeture du circuit primaire correspond une variation de flux dans la bobine primaire; cette variation est la même pour chaque spire du circuit secondaire, d'où, aux bornes du circuit secondaire, une certaine force électromotrice d'induction pouvant atteindre et dépasser 100000 volts. A l'ouverture du circuit primaire correspond un courant induit de même sens que le courant inducteur; à la fermeture correspond un courant induit de sens inverse. La variation du flux étant la même dans les deux cas, les quantités d'électricité induite sont égales; mais comme à la fermeture du primaire, le courant de self-induction retarde l'établissement du courant principal, la variation est moins rapide qu'à la rupture et la force électromotrice y est moindre. Aussi les étincelles de rupture sont-elles les plus puissantes.

Remarquons que, dans cette bobine, l'anneau de fer des transformateurs industriels est remplacé par un cylindre: nous

avons donc là un *transformateur à circuit magnétique ouvert*. Aussi le rendement de cet appareil est-il mauvais; par contre, les variations de flux sont beaucoup plus brusques qu'avec un noyau magnétique fermé qui conserve toujours un grand magnétisme rémanent. Cette circonstance est favorable à la production des tensions élevées. Aussitôt que l'appareil est en marche, on atteint une très haute tension aux deux extrémités de la bobine secondaire : si l'on réunit ces extrémités à deux fils que l'on rapproche l'un de l'autre, on obtiendra des étincelles brillantes accompagnées d'un bruit sec. On peut se servir de la distance maximum à laquelle l'étincelle peut jaillir pour mesurer la grandeur de la tension produite. La **distance explosive** peut atteindre 1 m. 20; elle est d'autant plus grande que le nombre des spires secondaires est lui-même plus grand. Pour obtenir ces grandes étincelles, on a soin de placer un *condensateur* de grande capacité en dérivation dans le circuit primaire de la bobine : on supprime ainsi l'extra-courant de rupture⁵. La distance explosive se mesure en munissant les pôles secondaires de tiges métalliques mobiles dont l'une est terminée par une pointe et l'autre par un disque.

Quand on munit la bobine de Ruhmkorff de nouveaux interrupteurs, l'intensité dans la bobine secondaire peut atteindre $1/10$ d'ampère, ce qui correspond, pour une tension de 50000 à 100000 volts, à une puissance de 5 à 10 kilowatts (soit de 6,8 à 13,6 chevaux). Dans ces conditions, il se forme entre le disque et la pointe, non plus une étincelle simple, mais un *faisceau d'étincelles*, un véritable courant lumineux qui s'accompagne d'un fracas assourdissant. Si les pôles de la bobine sont situés à une distance supérieure à la distance explosive, la bobine fournit un courant interrompu, toujours de même sens et de très petite durée. Pendant les décharges, l'un des pôles reste constamment positif, l'autre constamment négatif, et l'appareil peut être utilisé à la façon d'une machine électrostatique.

Pour obtenir des courants d'induction avec la bobine, il n'est pas nécessaire d'*ouvrir* et de *fermer*, par un *interrupteur*, le courant primaire; on peut aussi faire passer dans la bobine primaire des *courants alternatifs* fournis par une magnéto-électrique, par exemple. Pour arriver à de très hautes tensions secondaires, il faut évidemment employer des cou-

rants alternatifs à très nombreuses alternances par seconde. M. TESLA, en faisant circuler dans le circuit primaire d'une bobine sans noyau de fer des courants alternatifs à fréquence élevée, a obtenu des courants secondaires à 200 000 volts. Son appareil comprenait une résistance de self-induction et un condensateur en série sur le circuit secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. M. D'ARSONVAL reprit l'appareil de Tesla et étudia les multiples effets physiologiques des courants de haute fréquence ainsi découverts. Dans la suite de ces conférences, nous aurons à examiner les nombreuses applications de la bobine de Ruhmkorff, à propos des Rayons X, des ondes électriques et de l'Électrothérapie.

Dans les bobines actuelles, on tend à séparer les différentes parties principales : bobine primaire, bobine secondaire, interrupteur, condensateur. Très souvent même, les bobines d'induction sont construites de manière à permettre d'utiliser un nombre de spires variable pour la bobine primaire et des capacités différentes pour le condensateur. Telle est la bobine de KLINGELFUSS, à Bâle. La bobine de Ruhmkorff n'est guère employée que pour donner des étincelles à grande énergie. La facilité avec laquelle cette bobine fournit des décharges électriques a permis de découvrir et d'étudier les phénomènes très remarquables qui se produisent quand l'étincelle jaillit dans les tubes contenant des gaz raréfiés. Nous reviendrons sur ces curieux phénomènes.

Les usines électriques modernes. — Depuis l'établissement des dynamos, les applications de l'électricité se sont rapidement multipliées ; mais pour obtenir le courant électrique dans des conditions suffisamment économiques et pratiques, les grandes exploitations sont nécessaires. Au début, les stations électriques ne distribuaient leur énergie qu'à un nombre restreint d'abonnés : elles étaient de faible puissance et très nombreuses. Ainsi, il y a un quart de siècle, au moment où eurent lieu les premiers essais d'éclairage public à Paris, on installa trois stations génératrices pour éclairer l'avenue de l'Opéra ; il y a environ vingt ans, lors de la division de Paris en *secteurs électriques*, on installa des stations spéciales au centre des quartiers respectifs qu'il s'agissait de desservir. De nos jours, les progrès faits dans la construc-

tion des câbles et des machines génératrices permettent de placer des stations à plusieurs dizaines de kilomètres des lieux d'utilisation. La tendance actuelle est nettement l'*augmentation du rayon d'action des stations centrales* et, par suite, diminution de leur nombre ; et l'*augmentation considérable de la puissance individuelle des stations*. L'industrie électrique n'échappant pas à la loi générale, qui veut que la production en grand soit plus avantageuse que la production en détail, la *station centrale de grande puissance est devenue une nécessité économique*, et le besoin a fait naître autour des grandes villes, en Europe et en Amérique, de grandes installations. Les usines de la région parisienne, celles d'Anvers, de New-York et de Philadelphie sont les types du genre.

Visitons une de ces puissantes usines, celle de *Saint-Denis*, par exemple, qui est composée d'unités de grande puissance et alimente le Métropolitain de Paris, les tramways Nord-Parisiens et deux des sept secteurs parisiens. La puissance mécanique, dès 1906, atteignit 115 000 chevaux et l'énergie électrique disponible 75 000 kilowatts. La **visite d'une usine électrique** ne va pas sans produire un profond étonnement ; nous ne voyons rien de l'aspect que le seul mot d'usine évoque par une invincible association d'idées : rien ne rappelle les machines trépидantes, les arbres et les bielles, l'oscillation des balanciers, la rotation des volants, le grincement des poulies. Dans la *salle des machines*, on n'aperçoit que deux grandes cuirasses blindées produisant un ronflement sourd et léger. Grâce à leur vitesse de rotation, qui atteint 750 tours par seconde, ces énormes turbines sont, à puissance égale, vingt fois moins encombrantes que les machines à vapeur à piston que l'on employait au début ; elles mesurent 14 mètres de longueur sur 3 m. 50 de hauteur et 4 mètres de largeur ; aucun organe mobile n'est visible de l'extérieur. La *salle des chaudières* est nette et blanche, propre comme un salon : le charbon arrive mécaniquement dans les foyers. Dans la salle à côté, un homme surveille une colonne où des disques de couleurs variées indiquent le niveau de l'eau ou le tirage de la cheminée : il tourne quelques boutons électriques, comme nous quand nous allumons une lampe à incandescence,

La *vapeur* est, pour beaucoup de centrales, la principale **source d'énergie mécanique**; elle a été menacée par le *moteur à gaz pauvre*. Dans certaines régions métallurgiques, on trouve des groupes électrogènes de 6 000 chevaux, actionnés par les gaz que fournissent les hauts fourneaux voisins. Les *chutes d'eau* constituent une réserve d'énergie mécanique considérable, capable de mettre le courant électrique à un prix exceptionnel de bon marché. En France, quelques chutes d'eau sont utilisées pour la production de l'électricité: chute du Rhône à Bellegarde; canal de Jonage latéral au Rhône, près Lyon, qui présente une puissance mécanique de 16 000 chevaux au minimum; chutes de l'Isère et de ses affluents qui fournissent environ 100 000 chevaux. Connaissant les différences d'altitude de nos divers cours d'eau, ainsi que leur débit moyen, on peut évaluer la puissance mécanique des chutes d'eau de France à 10 millions environ de chevaux, puissance dont on utilise à peine la quinzième partie. La vaste et pittoresque région des Alpes françaises, depuis le lac de Genève à la Méditerranée, est devenue, grâce aux installations hydroélectriques un intense foyer d'industrie, créateur de richesses: elle comptait, en 1911, 475 000 chevaux installés, sur les 4 millions de chevaux qu'elle renferme⁶.

Pour mettre en œuvre ces énergies et actionner des dynamos, on se sert de *turbines hydrauliques*⁷. Celles-ci fonctionnant à charge constante, avec une régularité parfaite, conviennent admirablement pour la production de l'énergie électrique; à charge variable, elles exigent des appareils régulateurs donnant aujourd'hui entière satisfaction. Aux basses chutes correspondent des appareils à marche lente, tandis que les grandes chutes s'accoutument plus aisément d'alternateurs à grande vitesse à induit tournant. Comme pour les stations centrales à vapeur, les conditions économiques les meilleures sont réalisées par les usines hydrauliques puissantes. En France, on a projeté de construire sur les bords du Rhône une usine qui suffirait presque à alimenter Paris; en Amérique, on utilise 100 000 chevaux sur les 500 000 que peuvent fournir les chutes du Niagara.

Tous ces puissants moteurs actionnent aujourd'hui des machines génératrices également très puissantes. Les mêmes

raisons d'économie et de meilleur rendement, qui ont centralisé dans des usines la production d'énormes quantités d'énergie électrique, ont conduit à n'employer qu'un petit nombre de *grosses unités*. Aujourd'hui, on arrive à des unités de 8 000 kilowatts, capables, par conséquent de produire chacune une quantité d'énergie électrique comparable à celle que les sept secteurs de Paris réunis vendent à la totalité de leurs clients. En 1910, on a même installé aux usines d'électricité de Chicago, des unités de 30 000 chevaux, soit de plus de 22 000 kilowatts. L'alimentation de toute grande ville peut dépendre d'un seul groupe électrogène.

Dans toute usine électrique, on ne laisse autour des machines que les organes purement mécaniques ou ceux qui servent au graissage; tous les organes électriques qui doivent être commandés à la main ou surveillés pendant la marche de l'usine sont concentrés sur un panneau vertical appelé **tableau de distribution**. Ces tableaux se présentent d'une manière agréable avec leurs grandes tables de marbre, leurs barres de cuivre nu et leurs appareils bien séparés les uns des autres. Le tableau contient en général autant de panneaux qu'il y a de groupes générateurs; chaque panneau contenant tout ce qui est nécessaire pour la mise en marche, le contrôle et l'arrêt du groupe correspondant. Les *instruments de mesure* sont les ampèremètres, les voltmètres, les wattmètres que nous avons déjà étudiés. Les appareils servant à envoyer ou à interrompre le courant dans les quartiers à desservir sont des *interrupteurs*: ils sont constitués par un contact métallique mobile intercalé dans un circuit électrique que l'on déplace à l'aide d'une manette⁸. Chaque circuit traverse, outre l'interrupteur, un appareil de sûreté, le *coupe-circuit*. Certains coupe-circuits possèdent des fils fusibles, capables de fondre par une augmentation anormale d'intensité; d'autres sont automatiques et ouvrent le circuit quand le courant dépasse l'intensité pour laquelle ils sont réglés. Le tableau de distribution est, en quelque sorte, l'âme de l'usine électrique: c'est là qu'aboutissent tous les circuits des dynamos, de là que partent les conducteurs qui distribuent dans toutes les directions le courant nécessaire à l'éclairage, au chauffage, à la force motrice et aux opérations électrochimiques. Un électricien le surveille à tout instant; en faisant manœuvrer des

manettes, il peut modérer la tension, faire varier la quantité de courant consommée dans chaque quartier, suspendre ou raviver la prodigieuse activité d'une grande ville moderne.

Les plus puissantes usines hydro-électriques se trouvent en Suède et en Norvège. L'usine de *Vermock*, dont la première turbine a été mise en service en 1911, aura une puissance totale de 250 000 chevaux; elle comprendra 10 turbines alimentées par une chute de 450 mètres et servira à la fabrication du nitrate au moyen de l'air; en pleine marche, elle pourra produire annuellement 80 000 tonnes de salpêtre d'une valeur de 77 millions de francs. La Compagnie Parisienne de Distribution d'Électricité (C.P.D.E.) qui aura en 1913 l'exploitation de tout le réseau parisien, construit deux nouvelles usines, l'une à *Saint-Ouen*, l'autre à *Issy-les-Moulineaux*; la première devant recevoir 7 groupes électrogènes, la seconde 3 seulement. Chaque groupe est composé d'une turbine à vapeur fonctionnant sur un condensateur à surface, accouplée directement à un alternateur triphasé (de 12 300 volts, 1 250 tours, 41 périodes $2/3$) et à deux génératrices à courant continu de 230 volts, montées sur le même arbre et fournissant l'une l'excitation de l'alternateur, l'autre l'énergie nécessaire aux moteurs du condensateur. Chaque turbo-groupe est susceptible de donner 12 500 kilowatts pendant deux heures après une marche en charge normale de 15 000 kilowatts pendant une demi-heure. Le poids de chaque turbo-groupe est de 305 tonnes.

Le prix de l'énergie fournie par les stations centrales est encore assez élevé. Il s'abaisse rarement au-dessous de 0 fr. 70 le kilowatt-heure dans les stations à courants polyphasés, et de 1 franc dans celles à courants continus et ceci, en employant la vapeur. Avec les chutes d'eau, le prix du kilowatt-heure descend facilement à 0 fr. 50 et même à 0 fr. 25, après l'amortissement des frais d'installation qui sont généralement fort élevés. La consommation en charbon par kilowatt-heure est variable : 1 kg. 20 à Vienne, 1 kg. 40 à Francfort, 1 kg. 65 à Munich, 1 kg. 80 à Strasbourg, 2 kg. 37 à Manchester, 3 kg. à Nottingham; elle varie avec la nature du courant à fournir et la forme de la puissance motrice à utiliser.

Réversibilité des dynamos. — Quand on fait tourner une machine dynamo-électrique, elle produit un courant induit dû aux déplacements que l'induit éprouve dans le champ de l'inducteur. En réalité, *la dynamo ne crée pas le courant qu'elle débite* : un courant qui circule dans un circuit est une *énergie disponible sous une forme spéciale*, la forme électrique,

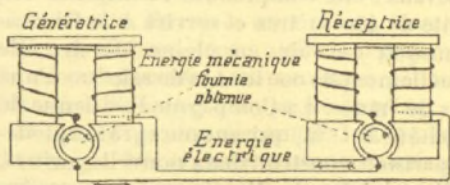


FIG. 42. — Réversibilité des machines dynamo-électriques.

forme particulièrement commode, parce qu'elle est apte à subir, d'une manière docile, toutes les transformations. La dynamo ne fait que *transformer* en énergie élec-

trique l'énergie mécanique qu'on utilise à produire sa rotation. Qu'arrivera-t-il si nous fournissons à une dynamo de l'énergie électrique? La transformera-t-elle en énergie mécanique? L'expérience montre qu'il en est bien ainsi. Deux machines identiques étant accouplées par des fils métalliques reliant leurs balais de même nom, si l'on fait tourner l'une d'elles, l'autre se mettra à tourner dans le même sens. On peut employer, pour actionner la machine génératrice, une machine à vapeur, une turbine, etc., et recueillir sur une réceptrice, une notable partie de l'énergie dépensée. Les deux dynamos peuvent être aussi éloignées que l'on voudra l'une de l'autre, l'énergie électrique transmise sous forme de courant n'en régénère pas moins de l'énergie mécanique. Ainsi se trouve résolu, grâce aux propriétés de la dynamo, le problème du **transport de l'énergie à distance**. Les premières tentatives furent faites par M. FONTAINE (1873) à Vienne, sur une distance de 3 kilomètres; puis par M. DEPREZ de Munich à Meisbach (57 kilomètres).

C'est grâce à la solution de ce problème que l'industrie peut utiliser des chutes d'eau puissantes dans le voisinage desquelles il eût été impossible de construire et d'alimenter des usines. Une turbine actionnant une dynamo génératrice suffit pour transporter l'énergie de ces chutes jusqu'aux usines

souvent fort éloignées et à mettre en mouvement des ateliers placés dans des conditions économiques favorables, c'est-à-dire au voisinage de voies de communication permettant l'apport des matières premières et le transport des produits manufacturés. C'est, la plupart du temps, le transport de l'énergie par *courants alternatifs* qui se trouve appliqué dans le cas de l'utilisation des chutes d'eau à une certaine distance.

La mise en marche, sur tout un réseau, de *tramways* actionnés par des dynamos motrices, est une application immédiate du transport de l'énergie par la seule utilisation de la réversibilité de la dynamo. Une dynamo puissante est mise en mouvement à la station centrale du réseau. Son courant, canalisé par exemple par les fils de trolley disposés parallèlement à la voie et par les rails mêmes qui font office de conducteurs de retour, distribue l'énergie à toutes les voitures disséminées sur le réseau.

Aujourd'hui, dans beaucoup d'ateliers, les machines-outils sont commandées par des *moteurs électriques* qu'actionne une dynamo génératrice mise en mouvement par une machine à vapeur. Cette disposition, en supprimant les transmissions par courroies toujours encombrantes et dangereuses, permet une utilisation plus économique et plus rationnelle de la place dont on dispose.

Dans cette conférence, nous étudierons comment se fait le *transport* et la *distribution* de l'énergie électrique, réservant pour des conférences ultérieures les moteurs et la traction électrique.

Transport de force par l'Électricité. — Toutes les applications de l'Électricité constituent un transport de force. Si, dans la cave d'une maison, se trouve installé un moteur à gaz actionnant une dynamo et que le courant fourni par cette dynamo soit utilisé dans des lampes à incandescence ou par des moteurs placés aux différents étages, on aura réalisé un transport de force. En pratique, on réserve la dénomination de *transport de force* aux cas dans lesquels la distance est très grande. Ce transport sert, principalement, à l'*utilisation à distance des forces hydrauliques* : l'énergie empruntée à l'eau courante est fournie directement par la Nature en quantités abondantes, et son utilisation ne demande souvent pas d'autres frais que

ceux d'installation de l'usine. La Suisse, la première, s'est engagée dans cette voie et les industriels de tous les pays se sont peu à peu rendu compte des énormes avantages que leur procurent ces transports de force. La transmission de la puissance électrique à distance permet d'éviter le transport du charbon : on peut, en effet, avoir intérêt à consommer le charbon sur place dans de grosses machines à vapeur et à transmettre ensuite électriquement la puissance produite⁹. Enfin, on peut avoir recours à l'Électricité pour actionner, de loin, plusieurs petites machines. L'expérience ayant montré que les petites machines consomment en proportion beaucoup plus de combustible que les grosses, on réalisera une économie de frais d'exploitation et d'installation en remplaçant plusieurs petites machines par une grosse dont on répartit le travail électriquement.

Supposons une dynamo actionnée par une machine motrice et plaçons dans le circuit une seconde dynamo. Il se produit, dans l'induit de cette seconde machine, une force électromotrice agissant en sens contraire de la première, de sorte que la force électromotrice totale est égale à la différence des forces électromotrices des deux machines : l'intensité dans le circuit est, d'après la loi d'Ohm, égale au quotient de cette force électromotrice totale par la résistance totale. Or, la force électromotrice de chaque machine dépend de la vitesse à laquelle tourne son induit ; si les deux dynamos sont identiques comme construction, l'intensité dans le circuit dépend de la différence de vitesse des deux machines et de la résistance totale¹⁰. La seconde machine fournissant du travail, sa vitesse décroît et l'intensité augmente dans le circuit. Alors tout se passe comme si le travail fourni à la première machine était rendu par la seconde. Le rapport entre le travail utile fourni par la deuxième dynamo au travail dépensé sur la première est le rendement général du transport de force. Ce rendement dépend des rendements des machines considérées séparément et de la perte d'énergie résultant du transport. Il est d'environ 80 p. 100.

Soient I l'intensité du courant employé ; R , la résistance de la ligne ; nous savons que la puissance perdue est RI^2 . Pour la réduire autant que possible, il faut donc réduire, soit la résistance de la ligne, soit l'intensité du courant. Réduire la résis-

tance de la ligne est une opération coûteuse, car elle revient à augmenter la section et, par suite, le poids du fil de ligne. On doit donc réduire l'intensité; mais alors, pour transporter malgré cela des quantités d'énergie suffisantes, il faut augmenter le voltage de telle sorte que, dans l'expression de la puissance EI , la grandeur de E compense la faiblesse de I . On est ainsi amené à employer, au départ, des *générateurs à haute tension*.

Transport de l'énergie électrique à haute tension et à grandes distances. — La nécessité de l'emploi des courants à haute tension pour le transport de l'électricité a été établie pour la première fois par l'ingénieur français MARCEL DEPREZ; elle constitue aujourd'hui le principe fondamental pour transmettre, avec un rendement élevé, les courants de puissance un peu considérable. Or, il est impossible de construire de bonnes dynamos à courant continu pour les hautes tensions, parce que l'isolement des enroulements de bobines voisines est difficile à réaliser, et aussi parce que le collecteur donnerait des étincelles aux tensions élevées. Les *transformateurs* que nous avons étudiés au début de cette conférence permettent d'élever la tension jusqu'à des voltages très considérables. Comme les appareils récepteurs n'exigent pas des tensions si hautes, un autre transformateur est nécessaire aux divers points d'arrivée pour transformer le courant de la ligne en un courant de faible tension et de forte intensité. Les *alternateurs monophasés et triphasés* sont beaucoup mieux adaptés à la production de très hauts voltages que les dynamos ordinaires et peuvent fournir directement des tensions de 10 000 volts.

L'emploi de hauts voltages s'est généralisé avec une rapidité inouïe, et les tensions utilisées se sont élevées dans des proportions fantastiques. Entre Paris et Creil, le transport de force réalisé en 1886 par M. DEPREZ se faisait sous 6 300 volts, ce qui paraissait déjà considérable. Pendant longtemps, on ne dépassa pas 10 000 volts; mais bientôt Côte établit pour son éclairage un transport à 20 000 volts. Betz nau, en Argovie alla chercher l'énergie fournie par une chute à 60 kilomètres et l'amena à une tension de 25 000 volts. Saragosse poussa jusqu'à 30 000 volts et, en 1900, à l'Exposition universelle de Paris, on regardait comme une curiosité un câble capable de

supporter 50 000 volts. Cette tension est aujourd'hui largement dépassée; pourtant, en Europe, en 1909, aucune distribution n'atteignait 60 000 volts. Les tensions les plus élevées se trouvaient en France aux usines de *Plombières* et de *Mouliers* pour un transport de force sur Lyon, aux usines de *Tuilère* (Dordogne) et à celles de *Ventavon* (Haute-Durance) où se trouvaient réalisés 55 000 volts. En Amérique, les progrès

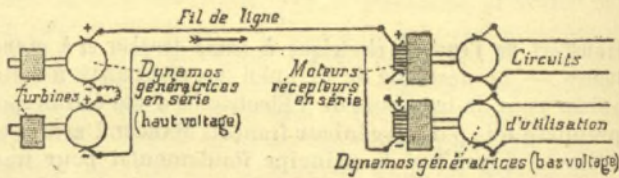


FIG. 43. — Schéma d'un transport d'énergie par courant continu.

ont été plus rapides et l'on ne tarda pas à atteindre des tensions formidables. La constitution géographique du pays, la densité minime de la population des grands territoires américains, la liberté d'allure des industriels yankees, la nécessité où ils se sont trouvés de fournir des torrents d'énergie à des villes nouvelles ou en voie de rapide et colossale expansion, sont pour beaucoup dans l'audace des ingénieurs américains. Le développement de transports d'énergie électrique aux États-Unis et au Mexique est extraordinaire; les distributions à 50 000 volts sont extrêmement nombreuses, la tension de 60 000 volts est très répandue et l'installation des grandes villes se fait à 80 000 volts (*Rio de Janeiro*, 88 000 volts). Depuis 1911, l'*Hydro Electric Power Commission Ontario* emploie des tensions de 110 000 volts. Les ingénieurs européens marchent maintenant sur les traces des Américains : en France, on a proposé 120 000 volts pour amener à Paris l'énergie électrique du Rhône, et M. THURY a étudié pour la ville de Milan un projet à 150 000 volts; on a même fait en France et en Allemagne des essais à 220 000 volts.

En même temps que la tension s'élevait, la distance à laquelle l'énergie électrique a été transportée s'est accrue considérablement. Tandis qu'en 1900, on trouvait déjà remarquable que l'on pût transporter quelques milliers de

chevaux à 30 ou 40 kilomètres de distance, de 1904 à 1906, la *Toronto and Niagara Power Co* a transporté 125 000 chevaux à 120 kilomètres; une compagnie californienne a porté la distance à 370 kilomètres; la compagnie du Littoral méditerranéen a couvert Marseille et la région comprise entre la Durance, le Var et l'Argens. Peut-être verrons-nous dans un avenir prochain, se réaliser en France l'entreprise formidable du transport à Paris, soit à 425 kilomètres, d'une puissance à conquérir sur le haut Rhône¹¹.

La puissance transportée a atteint des valeurs considérables : 20 000, 40 000 kilowatts, 60 000 même à Rio de Janeiro. Pour l'augmentation des puissances à transporter, deux adjuvants ont été nécessaires : les turbines à vapeur qui se sont substituées aux machines à piston, et les perfectionnements des turbines. On fait couramment aujourd'hui des turbines Parsons-Brown-Boveri de 50 000 kilowatts. Les turbines hydrauliques ont suivi la même progression et c'est ainsi qu'on voit s'élever de grandes usines centrales avec un petit nombre de puissantes unités faciles à surveiller et capables chacune d'alimenter une contrée étendue.

Forme du courant. — Les premiers transports d'énergie électrique furent réalisés avec du **courant continu**. La nécessité d'obtenir de hauts voltages et une faible intensité dans le fil de ligne rencontra bien des difficultés. On ne peut généralement pas dépasser une force électromotrice de 3 000 volts aux bornes de la génératrice; de plus, afin de diminuer l'intensité, il faut diminuer la résistance du fil de ligne, c'est-à-dire augmenter son diamètre, ce qui accroît considérablement la dépense. Il arrive un moment où l'intérêt des sommes nécessaires à l'achat des câbles de transport égale le coût du charbon brûlé par une machine à vapeur.

La question du transport des puissances naturelles sous forme d'énergie se trouvait donc forcément bornée à une distribution dans un faible rayon; elle n'aurait pu progresser si l'on n'avait employé les **courants alternatifs** qu'il est facile de développer sous une tension très élevée soit directement, soit par interposition de transformateurs. On peut alors limiter la section et, par suite, le prix des fils conducteurs. En effet, supposons que l'on ait à envoyer à 20 kilomètres une puis-

sance de 100 chevaux-vapeur (75 kilowatts environ). Avec le courant continu, on ne peut dépasser 1 500 volts, et l'intensité sera 50 ampères; en admettant une perte de 20 p. 100 dans le transport, le calcul montre qu'il faudra prendre des câbles de 25 millimètres carrés de section, coûtant 1 800 francs le kilogramme, soit 72 000 francs pour 20 kilomètres (fils d'aller et de retour). Avec les courants alternatifs, on peut élever la

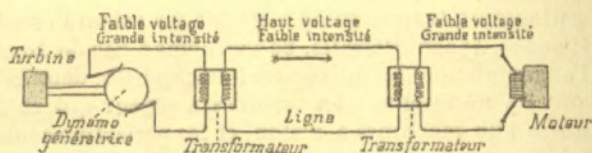


FIG. 44. — Schéma d'un transport d'énergie par courants alternatifs.
(En pratique, on emploie les courants triphasés, d'où trois fils de ligne.)

tension à 10000 volts, et l'intensité ne sera plus que de 7,5 ampères; dans ce cas, un câble de 3 mm²5 de section suffira, et comme le kilomètre de ce fil ne coûte que 350 francs, on réalisera au total une économie de 60 000 francs.

Les premiers essais importants de transport de l'énergie à grande distance au moyen de courants alternatifs ont été effectués, en 1891, par la Société A. E. G. en collaboration avec la fabrique d'OErlikon. Il s'agissait de transmettre l'énergie de *Lauffen* sur le Neckar à *Francfort-sur-le-Mein*, villes distantes l'une de l'autre de 175 kilomètres.

La supériorité des courants alternatifs polyphasés sur le courant continu était établie, mais l'entreprise de *Lauffen* n'était pas très rémunératrice en raison de la faible puissance transportée. Aussi, dans les années qui suivirent, les applications se restreignirent à de plus modestes proportions; en France, en particulier, on regardait le courant alternatif comme défectueux et dangereux, ce qui était exact à cette époque. M. THURY a montré comment on pouvait employer le *courant continu* dans des conditions avantageuses. Son système consiste à réunir en série plusieurs dynamos génératrices sur le circuit de transmission dans lequel elles maintiennent un courant d'intensité constante.

Le procédé de M. THURY a été employé avec beaucoup de succès entre Saint-Maurice et Lausanne sur une distance de 56 kilomètres ; la puissance est transportée par un courant continu maintenu à une intensité constante de 150 ampères et dont la tension peut atteindre 23 000 volts. Plus récemment on a réalisé, en France, un transport de plus de 40 000 kilowatts sous 57 000 volts continus à une distance de 180 kilomètres entre Moutiers (Isère) et Lyon, pour l'alimentation des tramways de cette ville. Ce transport est le plus important sous courant continu ; la perte sur la ligne ne dépasse guère 10 p. 100 ; on capte à Moutiers une chute de l'Isère de 65 mètres de hauteur, actionnant des turbines d'une puissance totale de 6 300 chevaux et l'on recueille à Lyon 5 400 chevaux environ.

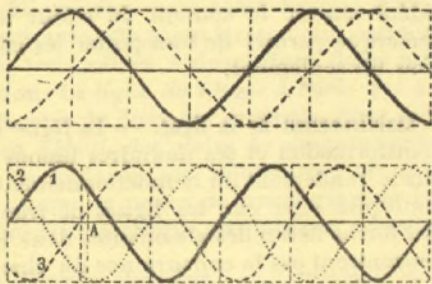


FIG. 45. — Courants diphasés (en haut) et courants triphasés (en bas).

Ainsi, le courant continu, après avoir été un instant abandonné, redevient le rival possible de l'alternatif, lequel n'est pas sans présenter certaines difficultés que nous nous contenterons de résumer. Le principal obstacle à surmonter réside dans la régulation qui se trouve influencée bien plus par la capacité de la ligne que par sa résistance et sa self-induction. De plus, en raison des très hauts voltages adoptés, on ne peut songer à transmettre que des pressions considérables ; et il est de toute nécessité de disposer la ligne de transport sur des isolateurs en porcelaine de grandes dimensions et très coûteux.

Le courant monophasé exigeant deux fils de ligne, un pour l'aller et un pour le retour, il paraît nécessaire d'employer quatre fils pour une canalisation biphasée, et six pour une canalisation triphasée, ce qui fait prévoir une complication dans le transport de ces courants. Il n'en est rien pourtant, car trois fils sont suffisants. Le triphasé se compose de

trois courants alternatifs de même période et décalés les uns par rapport aux autres de $1/3$ de période ; tels sont les trois courants de la figure 45. Cette figure montre en même temps une propriété remarquable des courants triphasés : c'est que la somme des intensités des trois courants est constamment nulle. A l'instant représenté par le point A, l'intensité du courant induit 2 est égale à la somme des intensités des courants 1 et 3 ; de plus le courant dans le circuit 2 est de sens inverse aux courants des deux autres circuits. Le courant qui circule dans un fil quelconque peut donc être considéré comme le courant de retour des deux autres. Cette remarque permet de transporter les courants triphasés avec trois fils seulement.

Etablissement de la ligne. — La ligne est l'artère vitale de la transformation et ses moindres lésions ont leur répercussion sur le rendement ou le fonctionnement. Les Américains ont multiplié chez eux les lignes de transport, car ils trouvent des forces naturelles abondantes dans leurs montagnes et ne rencontrent pas la concurrence du charbon ; c'est grâce aussi à la différence de prix entre le cheval thermique et le cheval électrique que les transports d'énergie ont pu prendre un développement énorme en Suisse et dans l'Italie du Nord.

Les lignes sont toujours *aériennes*, à moins qu'il ne s'agisse de traverser des villes, des bras de mer. Ainsi, trois câbles à 13 000 volts traversent le lac de Garde pour conduire le courant triphasé du Ponale à Rovereto ; un autre exemple est celui de la ligne de Moutiers à Lyon, qui se raccorde à 4 kilomètres de câble souterrain pour la traversée du faubourg d'Alsace. A l'Exposition de Turin, en 1911, on a pu assister à une réalisation d'une ligne de transport de force de 100 000 volts mi-aérienne, mi-souterraine, par la Société industrielle des Téléphones.

Pour les lignes longues et portant des courants élevés, il faut prendre des **mesures de protection contre la foudre**, car si la canalisation se trouvait atteinte en un point quelconque par la foudre, celle-ci pourrait arriver aux machines et les détériorer. Pour éviter ces accidents on branche sur chaque canalisation allant à la machine une paire de plaques métalliques, l'une étant réunie à la ligne et l'autre à la terre.

La foudre traverse très facilement le petit intervalle d'air qui sépare les deux plaques et, par suite, épargne l'installation.

Parmi les grandes **lignes projetées ou actuellement en construction**, citons la ligne des lacs américains et la ligne du Rhône à Paris. La *ligne des lacs américains* a pour point de départ les chutes du Niagara où le courant triphasé de 12000 volts est transformé à 110000 volts; la ligne doit aboutir à Dundas (80 kilomètres), puis se diviser en trois tronçons, dont l'un atteindra Toronto (65 kilomètres), les deux autres se terminant à London, l'un direct (120 kilomètres), l'autre (200 kilomètres) après avoir desservi d'autres villes. Au total, la ligne aura 480 kilomètres et sera constituée par deux groupes de trois câbles d'aluminium de 92 millimètres carrés de section. La *ligne du Rhône à Paris* qui aura 425 kilomètres sera formée de deux fils distincts. Pour faciliter la recherche d'un défaut, des postes de coupure sectionneront la ligne en tronçons de 150 kilomètres; ces postes serviront en même temps de postes de transformation pour la distribution de l'énergie électrique aux régions riveraines.

III. **Distribution de l'énergie électrique.** — *Comment se fait cette distribution d'énergie électrique?* Au début des applications du courant électrique, le problème était facile à résoudre, mais quand apparurent les lampes à incandescence il fallut alimenter, par la même source, un grand nombre de lampes de façon que chacune d'elles fût indépendante des autres. Plus tard, il fallut intercaler dans le même circuit des lampes à arc et des lampes à incandescence, éclairer des villes entières, distribuer l'énergie pour le chauffage, la force motrice, et, par suite, imaginer de nouvelles méthodes de distribution électrique pour répondre à des exigences toujours plus complexes.

Pour *l'éclairage à incandescence*, par exemple, il faut que chaque abonné puisse éteindre ou allumer à sa guise un nombre quelconque de lampes, c'est-à-dire qu'il existe une indépendance absolue entre toutes les lampes alors même qu'elles se trouvent dans un seul circuit et qu'elles sont alimentées par une même machine. Edison¹² résolut pratiquement le problème en montant les lampes **en parallèle** ainsi que le montre la figure 46; les fils sont choisis suffi-

samment gros pour que leur résistance soit faible et que la tension aux bornes de chaque lampe soit partout la même ; tous les foyers lumineux sont absolument indépendants les uns des autres. Cette solution convient au cas où les lampes sont remplacées par des *moteurs*. Une tension aux bornes constante est la condition nécessaire et suffisante pour satisfaire à toutes les exigences de la consommation d'énergie pour les lampes et les moteurs. En règle habituelle, on emploie pour le *courant continu* une tension de 110 volts : les lampes à incandescence, les moteurs et appareils de chauffage sont établis de façon à fonctionner sous ce voltage⁴³. Dans les réseaux à *courant alternatif*, on emploie parfois une différence de tension de 110 volts, quelquefois de 65 à 72 volts seulement, ce qui permet d'intercaler en série deux lampes à courant alternatif de 30 volts environ, ainsi qu'une résistance.

Dans les usines génératrices importantes, l'électricité est fournie par plusieurs dynamos que l'on intercale en nombre variable suivant les besoins. Une *canalisation principale double* part de l'usine et parcourt la ville ; elle est formée par des *câbles souterrains de gros diamètre*, car ceux-ci ont à conduire des courants très intenses. Dans chaque rue courent des *câbles de section moindre*, chaque conduite principale donnant naissance à un câble dérivé. Les câbles pris en dérivation sur ces derniers et qui parcourent les rues adjacentes sont de plus petit diamètre ; enfin les *canalisations posées dans les maisons* ont encore une section plus faible. L'ensemble de l'installation est donc analogue à une canalisation de gaz d'éclairage. Pour ces canalisations, on emploie des câbles composés d'une âme de cuivre, de sorte que l'une des canalisations est complètement entourée par l'autre ; le conducteur extérieur est entouré d'une couche isolante recouverte d'une gaine de plomb. Pour les courants triphasés on emploie trois câbles comme on l'a vu précédemment.

Chaque consommateur de courant est desservi d'une manière indépendante grâce à ce couplage en parallèle à tension constante ; un compteur branché dans chaque maison ou dans chaque appartement fait connaître la quantité d'électricité utilisée.

Le système de distribution que nous venons d'indiquer

est le système de distribution à deux fils. C'est la méthode la plus simple, mais elle revient coûteuse quand les distances augmentent, puisque la nécessité de n'avoir qu'une chute très faible de tension entraîne celle de prendre des câbles de gros diamètre. L'expérience a montré que la distribution à deux fils ne convient que dans un rayon de 800 mètres. Pour étendre le champ d'action des usines centrales, EDISON et HOPKINSON ont imaginé le système de distribution à trois fils. Il consiste à accoupler en tension deux dynamos de 110 volts ; la différence entre leurs bornes extérieures atteint donc 220 volts. De ces deux bornes extérieures ainsi que de la

borne commune aux deux machines partent trois canalisations qui parcourent la ville. La canalisation du milieu est dite *de compensation* : c'est entre elle et les fils extrêmes que les appareils récepteurs sont intercalés de manière que

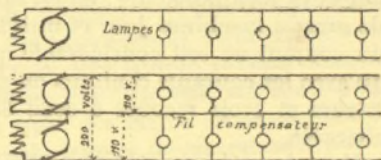


FIG. 46. — Distribution à deux fils (en haut) et à trois fils (en bas).

la tension entre leurs bornes soit encore de 110 volts. Les deux canalisations principales peuvent avoir une section plus petite puisque l'énergie qu'elles transportent est à une tension double ; néanmoins le système n'est plus avantageux au delà de 1 200 mètres. Le système de distribution à cinq fils comporte à la station quatre dynamos série associées en tension et trois câbles intermédiaires : la tension entre les conducteurs extrêmes est de 440 volts et de 110 entre deux conducteurs voisins. Quand l'étendue du réseau dépasse 2 à 3 kilomètres, les distributions à 3 ou à 5 fils sont combinées avec l'emploi des *feeders*, branchements s'étendant à droite et à gauche et reliés entre eux ; ils permettent d'amener le courant en différents points de la canalisation. Ce système est fréquemment employé de nos jours.

Les courants alternatifs et triphasés avec transformateurs sont avantageusement employés quand l'usine centrale se trouve à une distance un peu considérable des appareils d'utilisation ; ils permettent de transmettre l'énergie élec-

trique sous forme de courant à haute tension et de faible intensité et ensuite, grâce aux transformateurs, d'utiliser aux endroits voulus des courants de faible voltage et de grande intensité¹⁴. Tous les transformateurs sont montés en parallèle entre les canalisations principales. Celles-ci sont aériennes ou souterraines ; dans le premier cas, les fils sont fixés à des isolateurs portés par des poteaux ; dans l'autre, on emploie des câbles concentriques dans lesquels une canalisation entoure l'autre. Le système de distribution par courant alternatif offre un gros inconvénient : c'est l'impossibilité dans laquelle on se trouve d'emmagasiner ces courants dans des accumulateurs ; on est obligé de laisser fonctionner de grosses machines jour et nuit bien que la consommation du courant ne soit considérable qu'à certaines heures, alors qu'avec les courants continus on peut charger des accumulateurs et avoir recours à cette énergie pendant les heures chargées.

Malgré ses inconvénients, le système de distribution par courants alternatifs fonctionne régulièrement dans un grand nombre de villes d'Europe ; il est sensiblement plus avantageux que la distribution par courant continu pour desservir des secteurs étendus.

Le choix d'un système de distribution est, le plus souvent, une question d'espèce et les progrès réalisés par l'industrie électrique font qu'un système rationnel et le meilleur possible au moment de son adoption devient suranné au bout de quelques années. La tendance générale est de distribuer à courant continu (110 ou 120 volts) et de centraliser la production dans des usines puissantes de courants alternatifs triphasés (fréquence 25). Celles-ci envoient les courants dans des sous-stations de transformation convenablement réparties dans le périmètre à desservir.

Distribution de l'énergie électrique à Paris. — Depuis 1907, la Compagnie parisienne de distribution d'Electricité (C. P. D. E.) a succédé aux six secteurs indépendants qui éclairaient Paris. Elle a dû étendre et refaire son réseau et un régime transitoire doit durer jusqu'en 1914. A ce moment, l'énergie électrique se vendra 3 centimes l'hectowatt au lieu de 7 centimes aujourd'hui. Le nouveau réseau comprendra trois

zones de distribution : les *quartiers du centre*, où la population est dense et la consommation intense, recevront du courant continu ; la *rive gauche et l'ouest de Paris* où la population est clairsemée, garderont le courant alternatif monophasé à 3 000 volts avec transformateurs abaissant la tension d'utilisation ; le *nord-est, l'est et le sud-est de Paris* recevront du courant alternatif biphasé en deux ponts à 110 volts. Il faut prévoir des sous-stations où s'effectuera la transformation du courant produit par les usines génératrices.

Rôle des transports de force. — Les transports de force à grande distance, par leur combinaison avec la distribution de l'énergie, fournissent la solution de l'une des questions les plus importantes dans les exploitations industrielles. En effet, en assurant d'une façon très simple la répartition de l'énergie à autant de machines que l'on veut et situées à des distances quelconques les unes des autres, ils permettent de réaliser d'une part des combinaisons de *centralisation de la production* de la force et, d'autre part, des combinaisons de *décentralisation de la consommation* de l'énergie, ce qui offre des avantages énormes dans les contrées industrielles.

Nous savons maintenant comment on *produit, mesure, transforme, transporte et distribue* l'énergie électrique : il nous reste à voir comment on *l'utilise*. L'*Électricité comme force motrice* avec ses applications à la *traction* (chemins de fer, tramways, automobiles), l'*Électricité comme source de lumière et de chaleur*, l'*Électricité dans la métallurgie*, l'*Électricité dans les gaz raréfiés*, tels sont les sujets qui vont tout d'abord nous occuper dans les conférences suivantes.

NOTES DE LA QUATRIÈME CONFÉRENCE

1. Ce rapport est appelé *rapport de transformation*.
2. Les pertes sont dues à l'échauffement des deux circuits, à l'hystérésis dans le circuit magnétique et aux courants de Foucault dans toutes les masses métalliques de l'appareil; elles se traduisent par un dégagement de chaleur. On refroidit le transformateur par la ventilation ou par une double circulation d'eau et de pétrole. La société A. E. G. de Berlin a construit un transformateur fournissant la tension énorme de 500 000 volts; il nécessite un bain d'huile de 8 000 litres.
3. RUHMKORFF (1803-1877). Constructeur d'instruments de physique. Né à Hanovre, il vint à Paris et travailla chez des fabricants d'instruments de précision où il se fit remarquer par la perfection de son travail. La bobine d'induction qu'il perfectionna en 1851 lui valut le prix Volta d'une valeur de 50 000 francs; en 1864, il obtint le grand prix qui n'avait pas encore été décerné.
4. On construit actuellement des bobines donnant des étincelles de 35 centimètres de long, dont le circuit induit est formé d'un fil de 4/100 de millimètre de diamètre, formant environ 300 000 spires. La longueur de ce fil atteint 10 kilomètres. Les spires sont soigneusement isolées, ainsi que les couches de spires successives.
5. Le condensateur imaginé par FIZEAU est logé dans le socle de la bobine; ses armatures sont formées de feuilles d'étain alternées et séparées par des feuilles de papier trempées dans la résine. Le condensateur de Fizeau est d'autant plus efficace que l'interrupteur est moins rapide. Avec les *interrupteurs électrolytiques*, comme celui du docteur WERNELT, capable de fournir jusqu'à 3 000 interruptions par seconde, le condensateur devient inutile.
6. D'après les statistiques du ministère de l'intérieur du Canada, l'énergie canadienne disponible est de 36 millions de chevaux-vapeur, alors que la puissance utilisée est environ de un demi-million. La chute de la rivière Hamilton fournit à elle seule 9 millions de chevaux-vapeur.
7. On rencontre actuellement, dans les centrales, deux types de turbines: les turbines horizontales, telles que les turbines Parsons utilisées à l'usine de Saint-Denis, et les turbines verticales, telles que les turbines Curtis employées surtout en Amérique. Celles-ci sont mieux équilibrées, mais font porter tout le poids du groupe électrogène sur un axe unique et ont l'inconvénient d'exposer l'alternateur, placé au-dessus de l'appareil à vapeur, à une fâcheuse élévation de température.
8. Il est indispensable que le mouvement de rupture soit produit brusquement afin d'abrèger autant que possible l'étincelle d'extra-courant qui jaillit au moment de l'ouverture du circuit et qui altérerait rapidement, si elle se prolongeait, les pièces en contact. Il y a, sur le tableau de distribution, autant d'interrupteurs que de dynamos et que de lignes de distribution.
9. Cette question a été envisagée pour la production de l'énergie élec-

trique destinée à Paris; on a proposé la consommation sur place, dans les houillères du Nord, des charbons médiocres qui ne valent pas le transport. On peut aussi s'adresser à des déchets d'industrie; il est certain que les gaz des hauts fourneaux de l'Est fourniront, d'ici quelques années, la lumière et l'énergie aux départements de la frontière.

10. Si les deux machines sont absolument identiques et tournent à la même vitesse, l'intensité dans le circuit est égale à 0.

11. Il s'agit d'une chute de 64 mètres de hauteur capable de fournir 150 000 kilowatts à l'heure, soit en un an 1 milliard 300 millions de kilowatts-heures. La réalisation de ce projet équivaut à la découverte d'une mine de houille produisant annuellement 1 700 000 tonnes environ.

12. Edison, électricien et inventeur américain, né en 1847. Il avait vingt-trois ans à peine qu'il était connu dans le monde entier comme l'un des plus féconds inventeurs. Au premier rang de ses travaux il faut placer la création d'un système complet d'éclairage électrique comprenant la dynamo, les canalisations et la lampe à incandescence; il faut citer aussi ses beaux travaux sur la téléphonie qui ont permis d'organiser des services urbains. En dehors de ces deux branches si importantes des applications modernes de l'électricité, l'activité d'Edison a trouvé large carrière dans l'invention d'une foule d'appareils ingénieux parmi lesquels les plus populaires sont : la plume électrique, le phonographe, le kinétoscope, le kinétographe, le phono-kinétographe. Edison a personnifié en Amérique la science électrique pratique.

13. On peut aussi intercaler des lampes à arc entre les conducteurs dont la différence de tension est 110 volts. En effet, chaque lampe exigeant 45 volts, il suffit de monter deux lampes et une résistance en série entre les conducteurs de la canalisation : les lampes reçoivent alors le courant normal. Il est aussi possible de brancher des lampes à intensité lumineuse moindre et fabriquées pour supporter une tension plus faible; seulement, il faut en monter en série un nombre suffisant pour que la somme de leurs tensions normales fasse 110 volts.

14. La fréquence varie entre 15 et 135 périodes par seconde, mais la tendance actuelle est d'abandonner les fréquences élevées qui ne conviennent pas à l'emploi de moteurs électriques. Les installations actuelles comportant peu de force motrice se font à des fréquences comprises entre 40 et 60 périodes par seconde, tandis que dans les installations comportant beaucoup de force motrice, la fréquence généralement adoptée est de 25 périodes par seconde.

CINQUIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ, SOURCE DE LUMIÈRE

ARC ÉLECTRIQUE ET LAMPE A INCANDESCENCE

Conséquences de la loi de Joule. — Echauffement des conducteurs. — L'éclairage électrique, ses progrès, ses principes, ses deux solutions : la lampe à incandescence et l'arc électrique. — I. *La lampe à incandescence* (lampes à filaments de charbon et lampes à filaments métalliques). — Dépenses comparatives et consommation. — II. *L'arc électrique* (arc à air libre et arc en vase clos). — Charbons et régulateurs. — Lampes à arc électrique. — III. Installation et avantages de la lumière électrique. — IV. *Les applications de la lumière électrique* : dans la maison, dans l'industrie, dans la navigation et dans les théâtres.

Nous avons déjà vu, au cours des conférences précédentes, qu'un fil métallique s'échauffe quand il est parcouru par un courant électrique ; nous avons même indiqué que *la quantité de chaleur produite par le passage du courant est proportionnelle à la résistance R du courant, au carré I² de l'intensité, et au temps pendant lequel passe le courant*. Elle est exprimée par la formule Q (calories) = 0 cal. 24 \times R (ohms) \times I² (ampères) \times t (secondes). Comme 0 cal. 24 correspond à 1 joule, on peut remplacer la quantité de chaleur produite dans un circuit par la quantité d'énergie équivalente : $W = RI^2t$ joules⁴. Cette formule résume la **Loi de Joule**, et la chaleur développée porte le nom de **chaleur Joule**.

La mise en jeu de la chaleur par le passage des courants élec-

triques a reçu des applications fort importantes dont l'étude va maintenant nous occuper.

Échauffement des conducteurs. — La chaleur qui se dégage continuellement dans un fil a pour effet d'en élever progressivement la température. Si le courant est suffisamment intense et la résistance très élevée, cette augmentation de température peut être assez considérable pour que le fil commence à rougir, puis devienne *incandescent*. Les courants très intenses arrivent à fondre des barres de cuivre : le fait s'est produit accidentellement à New-York lors de la première installation de stations centrales dans cette ville.

L'incandescence des conducteurs peut enflammer les substances combustibles placées dans leur voisinage, aussi un certain nombre d'incendies ont cette origine. Pour parer à ce danger, on intercale dans diverses portions du circuit des fils métalliques formés d'alliages de plomb fusibles à basse température. Si l'intensité du courant devient anormale, ces **plombs fusibles** ou **coupe-circuits** sont fondus et le courant est interrompu. Mais les applications les plus importantes de la loi de Joule sont *l'éclairage* et *le chauffage électriques*.

Progrès de l'éclairage. — Sans vouloir faire ici l'historique de l'éclairage, nous nous bornerons à faire remarquer combien l'œil humain est exigeant et qu'il demande d'année en année des quantités de lumière de plus en plus grandes.

En 1745, pour le mariage du Dauphin, la Galerie des Glaces du Palais de Versailles fut éclairée d'une façon telle que tout le monde en fut émerveillé; les journaux de l'époque regardèrent cette orgie de lumière comme un événement prodigieux. On n'avait pourtant employé que 1 800 chandelles de cire. En 1873, dans la même salle, on offrit une magnifique réception au shah de Perse : à cette occasion on alluma 4 000 bougies, ce qui parut très normal. En 1878, au moment de l'Exposition universelle, il fallut employer 8 000 bougies et bien des invités se plainquirent du manque de lumière. Aujourd'hui les salons de l'Hôtel de Ville de Paris ont recours à un éclairage correspondant à 15 000 bougies². Le brillant éclairage de nos rues et de nos boulevards est tout récent. C'est en 1769 qu'apparurent les réverbères à huile, immense pro-

grès sur les lanternes garnies de chandelles de suif ; en 1830 seulement, la rue de la Paix, à Paris, la rue la plus favorisée, fut éclairée au gaz, et ce n'est qu'en 1878 que la lumière électrique a commencé à briller sur nos voies publiques. De nos jours, l'intense éclairage dont nous jouissons n'est-il pas jugé insuffisant ?

L'éclairage intensif semble être la forme la plus caractéristique du luxe et du confort modernes. La lumière électrique, par sa facilité d'allumage et d'extinction, par les avantages qu'elle présente au point de vue d'hygiène et de sécurité, enfin par sa beauté, est peut-être l'application qui a le plus contribué à rendre populaire la science électrique.

Progrès scientifiques de l'éclairage. — Un corps lumineux est un corps qui communique à l'éther environnant des vibrations plus ou moins complexes, mais dont quelques-unes sont capables d'impressionner notre œil. Le plus souvent, l'énergie émise par le corps lumineux est empruntée à une source calorifique ; dans ce cas, il s'agit d'un *phénomène d'incandescence*. Parfois le corps lumineux est une substance qui subit une modification chimique, comme le phosphore qui s'oxyde, ou bien qui reçoit un apport d'énergie électrique, comme un gaz raréfié, qui s'illumine par une décharge électrique : dans ce cas il s'agit d'un *phénomène de luminescence*.

Jusqu'à ces dernières années, on ne connaissait guère que des phénomènes d'incandescence produits par le charbon. C'est du charbon incandescent qui éclairait nos ancêtres quand ils faisaient usage de leurs fumeuses torches de résine ; c'est aussi du charbon qui nous éclaire quand nous allumons une bougie, une lampe ou un bec de gaz ; c'est encore du charbon qui nous envoie de la lumière quand nous faisons passer un courant dans les lampes électriques de nos appartements ou que nous circulons sur les boulevards éclairés par leurs globes éblouissants. D'après M. STÉPHAN, on peut dire que *la puissance rayonnée est sensiblement proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue* et s'élève, par suite, très rapidement lorsque cette température augmente. D'autre part, il résulte des recherches de M. WIEN que, si la température augmente, les ondes émises deviennent de plus en plus courtes, autrement dit : *le rendement lumineux s'améliore*. Chacun

sait d'ailleurs qu'au-dessous de 500 degrés, les solides rayonnent seulement de la chaleur obscure, puis qu'au-dessus de 500 degrés le rayonnement comprend des radiations lumineuses dont la couleur est successivement rouge, cerise, orangée, blanche et arrive au blanc ébouissant.

Ainsi, *plus un corps est chaud, plus il rayonne de lumière et plus cette lumière est blanche*. Si l'on veut s'éclairer avec des solides incandescents, on a tout intérêt à porter ces solides à la plus haute température possible, et cela non seulement au point de vue de la beauté de l'éclairage — la lumière étant d'autant plus plaisante à l'œil qu'elle est plus blanche — mais encore au point de vue économique, car ce sont les corps les plus chauds qui ont le meilleur *rendement optique*, c'est-à-dire qui restituent en énergie lumineuse la fraction la plus grande de l'énergie qu'il a fallu dépenser pour les échauffer.

Les progrès réalisés dans l'éclairage par incandescence électrique sont dus à l'emploi de corps rayonnants à des températures de plus en plus élevées. Quand on fait passer un courant dans un fil conducteur, on est arrêté, dans l'élévation de la température, par la volatilisation du fil ; avec des métaux réfractaires comme ceux que l'on emploie actuellement (osmium, tantale, tungstène), le rendement optique est bien supérieur à celui que peut fournir le carbone, car on peut atteindre 2000° au lieu d'être arrêté au voisinage de 1700°.

Les principes précédents ne sont applicables qu'aux solides. Pour rendre lumineux les gaz et les vapeurs, on les enferme, sous une faible pression, dans un tube en verre dans lequel deux électrodes métalliques permettent de faire passer un courant électrique. Dans ces conditions, chaque gaz ou chaque vapeur donne une qualité de lumière qui dépend de sa nature chimique, et qui est constituée par un petit nombre de radiations : on n'y trouve donc pas toutes les couleurs du spectre (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge) dont la superposition constitue la lumière blanche.

Dans cette conférence, nous n'étudierons que les phénomènes d'**incandescence** produits par les courants électriques (éclairage par lampes à incandescence et par l'arc électrique, chauffage électrique), réservant pour une conférence spéciale les phénomènes plus récemment connus et utilisés, de **luminescence** (arc au mercure, lumière froide, etc.).

La lampe à filament de charbon. — *La lumière à incandescence électrique a pour principe, l'échauffement déterminé, dans un conducteur, par le passage d'un courant.* D'après la loi de Joule, à intensité égale de courant, l'échauffement d'un conducteur est d'autant plus considérable que sa résistance est plus élevée.

Le fil dans lequel on fait passer le courant doit posséder, outre une *grande résistance électrique*, un *grand pouvoir émissif* et une *grande solidité* lui permettant de résister aux dilatations inégales produites par les variations du courant. On pensa tout d'abord aux métaux : platine, iridium, mais ces métaux deviennent pâteux et se cassent après plusieurs refroidissements successifs. On pensa ensuite au charbon que l'on n'avait pas encore fait fondre par aucun procédé. En 1844, STARR de Cincinnati opéra avec une baguette de charbon ; il vint à Londres présenter son expérience à FARADAY et eut un succès complet dans une expérience publique où brillèrent vingt-six lampes symbolisant les Etats de l'Union américaine ; mais, de retour en Amérique, il mourut pendant la traversée. En 1858, DE CHANGY, ingénieur des mines en Belgique, imagina une lampe où, pour éviter la combustion du charbon, un mince filament de charbon était enfermé dans une ampoule vide d'air : mais à l'Académie des Sciences où elle fut présentée, la lampe reçut un accueil si froid que de Changy abandonna ses recherches. En 1880, on apprit qu'EDISON venait d'inventer une lampe incombustible pouvant durer plusieurs mois sans se détériorer ; on resta d'abord fort incrédule. Aussi, la surprise fut-elle grande en 1881, quand, à l'Exposition d'électricité de Paris, on vit les représentants du célèbre américain installer des machines à vapeur, des dynamos, des lampes, des lustres, des appliques. Cette surprise se transforma bien vite en admiration : la lampe à incandescence venait de faire une entrée triomphale dans le monde.

En quoi consistent les perfectionnements apportés par Edison ? Il s'agissait d'obtenir des tranches de charbon suffisamment minces sans nuire à leur solidité. Edison commença par découper de petites feuilles de bristol en forme de fer à cheval, qu'il plaçait dans un moule de même forme et portait à une température très élevée ; puis après avoir essayé de remplacer le carton par diverses matières végétales pour constituer son filament de charbon, il fixa son choix sur les fibres de bambou

du Japon. La **lampe Edison** comprenait un filament de charbon enfermé dans une ampoule de verre ayant la forme d'une poire; le vide fait au moyen d'un tube de verre que l'on sépare ensuite à la lampe d'émailleur empêche le fil de brûler et, en outre, pour une même dépense d'énergie, lui permet d'atteindre une température plus élevée que dans un gaz, c'est-à-dire d'éclairer davantage. Le charbon ne pouvant être scellé dans le verre par fusion, Edison fut obligé de réunir les extrémités du filament de charbon à des fils de platine, les quels sont susceptibles de se souder au verre parce qu'ils ont le même coefficient de dilatation que lui. Les extrémités des fils de platine sortent à l'extérieur de l'ampoule et sont reliées à deux pièces de métal isolées auxquelles on donne le nom de *contacts de la lampe*. Pour se servir de la lampe, on l'introduit dans une *douille* fixée aux appliques, lustres, supports de lampes, etc., et qui reçoit le courant; un interrupteur placé sur la canalisation ou sur la lampe permet de fermer et d'ouvrir le

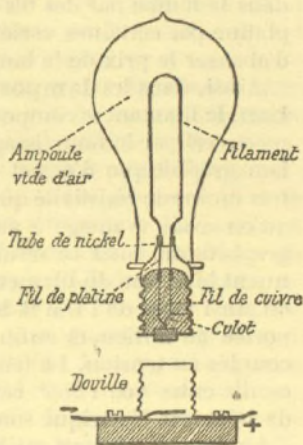


FIG. 47. — Lampe à incandescence.

circuit, et, par suite, d'allumer ou d'éteindre la lampe. La **lampe Swan**, imaginée presque en même temps que celle d'Edison, renfermait un filament obtenu en parcheminant dans l'acide sulfurique une tresse de coton et en la carbonisant dans du poussier de charbon.

Les lampes à filaments de charbon ont été peu à peu perfectionnées et leur prix a été considérablement baissé. Aujourd'hui, le filament s'obtient à l'aide d'une pâte de cellulose (coton dissous dans du chlorure de zinc) qu'on coule dans des filières; on obtient ainsi une matière semblable à du crin, qu'on recourbe et qu'on carbonise dans des moules en fonte. Ce filament est recouvert par *nourrissage* d'une couche de graphite, ou carbone plus conducteur : à cet effet, on le porte au

rouge par un courant électrique dans un espace rempli de vapeurs de benzine; la benzine se décompose et son carbone se dépose, sous forme de graphite, à la surface du filament. Celui-ci grossit et s'égalise en devenant plus élastique et meilleur conducteur. Les deux extrémités du filament sont soudées à de petits tubes de nickel et reliées à des fils de platine qui permettent de le soutenir dans l'ampoule; le courant est amené dans la lampe par des fils de cuivre. On remplace souvent le platine par certaines variétés d'acier au nickel ce qui permet d'abaisser le prix de la lampe.

Ainsi, dans les **lampes modernes à filament de charbon**, le filament se compose d'un noyau en charbon ordinaire recouvert par le nourrissage d'un tube ou enveloppe de charbon graphitique d'aspect métallique, solide et présentant six fois moins de résistivité que le charbon de l'âme. On a reconnu qu'on avait avantage à augmenter la proportion de charbon graphitique, mais ce résultat n'a pu être obtenu qu'en diminuant la section du filament et en augmentant sa longueur. On est ainsi passé de l'U à la boucle, puis à la grande boucle supportée au milieu, et enfin à l'emploi de deux filaments en U couplés en tension. La température du filament d'une lampe oscille entre 700-1800° centigrades; 3 à 4 p. 100 seulement de l'énergie électrique sont transformés en lumière.

Le vide est fait à un millionième d'atmosphère à l'aide d'une trompe à mercure; par le procédé Malignani, l'opération ne dure que deux minutes. L'indice d'un bon vide est la vibration du filament pendant une longue durée après un choc.

Les lampes peuvent être actionnées par du courant alternatif ou par du courant continu. Il existe un moyen très simple de vérifier la nature du courant qui traverse la lampe: il suffit d'en approcher un aimant. Si la lampe est alimentée par du courant alternatif, le filament de charbon vibre par suite des actions électromagnétiques qui changent de sens à chaque demi-période; si elle est traversée par du courant continu, le filament est attiré par un des pôles et repoussé par l'autre³.

La **puissance lumineuse** dépend de la valeur de la résistance du filament de charbon pour une intensité donnée. La résistance du charbon diminue, même très considérablement, lorsque sa température augmente, de sorte que la résistance d'une lampe à incandescence à chaud est à peu près la moitié

de la résistance à froid. On peut obtenir une puissance lumineuse quelconque d'une lampe : il suffit d'y faire passer des courants d'intensités différentes ; mais le courant électrique produit une action de désagrégation sur les filaments, une sorte de volatilisation. Pour chaque lampe, il existe une intensité déterminée pour laquelle elle donne une puissance lumineuse suffisante, sans être soumise à un travail excessif. La coutume est de désigner les lampes par le nombre de volts qu'elles exigent pour brûler normalement ; on dit une lampe de 50, 65, 110 volts. Chaque lampe a une **intensité lumineuse** normale déterminée, et on fait des lampes à incandescence de toutes grandeurs et dont l'intensité peut être de 5, 10, 16, 32, 50 bougies, etc. Pour l'éclairage des appartements, on utilise généralement des lampes de 16 bougies ; quand on désire un éclairage plus puissant, on a recours à des lampes de 25, 32 ou 50 bougies ; enfin, pour l'éclairage des rues, on dispose de lampes de 100 à 200 bougies. L'intensité lumineuse d'une lampe diminue sensiblement par l'usage : ainsi, une lampe de 16 bougies ne donne plus que 12 bougies après 200 heures, 10 bougies au bout de 600 heures, 8 bougies au bout de 1 000 heures. Par contre, si l'intensité lumineuse augmente en forçant le voltage, la durée diminue : une lampe de 16 bougies sous 100 volts fournit 19 bougies sous 105 volts, mais dure trois fois moins longtemps.

Chaque lampe, en brûlant, exige une certaine **puissance**. Une lampe de 16 bougies, avec une résistance de 200 ohms à chaud, est parcourue par un courant de 0,5 ampère, sous 110 volts : elle absorbe donc une puissance de $0,5 \times 110 = 55$ watts, ce qui représente 3,44 watts par bougie⁴. En général, les lampes à incandescence exigent toujours entre 2,5 et 3,5 watts par bougie. Dans les premiers temps de l'éclairage à incandescence, la dépense d'énergie était beaucoup plus élevée et atteignait 80 watts et même davantage pour une lampe de 16 bougies.

Les lampes à incandescence sont fabriquées par de nombreuses maisons : le filament affecte des formes différentes : le verre des ampoules est transparent ou dépoli, coloré ou incolore. On fabrique enfin de *petites lampes* destinées aux tensions peu élevées et qui peuvent être alimentées par le courant d'un accumulateur ou de piles sèches ; leur intensité lumineuse est

faible, 1/10 de bougie environ; elles sont employées soit en médecine soit comme lampe de poche, etc.

Lampes à incandescence dont le filament n'est pas en charbon. — Le succès de l'incandescence par le gaz imaginée par AUER fut le commencement d'une lutte livrée entre l'éclairage par le gaz et l'éclairage par l'électricité; la lumière du manchon Auer est non seulement, plus puissante que celle de l'électricité mais surtout bien meilleur marché. Pour lutter contre cette concurrence, il fallut perfectionner l'incandescence électrique, *obtenir des lampes qui consomment moins de courant que les lampes ordinaires à incandescence.*

On pensa tout d'abord à remplacer le charbon par les *terres rares* dont sont imprégnés les manchons à gaz. Ces substances peuvent supporter une température bien supérieure à celle à laquelle on peut soumettre le charbon, mais malheureusement elles ne sont pas conductrices à froid; il faut au préalable les chauffer. Le problème a été résolu par la Société A. E. G. de Berlin qui installa, en 1900, à l'Exposition de Paris, la **lampe Nernst**⁵. Dans cette lampe, le corps porté à l'incandescence est un bâtonnet en oxyde réfractaire (magnésie mélangée à des terres rares); afin de le protéger contre les chocs, on le dispose au milieu d'une ampoule ouverte et la lampe ressemble beaucoup dans son ensemble à une lampe à incandescence ordinaire. L'échauffement préalable est réalisé automatiquement par une spirale chauffante enroulée autour du bâtonnet. Le courant passe dans la spirale au moment de l'allumage et se trouve automatiquement rompu. La lumière de la lampe Nernst est très blanche et très puissante: elle dépasse en blancheur et en beauté celle du manchon Auer. L'intensité lumineuse va de 16 à 250 bougies. La consommation de courant n'atteint que 1,5 à 1,7 watt environ par bougie, soit la moitié de ce qu'exige la lampe ordinaire à incandescence. La durée de cette lampe n'est que de trois cents heures environ. En résumé, la lampe Nernst qui fit grand bruit au moment de son apparition, en Allemagne et en Angleterre, présente des inconvénients (allumage lent, durée faible, sensibilité aux variations de tensions, prix d'achat élevé) compensés par la beauté de la lumière, l'économie de consommation de courant et l'utilisation facile des

courants à potentiels élevés. Le rendement est intermédiaire entre la lampe à incandescence à filament de charbon et la lampe à arc.

On a vu que la lumière émise par un corps incandescent croît avec la température; si donc on trouvait des fils métalliques susceptibles de supporter des températures plus élevées que les filaments de charbon, on devrait pouvoir s'en servir pour construire des lampes plus économiques que les précédentes.

M. AUER VON WELSBACH, le célèbre inventeur de l'éclairage qui porte son nom, choisit un filament d'osmium, métal rare de la mine de platine, fondant à 2 500°. La **lampe Osmium** ne consomme plus que 1 watt 5 par bougie.

La résistance de l'osmium, contrairement à ce qui se produit dans le cas du charbon, augmente avec la température : cette circonstance est favorable, parce qu'elle permet de régulariser le courant qui traverse la lampe et de rendre ainsi l'intensité lumineuse plus indépendante des variations de tension dans le réseau. La lampe peut durer un millier d'heures; mais, en raison de sa construction difficile⁶, elle a l'inconvénient de coûter assez cher. En 1905, apparut la **lampe Tantale** de la maison Siemens et Halske. Le tantale⁷ est un métal précieux de la famille du platine. Comme sa résistivité est faible, il est nécessaire d'avoir des fils très minces et très longs : dans le mo-

dèle le plus répandu, le filament a 650 millimètres de longueur et 5/100^{es} de diamètre. Ce long filament de tantale est accroché en zigzag à de petits crochets; ses extrémités communiquent par des fils de platine avec le culot de la lampe. Ces lampes sont construites pour des intensités lumineuses de 10, 16, 25, 32, 50 bougies aux tensions de 110 et 120 volts. Les plus répandues sont celles de 25 bougies; elles n'exigent que 50 p. 100 environ du courant nécessité par une lampe à filament de carbone de même intensité, soit 1,5 à 1,7 watt par bougie. La durée des lampes tantale est de mille heures environ dans les conditions normales, mais leur pouvoir éclairant baisse assez fortement à partir de trois cents heures. Elles présentent une



FIG. 48.
Lampe à filament métallique.

propriété curieuse : tandis qu'une lampe à fil de carbone devient inutilisable dès que le filament est rompu, il arrive souvent, dans les lampes tantale, que le fil brûlé vient en contact avec le filament voisin et rétablit ainsi le courant interrompu. Une lampe tantale brûlée n'a pas besoin d'être immédiatement remplacée.

L'idéal que se sont proposé les techniciens est de construire une lampe qui ne consommerait qu'un watt par bougie. On essaya le tungstène, en allemand wolfram⁸; la consommation baissa au voisinage d'un watt par bougie, mais les lampes au wolfram présentaient le grave défaut de faire preuve d'une fragilité excessive et le filament se cassait à la moindre secousse. Les premiers essais du filament de wolfram ne purent donc être généralisés et le public commençait à se détourner de la nouvelle invention, quand un savant autrichien, le docteur H. KUZEL fit une remarquable découverte qui fit changer la face des choses. Il constata que le wolfram extrêmement divisé conduit à l'état colloïdal (c'est-à-dire à un état tel que le mélange de cette poudre, infiniment divisée, avec l'eau distillée, forme une masse plastique absolument homogène). Le filament de wolfram pur était trouvé, et les lampes ainsi fabriquées présentent toutes les qualités des lampes précédentes sans en avoir la fragilité. Le docteur Kuzel donna à sa lampe le nom de *Kolloïd*, auquel, en raison du magnifique éclat du filament incandescent, il ajouta le vocable *Sirius*. La lampe **Sirius-Kolloïd** est très répandue en raison de la très grande économie qu'elle fait réaliser par sa longue existence (1 000 heures environ), et pour sa lumière blanche qui ne varie jamais de la première heure à la dernière. Les théâtres, les music-halls, notamment l'Opéra-Comique et les Folies-Bergère, dont les brillantes mises en scène à profusion de lumière sont bien connues de tous, ont adopté la lampe Sirius-Kolloïd.

La lampe **Z**, au zircone-wolfram, possède un filament de 0,6 millimètres de diamètre absorbant 1 volt par 5 millimètres. Le type normal donne 45 bougies avec une consommation spécifique de 1 watt par bougie ; après 1 000 heures de fonctionnement la puissance est de 35 bougies.

Un autre progrès très important a été fait dans la construction des lampes à filament métallique, quand la Société Auer

a établi la **lampe Osram**, dont le nom est composé du commencement du mot *osmium* et de la fin du mot *wolfram*. On n'est pas très fixé sur la constitution du filament qui semble être essentiellement du tungstène. Ses avantages sont très nombreux : faible consommation de courant, d'un watt par bougie environ représentant une économie de courant de 75 p. 100 par rapport à la lampe à filament de carbone ; durée très longue ; lumière parfaitement blanche ; intensité lumineuse constante (la diminution d'intensité lumineuse au bout de 1 000 heures n'est que de 4 p. 100) ; chaleur radiante très faible (70 p. 100 de moins qu'avec une lampe à filament de carbone) ; la lampe fonctionne dans toutes les positions et aussi bien sur courant alternatif que sur courant continu, s'accommode de toutes les tensions et se fait pour des intensités lumineuses allant jusqu'à 1 000 bougies.

La lampe Osram gagne du terrain de jour en jour, et bon nombre de villes, principalement à l'étranger, l'ont adoptée

Comparaison des dépenses de courant des lampes à filament de carbone et des lampes à filament métallique

(LAMPE OSRAM)

Pour un prix du kilowatt-heure de		70 centimes.	60 centimes.	55 centimes.	50 centimes.	45 centimes.	40 centimes.	30 centimes.
16 bougies.	Lampe à filament de carbone . .	4,48	3,84	3,25	3,20	2,88	2,56	1,92
	Lampe Osram . .	1,26	1,08	0,52	0,90	0,81	0,72	0,54
25 bougies.	Lampe à filament de carbone . .	7 »	6 »	5,50	5 »	4,50	4 »	3 »
	Lampe Osram . .	1,75	1,50	1,37	1,25	1,12	1 »	0,75
32 bougies.	Lampe à filament de carbone . .	8,96	7,68	7,04	6,40	5,76	5,12	3,84
	Lampe Osram . .	2,24	1,92	1,76	1,60	1,44	1,28	0,96
50 bougies.	Lampe à filament de carbone . .	14 »	12 »	11 »	10 »	9 »	8 »	6 »
	Lampe Osram . .	3,50	3 »	2,75	2,50	2,25	2 »	1,50

pour l'éclairage des rues. Malgré son prix de quatre à six fois plus élevé que celui des lampes à filament de carbone, l'économie réalisée par son emploi est très grande, car quelques centaines d'heures d'allumage suffisent pour compenser la différence des prix d'achat. On peut d'ailleurs s'en rendre compte par l'examen du tableau qui précède.

L'économie extraordinaire réalisée par ces lampes leur a ouvert un nouveau champ d'application. La Société des lampes Osram a établi des **lampes dites intensives** de 100 à 1 000 bougies remplaçant avantageusement les lampes à arc. Ces lampes intensives, en effet, n'ont pas de charbons à remplacer, n'exigent aucun service de contrôle, fournissent une lumière absolument fixe et parfaitement blanche, assurent une excellente répartition de la lumière, peuvent fonctionner pendant 1 000 heures, fonctionnent aussi bien sur courant continu que sur courant alternatif et sous des tensions de 90 à 260 volts. On les emploie avantageusement pour l'éclairage des magasins, des expositions, des grands restaurants, des boulevards, des gares, des ports, pour les réclames lumineuses. Enfin, la lampe intensive, munie d'armatures spéciales, permet de réaliser dans les meilleures conditions possibles l'*éclairage indirect*, se rapprochant de la lumière solaire diffuse, et que l'on recommande pour les écoles et les salles de dessin, autant que pour les salles d'exposition⁹. Cette intrusion des lampes à incandescence dans le domaine jusqu'ici réservé aux lampes à arc prouve bien les progrès réalisés dans la fabrication des lampes à incandescence, grâce aux filaments métalliques. Un bel avenir est réservé aux lampes intensives; elles marquent une étape nouvelle dans l'évolution de l'éclairage électrique.

Consommation spécifique des lampes à incandescence. — Cette consommation dépend de l'intensité absolue du foyer, de la différence de potentiel normale, de la durée de fonctionnement et aussi de la poussée. Les lampes *poussées*, dites lampes économiques ou à faible consommation, ayant une durée ou vie plus courte, produisent une lumière plus blanche, mais d'un affaiblissement plus rapide. Les lampes à basse tension sont plus économiques que les lampes à haute tension, parce qu'il est possible de les pousser davantage et que leur

masse plus grande les rend moins sensibles aux variations du courant, le filament formant volant de chaleur. On admet qu'une lampe à incandescence est usée, quand son intensité lumineuse s'est affaiblie de 20 p. 100.

Autre utilisation des lampes à incandescence. — Les lampes ont une résistance considérable et elles sont capables de supporter des intensités de courant relativement grandes ; ce sont autant de qualités que l'on utilise pour fabriquer économiquement des **rhéostats pour fortes intensités**, rhéostats dont la construction reviendrait excessivement cher, s'ils étaient constitués par des fils.

L'arc électrique. — En 1807, SIR HUMPHRY DAVY¹⁰ qui venait d'entrer en possession d'une pile de 2000 éléments qui lui avait été offerte par souscription, en réunit les deux pôles à deux crayons de charbon qui se touchaient par leur extrémité ; écartant ensuite légèrement les deux charbons, il vit jaillir une lumière excessivement vive. Les extrémités du charbon étaient portées au rouge blanc, et l'air interposé devenait incandescent. A ce phénomène, Davy donna le nom d'**arc voltaïque**¹¹.

Depuis sa découverte, l'arc voltaïque est devenu non seulement le foyer de lumière le plus puissant, mais l'Électrochimie et l'Électrométallurgie le comptent au nombre de leurs auxiliaires les plus précieux ; la Science et l'Industrie ne possèdent pas de serviteur plus souple et plus dévoué.

Le **mécanisme intime de l'arc électrique** est encore en partie mystérieux. L'arc est un cas particulier du phénomène général de la décharge électrique à travers les gaz, phénomène que nous examinerons au cours de ces conférences et qui est particulièrement complexe et délicat à étudier. Des recherches récentes ont montré que tout corps porté à l'incandescence émet, en quantité d'autant plus grande que sa température est plus élevée, des électrons négatifs ; ceux-ci seraient projetés avec une grande vitesse par la cathode¹² et viendraient choquer les molécules de gaz ou de vapeur qui se trouvent dans son voisinage. De ces chocs résulte une nouvelle dissociation atomique à laquelle on a donné le nom d'**ionisation**. En d'autres termes, un certain nombre de

molécules ou d'atomes de l'atmosphère gazeuse dans laquelle sont baignées les électrodes se brisent par les chocs : chacune des parties résultant de cette dissociation devient un centre électrisé, l'un constituant l'ion électro-positif (chargé positivement), l'autre l'ion électro-négatif (chargé négativement et d'une charge égale). Comme ces ions se trouvent dans un champ électrique, ils se meuvent en sens inverse les uns vers



FIG. 49. —
Charbons
entre les-
quels jai-
llit l'arc
électrique.

la cathode, les autres vers l'anode, choquant et ionisant à leur tour d'autres molécules ou atomes sur leur passage. Le résultat de ce processus est un véritable bombardement de la cathode par les ions positifs et de l'anode par les ions et électrons négatifs. C'est ce bombardement qui élèverait la température et maintiendrait en particulier l'incandescence de la cathode, incandescence nécessaire à l'émission toujours renouvelée de nouveaux électrons : c'est lui qui assurerait la persistance de l'arc.

Pour obtenir un bon arc, il suffit de disposer d'une force électromotrice de 35 à 80 volts et d'une intensité de 10 ampères environ. Le procédé le plus commode pour étudier en détail l'aspect du phénomène consiste à projeter son

image sur un écran à l'aide d'une lentille convergente. On reconnaît alors que *l'arc lui-même est beaucoup moins éclatant que les pointes des charbons*, et, en particulier, que celle du charbon positif : on voit, d'ailleurs, que celui-ci se creuse en *cratère*, tandis que le charbon négatif s'allonge en *pointe*, et l'on constate nettement un *transport de matière* de l'un à l'autre dans le sens du courant. Le charbon positif s'use deux fois plus vite que l'autre.

Un résultat capital découle des recherches calorimétriques qui ont eu pour objet de déterminer la **température de l'arc** : c'est que *la température de la pointe positive est toujours la même*, aussi bien pour les arcs faibles que pour les plus puissants ; on l'évalue à 3 500°. Ce fait indique évidemment que cette pointe est le siège d'un changement d'état bien défini qui ne peut être que *l'ébullition du carbone*.

L'arc lui-même est constitué par un mélange d'air et de vapeur de carbone dont la température est au moins de 3 500° :

il constitue un conducteur très résistant dans lequel le courant développe, d'après la loi de Joule, une grande quantité de chaleur.

L'arc électrique est la source lumineuse la plus puissante que l'Homme ait pu établir jusqu'ici; d'ailleurs aucune lumière, sauf celle du Soleil, ne la dépasse en intensité. Il semble que l'arc électrique dut entrer immédiatement dans la pratique : or, il n'en fut pas ainsi. A l'époque où DAVY observa le phénomène, il n'était pas possible de l'appliquer à un mode d'éclairage régulier. Les générateurs d'électricité étaient insuffisants : les piles à liquide unique dont on disposait fournissaient un courant trop inconstant et trop onéreux. D'autre part, l'arc était instable : les charbons entre lesquels jaillit la lumière se consomment peu à peu, l'écart entre les deux points augmente, ce qui accroît la résistance et finit par empêcher le flux électrique de franchir la couche d'air interposée. Alors l'arc s'éteint.

Avant de chercher comment l'éclairage par l'arc électrique a été rendu pratique, nous examinerons les *conditions dans lesquelles on peut obtenir un arc* et quelles sont les *caractéristiques* de celui-ci.

L'arc à air libre et en courant continu. — Cet arc est celui que nous venons de décrire : son éclat varie entre 150 bougies par millimètre carré pour les arcs de faible intensité, et 220 bougies par millimètre carré pour les arcs de grande intensité. Il se comporte comme une résistance variant avec la nature des charbons, leur diamètre, l'intensité du courant, etc. Un arc trop court siffle, un arc trop long flambe. Les deux charbons s'usent, mais inégalement, aussi, pour compenser la forte usure du charbon positif, donne-t-on à celui-ci un diamètre plus fort. Pour un arc de 10 ampères qui possède un charbon positif de 17 millimètres de diamètre et un charbon négatif de 11 millimètres seulement, l'usure en longueur sera, pour chacun d'eux, d'environ 12 millimètres par heure.

L'arc à air libre et en courant alternatif. — On peut alimenter l'arc électrique aussi bien avec le *courant alternatif* qu'avec le *courant continu*; il y a cependant quelques différences : comme les deux crayons sont alternativement $+$ et $-$, ils sont

tous les deux à la même température, voisine de 3000 degrés; ils se taillent tous deux en pointe et s'usent à peu près également; l'usure est un peu plus forte pour le crayon supérieur frappé plus directement par le courant d'air qui monte le long des charbons. Il résulte de là qu'un arc alternatif alimenté par 10 ampères efficaces, donnera moins de lumière qu'un arc consommant 10 ampères en courant continu, parce que l'émission lumineuse ne se fera pas par une large surface à haute température comme le cratère positif; de plus, en supposant les crayons verticaux (ce qui est le cas général), la lumière du charbon inférieur est rayonnée surtout vers le haut, c'est-à-dire dans une direction où elle rend peu de services.

Caractéristiques de l'arc électrique. — La lumière de l'arc donne un spectre assez étendu dans l'ultra-violet; présentant les raies du charbon et des matières étrangères qui peuvent s'y

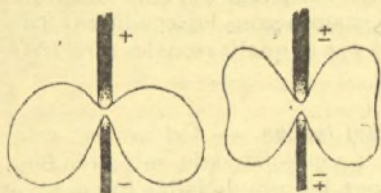


FIG. 50 et 51. — Répartition de la lumière autour de l'arc continu (à gauche) et de l'arc alternatif (à droite).

trouver (fer, silicium, manganèse). Pour utiliser le mieux possible la lumière émise par le cratère positif, on dispose toujours les charbons verticalement, de manière à ce que le charbon positif se trouve à la partie supérieure. Les points d'égal éclairement dessinent, dans le plan vertical, une courbe qui donne une idée très nette de la répartition de la lumière : les figures ci-dessus montrent que pour l'arc continu ou alternatif, les crayons portent ombre dans les directions voisines de la verticale; c'est toujours à 45 degrés environ de la verticale qu'il y a le plus de lumière rayonnée. Lorsque l'arc est enfermé dans un globe en verre dépoli, ouvert à sa partie supérieure, on obtient une distribution plus régulière de la lumière.

La consommation spécifique des arcs à courant continu est comprise, pour les modèles ordinaires, entre 1/2 watt à 1 watt par bougie; elle est, toutes choses égales, un peu

plus forte pour l'arc alternatif. La consommation spécifique est d'ailleurs plus faible pour les arcs puissants, qui produisent plusieurs milliers de bougies. L'arc sera donc l'éclairage par excellence des grands espaces, ateliers, halls, gares, rues et places, mais il ne se laisse pas fragmenter en foyers de faible intensité; c'est pourquoi *l'incandescence reste l'éclairage des espaces restreints*. Une autre cause concourt au même effet : les tensions employées couramment sont 110 et 220 volts; il convient donc, pour utiliser convenablement ces tensions, de placer en série deux ou trois arcs sur 110 volts, 5 à 6 arcs sous 220. L'arc isolé ne serait donc pas économique en courant continu, puisqu'il faudrait absorber une grande partie de la tension dans une résistance morte; en alternatif, on emploierait plus économiquement, une bobine de self-induction.

Charbons et régulateurs. — Au début on employait des baguettes de charbon de bois éteint dans l'eau, mais elles brûlaient trop rapidement; aussi LÉON FOUCAULT eut-il la pensée de tirer parti du résidu de la houille qui se dépose dans les cornues pendant la fabrication du gaz d'éclairage. Ce n'était pas encore l'idéal, car la résistance du charbon de cornue n'est pas uniforme, et il arrivait que la combustion s'accompagnait de détonations ou de vapeurs qui obscurcissaient momentanément l'arc lumineux. Les charbons utilisés pour l'arc doivent être *compacts et homogènes* pour que la lumière soit fixe; on les fabrique aujourd'hui avec un mélange de coke et de graphite, aggloméré avec du goudron, passé à la filière, puis cuit lentement à des températures croissant jusqu'au rouge blanc. Les crayons positifs sont généralement munis à l'intérieur d'une **mèche**, ou âme en pâte de charbon non cuite, mélangée avec des silicates ou des borates; la mèche a pour effet de fixer l'arc en l'empêchant de vaciller et, en même temps, elle donne des produits volatils qui rendent l'arc plus conducteur. On a même exagéré cet effet dans les **charbons à flamme** où l'âme du crayon positif est farcie de divers sels qui rendent l'arc lumineux; la coloration de l'arc dépend de la nature des oxydes incorporés. Les charbons minéralisés qui paraissent donner les meilleurs résultats sont ceux à base de chaux. La **lampe**

Bremer (1900) fournit une lumière agréable à l'œil, contient beaucoup de rayons jaunes et donne un ton chaud, légèrement doré, comparable à celui des lampes à incandescence un peu poussées. Cette lampe fut le point de départ industriel des lampes à arc à flamme colorée, qui sont aujourd'hui très répandues.

Afin de réduire l'usure des charbons, on a créé des arcs en vase clos; mais on est obligé, pour éviter la projection de charbon sur les parois du vase, d'allonger l'arc, ce qui oblige à le faire fonctionner sous une différence de potentiel de 80 à 86 volts. La consommation spécifique est, par suite, plus élevée, mais les crayons peuvent durer cent à cent cinquante heures.

Quels que soient les charbons, ils s'usent; il faut alors sans cesse les rapprocher l'un de l'autre pour qu'il n'y ait pas d'interruption de lumière. Il a donc été nécessaire d'imaginer des **régulateurs automatiques** capables : 1° de faire venir les charbons au contact au moment où le courant est lancé; 2° d'écarter les

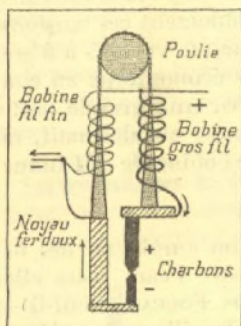


FIG. 52. — Schéma de lampe à arc.

charbons à la distance voulue pour que le nombre d'ampères traversant le circuit ainsi que le nombre de volts aux bornes de la lampe soient exactement ceux qu'un réglage préalable aura déterminés; 3° de rapprocher peu à peu les crayons à mesure qu'ils s'usent, de sorte que l'intensité et le voltage restent à peu près invariables. Les régulateurs sont très nombreux et d'un mécanisme compliqué; ils sont basés sur les propriétés des électro-aimants¹³. Depuis que les dynamos ont fourni, à bas prix, des courants intenses, les régulateurs ont pu être simplifiés et l'arc électrique a pris l'extension que l'on connaît.

Les lampes à arc électrique. — Les premiers régulateurs n'étant pas satisfaisants, on attendit pendant longtemps une lampe à arc réellement pratique. Aussi un accueil enthousiaste fut-il fait à la **bougie Jablochhoff** en 1875, dispositif aujourd'hui abandonné, mais qui se caractérisait par l'ab-

sence de tout mécanisme régulateur. Elle était formée de deux charbons placés côte à côte, à 3 millimètres de distance, et séparés par une substance isolante, formée de plâtre et de baryte, à laquelle on a donné le nom de *colombin*. A mesure que les charbons s'usaient, la chaleur volatilisait le colombin, et la lumière se maintenait constamment à l'extrémité des crayons : pour que ceux-ci s'usent tous les deux également, il était indispensable d'employer des courants alternatifs. Peu à peu les régulateurs se perfectionnèrent et la bougie Jablochhoff tomba dans l'oubli.

On ne construit plus guère actuellement que des lampes à régulateurs différentiels qui assurent la fixité de l'arc dans d'excellentes conditions. La **lampe Bardon** s'emploie seule, en circuit dérivé, à 70 volts (avec une résistance additionnelle) sur un circuit ordinaire d'éclairage à 110 volts; la **lampe Gramme** fonctionne sur circuit ordinaire et fournit une intensité lumineuse de 25 à 500 carrels. La **lampe Pilsen** fonctionne à 35 volts sous 6 à 8 ampères. La **lampe Fabius-Henrion** peut être introduite en tension sur un réseau de distribution; on peut en disposer 60 en tension. Les lampes à arc en vase clos ont pour principe d'empêcher le dégagement continu du gaz carbonique qui se forme autour de l'arc, en enveloppant cet arc d'un récipient transparent; dans ces conditions, l'arc se maintient plutôt par incandescence des extrémités des charbons que par combustion de ceux-ci : d'où une économie sérieuse des charbons¹⁴. Les principales de ces lampes sont la **lampe Marks** et la **lampe Bardon**. Enfin, nous avons vu précédemment que les lampes Osram intensives sont capables de lutter avantageusement avec les lampes à arc électrique. Le tableau suivant indique les dépenses de différentes lampes à arc et des lampes Osram intensives pour une même intensité lumineuse de 1 000 bougies; dans les calculs ci-dessous, il a été tenu compte du remplacement des charbons, de celui des lampes, de la main-d'œuvre, des dépenses du courant, ainsi que des réparations, de l'amortissement et de l'intérêt de la lampe.



FIG. 53.
Vue extérieure
d'une lampe à
arc.

Dépenses (en centimes) des lampes pour 1 000 bougies - heures.	Pour un prix du kilowatt-heure de					
	70 centimes.	60 centimes.	55 centimes.	50 centimes.	45 centimes.	40 centimes.
Lampe à arc à courant continu	90,2	79,2	73,7	68,2	62,7	57,2
Lampe à arc à courant alternatif	137,9	119,8	110,8	101,8	92,8	83,8
Lampe Osram intensive pour tous courants	74,5	64,9	60,1	55,3	50,5	45,7

L'intensité des lampes à arc les plus répandues varie entre 8 et 12 ampères. A l'intérieur des magasins, on emploie quelquefois des arcs de 3 ou 4 ampères. Quant aux arcs dont le débit dépasse 15 ampères, ils ne sont utilisés que dans des cas spéciaux, pour éclairer des projecteurs puissants ou des phares, ou bien pour produire des effets calorifiques, comme nous le verrons dans la conférence suivante. Avec 10 ou 12 ampères, l'éclat de l'arc dépasse déjà celui de 1 000 bougies, ce qui est bien suffisant dans la plupart des applications de l'éclairage. Les diamètres des charbons sont alors de 12 millimètres environ pour le positif et de 8 millimètres pour le négatif. Leur usure varie entre 4 et 5 centimètres par heure. Les longueurs sont calculées selon la durée de l'éclairage à fournir. Un arc normal de 4 millimètres et demi à 5 millimètres de longueur, exige environ 43 volts. Si l'on dépasse trop cette tension, l'arc s'allonge, devient violet et flambe en brûlant rapidement le crayon positif.

Installation des lampes électriques. — Les lampes à incandescence se montent en dérivation. On place sur les conducteurs qui amènent le courant des *coupe-circuits* formés de lames de plomb que le courant fait fondre quand son intensité dépasse une certaine limite dangereuse pour les lampes. On dispose des *interrupteurs* qui ont pour but de couper ou de rétablir le courant : ils se composent d'un socle de porcelaine portant deux plots de cuivre, auxquels aboutissent

les conducteurs; sur ces plots, appuie une pièce de cuivre formée de deux ailettes montées sur l'axe, et qu'on peut faire tourner à l'aide d'un bouton isolant. Quant on met la pièce de cuivre sur les plots, la communication est établie et les lampes s'allument.

Les lampes à arc se montent en série, au nombre de deux

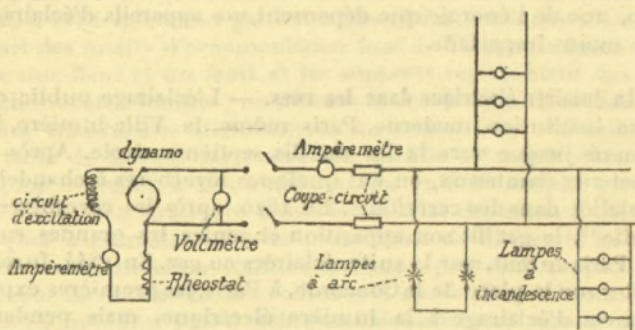


FIG. 54. — Montage des lampes à arc et des lampes à incandescence.

sur chaque dérivation d'une distribution à 110 volts. Chaque lampe consomme par bougie (0 w. 5), sept fois moins qu'une lampe à incandescence à filament de carbone.

Avantages de l'éclairage électrique. — Il est intéressant de comparer, au point de vue de la dépense, les divers modes d'éclairage. La lampe à filament de carbone est plus onéreuse que le bec Auer, mais les lampes à filaments métalliques (Tantale, Osmium, lampe Osram) redonnent l'avantage à l'éclairage électrique. La lampe à arc vient se placer avant le bec Auer et avant les lampes à filaments métalliques; malheureusement, elle ne convient pas aux usages domestiques, la lumière produite étant trop vive pour être utilisée dans des espaces restreints.

Au point de vue hygiénique, l'éclairage électrique, et particulièrement l'éclairage électrique par lampes à incandescence, l'emporte beaucoup sur l'éclairage au gaz. Alors que les lampes à filaments incandescents ne vicient en aucune

manière l'atmosphère des salles qu'elles éclairent, on a observé que l'éclairage au gaz d'une salle de spectacle vicie l'atmosphère autant que le ferait un nombre de spectateurs égal à dix fois celui que cette salle peut contenir.

Malgré ces avantages, de très grands progrès peuvent encore être réalisés dans les procédés d'éclairage, puisque nous ne savons actuellement transformer en lumière qu'à peine 5 p. 100 de l'énergie que dépensent nos appareils d'éclairage les moins imparfaits.

La lumière électrique dans les rues. — L'éclairage public est une institution moderne. Paris même, la Ville-lumière, l'a ignoré jusque vers la fin du dix-septième siècle. Après le guet aux flambeaux, on eut quelques réverbères à chandelle installés dans les carrefours. En 1810, après les réverbères à huile⁴⁵, le gaz fit son apparition et seules les grandes rues de Paris furent, par la suite, éclairées au gaz. En 1844, furent faites sur la place de la Concorde, à Paris, les premières expériences d'éclairage à la lumière électrique, mais pendant près de vingt-cinq ans, on la considéra comme une illumination luxueuse pouvant figurer à titre de curiosité et capable de donner plus d'éclat à certaines fêtes publiques. En 1878, le 31 mai, à neuf heures du soir, trente-deux globes de verre munis de bougies Jablochhoff s'allumèrent instantanément le long de l'avenue de l'Opéra et projetèrent autour d'eux une douce et brillante lumière blanche⁴⁶. La place de l'Opéra, celle du Théâtre-Français, le Carrousel, la Bastille, les Halles Centrales bénéficièrent bientôt du nouvel éclairage, mais à la suite d'une discorde survenue entre la Ville de Paris et la Compagnie Jablochhoff, la lumière électrique disparut de Paris en 1882. Elle y revint en 1888, après avoir fait le tour du monde et, cette fois, elle acheva de conquérir la capitale. Aujourd'hui, les *lampes à arc* règnent en maîtresses sur les boulevards et les grandes voies, dans les gares, les usines, les ateliers, partout où l'espace est assez grand pour que la vue ne soit pas blessée par un vif éclat.

La lumière électrique dans les maisons. — Dans les maisons, il est préférable de diviser la lumière en disséminant les *lampes à incandescence* qui sont devenues le luminaire domestique

par excellence. Groupées en lustres, en appliques, elles éclairent les demeures particulières, les cafés, les restaurants, alors que les lampes à arc se rencontrent dans les halls des grands magasins et dans les expositions. Les ampoules électriques, piquées au hasard de la fantaisie sur les bandes souples de PAZ et SILVA, se prêtent à tous les motifs de décorations possibles. Les *perles lumineuses* de WEISSMANN ajoutent encore à cette splendeur par leurs girandoles lumineuses. La plupart des motifs d'ornementation font de l'ampoule lumineuse une fleur et un fruit et les supports représentent des branches et des feuilles ; on dissimule les lampes dans des corolles translucides délicatement nuancées. Pour éclairer une table de travail, un chandelier mobile surmonté d'un abat-jour et reliée à la canalisation par un fil souple, est d'un usage très pratique. Dans le cabinet de toilette, des appliques à branches pliantes permettent de diriger la lumière dans la direction voulue ; la lampe peut être rapprochée, sans inconvénient, des coiffures et des étoffes. A la cuisine, un simple abat-jour de tôle émaillée suffit pour répandre dans toute la pièce un éclairage brillant et propre ; on rend quelquefois l'appareil mobile au moyen d'une suspension à contrepoids. Aucun luminaire ne peut rivaliser avec la lampe à incandescence, sous le rapport de la propreté et de l'absence d'odeur et de fumée. Il n'est plus nécessaire d'éloigner la lumière du plafond puisque aucune dégradation n'est plus à craindre ; les tentures prennent un aspect inaccoutumé, l'œil n'est plus ébloui par l'éclat aveuglant des flammes rapprochées et le plafond, plus vivement illuminé, fait réflecteur, diffusant partout une lueur douce et uniforme.

L'éclairage électrique par incandescence reste inférieur au pétrole, à l'acétylène et au bec Auer, mais la question pécuniaire, quoique très importante, n'est pas la seule à considérer et, de plus en plus, on se préoccupe d'assurer, dans l'habitation moderne, la sécurité, la salubrité et le confort. A ce triple point de vue, aucun mode d'éclairage ne peut soutenir la lutte avec l'Électricité¹⁷.

On construit maintenant des lampes à arc de petites dimensions pour vestibules, chambres, etc. Telles sont les lampes *Lilliput*, *Mignon*, *Piccolo*, etc., que l'on emploie dans les lustres, les appliques murales et même en lampes portatives.

Elles sont établies pour une tension de 80 volts et pour 1, 2, 3 ampères.

La lumière électrique dans l'industrie et la navigation. — Sur les *chantiers*, l'arc permet d'employer des équipes de nuit, et sa clarté facilite la surveillance. Sous les *halls des gares*, les régulateurs, suspendus à une hauteur qui atteint parfois 16 mètres ont l'avantage de supprimer presque complètement les ombres portées. L'*éclairage électrique des wagons*, d'abord limité aux *sleeping-cars*, tend à s'étendre aux voitures ordinaires des trains à longs parcours; les ampoules peuvent être placées au-dessus du dossier des sièges, de façon à rendre la lecture plus commode au voyageur. Les lampes à arc sont souvent répandues à profusion dans les *grands magasins de nouveautés* qui, dans un but de réclame, font de véritables débauches d'éclairage; cette lumière éclatante a l'avantage de ne pas modifier la teinte des objets mis en vente et de les montrer à l'acheteur tels qu'il les verrait en plein jour avec, peut-être, un aspect un peu plus séduisant, dû aux reflets multiples. L'incandescence est généralement préférée dans les *vitrites*; chez les bijoutiers, notamment, des ampoules à demi entourées de réflecteurs argentés font resplendir les pierreries. L'*annonce commerciale* et la *réclame* utilisent largement la lumière électrique. Les noms des marchands ou des produits se détachent en lettres de feu composées de lampes à incandescence. Certaines *enseignes* allument leurs lettres une à une, puis les lettres disparaissent pour reparaître ensuite sous l'action d'un commutateur invisible. Dans les *mines*, les lampes à incandescence, installées à demeure le long des souterrains ou rendues portatives et alimentées par de petits accumulateurs, ne provoquent aucune élévation de température dans les galeries déjà si chaudes, ne chargent pas l'atmosphère de produits irrespirables et ne déterminent aucune explosion de grisou. Aujourd'hui, tous les *navires de guerre*, tous les *grands paquebots* ainsi que les yachts de plaisance sont pourvus de lampes à incandescence alimentées par une ou plusieurs dynamos. Projetés par un réflecteur, les rayons de l'arc sondent l'horizon et éclairent la route à suivre. La portée de ces projecteurs atteint 8 kilomètres par les temps clairs : on s'en sert dans la marine de guerre pour prévenir

l'attaque des torpilleurs et pour régler le tir pendant la nuit.

L'éclat sans rival de l'arc et la portée considérable de ses rayons le désignaient tout naturellement pour l'éclairage des *phares*. Le premier phare électrique fut installé à Dungeness, en 1862 ; peu après les deux phares de la Hève furent modifiés en feux électriques. Aujourd'hui, cette transformation s'est étendue à presque tous les phares. Il a été reconnu que la lumière de l'arc pénètre plus loin dans le brouillard que celle du gaz. La lanterne du phare d'Eckmühl (Penmarch, Finistère) contient deux arcs de 50 ampères chacun, capables de fournir l'énorme intensité de 30 millions de bougies. La portée des rayons dépasse 90 kilomètres par les temps ordinaires⁴⁸.

La lumière électrique dans les théâtres. — L'éclairage des théâtres au pétrole ou au gaz a causé bien des sinistres. La liste est malheureusement longue des théâtres incendiés au cours d'une représentation, et Charles GARNIER, architecte de l'Opéra, assurait que « tout théâtre est fatalement voué à l'incendie ». Tout le monde a encore présent à l'esprit l'incendie de l'Opéra-Comique, de Paris, le 25 mai 1887 et celui qui, le 4 mai 1897, détruisit le Bazar de la Charité, rue Jean-Goujon à Paris. Les incendies dans les théâtres sont rendus presque impossibles par l'emploi de la lampe à incandescence. En effet, le filament ne peut communiquer le feu aux substances les plus inflammables, puisqu'il est complètement isolé de l'air ambiant ; une rupture du verre ne saurait avoir d'autre effet que de consumer instantanément le fil de carbone, bien avant que la chaleur ait eu le temps de se propager hors de l'ampoule. L'électricité a fait son apparition au théâtre, le 15 octobre 1881, à la soirée de gala offerte à l'Opéra, aux membres du Congrès international des électriciens. Le foyer fut d'abord éclairé, puis la salle, enfin la scène ; aujourd'hui, le moindre petit théâtre est brillamment illuminé intérieurement et extérieurement⁴⁹.

La scène est éclairée par la rampe, les herses, les portants ; la *rampe*, en éclairant l'artiste de bas en haut, produit des ombres fâcheuses sur le visage : on les atténue par les *herses* qui se placent à différentes hauteurs, et les *portants* placés verticalement de chaque côté de la scène. Les **jeux de lu-**

mière sont rendus faciles ; trois teintes suffisent : le blanc, le bleu, le rouge, pour obtenir toutes les combinaisons possibles ; le jeu d'orgue installé près du souffleur permet de passer insensiblement ou brusquement d'un éclairage à un autre. La lumière de l'arc, convenablement concentrée, a l'avantage de faire resplendir les toilettes et les bijoux, aussi est-elle d'un emploi fréquent dans les ballets.

Nous ne saurions énumérer tous les effets inédits qu'a permis de réaliser au théâtre la lumière électrique : nous nous bornerons à citer quelques exemples. Au dernier acte de la *Walkyrie*, les sombres nuées qui roulent dans un ciel orageux sont obtenues à l'aide de projections électriques ; de la même façon se produisent le lever du Soleil dans le *Prophète*, le lever de la Lune dans *Salammô*, et les splendeurs du Vénusberg dans *Tannhäuser*. Le bosquet des roses de la *Damnation de Faust* est composé d'ampoules illuminant soudain toutes les corolles à un signal donné. Les bijoux lumineux servent à orner la coiffure et le corsage des danseuses : à l'Opéra, dans le ballet d'*Ascanio*, on vit jadis s'allumer le flambeau de Phœbus-Apollo. La féerie de la *Poule aux œufs d'or*, le ballet des *Fleurs lumineuses*, et bien d'autres, nous ont montré des danseuses parées de lucioles. Signalons enfin, la *danse serpentine* créée avec tant de succès par miss LOÏE FULLER, et la *danse du feu* qui nécessite l'installation de projecteurs sous la scène.

Plusieurs volumes ne suffiraient pas à indiquer les applications de la lumière électrique, on en trouve, d'ailleurs, constamment de nouvelles. La lumière émise par les lampes à arc et par les lampes à incandescence n'est, en réalité, qu'un produit très accessoire de la consommation du courant. La plus grande partie de l'électricité s'y transforme en énergie calorifique et c'est l'étude de l'*Électricité comme source de chaleur* qui nous occupera dans la conférence suivante.

NOTES DE LA CINQUIÈME CONFÉRENCE

1. *W* est l'abréviation adoptée par le Congrès des électriciens en 1898 pour représenter l'énergie, c'est l'initiale du mot anglais *work* qui signifie *travail*. Si l'on remarque que l'expression RI^2t peut s'écrire $RI \times It$, que *It* est la quantité d'électricité qui a traversé le circuit en un temps *t*, et que *RI* est la différence de niveau électrique ou différence de potentiel, on voit une fois de plus l'analogie que l'on peut établir entre le courant électrique et un courant liquide. L'énergie produite par un courant liquide a pour valeur le produit de la quantité de liquide par la hauteur de chute.

2. L'unité pratique d'intensité lumineuse est la *bougie décimale*, elle correspond à peu près à une bougie stéarique de bonne qualité. Au sujet de l'évaluation de l'éclairément, voir *la Physique*, même collection.

3. Ce fait s'explique par l'action du champ magnétique créé par l'aimant agissant sur un conducteur parcouru par un courant électrique. Le filament de la lampe forme un solénoïde qui agit comme un véritable aimant.

4. Comme un cheval-vapeur vaut 736 watts, chaque lampe brûlant normalement consomme 55 : 736 soit environ 1/13 de cheval-vapeur.

5. Cette lampe fut construite sur les indications du professeur Walther NERNST de l'Université de Göttingen.

6. L'osmium métallique s'obtient très divisé en réduisant le tétra-oxyde de ce métal. L'osmium pulvérisé est mélangé avec un aggloméré composé de matières organiques, de façon à obtenir une pâte résistante que l'on peut faire passer au travers de filières.

7. Le tantale pur, obtenu en réduisant par le potassium ou le sodium le fluotantalate de potasse, est un métal très ductile et d'une remarquable ténacité qui ressemble à de l'acier, mais dont le point de fusion est très élevé.

8. Le wolfram accompagne les minerais d'étain. Il est utilisé pour la préparation de l'acier au tungstène. Ce nom de wolfram est la traduction allemande de *lapi spama*, écume de loup, dénomination déjà visitée du temps d'Agricola (1546).

9. La lumière de la lampe est projetée en majeure partie par le réflecteur contre le plafond de la salle et revient à l'état de lumière diffuse en produisant l'impression de la lumière du jour.

10. Célèbre chimiste anglais (1778-1829).

11. Ce nom *d'arc* vient de ce que l'expérience fut faite entre deux charbons placés horizontalement; dans ce cas, l'air incandescent tend à monter au milieu de l'air froid environnant, ce qui lui donne une forme d'arc convexe à sa partie supérieure. Si le phénomène se produit entre deux charbons verticaux, la flamme ne prend nullement la forme d'un arc.

12. La *cathode* est le charbon négatif, l'*anode*, le charbon positif. Ces termes cathode et anode rappellent le sens hypothétique que l'on donne au courant (qui irait du pôle + au pôle -); *ana* = en remontant; *kata* = en descendant; *odos* = route; *ion* = voyageur.

13. Le *régulateur* de FABIUS-HENRION, de Nancy, se compose de deux électro-aimants dont les noyaux de fer doux, coniques et allongés, soutiennent par leurs extrémités les deux porte-charbons. Ces noyaux mobiles font largement saillie au-dessous des bobines et sont rendus solidaires l'un de l'autre par une petite chaîne qui les porte et passe dans la gorge d'une poulie. L'une des bobines est à gros fil et se trouve traversée par le courant qui produit l'arc; l'autre bobine est à fil fin et montée en dérivation sur le circuit. Le charbon positif étant plus lourd que le charbon négatif est placé au-dessus de ce dernier de façon qu'au repos, les pointes se touchent. Quand le circuit est fermé, le courant qui passe dans le gros fil attire le noyau correspondant; celui-ci monte et soulève le charbon positif, l'autre descend et les charbons s'écartent; à mesure que l'usure augmente la distance des deux charbons, l'intensité du courant principal diminue et celle du courant dérivé augmente; alors le noyau à l'intérieur du gros fil descend et le charbon positif revient au contact du charbon négatif. Le régulateur est donc une balance très sensible.

14. Le globe qui entoure l'arc entraîne une perte de lumière : 5 à 15 p. 100 pour les globes diffuseurs transparents; 10 à 30 p. 100 pour les globes opaques; 20 à 50 p. 100 pour les globes dits « albâtres ».

15. La lumière de la lampe à huile pourvue d'un réflecteur étamé parut un prodige. Dans un rapport présenté au roi, en 1777, par le lieutenant de police, conseiller d'État, on peut lire : « La lumière que donne ce nouveau luminaire ne permet pas de penser que l'on puisse jamais rien trouver de mieux. » Or, l'intensité lumineuse de la lanterne en question atteignait à peine 12 bougies.

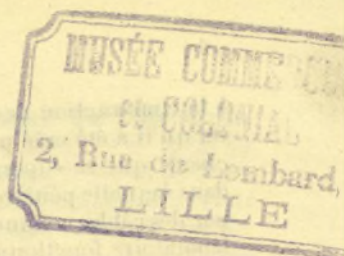
16. Des discussions sans nombre accueillirent aussitôt cette innovation. Les uns ne cessaient de la vanter, d'autres assuraient que cette lumière était trop vive, blessait la vue et ferait peur aux chevaux.

17. La moyenne des tarifs adoptés, en France, par les usines électriques paraît voisine de 8 centimes l'hectowatt-heure. A ce prix, une lampe de 10 bougies qui absorbe 35 watts, dépense un peu moins de 3 centimes par heure. Voici la dépense occasionnée en une heure par les principaux illuminants quand leur pouvoir éclairant équivaut à un carcel, c'est-à-dire à 10 bougies :

Bougie de stéarine, 20 centimes; lampe à huile, 5,9; pétrole, 2,7; acétylène, 1; bec Auer, 0,8; lampe à incandescence, 2,8; lampe électrique à arc, 0,7. Dans ces calculs, il n'a pas été tenu compte des frais de remplacement des manchons, filaments, charbons.

18. A chaque phare est annexée une petite usine électrique; la préférence est donnée au courant alternatif. La France est le pays qui possède le plus grand nombre de phares électriques. Ceux-ci se divisent en *phares de grand atterrissage* (La Coubre, Penmarch, Ile d'Yeu, Belle-Ile, Creach d'Ouessant) et en *phares d'atterrissage secondaire* (Dunkerque, Calais, Gris-Nez, Canche, Hève, Barfleur, phare des Baleines dans l'île de Ré, phare du Planier qui signale Marseille).

19. L'éclairage ordinaire d'une salle de spectacle correspond à environ 0,5 bougie décimale par mètre cube. L'éclairage brillant de la scène atteint 20 bougies par mètre carré de surface.



SIXIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ, SOURCE DE CHALEUR

ÉLECTROTHERMIE ET CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

- I. Les fours électriques (fours à arc et à résistance; fours sans électrodes). — Applications électrothermiques de l'arc électrique. — Métallurgie de l'aluminium, du fer et de l'acier. — Le carbure de calcium et le carborundum. — Les engrais chimiques de Norvège. — Soudure et travail électriques des métaux. — Forgeage, trempe, recuit électriques. — II. Le chauffage électrique. — Principes et appareils. — Chauffage électrique des théâtres, magasins, appartements. — La cuisine électrique et les banquets électriques. — Stérilisation électrique de l'air. — Allumage et allumeurs électriques.

L'Électricité n'est pas seulement une source magnifique de lumière, mais encore une source de chaleur d'une extraordinaire intensité. Le four électrique, en permettant d'atteindre des températures extrêmement élevées, a été le point de départ d'une branche nouvelle de l'industrie métallurgique.

Les fours électriques. — On peut faire remonter jusqu'à HUMPHRY DAVY la première utilisation de la chaleur développée par l'arc électrique, puisque le célèbre physicien s'en servit pour opérer la fusion de substances que l'on avait considérées jusqu'alors comme infusibles. La haute température de l'arc électrique — qui est d'ailleurs la plus élevée que nous sachions produire et qui atteint 3500° — devait conduire

à la construction des **fours électriques**. Le four électrique, tel qu'il a été créé par MOISSAN, se compose de deux blocs de chaux qui se superposent en laissant entre eux une cavité dans laquelle pénètrent deux gros cylindres de charbon reliés par des câbles conducteurs aux prises de courant. Les fours de laboratoire fonctionnent avec un courant de 30 ampères sous 80 volts et consomment ainsi de 3 à 4 chevaux; mais on en a employé dans lesquels l'intensité dépassait 1000 ampères

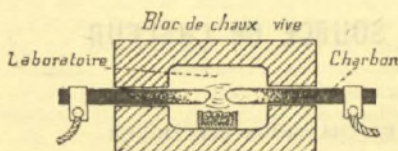


FIG. 55. — Four électrique Moissan.

sous 80 volts. Dans la cavité, on place les corps qu'on veut combiner ou décomposer.

La température obtenue dans la cavité est peu inférieure à celle de l'arc. A cette

température extrêmement élevée, environ 3500°, le platine fond et se volatilise; les matières les plus réfractaires telles que la chaux et la magnésie se liquéfient, de nombreuses réactions chimiques nouvelles ont lieu.

Le four Moissan a été modifié par DUCRÉTET par l'adjonction d'un gros aimant extérieur qui dirige l'arc du côté du creuset.

Parmi les résultats obtenus par MOISSAN, il en est un qui a beaucoup contribué à populariser le four électrique : c'est la *reproduction des pierres précieuses* et en particulier du *diamant*¹. De tout temps, on a imité le diamant, mais on ne pouvait tenter de le reproduire que lorsqu'on put disposer de la haute température de l'arc électrique. DESPRETZ, en 1853, réussit à volatiliser un morceau de charbon et, sur l'un des crayons qui avaient servi à l'expérience, il put recueillir une fine poussière cristallisée qui usait le diamant. MOISSAN fit fondre au four électrique du charbon de sucre (charbon pur) dans du fer en fusion : après saturation, le petit lingot de fer fut plongé dans l'eau et, pendant le refroidissement lent, le carbone s'isola sous forme de petits diamants. Cette découverte eut un très grand retentissement; les joailliers et les lapidaires d'abord émus, se rassurèrent, car il y a loin des microscopiques cristaux obtenus aux pierres resplendissantes qui

excitent tant de convoitises. Elle montra que, désormais, l'Homme avait assujéti les forces de la Nature. On opère au four électrique la *transformation allotropique du charbon en graphite*; on obtient ainsi non seulement du graphite pour lubrifier et servir de base à une peinture contre la rouille, mais aussi des charbons de lampes, des balais pour dynamos d'un grain très fin et d'une conductibilité remarquable.

Le **four à arc**, tel qu'il vient d'être décrit, est plutôt un instrument de laboratoire qu'un appareil industriel : aussi emploie-t-on de plus en plus le **four à résistance** dans lequel la chaleur est dégagée, par l'effet Joule, par passage du courant à travers les matériaux à traiter. Il est construit généralement en briques réfractaires et brasqué à l'intérieur avec de la poudre de coke tassé et calciné. Deux électrodes, ayant de 5 à 10 décimètres carrés de section, pénètrent à l'intérieur et amènent le courant à l'aide de gros câbles métalliques. L'électrode inférieure est fixe; l'électrode supérieure peut être soulevée à l'aide d'un treuil. Les matières à traiter sont tassées entre les deux charbons. On fait passer un courant dont l'intensité peut atteindre 10 000 ampères avec une tension de 30 à 50 volts : le dégagement de chaleur se fait alors aux points de plus grande résistance, c'est-à-dire dans la matière même à traiter. On emploie de préférence le courant alternatif; il est engendré par des alternateurs commandés en général par des turbines hydrauliques; on peut aussi employer du courant triphasé avec des fours munis de trois électrodes. Il existe des **appareils mixtes à résistance et à arc** qui nécessitent des courants moins intenses. Enfin, il faut signaler un système remarquable de **four sans électrodes**, c'est un véritable transformateur dont le primaire reçoit un courant de haute tension et dont le secondaire, constitué par le creuset lui-même, est parcouru par un courant d'une énorme intensité.

Électrothermie. — La source électrique de chaleur est utilisée en Electrométallurgie soit en employant uniquement l'élévation de température (*applications électrothermiques de l'arc*), soit en faisant servir l'arc à produire des décompositions chimiques (*applications électrochimiques de l'arc*). Nous n'examinerons ici que les applications de la première catégorie,

les autres seront étudiées à propos des phénomènes d'électrolyse.

Une des applications électrothermiques les plus importantes est la **préparation de l'aluminium**. Tout le monde connaît cette substance², appelée avec raison le métal de l'avenir, et dont la légèreté exceptionnelle, la ténacité, la malléabilité, la résistance aux agents atmosphériques ont ouvert des débouchés qui s'accroissent sans cesse à mesure que les perfectionnements apportés aux procédés de fabrication en diminuent le prix de vente. L'aluminium est très répandu dans la Nature, mais il y existe sous forme d'oxydes argileux (alumine, bauxite, cryolithe) très difficiles à décomposer : l'Électricité seule possède la puissance nécessaire pour extraire le métal pur de son minerai. Le *procédé* COWLES, appliqué en Angleterre, est le plus ancien de tous ceux qui reposent sur l'action thermique de l'arc électrique. Les fours sont remplis d'un mélange de charbon et d'alumine ; on y ajoute du cuivre ou du fer, si l'on veut obtenir, non pas de l'aluminium pur, mais du **bronze d'aluminium**. L'arc est amorcé, et les baguettes de charbon lentement écartées à mesure que la masse entre en fusion ; la chaleur dissocie le minerai, l'oxygène se sépare de l'aluminium et s'unit au charbon en produisant de l'acide carbonique. Pour obtenir 1 kilogramme de bronze d'aluminium, il faut dépenser une force de 45 chevaux-heure.

Une autre préparation importante, et qui a même pris un développement extraordinaire, est celle du **carbure de calcium**. L'Américain WILSON, cherchant à extraire le calcium de la chaux comme s'il s'agissait de produire l'aluminium, c'est-à-dire en traitant dans le four électrique un mélange de charbon et d'oxyde, ne recueillit qu'une scorie grisâtre. Il jeta le résidu dans une mare d'eau voisine d'un foyer et, à sa grande surprise, il vit l'eau bouillonner et donner naissance à un gaz qui s'enflamma et illumina le laboratoire d'une lumière éblouissante. Il venait de découvrir le gaz *acétylène*. Le calcium de la chaux en s'unissant au charbon avait donné du carbure de calcium lequel, au contact de l'eau, avait fourni un dégagement d'acétylène. MOISSAN, en 1893, a obtenu le carbure de calcium pur et cristallisé. Le four le plus anciennement connu pour cette fabrication est celui de M. BULLIER à Briancçon. Un kilogramme de carbure correspond à une dépense de

3 kilowatts-heure; les fours demandent un courant de 45 à 50 volts de tension, et l'intensité peut être portée jusqu'à 10 000 ampères³. Le carbure de calcium est utilisé pour la préparation du gaz acétylène et aussi à fabriquer certains métaux ou alliages en partant des chlorures ou des sulfures correspondants. C'est ainsi que l'on obtient les ferro-manganèse, ferro-chrome, ferro-tungstène, ferro-bore, nickel-chrome, etc. Une crise ne tarda pas à se produire en raison de la surproduction du carbure de calcium; bon nombre d'usines durent alors utiliser autrement leur installation électrique.

Le four électrique a permis d'obtenir un corindon artificiel très dur, carbure de silicium ou siliciure de carbone, appelé **carborundum**. On l'obtient en soumettant dans le four, à une température voisine de 2 200°, un mélange de coke, de sable et de sel marin. Le carborundum se présente sous la forme de cristaux gris ou violacés; il doit ses applications à son extrême dureté : on l'emploie pour polir le corps les plus durs, pour fabriquer les dents artificielles, les pierres précieuses. On l'utilise sous forme de toile, de papier, de meules à affûter⁴.

La **métallurgie du fer et de l'acier**, à l'aide de l'énergie électrique, a déjà donné de bons résultats et tout laisse à espérer que le champ à exploiter est très vaste. Le four électrique semble devoir prendre la place du haut fourneau à charbon. En 1878, SIEMENS décrivit un système de four électrique pour la fusion du fer, mais ce n'est qu'en 1900 que l'étude de la question a pris une forme plus concrète. M. HÉROULT produisit du fer et de l'acier dans des fours analogues à ceux qui servent à la préparation du carbure de calcium et de l'aluminium. L'usine de La Praz, outillée d'après les procédés Héroult, produit 6 tonnes d'acier par jour, en deux charges; elle emploie du courant alternatif à la tension de 120 volts; l'intensité atteignant 4 000 ampères. La consommation d'énergie est de 150 kilowatts par tonne de métal. Le procédé, imaginé par MM. KELLER, LELEU et C^{ie}, est exploité dans une usine hydro-électrique du Morbihan; un four sert à la fabrication de la fonte brute, l'autre à l'affinage pour la préparation de l'acier. Ce second four permet de raffiner de 15 à 20 tonnes de métal en une seule opération; une tonne d'acier

nécessite une dépense de 2600 kilowatts. L'usine de Froges emploie un *four à électrode coulante* : la cathode est constituée par le creuset lui-même ; l'autre électrode est disposée verticalement à la partie supérieure de l'appareil. On fabrique dans ce four du fer, de l'acier, des alliages au chrome et au silicium de haute qualité.

Les fours électriques se sont énormément répandus dans ces dernières années pour la fabrication des **alliages de fer et d'acier**. En fondant du fer et du chrome, on obtient un acier chromé que la dureté fait utiliser pour les cuirasses de navires. D'autres applications très importantes des fours électriques sont : l'obtention de l'acier par traitement du fer et la transformation de l'acier ordinaire en acier de qualité spéciale. A l'Exposition de Liège (1905) existait toute une collection d'**aciers électriques**⁵.

Le four électrique a servi aussi à préparer le magnésium, le bore, le silicium, le sodium et le lithium ; à obtenir une foule de métaux rares comme le chrome, le tungstène, le molybdène, le titane.

Enfin la haute température de l'arc électrique a permis de résoudre un problème de la plus grande importance, la **fixation de l'azote atmosphérique sous forme d'engrais chimiques**. L'oxygène et l'azote de l'air s'unissent dans l'arc électrique pour donner des oxydes d'azote ; ceux-ci peuvent être absorbés par l'eau et fournir de l'acide nitrique ou réagir directement sur des sels de calcium ou d'ammonium, en donnant des nitrates solubles et par conséquent assimilables par les plantes. Le *procédé Birkeland*, appliqué en Norvège, a fourni une bonne solution au point de vue industriel et économique ; l'énergie électrique y est à bon marché et l'on compte 110 grammes environ d'acide nitrique par kilowatt-heure. La fabrication artificielle des engrais azotés est appelée à prendre une énorme importance économique ; aussi de puissantes sociétés se sont-elles fondées pour se livrer à cette fabrication.

Soudure électrique et travail électrique des métaux. — La température élevée à laquelle fondent la plupart des métaux rend difficile la **soudure autogène**, c'est-à-dire celle qui s'opère sans l'intervention d'un métal étranger, mais par la

simple fusion des pièces à raccorder. La haute température produite par le courant électrique rend l'opération facile à réaliser. On peut utiliser soit la *chaleur de l'arc voltaïque*, soit l'*échauffement provoqué par la résistance* qu'opposent les conducteurs au passage du courant.

Le *premier procédé* a été imaginé en 1881 par DE BÉNARDOS. Les pièces à assembler sont disposées côte à côte sur une table de fonte reliée au pôle négatif d'une dynamo; un crayon de charbon est relié au pôle positif. On fait jaillir l'arc, la chaleur développée ramollit les points de contact qui se collent et s'unissent intimement. ZERENER a établi un chalumeau électrique très commode pour braser de petites pièces comme les cadres de bicyclettes par exemple. L'appareil se compose d'un régulateur à arc, dont les charbons sont inclinés obliquement l'un vers l'autre, et d'un électroaimant qui dévie l'arc, l'allonge et le projette en dard de chalumeau. On peut parfaitement exécuter trente brasures en une heure. La tension du courant employé pour la soudure par arc est comprise entre 40 et 100 volts; l'intensité dépend de la grosseur des pièces à assembler et dépasse souvent 500 ampères. Ce genre de soudure est très répandu dans la construction des accumulateurs, des réservoirs étanches destinés à recevoir le pétrole, etc.; on s'en sert aussi pour fabriquer des tubes en fer ou en cuivre sans joints apparents, pour façonner de légers meubles en fer, des lits par exemple⁶.

C'est aussi électriquement que l'on soude les rails de tramways : on promène le long de la voie une fois posée, un appareil de soudure électrique; chaque joint est saisi à son tour entre les mâchoires de cet appareil et soumis à l'action du courant⁷.

Le *second procédé*, indiqué par E. THOMSON paraît préférable parce que le métal soudé par rapprochement est plus homogène et n'acquiert pas de texture cristalline. Il est surtout plus économique, parce que la chaleur y est mieux utilisée. Les courants alternatifs ont toujours paru donner de meilleurs résultats que les courants continus. Certaines opérations exigent des intensités de 20000 ampères, tandis que la tension dépasse rarement un volt. La soudure par rapprochement est plus homogène que celle que l'on obtient

avec l'arc. Le métal n'est pas arraché ; sa surface reste plus régulière, et ses particules intérieures conservent une meilleure cohésion. Cette méthode s'applique aux produits les plus délicats de l'orfèvrerie, aussi bien qu'aux pièces de grosse mécanique. Des calculs précis, basés sur des expériences variées ont montré que la dépense maxima n'excède guère 3 centimes par centimètre carré de section soudée, main-d'œuvre comprise.

La soudure n'est pas la seule application des propriétés calorifiques du courant dans l'industrie métallurgique. Une source de chaleur qui suffit pour fondre presque instantanément les métaux les plus réfractaires est, à plus forte raison, précieuse quand il s'agit seulement de les porter au rouge pour les *forger* ou pour les *tremper*, ou bien quand il suffit d'entretenir une température déjà obtenue par d'autres procédés. Rien n'est plus facile que de modérer la chaleur en limitant l'intensité du courant.

Le **forgeage électrique** s'opère de la façon suivante. On porte les pièces de fer et d'acier, par le passage d'un courant puissant, à une température telle qu'on puisse les forger. A la *Boston Electrical Forging Company*, on emploie les courants alternatifs à grande intensité, une barre d'acier carrée, de 25 centimètres de côté et 30 centimètres de long est portée ainsi au rouge blanc en 2 minutes et demie, en absorbant 27 kilowatts. Le forgeage électrique offre comme avantages : la rapidité de l'opération, l'absence de gaz réducteurs, enfin une grande régularité dans la température à laquelle toute la masse se trouve portée uniformément.

La **trempe électrique** s'effectue en maintenant la pièce à tremper dans [un bain d'huile ou d'eau additionnée de carbonate de potassium afin d'en augmenter la conductibilité ; quand la température suffisante est atteinte, on supprime le courant qui traverse la pièce à tremper ; celle-ci, fortement chauffée, se trouve au contact du liquide froid et la trempe s'opère sans aucun déplacement de l'objet. Le procédé de l'*hydrothermie*, dû à LAGRANGE et HOHO, est fort original. La pièce à tremper est plongée dans de l'eau rendue conductrice et se trouve reliée au pôle négatif d'une dynamo. Le pôle positif communique avec une plaque de plomb immergée dans le même liquide. Nous verrons en étudiant

les phénomènes d'électrolyse que l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau vient former une gaine gazeuse autour de la pièce à tremper. Un échauffement considérable résulte de la résistance opposée par la couche gazeuse, et cette chaleur se communique au métal et le porte au rouge. Dès qu'on interrompt le circuit, l'électrolyse s'arrête, et l'eau froide vient brusquement mouiller le métal incandescent.

Le **recuit électrique** est utilisé pour obtenir le recuit local des plaques de blindage de navires, et adoucir les endroits de ces plaques qui doivent être ensuite percés.

Les opérations électro-métallurgiques sont déjà nombreuses et la liste n'en est pas épuisée : le dernier mot n'est pas encore dit dans cette branche de l'Électricité.

Le chauffage électrique. — Tous les moyens de chauffage basés sur la combustion du charbon, du gaz ou du pétrole ont un défaut commun : ils vicient l'atmosphère, au détriment de la santé. Le chauffage par circulation d'eau chaude ou de vapeur est beaucoup plus avantageux, mais il exige une seconde canalisation pour l'éclairage et complique l'installation. Le *chauffage électrique* est le plus agréable, le plus propre, le plus hygiénique, le plus pratique; de plus il permet d'utiliser la même canalisation pour l'éclairage, le chauffage, la ventilation, etc.

Le chauffage électrique repose sur la chaleur engendrée par un courant qui rencontre une résistance. Un fil de maillechort de 50 ohms de résistance parcouru par un courant de 3 ampères transforme en 1 minute 27 000 joules en chaleur et fournit 6 500 petites calories environ. Ce fil, dans l'air, émet peu de chaleur, à cause de la faible surface qu'il présente au rayonnement, il rougit et peut fondre; mais si on l'applique, contre une plaque de tôle ou de fonte avec interposition d'une mince couche d'un isolant incombustible, la chaleur se transmet à la plaque par conductibilité à travers l'isolant, et cette plaque chauffée rayonne par sa grande surface. Le calcul a permis d'établir qu'avec une surface de 1 décimètre carré de surface de chauffe par hectowatt, on se trouve dans de bonnes conditions de fonctionnement. On

prévoit la possibilité de se chauffer et de faire la cuisine à l'électricité.

Malheureusement, le *prix du courant électrique* est encore trop élevé pour que le chauffage par l'électricité puisse se répandre couramment dans la pratique. D'après des travaux récents, pour obtenir une différence de température de 22° entre un calorifère électrique et l'atmosphère d'un appartement, il faut dépenser une puissance de courant de 55 watts par mètre cube à échauffer : le chauffage reviendrait ainsi à 1 fr. 30 par heure pour un petit appartement de 50 mètres cubes. En tout cas, il est impossible de consommer moins de 33 watts par heure et par mètre cube, soit 0 fr. 55 environ, en comptant le kilowatt à 40 centimes. Généralement, les usines centrales d'électricité livrent le courant destiné au chauffage à un prix plus bas que celui du courant destiné à l'éclairage; l'usine y trouve son intérêt, car elle obtient ainsi une meilleure utilisation de ses installations, et en même temps, elle favorise le développement du chauffage électrique.

Le chauffage électrique reposant sur la Loi de Joule, on a tout intérêt à *faire passer le courant dans des fils de grande résistance*. Le *charbon de cornue* est très résistant, mais il est peu homogène et casse facilement; le *maillechort* est quinze fois plus résistant que le cuivre, le *ferro-nickel* quarante fois; ce dernier est plus cassant que le maillechort; le *silicium* a été aussi utilisé, mais le silicium est cher, ce qui est d'autant plus regrettable que le silicium est le métalloïde le plus résistant au point de vue électrique.

Depuis quelques années, on a mis au point des éléments chauffants constitués par des surfaces extrêmement minces, n'ayant pas plus de 1/4000 de millimètre d'épaisseur : la lame extra-mince de platine est déposée sur une plaque de mica. On réalise ainsi de grandes surfaces chauffantes se présentant sous le minimum de poids et de volume, et offrant le maximum d'effet utile. Grâce à ce dispositif, avec une lame de 1/4000 de millimètre d'épaisseur et de 20 millimètres de largeur, on peut faire débiter 3 ampères sous 110 volts. Dans les appareils ALIOTH, on a tiré parti des courants parasites (courants de Foucault prenant naissance dans le fer par le passage de l'électricité.)

Ces généralités étant exposées, voyons les principaux appareils à l'aide desquels on réalise le chauffage électrique.

Les radiateurs se composent d'une plaque métallique jouant le rôle de surface chauffante sur les deux faces de laquelle on a appliqué des couches d'émail dur et une couche de fils de ferro-nickel de 1 à 8 dixièmes de millimètre de diamètre, placés parallèlement et en série sur le courant destiné au chauffage⁸. On obtient ainsi une température variant entre 200° et 450° suivant le voltage employé. Il existe des radiateurs pour salons, bureaux; des appareils de cuisine tels que rôtissoires, poêles à frire, grils, chauffe-plats, etc. Un radiateur qui exige un courant de 20 ampères à 110 volts, consomme 2200 watts et entraîne une dépense de courant de 0 fr. 88 en comptant le kilowatt à 40 centimes.

Les personnes qui trouvent triste la chaleur obscure des radiateurs et regrettent les gaies flambées de l'âtre peuvent employer de préférence les bûches électriques de M. LE ROY. Ces bûches sont en silicium aggloméré et ont généralement 10 centimètres de longueur, 1 de largeur et 3 d'épaisseur; pour prévenir leur oxydation, on les enferme dans de petits manchons de verre où l'on a fait le vide. Elles chauffent directement par rayonnement; l'inventeur estime que la température atteinte par les crayons de silicium sous l'action du courant est d'environ 900°. Ces bûches durent 1500 heures et absorbent de 60 à 100 watts, selon leurs dimensions. Placées dans un poêle ordinaire ou dans une cheminée, les bûchettes de Le Roy procurent une chaleur saine et agréable, car, outre qu'elles n'altèrent en rien l'atmosphère, elles présentent l'avantage d'être rouges comme de la braise véritable et de réjouir l'œil. Ces bûches ont été adoptées par la Compagnie des wagons-lits pour le chauffage de ses voitures; elles ont été installées dans plusieurs paquebots de la Compagnie Transatlantique.

Chauffage électrique des théâtres, des magasins et des appartements. — Si l'on ne tient pas compte du coût de l'énergie électrique — lequel est variable et tombe même, à Berlin, à 2 centimes l'hectowatt — le chauffage électrique ne présente que des avantages. Un appareil de chauffage électrique ne nécessite aucun combustible, fonctionne indéfiniment, sans

qu'il soit nécessaire de le surveiller et sans vicier l'air de l'habitation, commence et interrompt son service aux moments voulus.

On a d'abord construit des **poêles électriques** transportables et pouvant être reliés avec la canalisation électrique de chaque pièce que l'on veut chauffer. Le réglage des différentes intensités et, par suite, des divers degrés de chauffage, s'effectue au moyen d'un petit volant qui réalise les couplages correspondants. Les appareils mobiles peuvent être remplacés par des **plaques murales** noyées dans le lambris et faisant partie de l'ornementation : dans un grand salon, par exemple, on peut avoir une cheminée servant à la ventilation et donnant de la gaieté, et des plaques murales pour chauffer. Le chauffage rapide de la pièce s'obtient en mettant toutes les plaques en action ; quand la pièce est chaude, un petit nombre de plaques suffit pour maintenir une bonne température.

Pour chauffer les salles de **théâtres**, les motifs d'hygiène et de sécurité qui conduisent partout à l'adoption de la lampe à incandescence font éliminer les calorifères à charbon. Le parterre est généralement plus froid que les galeries supérieures, par suite du mouvement ascensionnel de l'air chaud : les expériences faites avec des radiateurs électriques permettent de répartir uniformément la chaleur.

On emploie encore le courant électrique pour le chauffage des **wagons de chemin de fer** et des voitures de **tramways** : il suffit d'établir sur la canalisation principale une dérivation venant alimenter des résistances dissimulées sous les banquettes.

Appareils divers et cuisine électrique. — Dans ces dernières années, on a construit un grand nombre d'appareils où la chaleur est fournie par le courant électrique.

Les **chauffe-pieds**, destinés aux personnes qui restent longtemps assises, remplacent les chauffeuses dangereuses, les briques et bouillottes à eau chaude qu'il faut changer souvent. Un chauffe-pieds de 22 centimètres sur 21, traversé par une intensité de 0,4 ampère atteint 70° en dix minutes et cela pour une dépense de 0 fr. 003. Il en est qui possèdent un interrupteur permettant d'interrompre et de rétablir le courant toutes

les trois minutes. Le **chauffe-linge** renfermant un petit radiateur et une toile métallique sur laquelle on place le linge à chauffer ne consomme que 4 hectowatts. En Amérique, on a imaginé des **matelas électriques** pour malades, remplaçant les classiques bouillottes à eau chaude : ces matelas contiennent une trame métallique et dégagent une chaleur douce que l'on peut régler à volonté au moyen d'un rhéostat. Le **fer à repasser électrique** peut être soit chauffé sur un réchaud électrique, soit muni d'une plaque chauffeuse. On en fait usage dans les théâtres, l'Opéra de Paris, par exemple, pour repasser les jupes des danseuses : ce système n'expose à aucun danger d'incendie, conserve une température égale, ne risque pas de roussir le linge, évite les pertes de temps dues aux fers trop ou pas assez chauds, n'élève pas la température de la salle. En Amérique, on a généralisé l'usage des fers à repasser chez les particuliers. Dans les blanchisseries, l'énergie y est livrée à 15 centimes le kilowatt. Les **fers à friser** sont maintenant d'un usage courant : ils atteignent très rapidement le degré nécessaire et ne consomment qu'une faible quantité d'énergie (pas même un hectowatt).

Le chauffage électrique ne pouvait manquer d'être appliqué à la **cuisson des aliments**. La *cuisson électrique supprime les inconvénients du fourneau à charbon ou du réchaud à gaz* : pas de risque d'incendie, pas d'explosion, pas même de feu de cheminée, pas d'air vicié : le mets une fois cuit, on interrompt le courant et toute dépense inutile est évitée. Une fois réglés, les appareils maintiennent le degré de chaleur sans exiger aucune surveillance : grand avantage pour le pot-au-feu et les braisés qui demandent à être maintenus à 95° pendant quatre heures.

La **cuisinière électrique** est munie de commutateurs qui permettent de régler instantanément l'intensité du courant et la température : la plaque supérieure reçoit les plats et les casseroles, l'intérieur sert de rôtissoire. Pour cuire un gigot, par exemple, on fait d'abord passer le courant maximum, puis on diminue l'intensité du courant, et l'on achève la cuisson à une chaleur modérée.

On a établi un grand nombre d'appareils tels que : bouilloires, grils, chauffe-plats, chauffe-assiettes, etc., qui reçoivent leur énergie au moyen d'une prise de courant et d'un fil

souple : on peut, sans inconvénient, les poser sur une nappe, car un isolant spécial empêche la chaleur de rayonner en dessous. La **bouilloire électrique** consomme 6 hectowatts à l'heure et demande cinq minutes pour faire bouillir 1 litre d'eau : la dépense est de 4 centimes pour 1 litre d'eau bouillante⁹. Le **gril électrique** absorbe environ 5 hectowatts à l'heure et demande trois à quatre minutes pour cuire quatre côtelettes : l'opération coûte 4 centimes à peine : la graisse ne s'enflamme pas et ne répand pas de fumée âcre. Le **grille-pain** se compose de deux plaques chauffeuses s'ouvrant comme un livre : il permet de griller à la fois six tranches de pain sur leurs deux côtés : la dépense n'est que de 60 centimes l'heure. On le trouve dans les grands hôtels et restaurants. Le **chauffe-assiettes**, pour hôtels, ressemble assez au chauffe-linge déjà décrit : pour 8 douzaines d'assiettes, la dépense est de 16 hectowatts à l'heure. Il suffit de chauffer quelques instants, car la chaleur se conserve longtemps. L'**appareil à cuire les œufs** exige, pour quatre œufs, une dépense de 0 fr. 012 ; l'**appareil à frire** dépense 0 fr. 022 pour faire frire 250 grammes de pommes de terre. Citons encore un **appareil universel** pouvant réaliser un chauffage d'intensité variable et dépendant 0 fr. 089 pour faire bouillir 2 litres d'eau en vingt-quatre minutes ; 0 fr. 09 à l'heure pour maintenir l'eau en forte ébullition, 0 fr. 05 pour la maintenir en ébullition lente¹⁰.

Si l'on compare les frais de cuisson nécessités par l'usage de ces appareils à ceux qu'entraîne la cuisine au gaz, on constate que l'ébullition d'une quantité d'eau supérieure à 250 centimètres cubes est plus coûteuse par l'électricité que par le gaz. Par contre, pour les petites opérations comme infusions, cuisson des œufs, grillades, la dépense est la même, malgré le prix élevé de 40 centimes le kilowatt. Dans certains cas, la question de prix est secondaire. Pour préparer le café ou le thé dans un salon, rien ne vaut la bouilloire électrique, car, seule entre tous les autres systèmes, elle évite le maniement des allumettes et de combustibles salissants ou dangereux : elle est sans odeur, sans fumée, sans rayonnement thermique appréciable¹¹.

Les premiers essais de cuisine électrique furent assez timides, mais bientôt apparut la possibilité de faire cuire des repas entiers à l'électricité. Les premiers **banquets électriques** excitèrent vivement la curiosité et ravirent d'admira-

tion les convives. Un de ces banquets fut offert, en 1887, par M. Gaston Menier, à Paris; un autre, en 1891, à New-York, au *Franklin experimental Club*; en 1893, un banquet analogue fut donné par le club électrique de Saint-Louis (États-Unis) où tout fut préparé dans la salle de réception. La Compagnie électrique de la Cité, à Londres, offrit aussi, en 1895, un banquet où tous les mets furent cuits électriquement: pour 120 convives la dépense en énergie électrique fut de 25 francs. En 1900, à l'Exposition universelle de Paris, le restaurant espagnol *La Feria* fonctionna entièrement à l'électricité, bien qu'il eût à préparer plus de 600 repas par jour. La consommation maxima utilisée fut de 850 ampères et l'énergie totale de 350 kilowatts-heure par jour; l'énergie électrique étant payée 50 centimes le kilowatt, le prix de la cuisson du repas revenait à 23 centimes.

Si l'on tient compte que l'énergie électrique destinée au chauffage bénéficie de tarifs réduits et inférieurs à 50 centimes le kilowatt, on voit que le prix de revient de la cuisine électrique n'a rien d'exagéré, surtout si l'on tient compte que, chez un particulier, on peut réaliser, en réglant convenablement le courant, une économie dont s'inquiètent généralement peu les chefs cuisiniers¹². La préparation d'une tarte revient à 10 centimes, celle d'un pain à 30 centimes, celle d'un potage pour six personnes à 22 centimes. Pour cinq à six personnes se contentant de viandes grillées, d'un poisson à la sauce tomate, de pommes de terre et de riz à la Condé, on a constaté qu'il ne fallait pas plus de 35 centimes d'électricité.

Stérilisation électrique de l'air. — Le nombre des microbes est effrayant dans l'air que nous respirons: on a trouvé, à Paris, 28000 bactéries par mètre cube dans une église, 29000 dans un hôpital, 250000 dans certaines fabriques, plusieurs millions dans certains ateliers de confections de fourrures. L'atmosphère des cités ouvrières, locaux obscurs, salles de réunion, théâtres, chambres de malades contient un nombre énorme de microbes variés depuis le redoutable Bacille de la tuberculose jusqu'au Streptocoque pyogène de l'érysipèle, en passant par les agents du croup, du charbon, du choléra, de la grippe, etc.

La haute température atteinte par des fils résistants où passe

un courant électrique a été utilisée pour la *stérilisation électrique de l'air* des locaux. Le *stérilisateur SALLÉ* consiste en un long tube vertical en métal divisé en trois chambres, dont la chambre médiane est munie d'une prise de courant et com-

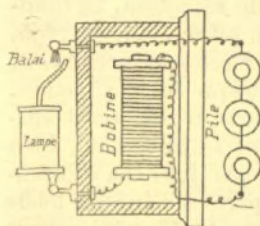


FIG. 56. — Allumoir par étincelle d'extra-courant

prend des résistances électriques atteignant la température de 600° . Il forme une cheminée d'appel vers laquelle est attiré l'air froid et d'où s'échappe l'air chaud stérilisé. Le nombre de bactéries qui, au début de l'expérience est de 40 000 à 50 000 par mètre cube, tombe à 10 000 au bout d'une heure, et à 1 000 au bout de deux heures : la stérilisation est complète en trois heures. La dépense de courant est

faible : 10 hectowatts pendant deux heures pour une salle de 100 mètres cubes.

L'allumage électrique. — La *chaleur développée par l'étincelle électrique* a été utilisée dans certains systèmes d'allumage. Dans plusieurs modèles de moteurs à gaz ou à essence, le mélange détonant est provoqué par la décharge d'une bobine de Ruhmkorff. De même, pour déterminer à distance l'inflammation des mines et des torpilles, on munit la cartouche de deux longs fils aboutissant à une bobine d'induction ou bien à une petite machine électromagnétique. On peut aussi utiliser la *chaleur développée par le passage du courant dans un fil métallique fin* : ce fil, contenu dans la cartouche, provoque l'explosion quand il est porté à l'incandescence.

On a créé un grand nombre d'**allumoirs** pour les becs de gaz, les lampes à essence, les cigares ; l'**allume-cigare** dans lequel un fil est porté à l'incandescence est plus économique que les allumettes, car pour 10 centimes, on réalise 400 allumages. Les allumoirs pour lampes à essence peuvent être montés sur la canalisation d'une sonnette électrique : ils sont fondés sur l'extra-courant de rupture dont l'étincelle jaillit près de la mèche et l'enflamme.

En résumé, un progrès incontestable a été accompli en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie électrique comme

source de chaleur, d'une part, grâce à l'obtention du courant à un prix de plus en plus réduit par la captation des chutes d'eau, d'autre part en raison des perfectionnements apportés dans la disposition des appareils transformant l'énergie électrique en énergie calorifique. L'électricité comme source de chaleur, de même que l'électricité comme source de lumière, a su se plier à toutes nos exigences; les applications ne feront désormais que de s'étendre.

NOTES DE LA SIXIÈME CONFÉRENCE

1. Le diamant n'est pas chose autre que du carbone pur et cristallisé. Au point de vue chimique, le diamant ne diffère pas de la plombagine ou du graphite dont le prix de vente est des plus modestes; seuls, la structure et l'arrangement moléculaire différencient ces substances.

2. Voir *La Chimie*, même collection.

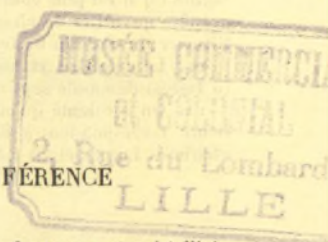
3. Dans les fours de 1000 chevaux, on utilise des électrodes de 60 centimètres de côté: les fours sont alignés dans un hall de l'usine; le mélange de coke et de chaux vive arrive au-dessus des fours et se trouve déchargé automatiquement. La production actuelle du carbure de calcium est de 180 000 tonnes annuellement pour l'Europe.

4. On essaye actuellement l'emploi du carborundum à la place du ferrosilicium, pour la métallurgie de la fonte de moulage et celle de l'acier.

5. Des hauts fourneaux électriques fonctionnent régulièrement en Suède et en Norvège. Pour une tonne de fonte il faut dépenser 2 500 kilowatts-heure, 250 kilogrammes de charbon et 14 kilogrammes d'électrodes. La *Société Trollhatan* projette de produire annuellement 1 500 tonnes de fonte électrique. Au 1^{er} janvier 1911, la France possédait 22 fours électriques pour la fabrication de l'acier, l'Allemagne 28, l'Italie 10, la Belgique, la Russie, le Canada 2.

6. Les soudures ainsi réalisées sont beaucoup plus résistantes que les autres; si elles sont, par exemple, pratiquées entre deux barres, on peut amener l'une de ces barres à faire avec l'autre un angle de 58° sans qu'il se produise de fente ou de cassure; si l'on applique les procédés ordinaires, l'angle de 147° ne peut être dépassé. Des soudures impossibles, jusque-là ont été de même réalisées: telles sont celles du fer avec l'acier le cuivre ou le laiton, celles du cuivre avec le laiton, etc.

7. On soude les rails de tramways électriques afin que le courant fasse retour à la dynamo génératrice par la voie elle-même. Il est à craindre toutefois que les dilatations et contractions dus aux changements de température n'amènent des ruptures et des gondolements.



8. L'isolement des fils est ainsi parfaitement assuré et tout danger d'incendie dû à la combustion des fils du radiateur est impossible. L'émail, ayant un pouvoir diathermane assez grand, transmet une bonne partie de la chaleur due à l'échauffement des fils de ferro-nickel.

9. Tous ces prix sont calculés à raison de 40 centimes le kilowatt : le coût de l'énergie pour chauffage étant 50 p. 100 meilleur marché que pour l'éclairage.

10. La cuisine électrique est facilement réalisée dans les hôtels de montagnes où il est plus commode de faire parvenir l'énergie électrique que de grandes quantités de charbon. Ex. : hôtel Moserboden, hôtel de la station Eismeer du chemin de fer de la Jungfrau.

11. La cafetière viennoise, d'une capacité de 600 centimètres cubes (3 tasses) demande sept minutes et entraîne une dépense de 2 centimes.

12. On a calculé qu'au prix de 20 centimes le kilowatt, 600 kilowatts-heure correspondent à 800 mètres cubes de gaz et 4 000 kilogrammes de charbon. Le gaz étant compté à raison de 16 centimes le mètre cube.

SEPTIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ AGENT CHIMIQUE

ÉLECTROLYSE. EFFLUVE. ÉLECTROCHIMIE

Les phénomènes de l'Électrolyse. — Leurs lois, leurs conséquences, leur explication. — Les actions secondaires de l'Électrolyse. — Opérations électrolytiques. — La Galvanoplastie : reproductions artistiques, électrotypie, gravure électrolytique. — Les dépôts adhérents (cuivrage, dorure, argenture, nickelage). — L'Électrometallurgie. — L'Électrochimie. — L'Électrolyse dans l'industrie. L'Effluve et l'Ozone.

L'Électricité est, de toutes les forces naturelles, celle qui se présente sous les formes les plus variées ; elle se métamorphose avec une grande facilité et donne naissance à des manifestations différentes de l'énergie. L'étude des effets lumineux et calorifiques du courant électrique nous l'a montré dans les conférences précédentes ; l'étude des *actions chimiques du courant*, importante au double point de vue théorique et pratique, en sera une éclatante confirmation.

Phénomènes de l'Électrolyse. — Quand un courant trouve sur son passage un liquide, deux cas se présentent : ou le liquide se comporte comme un isolant parfait, ou le liquide est conducteur. Dans le premier cas, le courant ne passe pas et le liquide ne présente aucune trace de décomposition ; dans le second cas, le courant passe et le liquide est décomposé. Les liquides de la première catégorie sont *l'eau pure, l'alcool,*

l'éther, etc.; les liquides de la seconde catégorie sont les *acides*, les *alcalis dissous* et les *sels en dissolution* ou *fondus*. La décomposition des liquides par le courant porte le nom d'*électrolyse* : le liquide décomposé s'appelle *électrolyte*; les conducteurs qui servent à l'entrée et à la sortie du

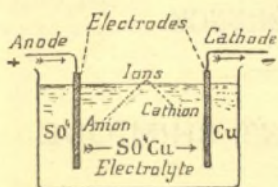


FIG. 57. — Électrolyse.

courant sont les *électrodes*; l'électrode réunie au pôle positif est l'*anode*, l'autre est la *cathode*¹. Ces électrodes sont habituellement constituées par des plaques ou des fils en métal ou en charbon.

Ce phénomène est connu depuis longtemps. A peine VOLTA avait-il inventé la pile électrique

qu'il observa la décomposition chimique que le courant fait subir aux substances traversées. En 1801, deux physiciens anglais CARLISLE et NICHOLSON décomposèrent l'eau par un courant électrique; en 1806, H. DAVY décomposa les alcalis et isola plusieurs métaux dont on ne connaissait que les sels; mais ce n'est qu'en 1840 que FARADAY fonda réellement les bases de l'Électrolyse, en observant que ces divers phénomènes obéissent à des lois rigoureuses.

Lois de l'Électrolyse. — Prenons un exemple simple d'électrolyse, ce qui nous permettra de fixer immédiatement les idées sur ce phénomène important. Soit un bain de *chlorure de sodium fondu* dans lequel on plonge comme électrode positive ou *anode* une plaque de charbon, et comme électrode négative ou *cathode* une plaque de fer. Quand le courant passe, le *chlorure de sodium est décomposé*; autour de l'anode se dégage un gaz à odeur forte et désagréable, c'est du *chlore*, tandis qu'autour de la cathode se rassemble un métal fondu qui est du *sodium*. FARADAY a donné le nom d'*ions* aux éléments qui résultent de l'électrolyse; le *chlore* de l'exemple précédent est l'*anion* puisqu'il s'est rendu sur l'anode; le *sodium* est, au contraire, le *cathion*, car il se rassemble autour de la cathode. De même, quand un courant électrique traverse de l'eau rendue conductrice par quelques gouttes d'acide sulfurique, on voit apparaître des bulles

gazeuses autour de chacune des électrodes en platine ; si l'on recueille ces gaz dans des éprouvettes, on peut se rendre compte que le gaz qui se dégage autour de la cathode est de l'hydrogène et l'autre de l'oxygène ; l'hydrogène est le cathion et l'oxygène l'anion.

Nous ordonnerons de la façon suivante les lois de l'électrolyse :

1° *Un corps ne peut être électrolysé que s'il est liquide ou dissous* ; pour électrolyser un solide, il est nécessaire de l'amener au préalable à l'état liquide, soit par dissolution, soit par fusion ; cette fusion ou cette dissolution peuvent d'ailleurs résulter de la chaleur dégagée par le passage du courant.

2° *L'hydrogène des acides ou le métal des bases et des sels est entraîné par le courant sur l'électrode négative, tandis que le reste de la molécule ou radical se porte sur l'électrode positive.* Ainsi, dans le chlorure de sodium NaCl, le métal est Na, sodium, tandis que le radical est Cl, chlore ; dans l'eau H²O, l'hydrogène H joue le rôle de métal, tandis que l'oxygène constitue le radical. Le sodium et l'hydrogène apparaissent autour des électrodes négatives, alors que le chlore et l'oxygène apparaissent autour des électrodes positives.

3° *Les produits de la décomposition ou ions n'apparaissent jamais dans la masse même du liquide, mais uniquement sur les électrodes elles-mêmes* ; le phénomène est très net quand les ions sont gazeux : l'hydrogène et l'oxygène qui proviennent de la décomposition de l'eau par le courant électrique ne se dégagent que sur les électrodes.

4° *Le poids d'un corps décomposé est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte* ; si un courant d'intensité constante décompose 10 grammes d'un électrolyte en 1 minute, il en décomposera 20, 30, 40 grammes en 2, 3, 4 minutes. D'autre part, un coulomb décompose toujours, en un temps plus ou moins long, un poids déterminé du même électrolyte ; ainsi un coulomb décompose toujours P/193 200 grammes d'acide sulfurique ou d'un sulfate (P étant le poids moléculaire² de l'acide ou du sulfate) et dépose sur la cathode 2/193 200 grammes d'hydrogène. Pour mettre en liberté 1 gramme d'hydrogène, il faudrait 193 200/2 ou 96 600 coulombs ; donc il faut 96 600 coulombs

pour une valence rompue. La loi énoncée plus haut et qui constitue la première loi de Faraday sur l'électrolyse peut se résumer ainsi : *Dans toute électrolyse, la rupture d'une valence exige un courant de 96 600 coulombs, quelles que soient la nature de l'électrolyte et la durée de l'opération.*

5° *La masse d'un électrolyte quelconque décomposée par le passage de 1 coulomb est proportionnelle au poids moléculaire de l'électrolyte ou au poids atomique du métal déposé ; elle est inversement proportionnelle au nombre de valences rompues dans la réaction.* Si l'on fait passer un même courant à travers plusieurs électrolytes différents ; les poids des métaux déposés obéissent à la loi précédente ; pour 96 600 coulombs les poids de ces métaux seront A/n , en appelant A le poids atomique du métal et n la valence de l'atome du métal considéré. (**Deuxième loi de Faraday**³.)

6° *Dans un mélange de plusieurs électrolytes, la réaction qui se produit la première est celle qui nécessite la moindre dépense d'énergie.* Quand, en particulier, le mélange électrolytique est une dissolution aqueuse d'un sel — et c'est là un cas très fréquent — deux réactions peuvent résulter du passage du courant : la décomposition de l'eau et celle du sel. La dépense d'énergie nécessaire pour effectuer la première de ces décompositions correspond à 3 829 calories par gramme d'eau, elle est plus élevée que pour la plupart des sels : c'est donc en général le sel qui est décomposé le premier.

Conséquences des lois de l'Électrolyse. — Il découle des lois de l'électrolyse plusieurs conséquences importantes. La *quantité d'électricité nécessaire pour mettre en liberté un équivalent chimique d'un métal* est de 96 600 coulombs, soit un courant de 1 ampère pendant 96 600 secondes ou pendant 26 heures 49 minutes. Un tel courant déposera 31 gr. 8 de cuivre, 103 gr. 46 de plomb, 108 grammes d'argent, 28 grammes de fer, etc.

Pour que l'électrolyse ait lieu, il est indispensable que l'énergie fournie par la source soit supérieure à l'énergie nécessaire à la décomposition de l'électrolyte, car une partie de l'énergie se dégrade suivant la loi de Joule et, en outre, il se produit des phénomènes d'intensité diverse dans le voisinage des électrodes. La force contre-électromotrice, dont nous avons

déjà parlé à propos des phénomènes de polarisation, ne peut être déterminée que par l'expérience, elle dépend uniquement de la nature et de la concentration de l'électrolyte, de la nature des électrodes et de la température du système. Pour que l'eau acidulée puisse être électrolysée, il faut que la différence de potentiel entre l'anode et la cathode soit supérieure à 1 volt 48.

Enfin, les lois de l'électrolyse conduisent à une *définition pratique du coulomb et de l'ampère*. Un coulomb est la quantité d'électricité qui met en liberté dans un temps quelconque 1 gr./96 600 ou 0 gr. 00001035 d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau acidulée. Un ampère vaut un coulomb par seconde. L'électrolyse fournit donc un moyen de *détermination de l'intensité d'un courant* ; on fait passer le courant à travers de l'eau acidulée et l'on détermine le poids d'hydrogène dégagé en un temps donné ; l'intensité s'obtient en divisant ce poids d'hydrogène par le produit du temps par 0 gr. 00001035. Les appareils qui permettent de faire la mesure de l'intensité par électrolyse sont des **voltamètres**.

Explication des phénomènes d'Électrolyse. — Bien des hypothèses ont été édifiées pour expliquer les lois de Faraday et les phénomènes électrolytiques. La plus récente en date, et peut-être la plus hardie, est celle que le savant danois ARRHÉNIUS a émise sur la constitution des dissolutions salines. Arrhénius a admis qu'un sel en dissolution est toujours dissocié pour une part d'autant plus grande que la solution est plus étendue. La molécule du sel se fractionne en deux parties, que l'on nomme *ions*. Les ions possèdent des quantités égales d'électricités contraires ; leur charge, positive pour le métal, négative pour le radical, est simplement proportionnelle à leur valence et correspond à 96 600 coulombs par valence-gramme. En dissolution étendue, le sel d'un électrolyte n'existe pas à l'état de combinaison mais à l'état d'ions, et si ces ions libres restent sans action chimique sur le dissolvant, cela tient à leur état d'électrisation qui modifie profondément leurs affinités chimiques. Si l'on vient à faire passer un courant dans la dissolution saline, les ions obéissent au champ électrique compris entre les électrodes : les ions négatifs sont entraînés vers l'anode, les ions positifs vers la

cathode. Au contact des électrodes, les ions se déchargent et apparaissent alors avec leurs propriétés chimiques ordinaires. *Les ions seraient donc les véhicules de l'électricité* : le dissolvant et les molécules non dissociées n'interviendraient pas dans le transport électrique. La loi de Faraday s'explique par ce fait que les charges électriques véhiculées sont proportionnelles à la valence des ions⁴. Bien que cette théorie paraisse au premier abord purement artificielle, elle s'adapte cependant, avec une merveilleuse précision, aux phénomènes qui se présentent dans l'étude des liquides composés : aussi est-elle universellement admise.

Les actions secondaires de l'Électrolyse. — Nous avons vu que dans l'électrolyse d'un sel, le métal se rend à l'électrode négative et le reste à l'électrode positive. Cette règle est générale mais il s'en faut que les corps qui apparaissent sur les électrodes soient toujours ceux qu'on recueille effectivement. Il se produit souvent des **réactions secondaires**, — dans lesquelles interviennent, les ions, les électrodes, le liquide qui a dissous l'électrolyte — et qui viennent masquer la simplicité de la *réaction primaire* précédente. Ces réactions secondaires sont souvent utilisées dans la pratique, ainsi que nous le verrons plus loin :

1° **Les ions se décomposent.** Le cas se présente dans l'*électrolyse de l'acide sulfurique étendu* où les produits gazeux recueillis sont l'oxygène et l'hydrogène. L'acide sulfurique SO^4H^2 est décomposé : l'ion H^2 est recueilli à la cathode; l'ion SO^4 n'est pas recueilli à l'anode, il se *décompose* en SO^3 et O, c'est-à-dire en anhydride sulfurique et en oxygène. Cet oxygène O est recueilli autour de l'anode, tandis que l'anhydride sulfurique SO^3 se combine à l'eau et reconstitue l'acide sulfurique. En somme, on recueille de l'*hydrogène* d'une part, et de l'*oxygène* d'autre part; finalement, c'est l'eau qui est décomposée et une quantité limitée d'acide sulfurique permet de décomposer une quantité d'eau indéfinie.

2° **Les ions attaquent les électrodes.** Le fait se produit dans l'*électrolyse du sulfate de cuivre avec anode en cuivre*. L'effet primaire du courant est de décomposer SO^4Cu en SO^4 et Cu. L'ion Cu se dépose sur la cathode dont il accroit

le poids, tandis que l'ion SO_4 attaque l'anode qui disparaît peu à peu en reconstituant le sulfate de cuivre. En définitive, tout se réduit à un transport de cuivre de l'anode à la cathode. Nous verrons des applications en galvanoplastie, dorure, argenture, nickelage ; on dit que l'anode est soluble.

3° Les ions attaquent le dissolvant. L'électrolyse d'une solution de potasse KOH fournit du potassium K à la cathode ; mais le potassium décompose l'eau et donne de l'hydrogène en même temps que la potasse se trouve reconstituée. A l'anode, une autre réaction secondaire se produit, l'ion OH se décompose et de l'oxygène se dégage. En définitive, on ne recueille que de l'oxygène et de l'hydrogène ; c'est l'eau qui est décomposée. Ces phénomènes sont utilisés dans l'industrie pour obtenir l'oxygène et l'hydrogène.

4° Les ions réagissent l'un sur l'autre. Le cas se présente dans l'électrolyse du chlorure de potassium KCl. L'action primaire fournit à la cathode du potassium qui en agissant sur l'eau donne naissance à un dégagement d'hydrogène et à de la potasse ; à l'anode apparaît du chlore. Si l'on établit dans le liquide une circulation convenable, le chlore et la potasse réagissent pour former de l'hypochlorite ou du chlorate de potassium. Ces préparations sont industrielles.

Opérations électrolytiques. — Toute opération d'électrolyse a pour premier résultat le transport d'un métal à la cathode. On peut donc utiliser l'électrolyse pour provoquer des dépôts de métal pur destinés, soit à adhérer à la cathode, soit à en être détachés, ce qui constitue deux classes distinctes d'applications : dépôts adhérents (nickelage, argenture, dorure) et dépôts indépendants (galvanoplastie, fabrication de l'aluminium, du cuivre pur, etc.). On peut aussi décomposer des électrolytes en vue d'obtenir des produits résultant d'actions secondaires, c'est ce qui a lieu dans la fabrication d'un certain nombre de sels, la préparation de dissolutions chlorées destinées au blanchiment et à la désinfection.

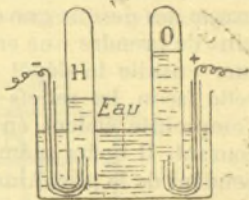


FIG. 58. — Voltamètre.
Électrolyse de l'eau.

La Galvanoplastie. — En 1837, JACOBI, professeur de physique en Russie, examinant le dépôt formé sur le pôle positif d'une pile de Daniell, reconnut que le métal ainsi précipité reproduisait fidèlement, sur sa surface interne, toutes les inégalités de l'électrode. Renouvelant l'expérience, il remplaça la lame de cuivre qui formait primitivement le pôle positif de la pile, par des plaques sur lesquelles des dessins étaient tracés au burin ; le dépôt, une fois détaché, offrait en relief l'empreinte exacte des dessins gravés en creux sur l'original. JACOBI imagina de prendre une empreinte de l'objet à imiter, et d'effectuer ensuite le dépôt galvanique sur cette empreinte. De cette façon, les reliefs du modèle, donnant des creux dans l'empreinte étaient en définitive reproduits en relief par le courant. Il opéra même dans un récipient distinct et indépendant de la pile. Ainsi, par une série de modifications judicieuses, le physicien russe était parvenu à créer de toutes pièces un art nouveau : la *reproduction des reliefs par l'électricité*⁵.

La **galvanoplastie**, peut-on dire, a pour objet de modeler les métaux en les précipitant lentement de leurs dissolutions salines sous l'action d'un courant électrique. Supposons qu'il s'agisse de reproduire la face d'une **médaille**. Il faudra deux sortes d'opérations : la préparation d'un moule, et la métallisation de ce moule.

Pour *préparer le moule*, on se sert habituellement de substances telles que le plâtre, l'alliage fusible de Darcel, la cire, la stéarine, la gélatine, la gutta-percha. Le *plâtre* convient surtout au surmoulage du plâtre et à la reproduction des objets en stuc, en marbre, ou en albâtre ; quand le moule en plâtre est sec, il est nécessaire de le rendre imperméable en le plongeant dans de la stéarine fondue. L'*alliage de Darcel*⁶ qui fond à 94°5 est simplement ramolli par une douce chaleur : à l'état pâteux, on l'applique sur le modèle et, en le frappant d'un coup léger, donné bien d'aplomb, on obtient une empreinte d'une remarquable finesse. La *cire* et la *stéarine* sont employées dans la reproduction des médailles et des clichés : on les coule à l'état de fusion sur le modèle, préalablement entouré d'une bande de carton ou de papier fort qui évite les coulées latérales. La *gutta-percha* est d'un usage très général : elle pénètre bien dans les détails du modèle, quand elle est

suffisamment chauffée, ne risque pas de se déformer une fois refroidie, et n'est altérée ni par les bains acides, ni par les bains alcalins. On ramollit la gutta dans l'eau chaude et on la presse fortement contre le modèle (médaille, planche gravée, bas-relief). Le modèle doit avoir été, au préalable, frotté de savon afin de faciliter le démoulage⁷.

Pour rendre le moule conducteur, on l'humecte légèrement, puis on le frotte à l'aide d'un pinceau enduit de plombagine

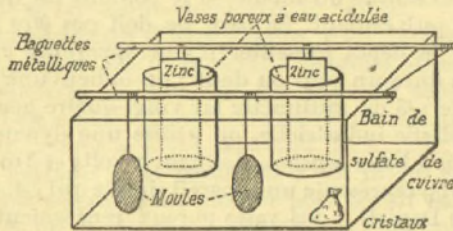


FIG. 59. — Appareil simple pour la galvanoplastie.

en poudre impalpable ; cette opération se poursuit jusqu'à ce que la surface qui doit recevoir le dépôt de cuivre présente un aspect brillant et uniforme. On procède de la sorte, non seulement avec la gutta, mais aussi avec les autres substances, sans quoi le dépôt galvanique resterait adhérent au moule. Les parties sur lesquelles il ne faut pas que le dépôt s'effectue sont recouvertes de cire (cire à cacheter dissoute dans l'alcool ordinaire).

Quand le moule est rendu conducteur, on l'entoure d'un fil de cuivre, et on le plonge dans le *bain galvanique*. Ce bain, contenu dans une cuve en grès ou en verre, est formé de 7 à 8 p. 100 en poids d'acide sulfurique et de 8 à 9 p. 100 en poids de cristaux pulvérisés de sulfate de cuivre. Le bain, refroidi, doit marquer 25° à l'aréomètre de Baumé⁸. Deux baguettes métalliques sont posées sur les bords de la cuve : l'une porte des plaques de cuivre pur qui serviront d'anodes et sont reliées au pôle positif de la pile ; l'autre, à laquelle sont suspendus les moules, est reliée au pôle négatif. Il est bon de mouiller les moules avec de l'alcool pour empêcher

les bulles d'air qui pourraient rester à leur surface. On fait passer le courant : le sulfate de cuivre se dédouble en cuivre qui se rend sur les cathodes, c'est-à-dire sur les moules, tandis que les ions SO^4 vont reformer du sulfate de cuivre en attaquant les lames de cuivre de l'anode. *Tout se passe donc comme si le cuivre était transporté de l'anode à la cathode.* L'intensité du courant doit être de 1 à 1,5 ampères par décimètre carré de surface du moule ; si le courant est trop intense, le cuivre précipité est cristallin et forme des rognons métalliques sur les saillies du moule ; si le courant est trop faible, le dépôt est pulvérulent. Le bain ne doit pas être trop concentré, car le dépôt présenterait une apparence cristalline. L'opération dure un jour ou deux ; on obtient une épaisseur de cuivre de 1/3 de millimètre en vingt-quatre heures. Dans la galvanoplastie industrielle, on utilise une dynamo à courant continu à basse tension, donnant 7 volts et 310 ampères.

La figure 59 représente un appareil simple qui est, en réalité, une pile de Daniell : les vases poreux renferment de l'eau acidulée dans laquelle plongent des lames de zinc. La baguette positive est reliée à la baguette supportant les moules par un fil conducteur. Ici, le sulfate n'étant pas régénéré, on maintient la dissolution au degré voulu par des cristaux de sulfate de cuivre. Dans l'un ou l'autre cas, quand l'épaisseur du dépôt est suffisante, on retire le moule du bain et l'on enlève la couche de cuivre. L'épreuve galvanoplastique démolée est rouge sale, recouverte de bavures. Pour lui donner son aspect définitif, il faut la *mettre en couleur* ; on la recuit sur un feu doux et on la soumet à l'effet d'une lessive bouillante de potasse. On la nettoie ensuite avec de l'alcool, de la benzine, de l'essence de térébenthine ; puis on la frotte avec du blanc d'Espagne ; finalement on lui donne une teinte de bronze en badigeonnant la pièce avec une bouillie de rouge d'Angleterre, de sanguine et de plombagine.

On est parvenu à reproduire par la galvanoplastie des objets naturels : fleurs, fruits, feuilles, etc., que l'on dispose isolément ou en groupes pour constituer des motifs d'ornementation ou de décoration intérieure, c'est la **Galvanotypie**. Le secret de l'obtention de ces objets, dont on admire la surprenante délicatesse, réside dans la métallisation parfaite de l'objet original. La méthode par voie humide qui consiste à

étendre sur l'objet une solution de nitrate d'argent étendue et que l'on réduit par la vapeur d'une solution concentrée de phosphore dans le sulfure de carbone, convient particulièrement aux pièces délicates, telles que dentelles, mousses, feuillages, insectes, etc.

La reproduction des reliefs à l'aide du *cuivre* réussit très bien ; ce métal étant à la fois très souple et suffisamment tenace, prend une solidité assez grande sous une épaisseur relativement mince. L'*argent* ne donne pas un dépôt assez solide ; l'*or* agit de même. Pour ces raisons, la reproduction des reliefs se fait uniquement avec le *cuivre*.

La reproduction d'une statue, d'un flambeau, etc., est plus compliquée. On peut mouler en gutta plusieurs parties qui représentent chacune l'un des côtés du modèle ; chaque fragment est enduit intérieurement de plombagine, puis on les rassemble avec le plus grand soin. Le tout est plongé dans un bain galvanique et suspendu à un fil qui communique avec le pôle négatif de la pile ; le pôle positif est relié à une carcasse de fils de plomb qui pénètrent à l'intérieur du moule et en épousent grossièrement la forme. Quand le dépôt est terminé, le moule est ramolli par la chaleur et permet de retirer la reproduction galvanique. La couche galvanoplastique est renforcée par l'étain que l'on coule à l'intérieur de l'objet. La galvanoplastie a contribué à répandre et à vulgariser les chefs-d'œuvre de l'architecture et de la statuaire ; elle a permis aussi d'exécuter des œuvres originales dont les dimensions anormales auraient rendu très difficile l'opération de la fonte. C'est par ce moyen qu'ont été exécutées les statues colossales qui ornent la façade de l'Opéra, à Paris, les portes de l'église Saint-Augustin, etc. La galvanoplastie multiplie à volonté les pièces les plus rares de l'art antique. C'est ainsi que le musée de Saint-Germain-en-Laye possède des copies des bas-reliefs qui décorent, à Rome, la Colonne Trajane et l'Arc de triomphe de Constantin. Les principaux musées d'Europe font mouler les objets les plus remarquables des autres collections et s'enrichissent de reproductions dont l'exactitude est parfaite.

Électrotypie. — Pendant longtemps, les livres illustrés ont été regardés comme des objets de luxe. Les gravures sur bois, après un tirage de 10000 exemplaires, étaient déformées et

mises hors d'usage; les planches métalliques résistaient davantage, mais le nombre d'exemplaires qu'elles pouvaient donner ne permettait pas encore d'abaisser sensiblement le prix de vente des publications illustrées. Aujourd'hui, on reproduit par la galvanoplastie les gravures sur bois, photographures, compositions typographiques. Le moule est en gutta; l'épreuve, étant très mince, est renforcée à l'aide d'un alliage de plomb et d'antimoine, puis montée sur bois. Cette épreuve peut supporter l'impression de 8000 exemplaires sans altération, et quand elle est usée, on en exécute facilement, un autre moule. C'est grâce à ce procédé que les publications illustrées ont pris, en quelques années, un développement extraordinaire. En remplaçant un dépôt de cuivre par un dépôt de nickel, la résistance du cliché devient beaucoup plus grande.

Gravure électrolytique. — L'Électrochimie a permis de simplifier la gravure sur cuivre. Dans le procédé à l'eau-forte, la planche recouverte de cire, sauf aux points qui doivent être gravés en creux, est plongée dans l'acide azotique qui creuse le métal, partout où il a été mis à nu. L'action est régulière, mais les vapeurs nitreuses qui se dégagent rendent l'air de l'atelier irrespirable. Le procédé électrolytique évite cet inconvénient : la plaque est immergée dans une solution de sulfate de cuivre et reliée au pôle positif d'une pile. Elle constitue une anode soluble, et le cuivre est rongé lentement partout où le stylet du dessinateur l'a découvert. Sur tous les autres points, le vernis protecteur s'oppose à l'action du courant.

Les dépôts adhérents. — L'Électrolyse permettant le transport d'un métal sur une cathode conductrice a fourni la possibilité de recouvrir un objet en métal vulgaire d'une mince couche d'un autre métal plus précieux, comme l'argent et l'or, et qui résiste mieux à l'action des agents atmosphériques. Les métaux que l'on dépose surtout sont : le cuivre, l'argent, l'or, le nickel.

Quelle que soit la nature des dépôts à former, il est indispensable de nettoyer parfaitement la surface des objets à recouvrir afin d'assurer un contact intime avec le dépôt. Deux opérations successives ont pour but de débarrasser cette sur-

face des corps gras et des oxydes qui la recouvrent : ce sont le dégraissage et le dérochage. Le *dégraissage* se fait en plongeant les pièces dans une dissolution de potasse ou de soude caustique; le *dérochage* consiste à les passer dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Le métal est ensuite mis en quelque sorte à vif par le *décapage* qui s'effectue en trempant les pièces dans de l'acide azotique⁹.

Les pièces ainsi préparées sont suspendues dans les cuves au moyen de fils conducteurs inattaquables par l'électrolyte et les produits de l'électrolyse; elles constituent la cathode et sont placées le plus souvent entre deux anodes du métal à déposer. Le bain doit être composé de substances très pures : il est bon de l'agiter, afin de maintenir homogène sa composition. La densité du courant doit être déterminée et la température surveillée : celle-ci doit être parfois assez élevée et, dans ce cas, si le courant n'y suffit pas, on recourt à l'emploi de réchauffeurs. Dans une fabrication courante, le poids de métal déposé sur chaque objet doit être rigoureusement le même. Des appareils spéciaux permettent de connaître le moment précis où ce poids est atteint, ils peuvent même au besoin, interrompre alors automatiquement le courant (*balances argyrométriques*).

Le *cuivrage* est l'opération galvanoplastique la plus répandue; il s'applique aux fils télégraphiques ou téléphoniques, à la fonte et au zinc d'ornementation; on recouvre de cuivre les candélabres et les fontaines en fonte de nos places publiques, ce qui leur donne l'aspect du bronze. Pour cuivrer le fer et le zinc, il faut éviter de les mettre en contact avec le sulfate de cuivre, parce qu'ils décomposeraient ce sel et se sulfateraient eux-mêmes. On doit faire usage d'abord d'une solution de cyanure double de potassium et de cuivre; quand le dépôt est commencé, on substitue à ce premier bain une solution ordinaire de sulfate de cuivre, beaucoup moins coûteuse que la précédente. On cuivre aussi des surfaces non conductrices : il faut dans ce cas avoir soin de les recouvrir, au préalable, d'une couche bien homogène de plombagine à l'aide d'un pinceau de blaireau fin; le frottement donne ensuite du brillant à la pièce. A l'usine OUDRY, pour cuivrer de grandes surfaces, on passe sur la fonte une couche de peinture au minium : cet enduit, une fois sec, est rendu con-

ducteur à l'aide de la plombagine, et le dépôt électrolytique s'accomplit dans d'immenses cuves remplies de sulfate de cuivre. Au bout de cinq à six jours, l'épaisseur du dépôt atteint 1 millimètre. Pour donner à l'objet ainsi traité l'apparence du bronze, il suffit de le frotter avec une brosse trempée dans un mélange d'ammoniaque et d'acétate de cuivre. C'est par ce procédé qu'ont été cuivrés les candélabres de la ville de Paris, les fontaines de la place de la Concorde, les groupes décoratifs de l'Opéra, la Vierge qui surmonte la basilique de Notre-Dame-de-la-Garde, à Marseille.

Les premiers essais de dorure et d'argenture électrolytiques sont antérieurs à la découverte de la galvanoplastie. En 1802, BRUGNATELLI, l'élève et l'ami de Volta, avait essayé de dorer au moyen de la pile en employant les ammoniures d'or, mais l'instabilité de ces solutions lui avait fait abandonner ses essais. Il faut attendre jusqu'en 1839, les expériences de DE LA RIVE, à Genève, qui attirèrent de nouveau l'attention des savants et des industriels sur l'emploi de la pile pour le dépôt des métaux. En 1840, ELKINGTON dota l'industrie du procédé encore en usage aujourd'hui, et en 1841, le prix Montyon de l'Académie des Sciences fut partagé entre Elkington et RUOLZ. Les brevets relatifs à l'argenture et à la dorure ayant été acquis par Ch. Christofle, un des bijoutiers les plus en renom de Paris, ces opérations ne tardèrent pas à devenir un nouvel art industriel des plus importants. Aujourd'hui, cette industrie ne consomme pas moins de 125 000 kilogrammes d'argent chaque année, ce qui représente une somme de 25 millions de francs.

Le bain de dorure varie de composition suivant que l'on opère à chaud ou à froid. Quand on opère à froid (pour les grandes pièces), on emploie une dissolution de cyanure d'or dans le cyanure de potassium ; quand on opère à chaud (pour les petites pièces), le bain est constitué par une dissolution de chlorure d'or dans le chlorure de potassium et le bisulfite de sodium, avec du phosphate de sodium. La pièce est suspendue à la cathode et une lame d'or constitue l'anode. Pendant l'opération, le courant doit être très faible, 0 amp. 10 environ par décimètre carré. Quand la dorure est terminée, on donne aux objets qui sont ternes au sortir du bain, une belle couleur d'or en les recouvrant au moyen d'une bouillie spéciale. On

peut obtenir une dorure de couleur *verte* en ajoutant au bain d'or d'une solution très étendue de nitrate d'argent, une *dorure rose* avec un mélange de bains d'argent, d'or et de cuivre, une *dorure rouge* avec un bain d'or et de cuivre. Les combinaisons que l'on peut réaliser sont nombreuses, ces colorations, associées aux réserves ou *épargnes* ménagées sur les objets à dorer, permettent d'obtenir des effets artistiques variés et très curieux⁴⁰.

Le *bain d'argenture* est formé d'un cyanure double d'argent et de potassium obtenu par réaction du cyanure de potassium en excès, sur le nitrate d'argent. On n'argente que le cuivre, seul métal sur lequel le dépôt est adhérent. Les autres métaux sont d'abord cuivrés avant d'être soumis à la dorure ou à l'argenture. Les anodes utilisées sont en argent pur : leur distance aux objets à argenter est de 8 à 10 centimètres et leur surface à peu près égale à celle de ces objets. Le courant doit avoir une tension de 2 à 3 volts, et son intensité ne doit pas dépasser un demi-ampère par décimètre carré. La durée de l'opération, pour un dépôt de bonne qualité et d'épaisseur suffisante, varie entre trois et huit heures, suivant la rapidité du dépôt, qui dépend de l'intensité du courant. Les pièces ont un aspect mat : pour les faire briller, on les frotte avec un outil appelé *gratte-bosse* qui consiste en un pinceau de fils de laiton. On passe ensuite au tripoli, on brunit avec des outils spéciaux en acier et de l'eau de savon.

Le *nickelage*, peu usité jusqu'en 1870, a pris depuis cette époque, une extension sans cesse grandissante, surtout depuis la vogue du cyclisme et de l'automobilisme. Le bain de nickel se compose d'une solution à 10 p. 100 de sulfate double de nickel et d'ammoniaque dans l'eau distillée chaude. Il faut filtrer après refroidissement. Les pièces à nickeler sont nettoyées comme à l'ordinaire ; elles doivent être polies, si l'on veut un dépôt brillant. Il est bon que le bain soit chauffé à 40° environ, sans quoi le dépôt serait gris et cassant. Il faut, en outre, qu'il soit aussi neutre que possible : un papier de tournesol ne doit pas changer de couleur. Le courant ne doit pas être trop intense, sans quoi le nickel se dépose sous forme pulvérulente, sans aucune adhérence. On lave ensuite, on polit au colcotar et l'on sèche à l'étuve.

L'Électrométallurgie. — L'Électrométallurgie est la métallurgie réalisée par l'intermédiaire des courants électriques.

Cette manière toute récente de traiter les métaux est surtout avantageuse dans les régions où abondent les minerais et les chutes d'eau, et où le combustible fait défaut. On y obtient, en effet, l'énergie électrique à bas prix en actionnant les dynamos au moyen de turbines hydrauliques. De plus, la métallurgie électrique constitue un progrès considérable sur les anciens procédés, tant pour la régularité des résultats obtenus que pour le prix de revient des opérations effectuées de la sorte.

Le cuivre est, de tous les métaux, celui qui se prête le mieux à la méthode électrolytique. Cette méthode s'applique surtout au raffinage des cuivres bruts et des vieux cuivres. La présence d'impuretés dans le cuivre modifie considérablement ses propriétés physiques; en particulier, sa conductibilité électrique; or, il y a avantage pour la fabrication des fils et câbles électriques à n'utiliser que du cuivre de grande conductibilité. On emploie comme électrolyte une solution de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique dans l'eau; comme anode une plaque de cuivre impur, et comme cathode une lame mince en cuivre pur. Sur la cathode se dépose du cuivre à peu près pur, tandis que les impuretés se déposent au fond du bain à l'état de boues. Dans celles-ci on trouve de 300 à 500 grammes d'argent par tonne de cuivre raffiné, ce qui compense à peu près les frais du traitement⁴⁴. La moitié de la production du cuivre exporté par les États-Unis s'obtient par électrolyse et le prix de revient de l'affinage est descendu de 100 francs à 40 francs la tonne. On fabrique aussi électrolytiquement des tubes de cuivre sans soudure, d'une résistance et d'une homogénéité parfaites, en faisant déposer le cuivre autour d'un mandrin en acier recouvert de plombagine; les cathodes animées d'un mouvement de rotation continu, pressent fortement sur des galets ce qui comprime le dépôt électrolytique à mesure qu'il se forme et donne au dépôt plus de ténacité. Le raffinage du plomb permet de séparer du plomb des métaux comme l'or, l'argent, l'antimoine, l'arsenic dont le prix de vente est assez rémunérateur. Par une méthode analogue, on peut raffiner

l'argent et en extraire l'or qui s'y trouve ; l'or a été obtenu au titre très élevé de 999,5.

Dans les procédés décrits jusqu'ici, on ne fait que *purifier un métal assez pur ou lui donner une forme voulue*. Un problème plus important consiste à *extraire directement les métaux de leurs minerais*. Le **traitement des sulfures de cuivre** se fait par le procédé MARCHESI : le minerai est fondu au four et coulé en plaques qui servent d'anodes à un bain de sulfate de cuivre ; les cathodes sont des feuilles de cuivre minces. La force électromotrice nécessaire ne dépasse guère $1/5$ de volt. L'**extraction du zinc** par le procédé LETRANGE consiste à transformer la blende ou sulfure de zinc en sulfate soluble que l'on électrolyse. La décomposition électrolytique donne du zinc, qui se dépose sur les cathodes, et de l'acide sulfurique qui sert à transformer en sulfates de nouvelles quantités de minerai. Dans les mines d'or du Transvaal, on se livre à l'**extraction de l'or** des résidus que l'on abandonnait autrefois et qui fournissent encore 10 p. 100 du poids total de l'or contenu dans les minerais bruts. Les résidus sont traités par une solution diluée de cyanure de potassium qui dissout l'or ; cette dissolution de cyanure de potassium et d'or est électrolysée dans des cuves fermées à clef et que l'on n'ouvre qu'une fois par mois pour recueillir l'or déposé sur les cathodes en plomb.

Les méthodes d'affinage qui viennent d'être indiquées pour les métaux lourds s'adressent aux solutions salines ; elles ne pouvaient être utilisées pour les métaux légers tels que le *sodium*, le *potassium*, l'*aluminium*, le *magnésium* qui exercent une action de décomposition sur l'eau. Une méthode spéciale permet de *séparer les métaux de leurs combinaisons fondues par élévation de la température*. L'**aluminium** n'a pu devenir d'un usage courant que du jour où l'on a su le produire à bon marché par l'électricité. Le kilogramme d'aluminium qui valait, il y a trente ans, plus de 100 francs est vendu aujourd'hui 2 fr. 50. Les méthodes que nous allons mentionner ne diffèrent des électrolyses ordinaires que par la température très élevée à laquelle doit être maintenue l'électrolyse. Il a donc fallu choisir des électrodes en matière peu fusible et cependant suffisamment conductrice : le charbon seul possède ces deux qualités. Dans le

procédé Héroult, appliqué à Neuhausen, dans une usine qui utilise la célèbre chute du Rhin, on fait l'électrolyse de l'alumine fondue, obtenue en partant de la bauxite¹²; on opère dans une cuve en fonte garnie intérieurement de charbon. De grosses électrodes de charbon servent à faire passer le courant. Au début, on descend l'électrode supérieure pour la mettre en contact avec l'autre charbon, de façon à produire un arc électrique qui fond l'alumine. Quand la fusion est produite, on soulève l'électrode positive de façon à supprimer l'arc. Le courant traverse l'alumine fondue et produit l'électrolyse de ce corps. L'aluminium se dépose sur le fond, à l'état liquide et de l'oxygène se dégage sur le charbon positif. On entretient la composition du bain par des additions de cryolithe et d'alumine. Si l'on place dans le fond de la cuve du cuivre ou d'autres métaux, on obtient le **bronze d'aluminium** ou d'autres **alliages d'aluminium**. On prépare encore le bronze d'aluminium par le *procédé Cowles* qui consiste à chauffer l'alumine, le charbon et le cuivre dans un four électrique, ainsi qu'on l'a vu dans la conférence précédente.

Le **sodium** est en général préparé par voie électrique, en électrolysant la soude caustique en fusion. On emploie de petites cathodes de fer, de sorte que la densité du courant, qui est très forte, écarte régulièrement de la cathode, la soude qui s'y forme par électrolyse. Le **potassium** métallique est obtenu par un procédé analogue. Le **magnésium** s'obtient, comme l'aluminium, par électrolyse du chlorure de magnésium et de potassium fondu; ce métal a pris de l'importance dans l'industrie, parce qu'il sert à fabriquer le **magnalium**, alliage de magnésium et d'aluminium.

L'Électrochimie. — Dans toutes les industries où des réactions chimiques sont mises en jeu, l'intervention de l'Électricité est susceptible de fournir des résultats plus parfaits, plus économiques ou plus rapides que ceux que l'on obtenait autrefois. Néanmoins, la substitution de l'Électrolyse aux anciens procédés est encore loin d'être un fait accompli; les méthodes nouvelles ne sont pas toutes mises suffisamment au point. Nous ne décrirons que les applications déjà réalisées avec succès.

L'électrolyse du sel marin (chlorure de sodium) fournit deux produits que l'industrie consomme en grandes quantités : le chlore et la soude¹³. L'électrolyse du chlorure de sodium se fait par *voie sèche*, en faisant subir au sel la fusion ignée, ou par *voie humide*, en faisant dissoudre le sel dans l'eau. Dans le premier cas, il se dégage du chlore à l'anode et il se dépose du sodium à la cathode; l'opération exige une force électromotrice de 7 volts et une densité de 6 000 à 10 000 ampères par mètre carré d'électrodes. Dans le second cas, on obtient encore du chlore à l'anode, mais le métal sodium réagit sur l'eau en donnant de la soude et de l'hydrogène. Dans l'application de ce procédé, on rencontre une difficulté : la soude se diffusant peu à peu dans le liquide vient réagir sur le chlore qui se dégage à l'anode. On évite cet inconvénient par différents dispositifs : emploi d'un diaphragme poreux, d'une cathode en mercure pour faire l'amalgamation du sodium. La décomposition électrolytique du sel marin coûte actuellement 83 francs environ la tonne; le prix de revient du chlore et de la soude est à peine le tiers de ce que coûtait leur fabrication par les procédés chimiques ordinaires. Il est donc possible que ces substances soient vendues trois fois moins cher qu'auparavant. Si, au contraire, on favorise l'action de la soude formée sur le chlore, on obtient de l'hypochlorite de sodium, employé comme décolorant et désinfectant. Si on laisse la température du bain monter vers 60°, ce n'est plus de l'hypochlorite qui se forme, mais le chlorate de sodium. Le chlorate de potassium s'obtient de même. Avec les méthodes perfectionnées actuelles, 1 ampère-heure produit 1 gr. 2 de soude caustique et 1 gramme de chlore; la fabrication de 1 gramme de soude caustique exige 1 400 grammes de sel marin.

La formation d'hypochlorites par électrolyse a rendu possible le blanchiment des textiles et de la pâte à papier. On s'est aussi proposé la désinfection des eaux d'égouts au moyen de l'électrolyse. Pour les villes situées au bord de la mer, il suffit d'électrolyser l'eau de mer pour obtenir un liquide contenant de 1 à 5 décigrammes de chlore par litre, proportion suffisante pour rendre aseptiques et inodores les matières traitées, sans détruire leurs qualités fertilisantes. Malgré les expériences faites au Havre, à Lorient

et à Nice, cette méthode d'assainissement n'a pas été appliquée en France; elle est adoptée par plusieurs villes de l'étranger⁴⁴. Enfin, nous mentionnerons encore les préparations industrielles de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse d'une solution de soude ou de potasse, du chloroforme, du bromoforme, de l'iodoforme, etc.

L'Électrolyse dans l'industrie. — Un grand nombre d'industries ont bénéficié des procédés électrolytiques, telles sont celles de la fabrication des couleurs, de la teinture des étoffes, de la rectification des alcools, etc.

Parmi les couleurs susceptibles d'être fabriquées par électrolyse, il faut citer la *céruse* ou blanc de plomb, le *vermillon* et les *couleurs d'aniline*. Dans la première de ces fabrications, l'électrolyte se compose d'une dissolution de nitrate de soude et de nitrate d'ammoniaque saturée de gaz carbonique. On fait passer un courant d'une densité de 1,6 ampère par décimètre carré de cathode; l'hydrocarbonate de plomb se précipite en flocons; pendant toute la durée des opérations, on sature le bain d'acide carbonique provenant des fours à chaux et purifié. Pour obtenir du *vermillon*, on dispose horizontalement contre les parois d'une cuve en bois des plateaux pourvus de rebords et supportant des couches de mercure; ces couches servent d'anodes. La cathode placée au fond de la cuve est une feuille de cuivre recouverte électrolytiquement de fer. Le bain se compose d'une dissolution de nitrate de soude et de nitrate d'ammonium dans laquelle on injecte régulièrement de l'acide sulfhydrique à l'aide d'un serpentín; il se précipite du sulfure de mercure ou vermillon⁴⁵. On a pu produire certaines matières tinctoriales en soumettant des substances dérivées de l'aniline à l'action des gaz dégagés par la décomposition de l'eau. En séparant les électrodes par une cloison poreuse, deux couleurs différentes sont formées, l'une par l'oxygène et l'autre par l'hydrogène. C'est ainsi que l'on a obtenu le *violet Hoffmann*, ainsi que plusieurs *bleus* et notamment l'*alizarine artificielle*, en décomposant le noir d'aniline. Les matières colorantes fabriquées de la sorte sont très pures et donnent aux soies des nuances remarquables.

L'Électrolyse a permis d'effectuer la **teinture directe des**

étouffes et des papiers. Il suffit pour cela de placer les tissus imprégnés du liquide à décomposer entre deux plaques métalliques reliées aux pôles de la source d'électricité. Si l'une de ces plaques porte des dessins en relief, la coloration ne s'opère que sur les points en contact, et l'impression s'accomplit au moment même où la couleur prend naissance. On applique l'Électrolyse à la rectification des alcools; les aldéhydes qu'ils renferment et qui donnent le mauvais goût aux alcools d'industrie sont hydrogénés par l'électrolyse et transformés en alcools. On rectifie de la même façon les huiles, ce qui dispense de l'emploi des acides. Enfin, l'Électrolyse a été appliquée au vieillissement artificiel des vins : une bouteille de vin nouveau électrolysé peut, paraît-il, rivaliser avec les vieilles bouteilles poudreuses que l'on exhume avec fierté du coin le plus tranquille de sa cave.

Actions électrochimiques diverses. — Un certain nombre d'actions électrochimiques semblent n'avoir avec les autres que des rapports lointains. Leurs lois sont encore trop peu connues pour qu'on puisse dire comment elles cadrent avec les lois générales de l'électrolyse. Nous citerons parmi ces actions l'électrolyse par courants alternatifs, les réactions dues à l'effluve et le tannage électrique.

A priori, l'électrolyse par courants alternatifs ne paraît pas devoir donner des résultats utilisables puisqu'on s'attend à voir chaque décomposition suivie par une recombinaison. On a pourtant obtenu des résultats contraires à ces prévisions en employant des électrodes de surfaces inégales; à l'inégalité des surfaces correspond une inégalité de leur pouvoir absorbant sur les gaz provenant de l'électrolyse. Il est un cas où les courants alternatifs sont accompagnés régulièrement et normalement d'actions chimiques, c'est celui des décharges sous forme d'effluve.

L'effluve est une décharge caractérisée par une lueur violette obtenue entre deux lames conductrices parallèles portées à des potentiels différents suffisamment élevés, et séparées par un gaz. On régularise la production de l'effluve en disposant des diélectriques, verre ou mica, entre chacune des lames. Si le potentiel est trop élevé, il se produit des étincelles ou des arcs permanents qui compromettent l'existence des

appareils. La circulation des gaz, la rotation ou le déplacement des électrodes, l'emploi des courants alternatifs sont favorables à la manifestation de l'effluve sans étincelles. Les effets de l'effluve ont été comparés à une *électrolyse des gaz*. La seule application réelle de l'effluve est la transformation de l'oxygène de l'air en **ozone** ou oxygène condensé.

Chaque fois qu'on provoque une décharge électrique dans l'oxygène, celui-ci se polymérise en partie. Quand la décharge se produit sous forme d'effluves bleus ou violets, on peut recueillir et utiliser l'ozone formé. Les producteurs d'ozone se composent d'électrodes parallèles entre lesquelles on fait jaillir des effluves et où l'on fait circuler l'air à ozoniser. Pour que l'appareil produise beaucoup d'ozone, il faut, dans le cas d'un courant continu, augmenter la fréquence des interruptions et, dans le cas d'un courant alternatif, augmenter la fréquence pour multiplier le nombre de décharges actives dans l'appareil. Avec l'appareil de BERTHELOT, le rendement était à peine de 1 gramme d'ozone par kilowatt-heure; aujourd'hui, on atteint 74 grammes (SIEMENS et HALSKE) et même 100 grammes (M. GIRARD). Les nouveaux appareils permettent d'utiliser les fréquences usuelles en se servant de l'énergie empruntée aux canalisations de distribution. Le principal usage de l'ozone a été la stérilisation de l'eau potable, à cause de ses propriétés bactéricides; il ne présente d'ailleurs aucun danger pour la consommation. En France, les municipalités de Dinard, Cosne, Nice, Cannes, Chartres, etc., utilisent l'ozone pour la stérilisation de leurs eaux. Une eau contaminée renfermant 180 000 bactéries par centimètre cube est complètement stérilisée par un barbotage de dix minutes avec de l'air ozonisé à 2 milligrammes par litre; en même temps l'eau est clarifiée et perd sa couleur limoneuse. La *Société Sanitas-Ozone* a lancé sur le marché plusieurs types d'ozoneurs domestiques ¹⁶.

L'ozone permet aussi la stérilisation de l'air, soit qu'il s'agisse de désinfecter des locaux contaminés, soit simplement d'épurer l'air des salles publiques, habitations, etc. Quelques millièmes de milligramme par litre permettent d'obtenir un air aussi pur que celui de la campagne pour un prix d'ailleurs insignifiant. L'ozone peut encore être employé : comme stérilisant dans les industries du lait, de la bière, de

l'alcool, du vin ; pour le blanchiment des textiles, des dentelles, des plumes, des fécules ; dans la fabrication des vernis, des toiles cirées, du linoléum, etc. ; dans la synthèse des parfums comme la vanilline, l'aubépine, etc.

Les anciens procédés de tannage exigeaient un temps très long : dix-huit mois pour le tannage à la fosse, six mois pour le tannage à la flotte ; avec le tannage électrique, les peaux de bœuf sont préparées en quatre-vingt-seize heures et celles de veau en quarante-huit heures. Les peaux sont placées dans un liquide tannique contenant de l'écorce de chêne ou de châtaignier. Un tambour cylindrique tournant autour d'un axe horizontal reçoit de 500 à 700 kilogrammes de peaux et 1 200 litres environ de liquide additionné d'un peu d'essence de térébenthine. Des câbles en cuivre amènent dans le tambour un courant de 100 ampères sous 100 volts.

La qualité du cuir est au moins égale à celle des cuirs obtenus par les anciennes méthodes ; aussi, depuis 1890, les installations électriques pour le tannage des peaux se sont rapidement multipliées.

Ainsi, peu à peu, toutes les branches de la Chimie reçoivent, grâce à l'Electricité, une impulsion nouvelle. Partout l'énergie électrique apporte ses précieuses qualités, elle simplifie les opérations, permet des réglages plus faciles, procure de meilleurs rendements et transforme ce qui n'était autrefois qu'un art, en une véritable science. WERNER SIEMENS, le créateur de l'industrie électrique en Allemagne, avait prédit, aux actions chimiques du courant, le plus brillant avenir. Chaque année qui s'écoule est marquée par un pas en avant et apporte une éclatante confirmation aux paroles de ce savant.

NOTES DE LA SEPTIÈME CONFÉRENCE

1. En comparant le courant électrique au courant d'une rivière, l'anode est l'électrode d'amont et la cathode l'électrode d'aval.

2. Voir les notions sur les poids moléculaires et les valences dans la *Chimie*, même collection.

3. La masse du métal déposé à la cathode est fournie par la formule

$$P = \frac{1}{96\,600} \times \text{poids moléculaire du métal} \times \text{intensité du courant} \times$$

temps de passage du courant \times inverse du nombre des valences rompues. Un coulomb libère toujours 0 gr. 0001035 d'hydrogène, 0 gr. 001118 d'argent, 0 gr. 00033 de cuivre.

4. D'après ARRHÉNIVS, la conductibilité des électrolytes doit être en rapport direct avec le nombre de molécules dissociées. On s'explique ainsi que le courant ne puisse traverser les corps dont les molécules ne se dissocient pas en se dissolvant et que les propriétés électrolytiques s'observent uniquement sur les acides, les bases et les sels fondus en dissolution.

5. On a prétendu que la galvanoplastie a été découverte en même temps par JACONI et par un savant anglais SPENCER. Jacobi communiqua sa découverte à l'Académie des Sciences de Saint-Petersbourg, le 21 octobre 1838; sept mois après seulement, les journaux anglais décrivaient le procédé de SPENCER.

6. L'alliage de Darcet est formé de bismuth, plomb, étain, antimoine.

7. En 1884, PELLEGAT a imaginé un procédé qui permet d'obtenir des détails plus minutieux encore que ceux fournis par la compression de la gutta. On fond la gutta et on la coule à l'état liquide dans les moules. On réalise alors de magnifiques reproductions artistiques, surtout quand le moulage est fait à terre perdue.

8. Pour les aréomètres, voir la *Physique* (même collection), par G. EISENMENGER.

9. Quelquefois, en vue de faciliter l'adhérence des dépôts, on amalgame les objets en les trempant dans un dernier bain de bioxyde de mercure et d'acide sulfurique. Entre chacune de ces opérations, on a soin de procéder à des lavages et à des trempages dans l'eau pure.

10. Il ne faut pas confondre les objets de laiton recouverts d'or, avec ce qu'on appelle, en bijouterie, le *doublé*. Le doublé d'or est formé de deux feuilles, l'une d'or, l'autre de cuivre jaune que l'on passe au laminoir. Au moyen de l'estampage sur matrice d'acier, on donne à ce ruban divisé en morceaux les formes les plus diverses.

11. La Nord-Deutsche Affinerie, de Hambourg, raffine à elle seule 2 500 kilogrammes de cuivre par jour et recueille dans les résidus plus de 1 000 kilogrammes d'or par an. L'énorme valeur que représente cette quantité de métal précieux était complètement perdue autrefois.

12. La *bauxite*, très répandue en Provence, est de l'alumine impure contenant des proportions variables d'oxyde de fer et de silice.

13. Voir les applications de ces deux corps dans la *Chimie*, même collection.

14. Dans une ville éloignée du littoral, il serait nécessaire de substituer à l'eau de mer une solution de chlorure de magnésium et de chlorure de sodium. La dépense dans ces conditions reviendrait, pour Paris, à 3 fr. 60 par habitant et par an.

15. Citons encore comme couleurs à base métallique fabriquées par l'électrolyse : le *jaune de cadmium*, le *vermillon d'antimoine*, le *vert de Scheele*, le *vert mitis*, le *rouge japonais*, le *bleu de Prusse*.

16. L'eau ozonisée conserve ses propriétés chimiques et digestives, ainsi que toutes ses qualités; de plus, sa teneur en oxygène est augmentée, ce qui la rend plus légère. L'odeur d'ozone ne persiste pas.

Rue du Lombard, 2

HUITIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ, FORCE MOTRICE

LES ÉLECTRO-AIMANTS. — LES MOTEURS ÉLECTRIQUES
LA TRACTION ÉLECTRIQUE

- I. Transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. —
II. Les électro-aimants et leurs applications. — Sonneries et appels électriques. — Les avertisseurs et la manœuvre des signaux. — L'heure électrique. — III. Le moteur électrique. — Moteurs à courants continus et moteurs à courants alternatifs. — L'outillage électrique. — IV. La traction électrique. — Tramways à trolley et à conducteur souterrain. — Les locomotives électriques. — Métropolitain et Nord-Sud. — Funiculaires. — Électrification des chemins de fer en France et à l'étranger. — Les monorails. — Les automobiles électriques. — Navigation et aérostation électriques.

Les conférences précédentes nous ont fait assister à la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique; nous avons vu comment l'Électricité nous chauffe et nous éclaire, comment elle a bouleversé la chimie industrielle par le four électrique et les procédés électrolytiques. Dans cette conférence, nous étudierons *comment l'énergie électrique peut se transformer en énergie mécanique*; nous la verrons servir de force motrice, révolutionner l'industrie en mettant en marche les machines-outils des ateliers et usines, faire mouvoir souvent à des vitesses vertigineuses les trains de chemins de fer et les tramways, le métropolitain et les automobiles, les navires sous-marins et aériens.

Les transformations de l'énergie électrique en énergie méca-

nique ont pour origine la production des champs de force. Si l'on prend des dispositions pour que ces derniers aient un pouvoir effectif assez stable, leur action peut être utilisée soit pour communiquer un mouvement continu à des organes convenablement agencés, soit au contraire, pour s'opposer au mouvement dont ces organes sont déjà animés et qu'ils prendraient d'eux-mêmes. Dans le premier cas, on constitue des *moteurs électriques* ou *électromoteurs*, tandis qu'au second cas correspondent principalement les *applications de l'adhérence magnétique*. Dans la transmission et l'enregistrement de signaux quelconques — et en particulier en *téléphonie* et en *télégraphie* — la production et l'utilisation des champs de force sont essentiellement intermittentes et irrégulières; les effets mécaniques que l'on provoque ne sont pas recherchés pour eux-mêmes; ils deviennent un moyen et non plus une fin.

Nous commencerons par étudier l'électro-aimant dont les applications sont si nombreuses que la plupart des appareils électriques renferment un électro-aimant; puis les principaux *moteurs électriques*, les *machines-outils électriques*, enfin nous terminerons par la *traction électrique* qui s'est développée d'une façon colossale depuis quelques années.

Les électro-aimants. — Nous avons déjà fait connaissance avec cet appareil en étudiant (troisième conférence) les phénomènes d'aimantation produits par les champs magnétiques. Une barre de fer doux, entourée d'une ou plusieurs couches de spires formées avec un fil conducteur recouvert de coton ou de soie, devient un aimant très puissant quand les spires sont parcourues par un courant; elle perd presque toute sa force d'aimantation dès que le courant cesse de circuler. *Un électro-aimant est donc un aimant temporaire qu'on peut créer par la simple fermeture d'un circuit électrique et qu'on peut supprimer presque complètement en interrompant le courant.*

Généralement, les électro-aimants sont recourbés en forme de fer à cheval pour que l'armature puisse s'appliquer contre les deux pôles. De cette façon, le circuit magnétique est fermé avec du fer; il est ainsi tout en fer et, par suite, peu résistant au point de vue électrique. De ce fait, le flux qui

n'a pas à traverser une couche plus ou moins épaisse d'air, augmente considérablement et avec lui la *force portante* de l'électro^t. Dans l'*électro-aimant en fer à cheval* chaque branche du noyau de fer reçoit une bobine de fil; le sens de l'enroulement sur les bobines est tel que, une fois en place, l'une soit la continuation de l'autre. Souvent, la partie fer des électros comprend trois pièces : deux *noyaux* parallèles et une *culasse* sur laquelle ils sont solidement fixés au moyen de vis; les bobines sont glissées sur les noyaux. Les électro-aimants se font en fer aussi doux que possible; le diamètre du fil conducteur dépend de l'intensité du courant et de l'épaisseur de l'enroulement (quand cette épaisseur ne dépasse pas 10 à 15 millimètres, on peut faire passer 3 ou 4 ampères par millimètre carré de section sans craindre un échauffement exagéré).

Dans un électro-aimant, on peut avoir en vue deux choses : la *force portante* ou son *action à distance sur une armature*. L'étude d'un projet de construction d'un électro dépend de l'application qu'on veut en faire.

Force portante des électro-aimants. — On obtient la force portante (en dynes) d'un électro, en multipliant la section du noyau par le carré de l'induction et en divisant le produit par 8π ; on l'obtient en kilogrammes en divisant le résultat précédent par 981 000. La force portante d'un électro dépend donc uniquement de la section du noyau et de l'induction. Habituellement, on pousse l'induction à 16 000 unités; la force portante correspond alors à 10 kilogrammes environ par centimètre carré.

Applications de l'adhérence magnétique. — Les électro-aimants étant capables d'attirer le fer se trouvent être l'organe principal des *trieurs électro-magnétiques* qui débarrassent de la gangue non magnétique les parties magnétiques des minerais de fer concassés; se chargent de la *fixation magnétique des moteurs*, des perceuses électriques en particulier, dont la mise en place est assurée par adhérence magnétique. Le *freinage électromagnétique* des voitures de tramway est aussi assuré par un électro-aimant. Les *embrayeurs*

électromagnétiques sont encore une application des électro-aimants.

Les électro-aimants porteurs sont constitués par une caisse d'acier à parois robustes dans laquelle est enfermée une bobine de fil solidement calée et isolée par du mica. La caisse d'acier constitue la carcasse de l'électro; elle est ondulée pour dissiper plus facilement la chaleur qui résulte du passage du courant. Sur la carcasse est solidement boulonnée une pièce polaire sur laquelle viendront se placer les pièces attirées. Enfin, tout le système est solidaire d'un crochet d'une grue roulante ou pivotante, ou d'un pont roulant. Ces grues électriques sont utilisées dans certaines fonderies pour retirer du sable les pièces coulées, dans quelques chantiers de construction, arsenaux, ports; le port militaire de Devonport vient de s'enrichir d'une grue électrique d'une puissance de soulèvement de 160 tonnes et éprouvée à 240 tonnes. En général dans les fonderies, la puissance est de 10 tonnes; le fonctionnement exige 35 ampères sous 220 volts soit environ une force de 10 chevaux.

Électro établi en vue d'une action à distance. — La force d'attraction de l'électro-aimant sur son armature, au contact ou à distance, dépend du nombre de lignes de force qui traversent cette armature. Or, la dispersion des lignes de force devient considérable quand on éloigne l'armature des pôles: il faut alors augmenter la force magnétomotrice. Un électro destiné à agir à distance doit donc être relativement long pour que les bobines glissées sur les noyaux puissent contenir un grand nombre de spires; de plus, ses branches ne seront pas trop rapprochées l'une de l'autre. Un électro établi en vue de sa force portante seule est court et trapu. Le champ d'induction créé par les électros trouve son application dans les sonneries électriques, les horloges électriques, les signaux de chemins de fer et, comme nous le verrons plus tard, dans le télégraphe et le téléphone.

Sonneries et appels électriques. — Une sonnerie électrique se compose d'un électro en fer à cheval (fig. 60) devant les pôles duquel se trouve à une petite distance, une armature de fer doux supportée par une lame d'acier flexible que ter-

mine un marteau; celui-ci est destiné à frapper sur un timbre. Sur le dos de la lame d'acier se trouve une petite pièce qui, à l'état de repos, est en contact avec une vis communiquant avec la borne négative; l'une des extrémités du fil de l'électro est reliée à la borne positive et l'autre à l'extré-

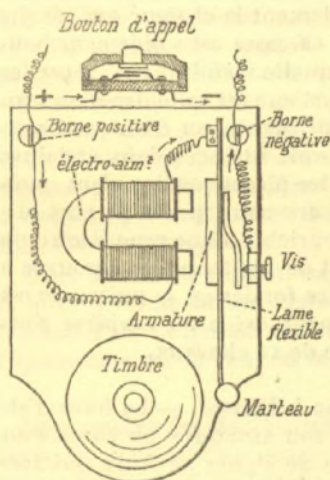


FIG. 60. — Sonnerie électrique et bouton d'appel.

mité de la lame flexible. Si l'on réunit les bornes de la sonnerie aux pôles d'une pile, le circuit électrique se trouve fermé et le courant passe dans le sens indiqué par les flèches; le noyau s'aimante, l'armature est attirée et le marteau frappe sur le timbre; mais comme à ce moment le contact cesse avec la vis, l'armature revient à sa position première; le courant circule de nouveau, les mêmes phénomènes se reproduisent et les chocs du marteau se répètent tant que dure le passage du courant.

Les appareils d'appel sont bien connus de tout le monde et leur nom en indique la forme. Pour appeler,

il faut fermer le circuit, on y arrive en rapprochant deux parties métalliques à ressort réunies aux extrémités du fil de ligne, ce qui se fait en appuyant sur elles directement ou par un bouton placé dans une enveloppe commune : bouton fixé contre un mur ou le chambranle d'une porte ; poire pendante des salles à manger. Pour appeler d'un même point, en divers endroits, comme le cas se présente pour un chef de maison, directeur, etc., on se sert de plaques de touche, c'est-à-dire de plaques de bois où sont posés divers boutons reliés aux points d'appel. Les contacts de sûreté préviennent de l'arrivée d'un client chez les commerçants, d'un voleur dans les banques, etc. Ils sont, selon leur but, de diverses sortes. Ils se placent : dans les feuillures des portes et des fenêtres et sonnent tant qu'elles

sont ouvertes [(contacts de feuillure) ; extérieurement et à niveau de la feuillure et ne sonnent qu'à l'ouverture et à la fermeture des portes (contacts extérieurs) ; sous les marches d'escalier, les seuils, les parquets, et sonnent quand on pose le pied (contact à pédale). Pour interrompre momentanément le jeu des sonneries, on place des *interrupteurs* sur le trajet d'un fil ; ils se composent presque tous d'une manette pouvant pivoter sur un petit socle en bois et prendre contact avec un petit bouton métallique pour permettre au courant de circuler. Les *commutateurs* servent aux changements de direction : il en est qui peuvent servir d'interrupteurs. L'*avertisseur pour incendie* se compose de deux contacts particuliers se rapprochant d'eux-mêmes par la dilatation que leur donne la chaleur ; ce sont des métaux ou alliages très sensibles à la chaleur, réglés à volonté et placés de préférence près du plafond vers lequel la chaleur s'élève d'abord.

Les **appareils récepteurs** sont les sonneries et les tableaux indicateurs. La *sonnerie trembleuse* que nous avons décrite fonctionne avec un courant continu fourni par une pile quelconque ; dans les grandes installations téléphoniques, les sonneries fonctionnent au moyen de courants alternatifs fournis par une petite magnéto. Dans les installations qui comportent plusieurs circuits, il est nécessaire, pour éviter les confusions, de connaître immédiatement la provenance des appels que l'on entend retentir. On emploie quelquefois plusieurs sonneries, mais il est préférable d'avoir recours, comme on le fait dans les hôtels où chaque chambre communique avec le bureau, à un *tableau indicateur*. Ce tableau comprend autant de groupes de deux petits électros droits que l'installation compte de boutons : quand le courant est lancé dans l'électro du haut, son armature est attirée et un petit disque portant le numéro de la chambre apparaît : l'employé, avant de se rendre à l'appel, presse sur un bouton, ce qui lance le courant dans l'électro du bas et le disque revenant à sa position première, disparaît. Les numéros peuvent être évidemment remplacés par d'autres indications comme : salon, salle à manger, fumoir, etc.

Les **appareils transmetteurs** sont les piles, généralement les Leclanché, et les fils conducteurs. Ceux-ci, pour les petites distances, ont 9/10 de diamètre, isolés par de la gutta-

percha que recouvre une tresse de coton rouge pour les fils positifs ou d'aller, et de couleur bleue pour les fils de retour. Les trembleuses les plus ordinaires ont une résistance de 6 à 8 ohms et portent de 400 à 500 spires sur chaque noyau de l'électro. Pour une installation où jamais plusieurs sonneries

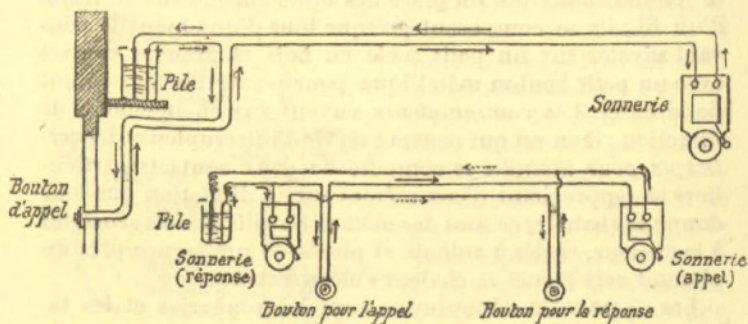


FIG. 61. — Installations de sonneries : En haut, sonnerie avec bouton d'appel à la porte d'un appartement. En bas, sonnerie avec deux boutons pour appel et réponse.

ne sont en circuit en même temps, 2 ou 3 éléments Leclanché suffisent. La résistance de la sonnerie doit être approximativement égale à celle de la ligne.

On peut réaliser avec les sonneries et les boutons d'appel de nombreuses combinaisons. La figure en représente deux des plus fréquentes : sonnerie avec bouton d'appel à la porte d'un appartement ; sonnerie avec deux boutons pour appel et réponse. On compte en général un élément de pile par 20 mètres de canalisation double.

Les avertisseurs électriques. — Le but des avertisseurs est de révéler automatiquement la présence des voleurs ou encore de donner, au moment voulu, un signal quelconque. Les contacts de sûreté, dont il a été déjà question, sont aussi des avertisseurs de vol : il existe aussi des serrures électriques dans lesquelles un contact spécial ferme le circuit d'une sonnerie, à la moindre tentative d'effraction.

Les avertisseurs électriques les plus importants sont ceux

qui assurent aux compagnies de chemins de fer la sécurité de leur exploitation. Outre le télégraphe, des signaux conventionnels sont transmis au moyen des courants et font connaître la position des trains, l'état des voies, de façon à éviter les accidents qu'occasionnent les erreurs d'aiguillage et les collisions. Partout où on a expérimenté la manœuvre des aiguilles et des signaux par transport de force à distance, on a établi une connexion entre eux : un signal ne peut être mis à l'ouverture que si toutes les aiguilles de l'itinéraire intéressé ont suivi le mouvement et se trouvent dans la position qu'on a voulu leur donner. L'électricité permet de manœuvrer plusieurs aiguilles à la fois, de telle sorte que toutes les aiguilles et signaux intéressant un itinéraire peuvent être actionnés par un seul levier. La manœuvre des aiguilles se fait soit par de puissants électro-aimants (ligne de Versailles à Paris), soit par un moteur tournant tantôt dans un sens, tantôt dans un autre suivant le sens du courant qu'on lui envoie ; un commutateur spécial placé dans l'appareil coupe le courant à la fin de la course, l'aiguille étant calée dans la position qu'on a voulu lui donner. Les moteurs de signaux tournent toujours dans le même sens qui est celui d'ouverture du signal : la fermeture est obtenue au moyen d'un contrepoids de rappel². Certaines compagnies installent sur le quai de la gare des cloches électriques dont le mécanisme est déclenché par un électro-aimant. Avant de donner le signal du départ, le chef de gare l'annonce ou le fait annoncer à la gare suivante, en poussant un certain nombre de fois le bouton interrupteur ; les agents sont ainsi prévenus qu'un train s'engage dans la section. On a cherché à rendre automatiques quelques-uns des signaux en les faisant produire par les trains eux-mêmes : ceux-ci passent sur un contact, déclanchent une pédale placée sur la voie, ce qui fait retentir une sonnerie, tourner un disque, apparaître l'aile d'un électro sémaphore, ou les mots : *Défense de passer* aux passages à niveau³. La mystérieuse sonnette d'alarme disposée dans chaque compartiment et qu'un avis sévère garde contre les attaques des mauvais plaisants est une simple sonnerie électrique. Des circuits à double fil aboutissent au bouton de chaque compartiment et sont reliés par des contacts de wagon en wagon : comme les pôles de même nom

sont fixés au même conducteur, les courants qui traversent les circuits s'annulent et les sonnettes placées dans les fourgons de tête et de queue, ne résonnent que si l'on interrompt l'un des circuits en tirant l'une des poignées; un voyant blanc apparaît au-dessus du compartiment⁴.

Avant de quitter les avertisseurs électriques pour dire quelques mots des horloges électriques, nous indiquerons le principe du **block-system** qui consiste à diviser le parcours en un certain nombre de sections pourvues chacune de sémaphores à signaux. Chaque fois qu'un train s'engage dans une section, l'employé préposé à la manœuvre du sémaphore bloque cette section, c'est-à-dire en prohibe l'accès aux trains suivants en déplaçant, à l'aide d'un levier, l'aile du sémaphore qui indique que la voie est occupée; en même temps, il envoie au poste suivant un signal électrique annonçant l'arrivée du train. La voie reste fermée jusqu'au moment où un courant, venu du poste suivant, agit sur un électro-aimant et fait reprendre à l'aile du sémaphore sa position primitive⁵. On a proposé bien souvent l'établissement d'un **block-system automatique** où tout fonctionnerait électriquement, sans le concours d'aucun employé : la réalisation en est délicate, mais nullement impossible.

Distribution électrique de l'heure. — L'électricité permet de distribuer simultanément, à plusieurs cadrans, l'heure indiquée par une horloge centrale qui peut marquer le temps avec une très grande précision, constamment en concordance avec les observations astronomiques. Toutes les minutes, l'horloge centrale établit un contact qui ferme le circuit d'une pile sur des cadrans dont le mécanisme est un rouage de minuterie conduit par un rochet. Celui-ci avance d'une dent sous l'effort de l'armature d'un électro-aimant chaque fois qu'il y a émission de courant; par ce moyen, si le rochet est convenablement denté, les aiguilles avancent toutes les minutes indiquant la même heure que l'horloge régulatrice. La précision est telle que si, dominant Paris, on pouvait voir d'un seul coup d'œil tous les cadrans des centres horaires, on observerait que le mouvement de l'aiguille de l'horloge de l'Observatoire est reproduit sur tous les cadrans à un quart de seconde près. L'Observatoire envoie aussi à des époques fixes,

et par les lignes télégraphiques, l'heure de Paris aux observatoires de quelques villes⁶.

Le moteur électrique. — Les modifications produites par l'éclairage électrique, bien que très profondes et correspondant bien au besoin de commodité et de confort qui caractérise notre vie moderne, ne sont pourtant rien en comparaison de la révolution économique qui a suivi l'apparition du moteur électrique. L'énergie mécanique est la plus importante au point de vue pratique de toutes les formes que peut prendre l'énergie électrique.

La première tentative faite pour transformer l'électricité en travail mécanique remonte à l'année 1838, où le physicien russe JACOBI construisit une machine composée d'électro-aimants qui, attirant un certain nombre d'armatures de fer doux, communiquaient un mouvement de rotation à deux roues à palettes. Cette machine fut installée sur un bateau qui put remonter la Néva à Saint-Petersbourg. La puissance développée n'était que les trois quarts d'un cheval-vapeur et les expérimentateurs, asphyxiés par les vapeurs d'acide nitrique provenant des 128 éléments de piles, furent obligés de cesser leurs expériences. Perfectionné par GAIFFE, ce moteur ne put jamais fournir de bons résultats ; son principal défaut résultait de la faible amplitude du mouvement que l'armature d'un électro-aimant peut exécuter utilement : la force attractive décroît, en effet, proportionnellement au carré de la distance.

La création du véritable moteur électrique remonte à la découverte de la réversibilité des dynamos. Nous avons vu dans la cinquième conférence, que si l'on réunit les bornes d'une dynamo en repos à celles d'un générateur électrique, l'induit se met à tourner aussitôt. Cette propriété très importante des dynamos peut être envisagée comme une conséquence de la loi de Lenz ; et de plus, la machine, fonctionnant comme réceptrice, tournera dans le sens contraire à celui dans lequel il faudrait la mettre en mouvement, comme génératrice, pour qu'elle produise le courant qui la traverse. *Le moteur électrique n'est donc pas autre chose qu'une dynamo* : néanmoins, dans la pratique, les constructeurs sont amenés à donner aux moteurs des dispositions sensiblement

différentes de celles qui conviennent aux dynamos génératrices. Tandis que les machines destinées à produire un courant doivent être avant tout robustes et montées sur des assises solides, le moteur doit être léger et peu encombrant. Les dynamos employées comme moteurs sont des électromoteurs.

Moteurs à courants continus. — *Tous les moteurs à courant continu en usage dans l'industrie sont des dynamos et les dispositions données aux inducteurs, à l'induit, aux collecteurs, aux balais, sont celles des dynamos* ⁷. Tant que la force développée ne dépasse pas quelques chevaux-vapeur, les moteurs peuvent n'avoir que deux pôles. Au-dessus de 20 chevaux, il est préférable de diviser le champ magnétique pour éviter un fort échauffement par effet joule dans les fils de l'induit. Les réceptrices sont donc multipolaires et comportent 6, 8, 12, 16 et même 32 pôles comme dans certaines unités de 250 à 1 000 kilowatts de la Compagnie française Thomson-Houston.

Dans les électromoteurs, *les balais sont décalés en arrière*, alors qu'ils le sont en avant dans les dynamos ; mais comme le décalage est moindre pour la marche en moteur que pour la génératrice (cela tient aux courants de Foucault qui agissent différemment dans les deux cas), on est arrivé à créer des types de moteurs qui fonctionnent sans décalage. Pour *renverser le mouvement*, on inverse le courant dans l'induit seul et non dans l'inducteur, car à cause de la grande self-induction du circuit inducteur, la rupture produirait de grandes étincelles. Avec les moteurs modernes, sans décalage sensible des balais, il est inutile de modifier la position des balais suivant le sens de rotation : une manœuvre très simple suffit pour produire la marche avant ou la marche arrière.

Le *rendement mécanique* à pleine charge des électromoteurs d'une certaine puissance dépasse 80 et s'élève parfois à 95 p. 100. C'est dire à quel point de perfection on est arrivé dans l'étude de ces machines. Le rendement étant à peu près constant pour un moteur donné, le travail mécanique engendré par le moteur fonctionnant sous un voltage constant est proportionnel à l'intensité consommée. On emploie les moteurs, soit en les raccordant à un réseau de distribution

électrique d'une station centrale qui fournit la même tension, soit en utilisant le courant fourni par un transport de force.

Les moteurs électriques à courant continu peuvent, tout comme les dynamos génératrices, être excités de trois manières différentes ; on aura donc pratiquement des moteurs à excitation *dérivée, en série* (shunt), ou *compensée* (compound) ; ici la question de l'amorçement ne se pose pas puisque le courant traverse nécessairement les bobines magnétisantes. Le **moteur shunt** est celui qui présente les plus grands avantages pour fournir du travail quand la tension aux bornes reste constante ; sa vitesse varie très peu avec la charge : par suite, ce moteur emprunte à la canalisation une quantité d'énergie toujours proportionnelle à la valeur du travail qu'il livre. On arrive à modifier la vitesse de ces moteurs en modifiant l'intensité du champ magnétique, et il suffit pour cela d'intercaler un *rhéostat de réglage* dans l'enroulement inducteur. — Le **moteur-série**, au contraire, possède la propriété caractéristique de tourner à vitesse variable suivant la charge ; à vide, c'est-à-dire lorsqu'il n'effectue pas d'autre travail que celui qui consiste à triompher de ses frottements, l'appareil consomme peu de courant et tourne vite ; s'il a un gros travail à fournir, le champ magnétique devient intense et il tourne lentement. Cette variation de vitesse est un inconvénient pour la commande des machines comme les métiers à tisser où la régularité est de rigueur ; par contre, le moteur-série est le **moteur** par excellence des *coups de collier*. Les tramways électriques sont équipés avec des moteurs-série, ce qui leur permet de monter les rampes, automatiquement, en vitesse plus réduite qu'en palier. — Les **moteurs compound** sont peu employés.

La résistance de l'induit étant toujours petite, il serait imprudent de mettre le moteur brusquement dans le circuit, car il se produirait dans l'induit des intensités capables de le brûler. Il faut toujours protéger l'induit par un *rhéostat de démarrage* dont on diminue progressivement la résistance à mesure que la vitesse augmente, et que l'on finit par mettre hors circuit quand la vitesse de régime est atteinte. Pour *arrêter*, on fait les mêmes manœuvres en sens inverse. Si l'on veut arrêter rapidement, on relie les deux pôles de l'induit ; le moteur, qui continue à tourner en vertu de la

vitesse acquise, fonctionne alors comme génératrice et le courant induit qu'il engendre s'oppose à son mouvement, en vertu de la loi de LENZ.

Bien que toute génératrice puisse servir de moteur, on a cependant donné aux moteurs des formes se prêtant mieux à leur emploi. La plus caractéristique consiste à envelopper entièrement l'induit par l'inducteur, de telle sorte qu'il n'y a que le collecteur et les balais qui émergent ; on obtient ainsi le **moteur cuirassé**, que l'on rencontre dans les ateliers où les bobinages risquent d'être endommagés par les limes métalliques, et qui s'impose pour les tramways, car les moteurs sont placés sous la voiture et doivent être protégés contre la boue et les pierres que projette le mouvement des roues.

Moteurs à courants alternatifs. — Les moteurs précédents étaient alimentés par un courant continu. A la rigueur, la même machine pourrait fonctionner avec des courants alternatifs, puisque le renversement du courant opéré simultanément dans l'inducteur et dans l'induit ne change pas le sens de rotation. Mais quand les alternances se succèdent avec trop de rapidité, le magnétisme rémanent diminue le rendement du moteur, en absorbant inutilement une quantité d'énergie exagérée, et le fait marcher dans des conditions très défectueuses au point de vue économique. Il existe aujourd'hui toute une catégorie de moteurs à courants alternatifs auxquels on a donné le nom d'**alternomoteurs** ; les uns ont une vitesse constante quelle que soit la charge et en synchronisme avec la période du courant d'alimentation : ce sont les *moteurs synchrones* ; les autres ont une vitesse qui diminue quand la charge augmente : ce sont les *moteurs asynchrones*. Les uns comme les autres comprennent une partie fixe (*stator*) et une partie mobile (*rotor*).

Le **principe de ces moteurs** est le suivant. Imaginons un électro-aimant recevant du courant alternatif, et plaçons entre ses pièces polaires un aimant mobile autour d'un axe. Si l'aimant est au repos, il y restera et n'éprouvera que des oscillations de faible amplitude puisque la polarité change sans cesse et que son mouvement, à peine commencé dans un sens, se trouve arrêté par un mouvement de sens con-

traire. Donnons maintenant à l'aimant une impulsion telle qu'à la fin de la première demi-période, c'est-à-dire au moment du changement de polarité, il ait fait un demi-tour : les attractions ultérieures se produiront dans le sens du mouvement et l'aimant continuera à tourner ; il devient capable de produire du travail. La rotation de cet aimant est rigoureusement *synchrone*, c'est-à-dire de même période, avec les alternances du courant d'excitation. Si la fréquence est de 50, l'aimant fera exactement 1 tour par période, soit 50 tours par seconde. S'il existait une petite différence, celle-ci s'accumulerait au cours des rotations successives et il arriverait un moment où les répulsions seraient remplacées par des attractions. Le moteur s'arrêterait, il serait comme on dit *décroché*. L'appareil dont il vient d'être question est un **moteur synchrone** ; il ne démarre pas seul, il faut mécaniquement communiquer à son rotor une vitesse égale à celle du champ ; il tourne avec une vitesse constante quel que soit le travail qu'on lui demande, mais il se décroche brusquement si le travail devient trop considérable.

Il existe d'autres moteurs dont la vitesse est moindre que la vitesse de rotation du champ et peut varier dans des limites assez larges ; ce sont les **moteurs asynchrones**. On a vu qu'un disque ou un cylindre métallique tournant entre les pôles d'un électro se trouve parcouru par des courants dits de **FOUCAULT**, dès que le courant est lancé dans l'électro, lesquels s'opposent au mouvement. Il en serait de même si le cylindre se trouvait placé dans un champ tournant. Si le cylindre est mobile autour d'un axe perpendiculaire au plan de rotation de ce champ, il tournera dans le même sens que le champ magnétique, mais non avec la même vitesse sans quoi il n'y aurait plus de courants induits et l'action mécanique du champ sur le cylindre serait nulle. La différence de vitesse entre le champ et le cylindre est appelée *glissement*⁸. Le glissement est très faible pendant la marche à vide, mais il augmente avec la charge ; il varie de 2 à 6 p. 100. Il n'y a pas de synchronisme entre le champ et le rotor : c'est pourquoi les moteurs de cette catégorie ont reçu le nom de *moteurs asynchrones*.

Un premier perfectionnement du moteur synchrone consiste à remplacer l'aimant par un électro-aimant excité en

courant continu, puis ensuite par un électro à plusieurs pôles alternativement nord et sud, excités en courant continu et environnés d'une couronne de pôles en nombre égal, excités en courant alternatif.

Malgré un certain nombre de qualités, les moteurs synchrones ne sont pas d'un emploi très fréquent, tant à cause des difficultés de la mise en marche que de la brusquerie du décrochage. On leur préfère généralement les **moteurs asynchrones à champ tournant**. Supposons qu'à l'intérieur du champ tournant précédent nous remplacions le cylindre métallique par une pile de disques de tôle présentant des rainures dans lesquelles sont serties des tiges de cuivre disposées suivant les génératrices du cylindre et réunies à leurs extrémités par deux conducteurs circulaires; nous aurons alors le rotor dit en *cage d'écureuil*, lequel démarre seul, même en charge, avantage précieux pour un appareil destiné à travailler sans surveillance⁹.

Les moteurs électriques dans l'industrie. — Les ateliers de constructions mécaniques, dans les centres industriels possédant une ou plusieurs stations centrales, remplacent peu à peu leur ancien outillage, mû par la vapeur, par un outillage plus moderne, plus économique et plus docile : celui qui est réalisé par l'emploi des moteurs électriques. On se sert le plus souvent de moteurs à courants continus ou à courants polyphasés à champ tournant.

L'installation d'un **outillage électrique** est réalisée sur l'un ou l'autre des modes suivants : 1° *le moteur électrique est unique*, il actionne alors toutes les machines-outils qui reçoivent l'énergie développée par le moteur, au moyen de courroies ou d'engrenages ; ce mode de transmission absorbe beaucoup d'énergie et fournit un faible rendement ; 2° *il existe un moteur électrique pour chaque machine-outil* et, le plus souvent, le moteur est installé sur l'arbre même de l'outil. Les petites machines-outils : perceuses, machines à fraiser, sont actionnées généralement par commande directe d'un moteur ($1/4$ à $1/2$ cheval) calé sur l'arbre de l'outil. Pour les machines plus puissantes : étaux limeurs, raboteuses, tours, la commande est faite à l'aide d'un petit train d'engrenages. Les *grandes cisailles*, dans les usines de laminage du fer et

de l'acier, sont actionnées par des moteurs tournant à la vitesse angulaire de 8 tours par seconde et pourvus de *rhéostats-régulateurs*; avec des cisailles de 40 000 kilogrammes on coupe des barres d'acier doux de 10 centimètres d'épaisseur.

A l'heure actuelle, les moteurs électriques ont pénétré partout. Dans les mines, les *burins*, les *forets*, les *haveuses* qui entaillent le filon carbonifère, les *perforatrices*, sont mûs électriquement; ce sont des *locomotives électriques* qui circulent dans les galeries de mines, des *treuils électriques* qui font monter les bennes de la profondeur des puits à la surface. Dans les chantiers maritimes, on peut voir tout un ensemble de machines portatives électriques, des *perceuses*, des *machines à mortaiser*, des *poissonneuses*, etc., capables de se déplacer rapidement et pouvant travailler simultanément sur une même pièce¹⁰. Dans les ports, les *grues électriques* s'appliquent à décharger rapidement les monstrueux transatlantiques; quelques heures suffisent pour décharger les navires charbonniers: à Cleveland, dans l'Ohio, quatre *ponts roulants* abaissent leurs bras gigantesques au-dessus du navire, font descendre des bennes qui enlèvent d'un seul coup une tonne de charbon et vont la déposer dans les wagons alignés sur le quai. Partout où la vie industrielle est intense, l'électricité est là pour lever des fardeaux, les monter, les transporter, les déposer à l'endroit désigné et tout ce travail merveilleux s'opère sur le simple geste de l'ouvrier chargé de la conduite de la machine. En agriculture, les moteurs électriques actionnent les *machines à battre*, les *barattes*, les *hache-pailles*, les *pompes*, les *concasseurs*, des *charrues électriques*, etc. Dans la marine, l'électricité, fait monter les projectiles et les gargousses de la soute jusqu'à la tourelle, fait manœuvrer des canons de 10 tonnes, aussi bien que les ventilateurs qui renouvellent l'air dans les chaufferies¹¹; la *torpille*, cette collaboratrice redoutable des luttes modernes, possède aussi son moteur électrique¹². Sur les voies ferrées, les *chariots transbordeurs*, les *plaques tournantes* sont actionnés par l'électricité. Dans la maison moderne, l'électricité met en mouvement la *machine à coudre*¹³, aussi bien que le *piano électro-automatique*; dans ce dernier appareil, des rouleaux, entraînés par un moteur élec-

trique, font passer des bandes de carton perforé en face de contacts reliés à des électro-aimants ; dès qu'une perforation se présente, le circuit de l'électro aimant correspondant est fermé et un marteau frappe la corde. Le *phonographe* aussi est mù électriquement. Les *ascenseurs électriques*, fort employés aux Etats-Unis, n'ont fait encore à Paris que de timides apparitions ; en principe, un ascenseur électrique comprend simplement un moteur actionnant un treuil placé dans le sous-sol ; la cabine de l'ascenseur est suspendue à un câble qui vient s'enrouler sur le tambour de ce treuil, après avoir passé sur une poulie fixe disposée à la partie supérieure de l'immeuble desservi ¹⁴.

Partout, dans ces dernières années, l'emploi des moteurs électriques ¹⁵ s'est développé avec une énorme rapidité. Dans les villes où les stations centrales distribuent commodément le courant électrique, la consommation d'énergie par la force motrice atteint et dépasse celle exigée pour la lumière. Aussi, l'électricité a-t-elle contribué à apporter la solution d'une question sociale des plus importantes : elle permet aux petits producteurs d'obtenir la puissance dans des conditions d'économie dont seules pouvaient profiter, jusqu'ici, les grandes entreprises industrielles.

La traction électrique. — Si l'on met un moteur électrique en connexion avec l'essieu-moteur d'un véhicule, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une bielle ou d'un train d'engrenages, il est évident que les roues se mettront à tourner et que le véhicule se déplacera. C'est là le principe de la traction électrique qui a fait, en ces dernières années de si formidables progrès.

La traction électrique est née à Berlin, en 1879, aux ateliers SIEMENS ¹⁶. Le moteur était une dynamo ordinaire dont l'un des pôles communiquait avec les roues et l'autre avec un ressort métallique frottant sur un rail central bien isolé du sol. Le courant était produit par une dynamo fixe dont les bornes étaient reliées, l'une au rail central et l'autre aux rails ordinaires. Le premier tramway électrique fut inauguré en 1881, entre l'Institut central des Cadets et Lichterfeld ; la même année, il apparaissait timidement à l'exposition d'électricité de Paris où il promenait les visiteurs ébahis-

de la place de la Concorde au palais de l'Industrie. Depuis cette époque, la traction électrique a pris un développement incroyable. Les tramways actionnés par le courant sillonnent aujourd'hui la plupart des villes des deux mondes. Ce résultat, nous le devons aux ingénieurs américains qui, pendant près de dix ans, alors que l'Europe semblait se désintéresser de cette application, l'ont peu à peu élaborée et menée au point de quasi-perfection dont nous profitons aujourd'hui¹⁷.

Les tramways électriques. — Les tramways électriques offrent des avantages incontestables sur la traction animale. La puissance des organes mécaniques et la facilité d'arrêt permettent de porter de 8 à 12 kilomètres à l'heure la vitesse normale dans les rues les plus encombrées. La rapidité des transports, la commodité, l'abaissement des tarifs rendu possible par la diminution des frais d'exploitation, accroissent le trafic dans une proportion de 80 p. 100. Dans toutes les grandes villes où le moteur électrique a remplacé les chevaux, il a fallu agrandir les voitures, en augmenter le nombre, y ajouter des remorques, multiplier les départs.

Un tramway électrique comprend, quel que soit le mode adopté pour son fonctionnement, les parties essentielles suivantes : 1° un *moteur* ; 2° un *contrôleur-distributeur* ; 3° une *prise de courant*.

Les **moteurs de tramways** sont, au minimum, au nombre de deux. Ils sont alimentés soit par du courant continu fourni par une usine centrale ou par une sous-station de transformation, soit par du courant continu fourni par une batterie d'accumulateurs que porte la voiture elle-même, soit enfin par des courants alternatifs généralement triphasés¹⁸. Le *moteur de la Société alsacienne*, dont la puissance varie de 15 à 35 chevaux, possède une carcasse en acier coulé composée de deux parties se raccordant à charnière et fermant hermétiquement ; le mouvement de l'induit est transmis à l'essieu moteur à l'aide d'engrenages. Le *moteur Thomson-Houston* a un inducteur à deux bobines formant quatre pôles : la carcasse de l'inducteur est une boîte en acier doux, avec couvercle s'ouvrant facilement pour la visite des mécanismes et leur entretien ; il possède deux balais en charbon cuivré. Ce moteur est

très employé sur les lignes françaises. A la sortie de l'induit, le courant se rend dans les rails par l'intermédiaire des roues motrices. La puissance de chaque moteur est, en général, de 25 chevaux, mais c'est là un maximum rarement utilisé

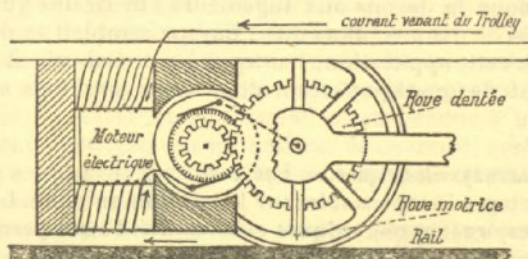


FIG. 62. — Fonctionnement d'un tramway électrique.

en marche courante, l'énergie dépensée n'excède pas 15 à 20 chevaux, même aux montées sous pleine charge¹⁹.

Les **contrôleurs-distributeurs** que manœuvre le wattman, sont au nombre de deux par voiture; ils permettent de relier les deux moteurs de la voiture en série ou en parallèle et d'introduire dans le circuit d'alimentation des résistances plus ou moins grandes. Pour le démarrage de la voiture, les moteurs sont mis en série avec intercalation de toutes les résistances : on diminue ainsi de moitié la force électromotrice appliquée à chaque moteur, en même temps qu'on empêche l'intensité du courant de prendre une valeur exagérée. À mesure que la vitesse de la voiture augmente, la force contre-électromotrice développée dans chaque moteur croît, de sorte que l'intensité du courant diminue : on ramène cette intensité à une valeur suffisante en tournant la manivelle du contrôleur de manière à mettre successivement les résistances hors circuit. Quand on tourne en sens inverse, la vitesse des moteurs diminue graduellement : à la fin de la course de la manette, les moteurs sont en court-circuit avec les résistances, ils fournissent alors des courants qui, d'après la loi de LENZ, s'opposent au mouvement : la voiture s'arrête. Ce *freinage électrique* n'est employé qu'en cas d'urgence : généralement, l'arrêt est obtenu avec un frein à sabots.

L'éclairage du tramway se fait par des lampes à incandescence distribuées en tension, en nombre dépendant du voltage du courant : ainsi on emploie cinq lampes de 110 volts pour un courant de 550 volts. Plusieurs séries peuvent être disposées en dérivation si c'est nécessaire. Le chauffage par l'électricité est tout indiqué, mais il est coûteux : il est plus répandu en Amérique qu'en France.

La prise de courant est le mécanisme électrique qui permet d'amener le courant d'alimentation dans le contrôleur-distributeur²⁰. La nature de ce mécanisme varie avec le mode de distribution du courant aux véhicules.

La traction électrique n'est, en somme, qu'un cas particulier du problème de la production du travail par l'électricité et de la transmission de l'énergie électrique ; mais tandis que, dans une installation ordinaire, on peut réunir par une canalisation fixe la dynamo génératrice au moteur électrique, dans le cas des tramways, le moteur se déplace constamment. C'est là une des questions les plus épineuses de l'exploitation des tramways et chemins de fer électriques.

Tramways à trolley aérien. — Pour relier les voitures à l'usine génératrice, on a d'abord songé à utiliser les rails eux-mêmes ; c'est ce que firent SIEMENS et HALSKE pour leur premier tramway. On employait trois rails : les roues du véhicule roulaient sur les rails extérieurs, tandis que le rail du milieu servait uniquement à amener l'énergie électrique ; celle-ci, après être passée par les enroulements de l'induit et des inducteurs, regagnait les roues du véhicule et faisait retour à l'usine par les rails extérieurs. Outre le danger que la voie faisait courir aux piétons et aux chevaux, il arrivait qu'en temps de pluie, les rails communiquaient avec ceux du milieu, et le courant passait directement entre ces rails au lieu de traverser le moteur de la voiture.

La transmission aérienne, déjà imaginée par SIEMENS et HALSKE, ne fut mise au point que plus tard, en Amérique ; elle a été ensuite introduite en Europe. Au-dessus de la voie, se trouve tendu un câble de cuivre ou de bronze siliceux appelé fil de trolley ; celui-ci est en contact constant avec un petit chariot à galet, le trolley, situé à l'extrémité d'une perche que porte le toit de la voiture : c'est par cette perche que le cou-

rant passe du fil au moteur électrique de la voiture, d'où il retourne par les rails au pôle négatif de la source d'électricité. Pour effectuer ce retour, il faut que le contact entre les rails soit toujours très bon, aussi les réunit-on par des lames de cuivre soudées à chacun d'eux. En général, la *différence de tension* entre l'aller et le retour est de 500 volts : on la maintient constante. Une voiture ordinaire de tramway *consomme* une moyenne de 400 watts-heure par kilomètre parcouru en palier : au moment du démarrage, la consommation atteint cinq à dix fois la valeur de celle nécessitée pour une marche en terrain plat. Le fil de trolley a un diamètre de 9 millimètres : il est soutenu par des fils tenseurs en acier (avec raccords isolants) fixés perpendiculairement au câble et maintenus par des potences en fonte ou en acier formés de tubes emboîtés. Dans le cas d'un long parcours, afin d'éviter une perte de voltage qui pourrait devenir considérable, le courant continu est envoyé dans des *feeders* qui le distribuent sous potentiel constant jusqu'aux points les plus éloignés de l'usine²⁴. Le voltage varie généralement de 500 à 550 volts : le débit dépend du nombre de moteurs en service sur les lignes : il ne dépasse guère 1 200 ampères sur un réseau d'un rayon moyen de 4 à 5 kilomètres.

Afin d'éviter que la roulette échappe du fil, on remplace celle-ci par un *archet* ; des ressorts fixés à la partie inférieure assurent le contact avec le fil.

Le tramway à trolley est le plus commode à installer ; aussi existe-t-il dans toutes les villes importantes du monde : son établissement permet d'imposer des tarifs très réduits aux compagnies qui sollicitent une concession²⁵. Le tramway à trolley s'établit partout, aussi bien sur les fleuves glacés de la Russie que dans les villes tropicales où son aspect moderne produit un effet singulier à côté des temples et des minarets. Dans certaines villes, pourtant, le fil aérien a été prohibé soit par souci d'esthétique, soit par la crainte des accidents que pourrait entraîner la chute d'un fil conduisant un courant de 500 volts. En réalité, ces craintes sont exagérées, car les supports nouveaux contribuent, au contraire, à l'ornementation des rues, et des coupe-circuits sont installés dans toutes les dérivations.

Tramways à conducteur souterrain. — Ne pouvant établir de fils aériens, les compagnies se sont vues obligées de l'enfourer dans un tunnel souterrain. Ainsi fut établi à Buda-Pest, à Paris, à New-York, le trolley souterrain. Le conducteur est placé dans un caniveau en maçonnerie, au-dessous de l'un des rails formé de deux barres d'acier parallèles laissant entre elles un espace vide de 33 millimètres (*caniveau latéral*). Une tige fixée sous le tramway traverse la fente et se termine par un balai frottant sur le conducteur. Le caniveau souterrain fut adopté pour différentes lignes des Tramways-Sud de Paris (Bastille-Gare-Montparnasse-Étoile) par la compagnie Thomson-Houston. A New-York et même à Paris (avenue Daumesnil), on a préféré la rainure centrale qui coûte plus cher que la précédente, mais qui est plus facile à construire (*caniveau axial*). Le caniveau souterrain a de nombreux inconvénients : l'eau qui pénètre nuit à l'isolement, la boue et la poussière occasionnent des contacts imparfaits, des courts-circuits²³ peuvent s'établir, la moindre réparation au conducteur nécessite le dépavage de la chaussée, enfin, l'établissement de la ligne revient à peu près à 300000 ou 400000 francs le kilomètre.

L'interdiction d'établir des lignes aériennes a fait surgir des systèmes mixtes assez curieux. Tantôt une fraction de la ligne de pénétration cesse d'être alimentée par le trolley et recueille le courant par caniveau souterrain; tantôt toute transmission d'énergie cesse, et ce sont les accumulateurs qui se chargent d'exciter les moteurs; tantôt on se sert successivement du trolley, des accumulateurs et du caniveau souterrain²⁴. Quand le trolley fonctionne, une partie seulement du courant va aux moteurs, l'autre se rend dans la batterie d'accumulateurs; quand le câble aérien disparaît, c'est le courant de décharge de la batterie qui va aux moteurs.

Le prix très élevé de l'établissement du caniveau souterrain et la crainte de voir le caniveau se boucher²⁵ ont fait adopter le système de prise du courant par contacts superficiels. Le courant est amené à des pavés en fonte douce ou plots, placés au niveau du sol dans l'axe de la voie à 2 m. 50 d'intervalle; on s'arrange de façon que le courant ne parvienne à ces plots que successivement et à mesure que la voiture arrive au-dessus de chacun d'eux. Ce résultat est obtenu

par un appareil de distribution enfoui dans le sol tous les 100 mètres qui permet de faire passer automatiquement le courant d'un plot à l'autre, comme dans le système CLARET-WUILLEUMIER, ou encore par le jeu d'un électro-aimant contenu dans le plot, comme dans les systèmes DIATTO et DOLTER²⁶. Ces systèmes ont eu leur moment de célébrité, et l'on crut que les destinées les plus brillantes leur étaient assurées : de nombreuses villes de province ont adopté immédiatement ce mode de prise de courant et plusieurs des nouvelles lignes de pénétration dans Paris : Noisy-le-Sec, Opéra, Bondy-Concorde, Bonneuil-Concorde, ont été équipées avec les plots Diatto. Malheureusement, la pratique a montré que ces systèmes ne sont pas dépourvus d'inconvénients : les plots, qui fonctionnent environ trois cents fois par heure pour une ligne de 5 kilomètres, peuvent cesser de fonctionner : ou bien le plot ne se soulève pas, alors ce sont de longues théories de tramways immobilisés, ou bien il ne retombe pas après le passage de la voiture, et les chevaux qui y risquent les pieds apprennent à leurs dépens les dangers d'une distribution à 500 volts.

A Lugano et à la Jungfrau, on a inauguré, il y a quelques années, des tramways à courants triphasés; il y a deux fils de ligne, par suite deux trolleys, le troisième fil est remplacé par les rails. Le moteur est du genre Brown.

C'est l'Amérique qui détient le record pour le nombre et l'étendue des réseaux de traction électrique : viennent ensuite l'Allemagne, la France, l'Angleterre, l'Italie. En Amérique, le tramway à trolley a toutes les faveurs; mais les avenues sont encombrées par les câbles qui se croisent en tous sens. A Boston, on a construit un tramway souterrain (Subway), tellement les tramways aériens sont insuffisants au transport des voyageurs.

Locomotives électriques. — La rapide extension des tramways électriques devait faire envisager le problème de l'électrification des voies ferrées. Si cette transformation ne paraît pas devoir être la solution unique et générale, elle semble indiquée dans bien des cas, notamment quand la ligne présente de fortes rampes. La traction électrique permet dans ce cas une vitesse économique plus grande que la traction à vapeur et souvent rend possible, dans les descentes, la récupération

partielle de l'énergie consommée dans les montées; d'une façon générale, les convois peuvent être fréquents et légers.

On a essayé trois types de locomotives électriques : la *locomotive automobile*, la *locomotive à prise de courant*, la *locomotive à accumulateurs*. Cette dernière n'a été employée que dans des cas spéciaux. La locomotive-automobile Heilmann fournit elle-même à ses moteurs le courant électrique nécessaire à leur fonctionnement. C'est une usine électrique mobile. Le roulement est beaucoup plus doux qu'avec les locomotives ordinaires à vapeur : les effets perturbateurs des mouvements alternatifs sont complètement évités, la puissance est accrue dans les rampes et l'adhérence rendue plus parfaite par une meilleure répartition de l'effort moteur. Cette locomotive peut remorquer un train de 250 tonnes à la vitesse de 100 kilomètres à l'heure. Malgré le succès des expériences auxquelles il a été soumis sur la ligne de l'Ouest, le système Heilmann n'a pu donner qu'une solution provisoire et constitue, en quelque sorte, une transition entre l'ancienne locomotive à vapeur et le remorqueur à trolley qui est certainement le tracteur de l'avenir.

Le premier essai de locomotive à trolley fut exécuté en 1895 par la compagnie américaine Thomson-Houston pour franchir les tunnels de Baltimore (Ohio). Plus de fumée et, par suite, plus de ventilation spéciale pour l'aération des tunnels. Récemment, le conducteur aérien a été remplacé par un rail en acier disposé sur le côté de la voie et supporté par des isolateurs ; la prise de courant se fait par un *sabot* glissant sur ce troisième rail. On est ainsi revenu à ce procédé du troisième rail que SIEMENS avait établi en 1878 à Berlin et que la première ligne électrique souterraine de Londres, *South and City*, avait déjà adopté. Depuis 1897, on ne parle que du troisième rail en Amérique et beaucoup d'ingénieurs pensent que là se trouve la solution pratique des trains électriques à grande vitesse. Avec ce système, on projette de donner à des trains électriques circulant entre New-York et Philadelphie, une vitesse de 274 km. à l'heure.

En France, on commence à appliquer le système du troisième rail. A Paris, dans le parcours de la gare d'Austerlitz au quai d'Orsay, se trouve adopté un dispositif qui s'en rapproche, afin d'éviter l'emploi des locomotives à

vapeur sur les quelques kilomètres de voie souterraine le long des quais. Depuis 1904, la ligne électrique est prolongée au dehors de Paris jusqu'à Juvisy²⁷. La ligne électrique Invalides-Versailles a aussi adopté le troisième rail. La station génératrice se trouve aux Moulineaux et contient des alternateurs triphasés de 800 kilowatts sous une tension de 5 500 volts ; les locomotives sont munies chacune de quatre moteurs capables de remorquer un train de 120 tonnes à la vitesse de 60 kilomètres à l'heure.

Les Métropolitains. — L'intensité de la circulation dans les grandes villes actuelles a conduit à la nécessité d'établir des chemins de fer reliant les différents quartiers de la ville. Ces chemins de fer devant être en grande partie souterrains ne pouvaient être qu'équipés électriquement et la solution préférée est celle du troisième rail. Il en est ainsi à Londres, à New-York, à Paris, à Berlin.

À Paris, l'idée de la construction d'une voie ferrée souterraine n'est pas récente. La première conception du Métropolitain de Paris remonte à l'année 1865 ; en 1872, apparaît le premier projet ; en 1898, les pouvoirs publics font voter les lois nécessaires à l'exécution des travaux ; enfin, en 1899, les premiers travaux ont commencé par l'établissement de la ligne Vincennes-Porte-Maillot (10 km. 650). Depuis la mise en service de cette ligne, la vogue du Métropolitain n'a cessé de s'accroître et il ne sera bientôt plus de quartier de Paris qui ne soit desservi par une ligne souterraine. Le système adopté est celui du troisième rail ; chaque kilomètre de voie revient en moyenne à 5 millions, mais il provoque un supplément de un million de voyageurs par an. La traversée de la Seine se fait en viaduc (Passy-Austerlitz) ou souterrainement (pont Saint-Michel). L'usine génératrice, située au quai de Bercy, comporte une série d'alternateurs attelés directement sur l'arbre des machines à vapeur et développant une puissance de 1 500 kilowatts ; le courant de 5 000 volts est envoyé à plusieurs sous-stations où il est transformé de courant alternatif en courant continu à 600 volts : à cet état, il est envoyé au rail distributeur. Les trains se composent de quatre voitures avec une seule automotrice, ou de huit voitures avec deux automotrices. Les moteurs peuvent déve-

lopper 75 chevaux normalement : un petit moteur spécial disposé dans la cabine du wattman, actionne la pompe à air du frein et le réservoir d'air comprimé du sifflet avertisseur. Le chemin de fer du Nord-Sud est alimenté, comme le Métropolitain, par du courant continu à 600 volts provenant de la transformation de courants triphasés à haute tension (10 000 à 15 000 volts) fournis par les deux usines centrales de Saint-Denis et d'Ivry. L'équipement électrique diffère de celui du Métropolitain : il comprend un rail isolé relié à un pôle positif à 600 volts, des sous-stations de transformation, un fil aérien en cuivre relié à un pôle négatif, et enfin la voie de roulement reliée au potentiel zéro de la terre. Ce dispositif forme ce qu'on appelle un distributeur à trois conducteurs et à deux ponts ; il procure une grande économie dans la section des conducteurs parce qu'elle équivaut à une distribution à deux fils à 1 200 volts entre les deux conducteurs de retour. Chaque train comprend deux voitures motrices dont l'une est branchée entre le troisième rail et la voie, et l'autre entre le fil aérien et la voie ; ces deux motrices absorbent à peu près la même quantité de courant ; chacune d'elles est munie de quatre moteurs de 125 chevaux.

Chemins de fer de montagnes. — La traction électrique devait évidemment supplanter la traction à vapeur dans les montagnes où la force motrice ne coûte presque rien. Aujourd'hui, les chemins de fer de montagnes sont presque tous électriques. Les uns, dans le cas d'une rampe moyennement accentuée, sont à *trolley* (chemins de fer du Gornergrat, au pied du Cervin, de la Jungfrau ; du Mont-Blanc), ou à *troisième rail* (chemin de fer du Fayet à Chamonix). Les autres qui arrivent à gravir des pentes de plus de 45°, empruntent le secours d'un câble et prennent le nom de *funiculaires* ; ils fonctionnent sous l'effort d'un moteur électrique fixe qui actionne un treuil. Tels sont : le funiculaire du Salève près de Genève ; celui du Mont-Dore ; celui du Vevey au Mont-Pèlerin, en Suisse ; celui du Wetterhorn, etc.

Electrification des Chemins de fer. — L'électrification des chemins de fer, suivant l'expression américaine qui tend à être adoptée — est la substitution de la traction électrique à la

traction par la vapeur sur les voies ferrées. Les chemins de fer suisses ont été un précieux terrain d'études pour les électriciens ; les grands tunnels du Simplon et du Lötschberg, dans les Alpes bernoises, ont donné lieu à des études de locomotives électriques remarquables. Depuis 1900, les électrifications ont été nombreuses ; en 1901, deux lignes électriques de plus de 100 kilomètres chacune furent mises en exploitation dans le nord de l'Italie ; puis ce sont les lignes de Liverpool à Crossens, celles de la banlieue de Newcastle. En France, après avoir réalisé Paris-Juvisy, on projette Paris Mantes, Paris-Pontoise, Paris-Argenteuil, Paris-Saint-Germain d'après le type du Métropolitain. La Compagnie du Midi se propose d'installer la traction électrique sur la ligne de Toulouse à Bayonne entre Montréjeau et Pau ; le courant monophasé à 55/60 000 sera envoyé à cinq sous-stations qui le distribueront à 11/12000 volts. En Allemagne, le même mouvement se manifeste : sur la ligne de Magdebourg-Leipzig-Halle la traction se fait par courant monophasé ; cette électrification s'étend à d'autres lignes. En Suisse, l'électrification des chemins de fer fédéraux est à l'étude et l'achat d'un certain nombre de chutes est déjà décidé. En Angleterre, on comptait, en 1912, près de 400 kilomètres électrifiés. Aux Etats-Unis, les lignes électriques de 100 à 150 kilomètres sont déjà nombreuses.

Dans tous les pays, les efforts s'orientent vers la création de moteurs vraiment pratiques, robustes et souples, à courant monophasé, parce que l'on est convaincu de la nécessité économique de deux conditions primordiales : la prise directe de courant sur la ligne de haute tension et l'adoption d'un matériel de traction assez simple et assez résistant pour être confié à un manœuvre intelligent.

Le courant alternatif monophasé a pris une grande extension. Il peut être appliqué aux locomotives de trois manières différentes : 1° le courant monophasé amené à haute tension est transformé dans la locomotive en un courant à basse tension et conduit dans les moteurs monophasés qui actionnent les essieux moteurs (disposition adoptée en Angleterre par la Compagnie du Midland ; pour le chemin de fer du Lötschberg ; Compagnie du Midi) ; 2° le courant traité comme précédemment actionne un moteur monophasé qui

met en mouvement la dynamo à courant continu de la locomotive (disposition adoptée par la Société Oerlikon); 3° le courant monophasé, dont on a abaissé la tension, est transformé en courant continu par le *redresseur-régulateur* de MM. AUVERT et FERRAND, il alimente ensuite les moteurs en série à courant continu de la locomotive (disposition adoptée par le P.-L.-M., essais de 1911).

Les grandes vitesses. — Les monorails. — L'électricité a permis de réaliser les grandes vitesses. En Allemagne, sur la ligne de Zossen à Marienfeld, on a obtenu 208 kilomètres à l'heure avec une locomotive Siemens, et 210 kilomètres avec une locomotive A. E. G. Ces allures excessives deviendront probablement habituelles, grâce à l'emploi raisonné des courants alternatifs à haute tension. En prévision de ces vitesses extrêmes, on a étudié plusieurs systèmes de voies à un seul rail (**monorails**). Certaines lignes existent déjà et fonctionnent régulièrement; telles sont celles de *Liverpool à Manchester* (système BEHR), en Angleterre; de *Barmen-Elberfeld-Wowinkel*, en Allemagne (système LANGEN). Cette dernière est, pendant 10 kilomètres sur 13, posée au-dessus de la rivière Wupper, affluent du Rhin²⁸. Plusieurs autres lignes ont été mises à l'étude et sont déjà en construction.

Les automobiles électriques. — On réserve le nom de voitures automobiles à des véhicules de petites dimensions, circulant sans voie ferrée, comme les omnibus, les fiacres, les motocycles. Ces voitures sont nées en 1881. A cette époque, TROUVÉ fit fonctionner à Paris, rue de Valois, au grand ébahissement des passants, un tricycle actionné par un moteur électrique et quelques accumulateurs Planté.

L'**automobile électrique** est supérieure, sous bien des rapports, à l'automobile à pétrole. La conduite en est très simple, car un levier unique commande la mise en marche, le réglage de la vitesse et l'arrêt; le moteur démarre sans peine et fonctionne avec une régularité parfaite. Toutefois elle n'a pas l'indépendance des automobiles à pétrole, car il est nécessaire de recharger la batterie quand elle est épuisée. On a construit des fiacres électriques dont les accumulateurs ont une capacité de 135 ampères-heure et permettent

d'effectuer un trajet de 60 kilomètres. La dépense est d'environ 160 watts-heure par kilomètre. On a également essayé des tricycles ou des voitures électriques munis d'un moteur de un demi cheval à 1 cheval, recevant le courant d'une petite batterie d'accumulateurs légère, disposée sous le siège. Le poids encore trop considérable des accumulateurs est un obstacle à l'extension des automobiles électriques.

La navigation électrique. — Nous avons vu, au début de cette conférence, que la navigation électrique a été inaugurée en 1838, sur la Néva; mais ce n'est qu'en 1881 que les résultats furent satisfaisants avec le canot automobile *Eurêka* de G. TROUVÉ; il contenait 12 éléments au bichromate, un moteur et une hélice. Aujourd'hui, les piles ont été remplacées par des accumulateurs et l'on fait appel au moteur le plus puissant pour actionner l'hélice; mais c'est surtout la *navigation de plaisance* qui paraît appelée à profiter du nouveau mode de locomotion²⁹. On a proposé de remplacer les machines à vapeur des *torpilleurs* par des moteurs électriques ce qui ferait disparaître le bruit, la cheminée, la fumée, les flammes; mais le poids de l'appareil réduirait de beaucoup son champ d'action.

Le premier sous-marin électrique, le *Gymnote*, œuvre de DUPUY DE LÔME et de GUSTAVE ZÉDÉ fut lancé en 1889; après lui vint le GUSTAVE ZÉDÉ; aujourd'hui, la plupart des puissances ont fait construire des sous-marins électriques; le moteur qui actionne l'hélice est toujours une batterie d'accumulateurs³⁰.

Le moteur électrique est le seul qu'on puisse installer sans danger sur la nacelle des aérostats, tout près d'une étoffe inflammable d'où filtre sans cesse un gaz éminemment combustible; aussi, dans la plupart des tentatives de direction des ballons, l'électricité a été employée comme source d'énergie. Dans ces dernières années, les perfectionnements apportés aux moteurs à pétrole par les constructeurs d'automobiles³¹, ont fait abandonner le moteur électrique.

NOTES DE LA HUITIÈME CONFÉRENCE

.. Le rapport entre la quantité de flux qui traverse la bobine après l'introduction du fer, et le flux qui la traversait avant cette introduction est appelé *coefficient de perméabilité*. La perméabilité diminue dans de grandes proportions quand le nombre des lignes de force augmente; le fer tend à se saturer.

2. Comme installations de ce genre, nous citerons : la gare d'Anvers (système Siemens), la gare de Bordeaux Saint-Jean (système Ducouso), la gare du Pont de Lyon du chemin de fer de ceinture (système Taylor), la gare de Nancy (système Descubes), et plusieurs autres plus récentes.

3. Les premières cloches électriques employées ont été inventées en Autriche, par M. LÉOPOLDER. L'indicateur de passage à niveau de MM. LOISEAU et LEBLANC date de 1879 : la pédale est placée à 2 kilomètres avant le passage à niveau ; les mots sont écrits en blanc sur le carreau rouge d'un reverbère qu'un volet de tôle découvre au moment où un train va passer.

4. Dans certaines compagnies, le tirage du bouton agit sur le frein à air comprimé et cale les roues, ce qui avertit nécessairement le mécanicien.

5. La disposition des appareils et les détails de leur mécanisme varient avec chaque compagnie. La longueur des sections change aussi : 1 kilomètre aux abords des grandes villes, quelques centaines de mètres dans les grandes gares, 4, 5 et même 6 kilomètres en d'autres régions.

6. A Paris, l'heure officielle est donnée électriquement à quatorze centres horaires qui remettent électriquement à l'heure, à des époques fixes, les cadrans des édifices publics situés dans les environs. A Neuchâtel, l'Observatoire est relié électriquement à douze centres de population distants de 2 à 156 kilomètres; on utilise les lignes télégraphiques. En Angleterre, l'Observatoire de Greenwich donne l'heure à tous les quartiers de Londres. A Liverpool et à Edimbourg, des boules-signal reliées entre elles par des fils conducteurs et mises au bout de hautes perches tombent à une heure après-midi. A New-York, la chute de la « boule de temps » est déterminée électriquement par l'Observatoire de Washington distant de 360 kilomètres.

7. Parmi les meilleurs types actuels de moteurs électriques à courant continu, il convient de citer ceux de la *Société Gramme*, de la *Société Alsacienne de construction mécanique*, de la *Compagnie Générale électrique* de Nancy, de Siemens et Halske de Berlin, de Kapp et Bolton de Leeds. Les modèles construits par les *Etablissements Fabius-Henrion*, la *Société l'Éclairage Électrique* sont très estimés en raison de leur construction soignée et de leur haut rendement.

8. Le glissement est très important dans la théorie des moteurs asynchrones; on peut le comparer au glissement des poulies contre les courroies de transmission qui produit également une certaine diminution de vitesse.

9. Il existe encore d'autres catégories de moteurs, tel le *moteur à*

répulsion que nous ne ferons que mentionner. Il est considéré comme le meilleur moteur à courant alternatif simple et son emploi se répand tous les jours.

10. L'une des installations les plus importantes de ce genre est celle du Lloyd autrichien à Trieste.

11. Un moteur de 15 chevaux suffit pour faire manœuvrer une tourelle de 24 centimètres avec sa lourde plate-forme, sa cuirasse et le canon lui-même. Le monte-projectiles du canon de 34 centimètres est actionné par un moteur électrique spécial de 8 chevaux. Le tir des canons à bord des navires se fait électriquement.

12. La *torpille* Sims-Edison adoptée par le gouvernement des États-Unis, porte à l'avant 225 kilogrammes de dynamite; le câble conducteur se déroule à mesure que la torpille avance. À l'aide d'un manipulateur installé à terre ou sur un navire, on fait marcher à volonté, en avant ou en arrière, le moteur de la torpille; on lance ensuite le courant dans l'amorce pour provoquer l'explosion de la charge.

13. Le moteur placé sous la tablette ne gêne aucunement et ne consume pas plus qu'une lampe de 16 bougies.

14. Il existe d'autres types d'ascenseurs électriques : tel l'appareil de M. RUSSEL-SMITH qui repose sur un tout autre principe, celui d'un noyau mobile aspiré par des solénoïdes, dans les fils desquels circule un courant. Avantages : facilité d'établissement, aucun bruit dans le fonctionnement, pas de démarrage brusque. L'ascenseur électrique ne nécessite ni puits ni conduites hydrauliques, de plus, il permet de réaliser une économie de 80 p. 100 sur les ascenseurs hydrauliques.

15. Les moteurs qui ont eu le plus de succès sont les *moteurs-shunt*; quelquefois les *moteurs-série* sont utilisés, par exemple, quand la génératrice livre le courant à débit constant, comme le fait se présente pour les petites installations. Quant aux *moteurs-compound*, ils conviennent aux machines qui exigent une grande régularité de marche : machines typographiques, lithographiques, rouleaux de papeteries, métiers à tisser.

16. Les frères SIEMENS ont consacré toute leur vie à la science électrique. L'aîné Werner, membre de l'Académie de Berlin, fonda la célèbre usine électrique qui porte son nom et celle de son associé M. HALSKE. Karl seconda son frère dans ses multiples travaux et dirigea les succursales en Angleterre. C'est lui qui construisit le premier câble transocéanique.

17. Il ne faut pas s'étonner si la plupart des termes usités sont empruntés au langage de ses créateurs. Le conducteur est un *wattman*, le collecteur qui recueille le courant de la ligne est le *trolley*, les gros câbles alimentateurs sont les *feeders*, le commutateur qui sert à démarrer, à régler la vitesse s'appelle *controller* (d'où l'on a fait par corruption *contrôleur*.)

18. Excitation *en série* quand le courant provient de la station; *en dérivation* quand il est fourni par une batterie. Le moteur est à *champ tournant* quand on utilise les courants triphasés.

19. La caisse de la voiture ne fait pas corps avec le truck qui porte les moteurs et les essieux, mais y repose par un intermédiaire élastique, tel que ressorts à boudin d'acier. Si un accident survient aux moteurs, on place la voiture sur un truck de rechange.

20. La plupart des tramways sont de construction symétrique, afin d'éviter les plaques tournantes aux stations extrêmes et la manœuvre du retourne-

ment. Chaque plate-forme est donc munie des organes de direction : freins, interrupteurs, coupe-circuits, commutateur ou controller.

21. En Amérique, on fait usage d'un fil en 8. La boucle supérieure est utilisée pour la suspension; la boucle inférieure du fil reçoit la roulette du trolley. Avantage : la grande section permet des feeders plus éloignés qu'avec le fil rond.

22. 1 kilomètre de ligne aérienne à fil unique revient environ à 20 000 francs.

23. Rappelons qu'il y a court-circuit sur une ligne électrique lorsque, par suite d'accident quelconque, la résistance est devenue pratiquement nulle entre les deux pôles, et que le circuit se ferme avant d'atteindre le point d'application où le courant devait être utilisé.

24. Citons pour Paris comme exemples de lignes modifiant ainsi leur prise de contact : *Pantin-Place de la République*; *Malakoff-Halles*; *Clamart-Saint-Germain-des-Prés*.

25. Les caniveaux actuels sont disposés de telle façon qu'une chasse d'eau permet un nettoyage complet et rapide. Ce qui n'est plus à craindre aujourd'hui semblait encore, il y a quelques années, un obstacle insurmontable.

26. Le système *Claret-Vuilleumier* a fait son apparition en 1894, à l'exposition de Lyon; le système *Diatlo* a été inauguré en 1899 à Tours.

27. La remorque électrique est assurée par des locomotives possédant quatre moteurs de 270 chevaux et dont la vitesse peut atteindre 100 km. à l'heure. Les trains de banlieue parcourent les 19 kilomètres séparant la gare d'Austerlitz de Juvisy en quinze minutes.

28. Les courbes de cette voie originale ont un rayon minimum de 75 mètres et peuvent être franchies à l'allure de 50 kilomètres à l'heure avec une inclinaison des wagons de 15 degrés; le plancher des wagons se trouve à 4 m. 50 au-dessus du sol.

29. On a calculé qu'il faudrait embarquer 40 000 tonnes d'accumulateurs à bord d'un navire de 6 000 tonnes pour lui permettre de traverser l'Océan Atlantique.

30. Pour plonger, on augmente le poids du bateau en introduisant de l'eau dans les réservoirs; pour remonter à la surface, on chasse l'eau des réservoirs au moyen de pompes.

31. Voir G. EISENMENGER. *La Physique* (même collection).

NEUVIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ A TRAVERS LES GAZ RARÉFIÉS

PHÉNOMÈNES DE RAYONNEMENT, D'IONISATION
ET DE LUMINESCENCE

La décharge électrique dans les gaz aux pressions moyennes. — Les rayons cathodiques et les phénomènes qu'ils produisent. — Phénomènes d'ionisation des gaz. — Les rayons de Roentgen ou rayons X. — Fluorescence et phosphorescence. — Transformation des rayons X par la matière : rayons S et rayons T. — Les phénomènes radio-actifs. — Le rayonnement du radium. — Luminescence et éclairage : lampe à vapeur de mercure, lampe quartz, lumière de Moore. — La luminescence du néon. — Phénomène photo-électrique et rayonnement ultra-violet.

Dans les conférences précédentes, nous avons eu l'occasion de parler des propriétés électriques des métaux et des isolants solides, mais nous n'avons pas indiqué comment se comportent l'air et les autres gaz par rapport à l'électricité. Dans cette conférence, au contraire, nous étudierons les phénomènes qui accompagnent le passage de l'électricité à travers les gaz. Or les gaz jouissent, au point de vue électrique, de propriétés complexes et les phénomènes qui en résultent comptent parmi les plus variés d'aspect que la Physique peut offrir à la sagacité du savant. L'étude de la décharge électrique à travers les gaz domine la Physique moderne, c'est elle qui a conduit à la découverte des rayons X, à préciser nos connaissances sur la phosphorescence, à établir de nouvelles et fécondes hypothèses sur la nature de l'Électricité, à ima-

giner les « électrons » dont nous avons déjà parlé et qui jouent un si grand rôle dans les théories actuelles de l'électricité et de la radio-activité. Certains philosophes en font l'essence même de toute matière et de toute énergie.

Phénomènes produits par les décharges dans les gaz aux pressions moyennes. — Quand on établit une différence de potentiel progressivement croissante entre deux conducteurs placés dans l'air ordinaire, il finit par éclater entre ces conducteurs, une étincelle, ainsi que nous l'avons vu dans la première de ces conférences. L'étincelle est la manifestation de la décharge électrique.

Les divers aspects de l'étincelle ont été fixés par la photographie instantanée. Quand sa longueur ne dépasse pas 3 ou 4 centimètres, l'étincelle est rectiligne ; au delà, elle devient sinueuse ; parfois même, elle présente des ramifications comme on le voit dans les éclairs orangeux. L'étincelle est d'autant plus éclatante et plus bruyante que la décharge met en jeu une plus grande quantité d'électricité. La longueur de l'étincelle, c'est-à-dire la distance explosive, croît avec la différence de potentiel et plus rapidement que celle-ci : il faut environ 5 000 volts pour avoir une étincelle de 1 millimètre et 25 000 volts pour une étincelle de 1 centimètre. La longueur de l'étincelle dépend aussi de la pression du gaz et l'on a pu, à ce sujet, formuler la loi suivante. *Pour une différence de potentiel donnée, la distance maxima à laquelle la décharge se produit est en raison inverse de la pression du gaz.*

Si les conducteurs entre lesquels se fait la décharge s'éloignent trop, la décharge devient moins bruyante : au lieu de produire une explosion, elle donne lieu à un bruissement particulier. Elle se présente alors, au pôle *positif* sous la forme d'une *aigrette violette très pâle*, formée d'un pédicule assez brillant portant un grand nombre de fines ramifications ; le pôle *néгатif* offre un aspect différent : il est entouré d'une sorte de *gaine violette* et s'il présente une pointe, il s'y trouve une *petite étoile brillante*. La forme de l'aigrette dépend donc du signe de l'électricité qui s'échappe. Ajoutons encore que si les deux conducteurs sont recouverts d'une lame de verre ou de mica, on observe, pour une grande différence de potentiel, une lueur violette très pâle et silencieuse.

A ce phénomène on a donné le nom d'*effluve*, et nous avons vu, dans la septième conférence, que l'*effluve* peut produire certaines réactions chimiques, la formation de l'ozone, par exemple. Les décharges positives sont essentiellement identiques dans tous les gaz, tandis que les décharges négatives présentent entre elles de grandes différences; retenons ce fait que nous ne pourrions nous expliquer qu'à la fin de cette conférence.

Phénomènes produits par la décharge dans les gaz raréfiés. — *Quels phénomènes se produiront si l'on diminue la pression de l'air?* Telle était la question à laquelle l'abbé NOLLET, ABRIA en 1842, GASSIOT en 1854, en France, PLUCKER, à Bonn en 1858, cherchèrent les premiers à répondre. Ce dernier eut la chance de s'adjoindre le concours du célèbre souffleur de verre, GEISSLER, qui devait faciliter énormément ses recherches. Pour exécuter ces expériences, on enferme l'air dans un récipient en verre, on fait le vide aussi loin qu'on le veut avec une trompe à mercure; on peut aussi enfermer dans le récipient tel ou tel gaz à travers lequel on désire faire passer la décharge électrique. L'électricité passe au moyen de deux fils scellés et mis en relation avec les deux pôles de la source d'électricité: l'*anode* est le conducteur d'entrée, la *cathode*, le conducteur de sortie. Ces électrodes peuvent être terminées par des plaques ou des surfaces courbes. Comme source d'électricité, on peut prendre une batterie d'accumulateurs à haute tension, mais généralement on s'adresse à une bobine de Ruhmkorff et l'on met en série avec le tube une *soupage de VILLARD* ne permettant le passage du courant de la bobine que dans un sens déterminé¹; les différences de potentiel sont de l'ordre de 20 000 à 100 000 volts.

A mesure que la pression diminue dans le tube, on observe des phénomènes très remarquables et souvent fort beaux. D'abord les étincelles jaillissent d'une électrode à l'autre, en zigzags, comme l'éclair, puis elles s'étalent et forment une gerbe de lignes fines et faiblement lumineuses. Quand on arrive à $1/100^e$ d'atmosphère, la lumière forme une magnifique gerbe d'un violet rosé, à bords diffus, et qui, partant de l'*anode*, vient s'évanouir à une certaine distance de la *cathode*. C'est la *lumière positive*. Sur la *cathode*, on voit une

petite plage lumineuse rose avec l'air, blanche avec le gaz carbonique, bleu-violet avec l'hydrogène, c'est la *lumière négative* ; entre les deux se trouve une partie obscure : l'espace obscur de Faraday. En continuant à faire le vide, la lueur s'élargit et remplit presque complètement la section du tube, mais elle perd de plus en plus en longueur et en intensité lumineuse : la lumière négative s'étend sur toute la cathode, puis elle se sépare de la cathode. Entre les deux, se trouve un espace obscur : espace obscur de Hittorf. Au contact même de l'électrode, on observe une nouvelle couche lumineuse rosée. Au voisinage de $1/1000^{\circ}$ d'atmosphère, ces phénomènes sont nets et la lueur violette se divise en tranches alternativement brillantes et sombres ; elle devient *stratifiée*. GEISSLER a, le premier, vendu des tubes de formes très diverses et parfois artistiques, où la pression n'est plus que de 1 millimètre environ ; on donne à ces tubes, le nom de tubes de Geissler. La jolie clarté et le chatolement des couleurs que la lumière positive communique aux tubes de Geissler, les font souvent employer pour produire des effets lumineux ².

Si l'on pousse la raréfaction plus loin, la zone obscure qui entoure la cathode augmente de plus en plus et la colonne lumineuse diminue de longueur. Pour une pression comprise entre $1/100\ 000^{\circ}$ et $1/1\ 000\ 000^{\circ}$ d'atmosphère, l'intérieur du tube demeure presque entièrement obscur, mais un nouveau phénomène se manifeste.

Les rayons cathodiques et leurs phénomènes. — CROOKES, vers 1880, guidé par des idées particulières sur l'état de la matière dans les milieux raréfiés, a analysé les faits de plus près et découvert des phénomènes importants. Il a constaté que le vide étant poussé à $1/100\ 000^{\circ}$ d'atmosphère, le verre de l'ampoule prend une belle teinte fluorescente verte, surtout au point opposé à la cathode. *Quel est l'agent qui produit la luminescence des parois de verre du tube de Crookes ?* Ce ne peut être le courant électrique, puisque celui-ci va d'une électrode à l'autre sans toucher la paroi. Tout objet introduit dans le tube, une croix d'aluminium, par exemple, porte ombre absolument comme le ferait un corps lumineux substitué à la cathode. Cet agent inconnu qui émane de la cathode, se

propage en ligne droite comme la lumière, et se traduit par les rayons cathodiques; ceux-ci illuminent sur leur passage le gaz raréfié de même que le faisceau de lumière solaire entrant dans une chambre obscure illumine les poussières qu'il rencontre.

Les rayons cathodiques possèdent des propriétés importantes : 1° *Ils se propagent en ligne droite*, ainsi que nous venons de le voir. — 2° *Ils produisent des phénomènes de phosphorescence et de fluorescence* ³. Nous savons déjà que le verre du tube de Crookes en activité devient luminescent : un grand nombre de substances placées sur le trajet d'un faisceau cathodique à l'intérieur du tube de Crookes deviennent phosphorescentes; un simple morceau de craie émet une vive lumière, le sulfure de calcium devient lumineux à la façon d'un ver luisant, alors que d'autres minéraux prennent un aspect féérique. — 3° *Ils échauffent les substances placées sur leur passage* : on peut fondre un petit lingot de platine que l'on dispose au centre de courbure d'une cathode sphérique. Le verre, frappé par des rayons cathodiques s'échauffe, se ramollit : si l'on n'y prend pas garde, le tube où l'on produit ces rayons et où la pression est très faible, peut se percer sous l'action de la pression atmosphérique. — 4° *Ils produisent des effets mécaniques*; ainsi un léger moulinet placé sur le trajet d'un faisceau cathodique se met à tourner comme la roue d'un moulin sous l'action de l'eau. 5° — *Ils sont déviés par un aimant ainsi que par un corps électrisé*, comme le serait un courant électrique. — 6° *Ils produisent des effets chimiques*, car un grand nombre de corps sont modifiés par les courants cathodiques : le chlorure de sodium se colore en brun, le bromure de potassium en bleu. Les rayons cathodiques peuvent avoir une action réductrice : le cuivre oxydé est ramené à l'état de cuivre métallique. — 7° *Ils sont capables de traverser des feuilles minces d'aluminium* et cette propriété a permis aux physiciens de les faire sortir du tube à vide où ils semblaient enfermés et ne constituer qu'une curiosité scientifique. La paroi du tube ne les laisse pas filtrer vers l'extérieur et il semble que toute l'énergie des rayons cathodiques soit utilisée à la production de la phosphorescence et à l'échauffement de la paroi. HERTZ, le premier, a montré que les rayons cathodiques traversent de minces plaques d'alu-

minium. Partant de cette observation, LÉNARD, préparateur de Hertz, réussit, en remplaçant une partie de la paroi de verre par une feuille d'aluminium, à faire pénétrer dans l'atmosphère les rayons cathodiques qui étaient jusque-là restés dans le tube. Ce sont les rayons de LÉNARD. Ceux-ci peuvent exister dans l'air ordinaire, tandis qu'ils ne peuvent être créés que dans l'air très raréfié; ils se propagent aussi bien dans les divers gaz et dans le vide absolu qu'à l'intérieur du tube de Crookes, mais tandis que dans le vide ou les gaz raréfiés leur propagation demeure rectiligne sur de grandes longueurs, dans les gaz aux pressions ordinaires, ils diffusent dans tous les sens comme le fait la lumière dans un milieu trouble. LÉNARD montra encore que les rayons cathodiques produisent la phosphorescence des corps, même en dehors du tube et peuvent influencer les plaques photographiques. Enfin, Lénard a établi l'hétérogénéité des rayons cathodiques; ces différentes sortes de rayons, déviées plus ou moins fortement par un aimant peuvent être comparées aux rayons lumineux de couleurs différentes qui se trouvent séparés à leur sortie du prisme.

Les expériences de Lénard, en permettant d'approfondir l'étude des rayons cathodiques, ont modifié les idées que l'on se faisait sur la nature de ces curieux rayons. Se propageant dans le vide, ils doivent se propager dans l'éther; mais c'est une lumière bien étrange que cette lumière, qui est déviée par un champ magnétique. De plus, J. J. THOMSON a reconnu que la vitesse des rayons cathodiques est de 200 kilomètres, c'est-à-dire bien différente de celle de la lumière qui atteint 300000 kilomètres par seconde.

Dès que l'on put faire sortir les rayons cathodiques du tube de Crookes, on put étudier leurs actions électromagnétiques et électrostatiques. Les expériences de M. PERRIN ont conduit à la conclusion suivante : *Il y a tout lieu de considérer les rayons cathodiques comme un courant de particules chargées d'électricité négative* et lancées par la cathode normalement à sa surface. Leur trajectoire est rectiligne, mais peut s'incurver sous l'action d'un champ magnétique ou d'un champ électrostatique.

Nature des rayons cathodiques, — *Comment expliquer les mer-*

veilleuses propriétés des rayons cathodiques? CROOKES avait émis une hypothèse qui éclaircissait bien des points, mais qui, cependant, péchait sous certains rapports. Il pensait que ces rayons étaient constitués par la projection de certaines particules émises par la cathode, ces particules étant, soit des particules du gaz existant, soit des particules de la cathode même, soit, peut-être, des parties électrolysées des molécules de gaz. Cette hypothèse permettait bien d'expliquer la propagation rectiligne de ces rayons, la phosphorescence et l'échauffement des corps frappés, par le bombardement des particules, mais elle ne pouvait faire comprendre la déviation par l'aimant et les charges négatives des rayons cathodiques.

Les recherches récentes ont montré la modification qu'il suffisait d'apporter à cette théorie pour qu'elle pût tenir compte de tous les phénomènes observés. On admet actuellement que ce sont de petites masses chargées négativement, *les électrons négatifs eux-mêmes* qui se déplacent rapidement en ligne droite à partir de la cathode dans le sens des rayons. On s'explique immédiatement que tout corps frappé par les rayons cathodiques se charge d'électricité négative, que les particules électriques en mouvement soient déviées par les forces électriques ou magnétiques. Si l'on mesure cette déviation on peut déduire non seulement la vitesse de ces particules, qui dans le vide poussé très loin peut aller jusqu'au tiers de la vitesse de la lumière, mais encore connaître le nombre de coulombs que chaque particule transporte par gramme. On a ainsi établi que chaque gramme de ces particules doit contenir une charge d'environ 170 millions de coulombs; or comme 1 gramme d'hydrogène ne porte en lui que 96 540 coulombs, on en déduit que les particules doivent avoir une masse d'environ la $\frac{1}{2000}$ partie de celle de l'atome d'hydrogène. Dans l'électrolyse, les électrons sont toujours réunis à des atomes de la matière des corps et ne se déplacent qu'avec ces atomes; au contraire dans les gaz raréfiés, les électrons peuvent se déplacer libres de toute matière, et, en raison de leurs masses excessivement petites, et de leurs puissantes forces électriques, ils acquièrent des vitesses énormes.

Puisque les électrons négatifs se déplacent dans les rayons

cathodiques, on peut se demander où sont les *électrons positifs*. Ces particules positives existent bien dans les tubes à vide, mais au lieu de s'éloigner de la cathode comme le font les particules négatives, elles y affluent. Si la cathode est percée de trous, l'afflux passe au travers et constitue un groupe de rayons canalisés à travers les ouvertures, chargés d'électricité positive, ce sont les **rayons de Goldstein** ou **rayons-canaux**. Ces rayons sont déviés par les aimants, mais plus faiblement que les rayons cathodiques, et précisément en sens inverse de ceux-ci. Leur vitesse est beaucoup plus faible que celle des rayons cathodiques, tandis que leur masse est presque égale à celle d'un atome d'hydrogène; on peut donc dire que *dans les rayons-canaux ce sont les ions positifs et non les électrons qui se déplacent*.

Phénomène d'ionisation des gaz par choc des ions. — On vient de voir qu'il existe des charges négatives et des charges positives dans un gaz parcouru par un courant, et leur présence permet d'expliquer les propriétés des rayons cathodiques et des rayons-canaux. Peut-on expliquer de la même façon les phénomènes constatés dans les tubes de Geissler? Les électrons négatifs, projetés par la cathode, rencontrent les molécules du gaz enfermé dans le tube, les ébranlent, et déterminent la dissociation de ces molécules; or cette dissociation fournit des électrons négatifs et des ions positifs. Le *choc des ions* a décomposé, en leurs ions, les particules du gaz auparavant neutres. On dit que *le gaz est ionisé*; le phénomène porte le nom d'**ionisation**. *L'ionisation a lieu constamment dans les gaz raréfiés et se produit précisément dans les parties lumineuses du gaz*. Dans un tube de Geissler, l'ionisation par choc a lieu au delà de la région sombre de Hittorf, et les ions positifs, se précipitant sur la cathode, l'enveloppent d'une gaine lumineuse. La première couche cathodique des tubes de Geissler correspond donc aux rayons-canaux pour un vide plus élevé. Quand le vide est convenable, les électrons négatifs acquièrent une vitesse assez élevée pour déterminer l'ionisation, non seulement à l'extrémité la plus éloignée de l'anode, mais sur tout leur parcours; alors on observe une bande lumineuse continue. Pour d'autres degrés de vide, les électrons excitent uniquement l'extré-

mité de la lumière positive et les particules projetées parcourent une certaine distance avant que leur vitesse, qui va en s'accélégrant, devienne suffisante pour ioniser le gaz et le rendre lumineux; derrière l'extrémité lumineuse se trouvera donc une région obscure, puis une bande brillante. Ainsi s'expliquent les stries de la lumière positive.

En somme, la théorie des électrons permet d'expliquer les phénomènes que l'on observe quand la décharge électrique traverse un tube où le vide va en croissant.

Autres rayons cathodiques et rayons anodiques. — Il existe des rayons cathodiques d'un autre genre dits **rayons de striction** prenant naissance dans toutes les parties étranglées des tubes à vide du côté de l'anode. M. RICH a observé récemment la formation de rayons nouveaux, les **rayons magnéto-cathodiques** qui prennent naissance sur les électrodes placées dans un champ magnétique. Enfin, en 1908, deux savants allemands ont observé l'existence d'un rayonnement émis par l'anode; il faut pour cela que l'anode soit recouverte de sels métalliques facilement dissociables, comme le borax, le sel marin et surtout les iodures alcalins. Ce rayonnement jouit de toutes les propriétés des rayons cathodiques, mais il transporte de l'électricité positive.

Jusqu'à présent, la décharge à travers les gaz raréfiés nous a permis d'observer : la lumière cathodique violette; la colonne anodique qui possède une cohésion; les rayons cathodiques chargés négativement; les rayons canaux chargés positivement; les rayons de LÉNARD à la sortie d'une paroi d'aluminium; les rayons cathodiques de striction; les rayons magnéto-cathodiques; enfin les rayons anodiques. Il nous reste à étudier une propriété très importante des rayons cathodiques : c'est leur transformation en rayons X.

Les rayons X. — Les travaux de HERTZ et de LÉNARD sur les rayons cathodiques avaient suscité un vif intérêt dans le monde scientifique; cet intérêt s'accrut en 1895 lorsque, à la suite d'une découverte fortuite, s'ouvrit d'un seul coup un champ immense à de merveilleuses applications pratiques. ROENTGEN, professeur à l'université bavaroise de Wurtzbourg vit que si l'on enferme un tube de Crookes en activité

à l'intérieur d'une boîte opaque, un écran de platino-cyanure de baryum placé non loin de là s'illuminait. Il interposa entre la boîte et l'écran une planche de bois, une plaque d'aluminium de plus de 1 centimètre d'épaisseur, enfin un gros livre de 1 000 pages; l'écran s'illuminait encore. A un certain moment, plaçant par hasard sa main entre la boîte et l'écran il vit, avec surprise, se projeter sur l'écran, le squelette de sa main. Roentgen conclut qu'il existe des rayons qui, sortant du tube de Crookes en activité sont capables de traverser le bois, le papier, le carton, la chair, alors que les os sont traversés plus difficilement. A ces rayons qui venaient de manifester leur existence par un résultat si étrange, il donna le nom de **rayons X**. On les appelle aussi **rayons**

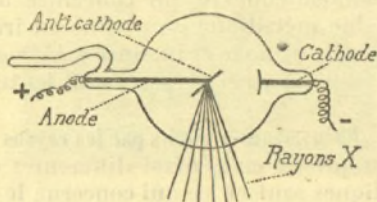


FIG. 63. — Tubes Focus pour les rayons X.

Roentgen. Ces rayons invisibles sortent exactement des endroits du tube de Crookes frappés par les rayons cathodiques; on peut, en effet, faire dévier les rayons cathodiques à l'intérieur du tube au moyen d'un aimant; le nouvel endroit qu'ils rencontrent devient un lieu d'émission de rayons X. M. PERRIN a montré par la suite que c'est aux points où une matière quelconque arrête les rayons cathodiques qu'il se forme des rayons de Roentgen. Il n'existe aucun corps solide qui, exposé au flux cathodique, ne puisse donner naissance aux rayons X; les liquides et les gaz se comportent de même. M. Roentgen a constaté que les divers corps ont, à ce point de vue, un rendement différent.

Si les rayons X et la lumière émise par les parois de verre d'un tube de Crookes ordinaire sont nettement différents, leur mode de production constitue deux phénomènes du même ordre; *l'émission des rayons X est une véritable luminescence invisible*, mais qui n'est pas nécessairement accompagnée d'une luminescence visible; le platine en émettant des rayons X n'émet aucune lumière visible. La couleur de la fluorescence des parois de l'ampoule dépend de la nature

du verre qui les constitue ; la plupart des ampoules ont une luminescence verdâtre. M. RADIGUET a obtenu des ampoules émettant une fluorescence bleue, blanche ; il en existe aussi à lueur rose. L'énergie employée à produire cette luminescence quelle que soit sa couleur, et qu'elle soit due au flux cathodique ou aux rayons X, est de l'énergie perdue ; le tube donnant le meilleur rendement serait évidemment un tube n'émettant aucune lumière visible quand il est en activité. On obtient un bon rendement en se servant d'une cathode concave qui concentre le faisceau sur une petite lame métallique en platine ou iridium (*anticathode*) jouant le rôle d'anode et inclinée à 45 degrés sur l'axe de la cathode. Les tubes ainsi préparés sont les tubes **Focus**.

Phénomènes produits par les rayons X. — Les rayons X ont des propriétés en général différentes de celles des rayons cathodiques sauf en ce qui concerne le mode de propagation et la faculté d'exciter la fluorescence.

1° *Les rayons X passent au travers de la plupart des corps opaques à la lumière ; c'est leur propriété la plus marquante.* Ils traversent le bois avec autant de facilité que la lumière franchit le verre, il en est de même avec l'aluminium. On peut photographier des corps enveloppés et enfermés dans une boîte en bois, l'argent enfermé dans un porte-monnaie, un clou enfoncé dans une planche, le compas à l'intérieur de la pochette, les os de la main, parce que les pièces d'argent arrêtent les rayons qui les frappent, plus fortement que le cuir, le clou en fer plus fortement que le bois, les os de la main plus fortement que la chair. La force de pénétration des rayons X varie avec le degré de raréfaction obtenu dans le tube, la résistance du tube, la distance séparant la cathode de l'anticathode, la différence du potentiel entre la cathode et l'anode (SWINTON, 1897).

2° *Les rayons X se propagent en ligne droite et ne subissent ni réflexion ni réfraction.* M. PERRIN a reconnu que cette propagation est plus rectiligne que celle de la lumière. Rien ne peut les déranger de leur route ; on n'a pas réussi non plus à les polariser. On a parlé d'une diffusion des rayons X, mais il semble que ce soit là le résultat d'une luminescence de l'air (G. SAGNAC.)

3° Les rayons X ne sont déviés ni par l'aimant ni par un corps électrisé, propriété qui les sépare des rayons cathodiques.

4° Les rayons X impressionnent les plaques photographiques et excitent la fluorescence. — Ce sont ces propriétés qu'ils ont fait découvrir. La photographie par rayons X n'a aucun rapport avec la photographie ordinaire : on n'obtient pas l'image des objets, mais simplement leur ombre portée. Plus exactement, on obtient sur le cliché des plages plus ou moins sombres, limitées par les contours apparents des corps plus ou moins transparents que le faisceau doit traverser. Les chairs sont très transparentes, les os le sont



FIG. 64. — Radiographie de la main.

beaucoup moins ; on peut donc obtenir avec les rayons X l'ombre du squelette et des corps étrangers. Nous verrons, dans la dernière conférence, l'importance que la médecine et la chirurgie ont tiré de ce fait. Les rayons X provoquent la luminescence non seulement du platinocyanure de baryum, mais encore du platinocyanure de potassium, tungstate de calcium, etc. ; le phénomène cesse avec la cause qui le produit. Le sulfure de zinc, au contraire, est phosphorescent, c'est-à-dire continue de luire, même quand il n'est plus frappé par les rayons X. Le verre, et en particulier le cristal, deviennent lumineux en dehors du tube de Crookes, ce qui a permis à M. RADIGUET de réaliser des expériences fort pittoresques qu'une personne non prévenue aurait pu attribuer à la magie ou au spiritisme. D'après M. CH. ED. GUILLAUME, la luminescence obtenue avec les rayons cathodiques serait due à ce que les rayons X se forment sur la substance elle-même, laquelle les absorberait et transformerait en radiations lumineuses ou en radiations ultra-violettes. Outre cette luminescence visible, les rayons X peuvent provoquer une luminescence invisible principalement quand ils frappent certains métaux (G. SAGNAC).

5° Les rayons X déchargent les corps électrisés : c'est une propriété d'un grand intérêt au point de vue physique; elle a fait l'objet d'un grand nombre de travaux. Il suffit de faire fonctionner un tube de Crookes à quelque distance d'un électroscope chargé pour voir les feuilles d'or se rapprocher. Pour que la décharge ait lieu, il n'est pas nécessaire que le faisceau de rayons X vienne frapper la surface du conducteur électrisé, il suffit qu'il rencontre les lignes de forces issues de ce corps (J. PERRIN). On admet que l'air traversé par les rayons de Röntgen a perdu son pouvoir isolant et est devenu lui-même conducteur. Cette conductibilité de l'air s'expliquerait de la façon suivante : les particules de l'air seraient en partie désagrégées par les rayons, il se formerait des ions de nature spéciale, il y aurait production du phénomène d'ionisation. Les ions libres à proximité d'un corps chargé peuvent alors s'unir à l'électricité que porte le corps, et déterminer ainsi sa décharge. Nous avons vu précédemment que, dans les gaz raréfiés, les chocs des ions ionisaient constamment de nouvelles quantités de gaz. Les rayons Röntgen constituent un autre procédé très énergique d'ionisation des gaz.

On explique facilement par cette hypothèse que la conductibilité du gaz se maintienne un certain temps après qu'on a supprimé le passage des rayons X; peu à peu les ions se recombinent, et la conductibilité disparaît. On explique de même que la conductibilité se produise non seulement là où passent les rayons, mais partout où peuvent se diffuser les ions séparés. Toutefois, pour que cette diffusion ait lieu, il est nécessaire qu'il y ait en présence des corps à des potentiels différents, poussant en sens inverses les ions chargés d'électricité de signes contraires; autrement, les ions se recombinent, puisque, chargés d'électricités contraires, ils s'attirent. Ces phénomènes et les expériences sur les rayons cathodiques nous amènent donc à considérer comme possible la décomposition des molécules d'un corps simple. Tandis que les ions qu'on rencontre dans l'électrolyse sont des morceaux de la molécule chimique, ici, au contraire, il s'agit d'une décomposition beaucoup plus profonde, pouvant se faire même sur la molécule d'un corps simple.

Nature des rayons X. — La nature des rayons découverts par

ROENTGEN n'est pas parfaitement connue; on est encore réduit aux hypothèses et celles-ci sont très nombreuses.

On n'a pu manquer d'être frappé d'une certaine *ressemblance entre les rayons X et les rayons ultra-violet*s : les uns comme les autres facilitent l'explosion de l'étincelle électrique et provoquent la décharge des corps électrisés. Pourtant, la lumière ultra-violette décharge surtout les corps électrisés négativement, alors que les rayons X agissent également sur l'électricité négative et sur l'électricité positive : de plus, la lumière ultra-violette est très réfrangible, alors que les rayons X ne le sont pas du tout. Il est vrai que la théorie d'Helmholtz sur la dispersion conduit à conclure que l'indice de réfraction, qui augmente d'abord avec le nombre de vibrations, décroît ensuite rapidement pour devenir voisin de l'unité : les rayons alors ne seraient plus déviés. Cette théorie repose sur une extrapolation peut-être trop hardie de la formule d'Helmholtz.

Nous n'indiquerons pas les différentes hypothèses émises pour expliquer les curieuses propriétés des rayons de Röntgen. Nous dirons seulement qu'on suppose que, dans le tube, le choc des électrons sur l'anticathode produit des ébranlements continuels de l'éther, et que ces chocs se propagent à travers celui-ci. Ces vibrations de l'éther qui se succèdent à des intervalles extrêmement courts, ébranlent les molécules de la couche sensible des plaques photographiques et les particules d'argent sont libérées lors du développement de la plaque; de même, quand ces impulsions successives de l'éther tombent sur un écran, elles excitent les particules du corps fluorescent, et celles-ci se mettant à vibrer émettent de la fluorescence. Cette hypothèse a le mérite d'expliquer que les rayons X ne sont déviés ni par le champ électrique, ni par le champ magnétique et qu'ils se propagent avec la vitesse de la lumière comme l'a vérifié expérimentalement M. BLONDLOT.

Nous avons vu qu'il existe plusieurs espèces de rayons cathodiques : ils doivent donc donner naissance à plusieurs espèces de rayons X. On a en effet constaté qu'une même substance peut être transparente pour les uns et opaque pour les autres. La constitution du faisceau de rayons X émis par un tube semble varier avec la fréquence des décharges et l'état de l'ampoule; elle ne serait pas la même aux divers moments du fonctionnement du tube. Une ampoule où le vide est peu

poussé émet des rayons facilement interceptés par des corps denses; ces rayons donnent, sur une plaque photographique, des images riches en contrastes; on dit que ce *tube* est *mou*. Une ampoule dans laquelle, au contraire, le vide a été poussé très loin émet des rayons qui pénètrent facilement au travers des corps épars, mais qui donnent peu de contrastes dans les images : on dit que ce *tube* est *dur*. Quand le vide est trop prononcé, la décharge ne passe pas.

Au bout d'un certain temps de fonctionnement les tubes ou ampoules subissent une augmentation de résistance due à ce que le gaz raréfié pénètre dans les parois du verre et dans les électrodes. Il faut alors chauffer légèrement le tube sur toute sa surface, mais surtout au voisinage de la cathode; quand le tube est devenu réfractaire à ce mode de traitement, on le chauffe dans de l'eau bouillante. On construit maintenant des ampoules qui permettent de régler, entre certaines limites, le degré de vide : ces *ampoules à régénération* sont basées sur ce fait que le palladium, chauffé au rouge, laisse échapper de l'hydrogène.

Radioscopie et radiographie. — C'est sur la propriété des rayons X de traverser les corps opaques que sont fondées les applications pratiques. On a vu précédemment comment on peut obtenir sur un écran fluorescent au platinocyanure de baryum l'ombre des objets opaques aux rayons X et, par suite, distinguer la forme des objets renfermés dans une boîte. C'est la **radioscopie**. Si l'on remplace l'écran par une plaque photographique, on obtiendra une photographie des objets invisibles à l'œil : c'est la **radiographie**.

Les applications des rayons X sont extrêmement nombreuses et au cours de la douzième conférence, nous aurons à nous occuper des merveilleux services que les rayons de Röntgen ont rendus en anatomie, en physiologie, en médecine, chirurgie, art vétérinaire. Nous nous contenterons ici d'indiquer les principales applications industrielles.

La radioscopie est utilisée dans les services des postes, des douanes, de l'octroi pour examiner rapidement le contenu des boîtes, des paquets; on a pu étudier aussi la structure intime des métaux et des alliages, déterminer le sexe des chrysalides à l'intérieur des cocons de soie, percer l'enveloppe

épaisse de momies entortillées dans leurs bandelettes, déterminer l'état de pureté de certains corps ou leur nature exacte par leur degré de transparence. La radiographie permet de distinguer le diamant de ses imitations faites avec des substances de grande opacité. L'alumine cristallisée qui, sous les noms de corindon, rubis, saphir, émeraude, topaze, constitue la plupart des pierres les plus recherchées après le diamant, se place, au point de vue de sa transparence aux rayons X, entre celui-ci et les imitations de ces diverses gemmes : la turquoise se distingue facilement de ses imitations ; les perles fines de petite taille sont moins opaques que les fausses de même dimension, mais la distinction est plus difficile à faire pour les grosses perles⁴.

Transformation des rayons X par la matière. — M. G. SAGNAC a montré que la luminescence des métaux frappés par les rayons X fournit une nouvelle série de radiations : **rayons secondaires S**. Les rayons secondaires sont caractérisés par une absorption par les différents corps bien plus grande que celle des rayons X : ils agissent comme ces derniers sur les écrans fluorescents, les plaques photographiques et les corps électrisés. L'air et les gaz, selon toutes probabilités, transforment les rayons X en des rayons secondaires d'une nature différente comme le font les corps solides. Le phénomène d'émission secondaire de l'air serait comparable à l'émission en tous sens qui prend naissance sur tout le trajet d'un faisceau lumineux dans un liquide renfermant une petite quantité de fluorescéine. Les rayons secondaires peuvent se transmettre à leur tour en **rayons tertiaires T**. On pressent que l'on pourra parvenir à remplir peu à peu l'intervalle entre les rayons X et les rayons ultra-violet.

Les rayons Becquerel. — Nous avons vu que le tube de Crookes, traversé par une décharge électrique, fournit trois sortes de rayons : les *rayons cathodiques*, formés par les électrons négatifs émis par la cathode à une vitesse considérable ; les *rayons canaux*, formés par des ions positifs et dont la vitesse est mille fois plus petite que celle des rayons cathodiques ; enfin, les *rayons Röntgen* dont la nature est encore peu connue. M. H. BECQUEREL chercha si les substances que la

lumière ordinaire rend phosphorescentes ou fluorescentes ne produisaient pas, elles aussi, des rayons X. En 1896, il découvrit que l'*uranium* et ses composés émettent spontanément, et d'une façon continue, des radiations ayant de grandes analogies avec les rayons cathodiques et les rayons de Röntgen. Ces nouveaux rayons peuvent traverser tous les corps solides, liquides et gazeux : ils impressionnent les plaques photographiques même au travers de ces corps, et ils rendent faiblement conducteurs les gaz qu'ils traversent. A ces rayons, il fut donné le nom de rayons Becquerel. En 1898, M. SCHMIDT et Mme CURIE observèrent séparément que le *thorium* jouit de propriétés analogues. D'une façon générale, on appelle substances radio-actives, celles qui produisent des rayons de cette nature. La propriété d'émettre ces rayons a pris le nom de radio-activité.

Phénomènes radio-actifs. — En étudiant ensuite certains minéraux, Mme Curie fut surprise de l'activité inattendue de quelques-uns d'entre eux, et en particulier de la pechblende, minéral d'oxyde d'uranium, qui se montrait quatre fois plus active que l'uranium lui-même. M. et Mme Curie pensèrent que ces minéraux devaient renfermer, en petites quantités, une matière fortement radio-active, différente de l'uranium, du thorium et des corps simples alors connus. En 1900, M. et Mme Curie parvenaient à isoler deux nouvelles substances un million de fois plus actives l'uranium : le *polonium*, voisin du bismuth, et le *radium*, voisin du baryum. Depuis cette époque, M. DEBIERNE a séparé l'*actinium*, substance fortement radio-active que l'on peut rapprocher du groupe des terres rares.

Parmi les différentes substances radio-actives dont il vient d'être question, le *radium*, à cause de la pureté avec laquelle on peut l'obtenir, présente les propriétés des rayons Becquerel, au degré le plus élevé. Ces rayons rendent conducteur l'air qu'ils traversent : ils l'ionisent. Si l'on charge un électroscope, il suffit d'approcher un tube de verre renfermant un dixième de milligramme de radium pour voir les feuilles, primitivement écartées, retomber à la verticale ; l'air devenu conducteur a mis la charge de l'électroscope à la terre. Les rayons émis par le radium, de même que les rayons Röntgen, impressionnent les plaques photographiques, même

au travers du papier, du bois, de feuilles métalliques, mais la différence de pénétration n'est pas aussi marquée que pour les rayons Röntgen : on ne pourrait obtenir le spectre de la main ; avec un porte-monnaie contenant une pièce et une clef on parvient à des épreuves assez satisfaisantes. Enfin les *écrans fluorescents deviennent lumineux sous l'action des sels de radium*, mais dans une proportion plus faible qu'avec les rayons Röntgen. Un effet particulier du radium, du thorium, de l'actinium est la propriété qu'ils possèdent de *rendre passagèrement radio-actifs les corps qui se trouvent à leur voisinage* : on dit qu'ils contiennent de la radio-activité induite. Il semble que le radium, le thorium, l'actinium émettent une matière qui a les allures d'un gaz et à laquelle M. RUTHERFORD a donné le nom d'*émanation*. L'activité induite des corps diminue peu à peu, tandis que le radium conserve, sans aucun changement appréciable, sa faculté d'émettre des radiations ⁵.

Les corps radio-actifs ont encore la faculté, par les rayons qu'ils émettent, de provoquer des actions chimiques : le phosphore blanc se transforme en phosphore rouge ; la topaze blanche devient rouge orangé ; le quartz noircit. Les recherches de BERTHELOT ⁶, continuées par son fils et M. BORDAS, ont montré que l'on peut reproduire certaines pierres précieuses comme le corindon vert ou émeraude d'Orient.

Ainsi, *les corps radio-actifs émettent spontanément des rayons présentant de grandes analogies avec ceux qui résultent du passage de la décharge électrique dans un gaz raréfié*. Examinons ces rayons d'un peu plus près.

Le rayonnement du radium. — L'étude physique de la radiation du radium a montré que cette radiation est assez compliquée. Les rayons émis par le radium se propagent en ligne droite, ne se réfléchissent pas et ne se réfractent pas ; ils forment un mélange hétérogène qui se scinde en trois groupes principaux sous l'action d'un champ magnétique. M. RUTHERFORD a désigné par α , β , γ , ces différents groupes.

Si l'on place dans une cavité creusée dans un bloc de plomb une petite quantité d'un sel de radium et qu'on en approche le pôle d'un barreau aimanté, les trois groupes de rayons se présenteront séparés et pourront être étudiés séparément.

Les rayons α (alpha) sont, sur la figure, déviés vers la gauche. Ils sont très vite absorbés par l'air à leur sortie, et se comportent dans un champ magnétique comme de petits projectiles animés d'une grande vitesse (10 000 km. par seconde) et chargés d'électricité positive. Les rayons α sont analogues, par conséquent, aux rayons-canaux. — Les rayons β (bêta) forment un deuxième groupe de rayons fortement déviés en

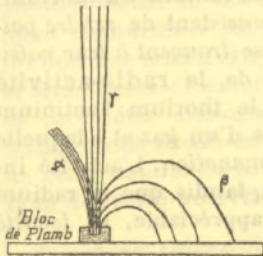


FIG. 65. — Dispersion des rayons du radium par le champ magnétique (le pôle nord de l'aimant est en avant du plan de la figure).

sens inverse des premiers. Ils se comportent comme des projectiles chargés d'électricité négative et animés d'une vitesse pouvant atteindre les 9/10 de celle de la lumière (KAUFMANN); ces projectiles ou électrons ont une masse environ 2000 fois plus petite que celle d'un atome d'hydrogène, alors que la masse des projectiles constituant les rayons α était de l'ordre de grandeur d'un atome d'hydrogène. Il en résulte que les rayons β sont beaucoup plus pénétrants que les rayons α , et que les rayons β sont analogues aux rayons cathodiques. — Les rayons γ (gamma) ne sont pas déviés par l'aimant; ils traversent les corps sous une grande épaisseur et sont les plus pénétrants des trois sortes de rayons. Ce sont eux qui forment la plus faible partie du rayonnement total, alors que la majeure partie est formée par les rayons α . L'étude des rayons γ les a montrés analogues aux rayons de Röntgen.

Le radium dégage constamment de l'énergie par les trois sortes de rayons α , β , γ et par l'émanation; cette quantité d'énergie est plus grande qu'on ne l'avait cru tout d'abord. CURIE et LABORDE ont découvert que le radium émet constamment de la chaleur; ce dégagement atteint 118 petites calories à l'heure pour un gramme de bromure de radium (SCHWEIDLER et HERS, 1909.)

Le fait qu'un morceau de radium émet constamment des électrons positifs et des électrons négatifs a été le point de départ d'une nouvelle théorie sur la constitution de la matière.

Puisque les électrons sont émis constamment, il faut admettre qu'ils existent dans ce corps et que les *atomes* ne sont, en réalité, que des réunions d'électrons disposés de manières différentes. La connaissance des phénomènes de radio-activité a non seulement ajouté un merveilleux chapitre à la Physique moderne, mais encore, elle est venue ébranler les fondements mêmes de la Chimie. L'atome, que la Chimie a considéré jusqu'ici comme l'unité de matière non divisible, ne serait en réalité, qu'un corps composé. Les substances radio-actives se présentent alors comme des corps dont les électrons sont dans un état instable, en d'autres termes dont les atomes sont en pleine période de décomposition. Dans cette hypothèse, les électrons négatifs qui constituent les rayons β sont formés de particules contenues dans l'atome de radium, tandis que les rayons α sont constitués par de plus grosses particules, mélange d'électrons positifs et négatifs ⁷.

Nous avons parlé de l'émanation du radium et nous avons dit qu'il est commode de l'assimiler à un gaz, mais à un gaz instable qui disparaît au bout d'une certain temps du réservoir scellé qui le renferme. Nous ne chercherons pas comment s'est transformée cette émanation ; nous nous contenterons de dire que les recherches récentes de MM. RAMSAY et SOBBY ont montré que la destruction de l'émanation est accompagnée de la production d'une petite quantité d'hélium. Il y aurait ainsi transmutation des corps simples ⁸. Ce résultat si surprenant est cependant en accord avec le fait que l'hélium se trouve seulement dans les minéraux contenant de l'uranium et du radium, et se dégage de ces minéraux quand on les chauffe.

On a reconnu la présence de l'émanation de radium dans les gaz émanés de certaines sources naturelles (J. THOMSON, 1902) ; depuis cette époque toutes les eaux minérales ont été analysées et dans toutes on a trouvé de l'hélium : elles sont presque toutes radio-actives, mais très différemment, et celles dont la radio-activité est le plus accusée sont précisément celles que la thérapeutique regarde comme les plus efficaces. Peut-être est-ce ainsi qu'il faut expliquer que certaines eaux minérales, très actives et souvent dangereuses à la source, perdent leurs propriétés quand elles sont consommées au loin, alors que les dosages chimiques ne révèlent aucune

modification dans la composition du liquide. L'eau de mer est aussi radio-active, et peut-être faut-il expliquer les bien-faisants effets d'une saison passée à la mer ou dans les villes d'eaux, à l'énergie que nous apportent les quantités infinitésimales d'émanation de radium que nous incorporons à notre organisme.

Hypothèses sur les causes de la radio-activité. — D'après ce qui précède, on voit que le *radium et les corps radio-actifs constituent des sources d'énergie* se révélant à nous sous forme de rayonnement de Becquerel, de production d'émanation, d'énergie chimique et lumineuse et de dégagement continu de chaleur.

D'où peut provenir cette énergie ? On peut supposer que le radium est un élément en voie d'évolution, que ses atomes se transforment lentement mais d'une façon continue et que l'énergie perçue par nous est l'énergie sans doute considérable mise en jeu dans la transformation des atomes. On peut supposer aussi qu'il existe dans l'espace des rayonnements encore inconnus et inaccessibles à nos sens. Le radium serait capable d'absorber l'énergie de ces rayons hypothétiques et de les transformer en énergie radio-active. Ces deux hypothèses ne sont peut-être pas incompatibles. En tout cas, l'expérience seule nous donnera, sans doute, un jour, la cause de ces phénomènes remarquables. On le voit, les phénomènes électriques que nous ignorons sont beaucoup plus nombreux que ceux que nos connaissances nous ont déjà permis de découvrir.

Ionisation de l'air. — En étudiant les phénomènes électriques de l'atmosphère, nous avons déjà fait intervenir l'ionisation de la couche d'air atmosphérique qui entoure la Terre sous l'action du Soleil (conférence I). Le rôle direct de l'électrisation solaire vis-à-vis de la Terre était resté à peu près ignoré jusqu'à ces dernières années ; mais les merveilleuses découvertes des rayons Röntgen, de la radio-activité et de l'ionisation de la matière, mirent en lumière le rôle essentiel que l'Électricité joue dans les forces de la Nature. La science d'aujourd'hui va même jusqu'à admettre une connexion plus intime entre l'astre de vie et les planètes ; elle *croit* à

un échange possible de matière ionisée entre les mondes lointains. Les ions franchiraient les espaces interplanétaires et se précipiteraient du Soleil vers les planètes sous la forme cathodique.

Les ions atmosphériques apparaissent comme des facteurs de la *condensation de la vapeur d'eau atmosphérique*. D'autre part, les rayons cathodiques permettent d'expliquer, d'une façon simple, les particularités présentées par les *aurores boréales*. En effet, quand un faisceau de rayons cathodiques est oblique par rapport aux lignes de forces d'un champ magnétique puissant, ce faisceau s'enroule en hélice autour des lignes de force du champ, s'approche de l'un des pôles et rebrousse chemin vers l'autre pôle en formant une série de zig-zags. Vue de son centre, cette nappe cathodique présente tout à fait l'aspect des *aurores boréales en éventail*. Dans des champs très puissants, on obtient l'aspect des *aurores en draperie*. Beaucoup de physiciens admettent aujourd'hui que ces aurores sont dues à des rayons cathodiques provenant du Soleil et pour lesquels les nuages chargés de cristaux de glace (cirrus) qui accompagnent toujours ces aurores, jouent le rôle de cathodes.

Les phénomènes de luminescence et l'éclairage. — Les phénomènes de phosphorescence nous ont montré que l'énergie chimique peut se transformer en énergie rayonnante correspondant à des ondulations visibles, sans que se produise en même temps, une quantité notable de radiations à plus longue période. Un gaz raréfié renfermé dans un tube de Geissler traversé par un courant, ou dans un tube de Tesla traversé par des courants de haute fréquence, s'illumine fortement, mais sans qu'on puisse utiliser cette lueur comme mode d'éclairage. Ce n'est qu'avec l'arc au mercure que les phénomènes de luminescence ont pu être employés pour l'éclairage.

Arons, en 1892, avait construit une *lampe à vapeur de mercure* présentant des électrodes en mercure et fournissant une lumière particulièrement riche en rayons ultra-violets ; en 1901, elle fut modifiée si heureusement par M. COOPER HEWITT qu'elle put entrer dans la pratique de l'éclairage. Cette lampe est constituée par un tube de 20 millimètres de

diamètre et de 1 m. 50 de longueur, complètement vide d'air, mais dans lequel on a laissé une certaine quantité de mercure ; dans la position normale, qui est inclinée, le mercure recouvre la cathode ; l'anode, qui est en fer ou en graphite, est placée à l'autre extrémité du tube. Quand on veut allumer la lampe, il suffit de la faire basculer après avoir réuni ses électrodes aux prises du courant : le mercure réunit les deux électrodes et ferme le courant ; quand la lampe revient à sa position inclinée, le mercure retourne dans l'ampoule cathodique, pendant que la vapeur de mercure s'illumine d'une lueur continue et très éclairante. La cathode est très chaude, aussi le mercure s'y vaporise-t-il constamment pour aller se condenser sur les autres régions ; la surface du mercure joue toujours le rôle d'une surface cathodique en état de désagrégation. Cette lampe ne peut fonctionner sur le courant alternatif, et le courant continu doit entrer par l'électrode en fer. Une lampe de 700 bougies consomme 3, 5 ampères sous 110 volts, ce qui correspond à une dépense de 0 watt 55 par bougie. C'est donc une lampe très économique ; de plus elle ne nécessite aucun entretien, sa durée moyenne est de 2 000 à 5 000 h. ; certaines lampes même fonctionnent pendant 15 000 heures. La lumière émise est bleu verdâtre et très puissante, mais l'absence de radiations rouges lui donne une teinte blafarde désagréable. Tout le monde connaît aujourd'hui ces lampes que l'on utilise pour l'éclairage des chantiers, des garages d'automobiles, des devantures de magasins, pour la décoration et la réclame lumineuse. On a cherché à enrichir cette lumière de quelques radiations rouges, en entourant le tube d'une gaze colorée. A l'intérieur des tubes, l'arc de vapeur de mercure donne lieu à un phénomène identique à celui de la décharge éclairante des tubes de Geissler.

L'une des principales supériorités de l'arc à mercure sur l'arc ordinaire est sa richesse en rayons à courte longueur d'onde ou rayons ultra-violet^s. Mais le verre arrête les rayons ultra-violet^s et on a dû le remplacer par du quartz fondu qui les laisse passer. La *lampe uviol* (ultra-violet), formée d'un verre spécial fabriqué à Iéna, est spécialement construite pour la production de ces radiations ; elle est utilisée en hygiène, en thérapeutique, dans l'industrie. La *lampe*

quartz, fabriquée à Berlin, présente l'aspect d'une lampe à arc ordinaire ; grâce à son excellent rendement, elle commence à concurrencer les lampes à arc même pour l'éclairage ordinaire. Elle affecte une forme plus commode que les longs tubes de Cooper Hewitt, et la lumière se rapproche du blanc-jaunâtre. La puissance lumineuse est très considérable étant donnée la température fort élevée (5 000 degrés) qui règne dans l'intérieur du tube ; on arrive à plus de 3 000 bougies pour une intensité de 3, 5 ampères à 220 volts ; elle n'exige que 3/10 watts par bougie et dépasse ainsi de beaucoup, sous le rapport de l'économie de consommation d'énergie, les lampes à arc flamme eux-mêmes.

Le rayonnement ultra-violet. — Les propriétés électriques des radiations ultra-violettes, connues sous le nom de **phénomène photo-électrique** ou **effet Hertz**, ont été découvertes par HERTZ en 1887. Si l'on fait tomber un faisceau de lumière ultra-violette sur une plaque de métal poli, bien isolée et chargée négativement, on constate que la charge négative se dissipe rapidement. Il y a donc un rapprochement à faire entre les rayons ultra-violets et les rayons cathodiques ; *les rayons ultra-violets déchargent les corps électrisés négativement, ionisent les milieux qu'ils traversent, rendent luminescentes certaines substances et détruisent, d'une façon intense, les cellules animales et végétales.*

Les rayons ultra-violets ont des **propriétés microbicides** très nettes et très importantes que l'on utilise depuis quelques années pour la *stérilisation des liquides*. Une installation récente faite à Marseille permet de stériliser 25 mètres cubes à l'heure d'une eau contenant 50 000 bacilles-coli par litre ; une lampe Cooper Hewitt est logée dans une rigole en quartz et émerge légèrement. La stérilisation revient à un quart de centime par mètre cube. M. BILLON-DAGUERRE emploie des tubes en quartz contenant certains gaz raréfiés qu'il illumine avec un courant induit de faible intensité primaire ; il obtient ainsi une action microbicide considérablement plus grande que celle des lampes à mercure et pour une énergie moindre. La stérilisation du lait par les rayons ultra-violets est préférable à la pasteurisation, car elle ne précipite pas les carbono-phosphates qui sont un

des éléments nutritifs du lait. La destruction des bacilles tuberculeux par les radiations ultra-violettes a été démontrée par Mmes HENRI et BARONI (1910) après expériences faites sur 310 cobayes. Les rayons ultra-violets produisent des modifications chimiques : le phosphore blanc est converti en phosphore rouge, le soufre cristallisé en soufre insoluble, le sucre candi en lévulose et dextrose. On les utilise depuis peu de temps dans une usine allemande, à Langelsheim, près de Goslar, pour rendre siccative et blanchir l'huile de lin employée en peinture, ainsi que pour préparer certains vernis à base d'huile de lin. En 1911, MM. DANIEL BERTHELOT et H. GAUDUCHON ont fait entrevoir la possibilité d'utiliser les rayons ultra-violets pour fabriquer les engrais agricoles, et reconnu que ces rayons accélèrent les réactions chimiques qui tendent à se produire spontanément. Ils ont appliqué ces notions à l'examen des poudres sans fumée modernes qui représentent des produits colloïdaux en voie de décomposition lente. En thérapeutique, les rayons ultra-violets sont employés pour combattre les maladies de peau ; comme traitement général sous forme de bain de lumière, ils contribuent puissamment à la guérison de certaines maladies consomptives. Ils produisent des effets désastreux sur les yeux ; le verre ordinaire ne retient que les rayons ultra-violets les moins dangereux ; aussi fabrique-t-on des verres protecteurs contre les rayons ultra-violets ¹⁰.

La lumière de Moore. — La lumière obtenue par le passage de l'électricité dans un tube à gaz raréfié a été désignée du nom de lumière de Moore. Depuis 1910, elle est employée en Amérique, à l'Hôtel central des Postes de New-York, à Madison Square et dans de grands magasins ; à Berlin, elle a fait son apparition au Palais de glace ; à Paris, elle a été appliquée à l'éclairage des Galeries Lafayette. Le tube de Moore est un tube de verre de 30 à 50 mètres de longueur, disposé au plafond ; les électrodes sont des cylindres de graphite connectés au secondaire d'un transformateur à haute tension. La couleur de la lumière dépend du gaz qui le remplit ; le gaz carbonique donne une lumière blanche, l'azote une lumière jaune orangé. La lumière est diffuse et sans ombre. L'économie de la lumière de Moore est mani-

festé ; à Berlin, par exemple, on a obtenu avec 2 940 watts le même résultat qu'avec 3 520 watts au moyen d'arcs ou 6 000 watts au moyen de lampes à filaments métalliques ; de plus la lumière de Moore est particulièrement agréable. Elle n'est encore réservée qu'aux éclairages de luxe ¹¹.

Cette lumière qui, par usurpation, porte le nom de **lumière froide**, a été appliquée par M. DUSSAUD à la projection, au cinématographe, à la photographie des couleurs (1910) ; elle sera d'un précieux secours aux chirurgiens et aux médecins pour l'exploration du corps humain, aux micrographes pour l'examen des préparations délicates et d'une façon générale dans tous les cas où, ayant besoin d'un éclairage intense, on doit cependant éviter une élévation même minime de la température ambiante.

La luminescence du néon. — L'éclairage par luminescence vient d'acquiescer, comme on l'a vu, une place restreinte encore, mais pleine de promesses. Tandis que la lampe à vapeur de mercure convient surtout pour les hangars, les ateliers, les chantiers, les tubes à azote donnent une lumière douce, rosée, d'un bel effet pour les grands magasins et les salons. Le néon, gaz de l'air, découvert par sir WILLIAM RAMSAY en 1900, possède des propriétés remarquables au point de vue de la luminescence. M. G. CLAUDE a proposé un procédé d'éclairage au néon qui a donné d'excellents résultats ; la lumière émise est riche en radiations rouges et donne aux objets et aux personnes une teinte chaude attrayante. Les Parisiens ont pu juger du magnifique effet produit par cette lumière, lors du Salon de l'Automobile de 1910 au Grand Palais des Champs-Élysées ; quatre tubes de 36 mètres de longueur avaient été installés sous les colonnades de la vaste façade et éclairaient en rouge le bas des colonnes, tandis que les tubes Cooper Hewitt en éclairaient en vert le haut. La consommation est de 0,6 watt par bougie ¹².

En résumé, cette conférence nous a fait connaître, par l'étude du passage de la décharge électrique à travers les gaz, des phénomènes de la plus grande importance dont nous n'avons pu faire qu'entrevoir, aussi bien au point de vue théorique que pratique, la considérable portée. Leur interprétation conduit à la conception de la structure corpusculaire

de l'Électricité et à une explication nouvelle et féconde de la constitution de la matière.

NOTES DE LA NEUVIÈME CONFÉRENCE

1. Dans la bobine de Ruhmkorff, le courant changeant de sens deux fois pour chaque interruption du courant primaire de la bobine, chaque électrode du tube est alternativement anode et cathode, ce qui empêche une vision nette des phénomènes.

2. Nous verrons dans la suite de cette conférence que M. MOORE a utilisé le même phénomène pour un nouveau mode d'éclairage qu'il a surnommé la « lumière froide ».

3. Certaines substances soumises à l'action de radiations convenables qu'elles absorbent deviennent de véritables sources de lumière. Si, après l'extinction de la lumière excitatrice l'éclat ne persiste qu'une fraction de seconde, la substance est dite *fluorescente* : s'il est plus long, elle est dite *phosphorescente*. On désigne indistinctement la phosphorescence et la fluorescence, par un seul terme : la *luminescence*.

4. La radiographie intervient aussi dans la recherche et la culture des huîtres perlières afin de reconnaître, sans les détruire, celles qui renferment une perle ayant une valeur commerciale; les huîtres à perles trop petites sont mises dans des parcs spéciaux jusqu'à ce que la perle ait atteint la grosseur voulue.

5. Un gramme de radium dégage par seconde 30×10^{-6} millimètres cubes d'émanation : soit en un an $1/1\ 000$ de mètre cube. Un atome de radium semble rester actif plus de mille ans.

6. Berthelot (Marcellin), chimiste français, membre de l'Académie de Médecine, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, fut inspecteur général de l'Enseignement supérieur et ministre de l'Instruction publique (1887). A laissé un très grand nombre de travaux se rapportant, les uns, à la synthèse des composés organiques, les autres à la thermochimie.

7. On peut remarquer que ce sont les atomes les plus gros, les plus lourds qui sont précisément les corps instables, de même que, dans la théorie du système solaire de KANT et de LAPLACE, ce sont les corps célestes les plus lourds qui, ne pouvant plus maintenir leur cohésion, se scindent le plus facilement en parties légères (satellites, lunes).

8. On connaît déjà plusieurs séries de transmutations dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici. Ramsay, en 1908, a annoncé qu'en faisant agir l'émanation sur l'eau distillée, on obtient le *néon* (gaz de l'air), tandis qu'en la faisant agir sur une dissolution de sel de cuivre, il a vu

se former le potassium, le sodium, le lithium; ces corps seraient des produits de la désintégration du cuivre.

9. Quand on fait tomber un spectre sur une plaque photographique, on reconnaît que l'action chimique de la lumière va en croissant du rouge au violet; à peu près nulle dans le rouge (de là l'emploi du verre rouge en photographie), elle est maximum dans le violet et l'action se produit au delà du violet: il y a donc des rayons que notre œil ne perçoit pas et qui impressionnent les plaques photographiques, ce sont les *rayons ultra-violet*s. La *longueur d'onde* est l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant une vibration entière.

10. Des rayons ultra-violetes accompagnent la lumière solaire. Ce sont eux qui produisent les *coups de soleil*. La lumière solaire diffuse perd ses rayons ultra-violetes dans les réflexions successives qu'elle subit.

11. Le vide des tubes augmente quand ceux-ci sont en service depuis quelque temps; on dit qu'ils deviennent *durs*. Il faut alors des potentiels plus élevés pour faire passer la décharge. On a cherché un système automatique permettant la rentrée des gaz de manière à maintenir la pression intérieure constante.

12. Pour un tube de 6 mètres de longueur, 45 millimètres de diamètre et des électrodes métalliques, il faut une différence de potentiel de 1 000 volts (il en faudrait 3 000 pour un tube à azote); intensité normale du courant 9/10 d'ampère; puissance consommée 850 watts; intensité lumineuse 220 bougies par mètre. M. Claude a fait fonctionner un tube pendant soixante heures sans le recharger, tandis que le tube Moore doit « respirer » deux fois par minute au moyen de la soupape.



DIXIÈME CONFÉRENCE

LA PENSÉE, LA PAROLE ET L'IMAGE A TRAVERS L'ESPACE

TÉLÉGRAPHIE, TÉLÉPHONIE, TÉLÉVISION, TÉLÉMÉCANIQUE

I. L'Electricité et la transmission de la pensée. — Télégraphes électriques et télégraphes imprimeurs. — Télégraphie multiple et télégraphie simultanée. — Les lignes télégraphiques et leurs accessoires. — La Télégraphie sous-marine. — Le Télégraphe dans le monde. — II. La transmission de la parole. — Télégraphie électromagnétique. — Les transmissions lointaines. — Microphones et récepteurs. — Les communications téléphoniques. — Téléphonie automatique. — Téléphones haut-parleurs et théâtrophones. — Le télégraphone et l'arc chantant. — III. La transmission des images par l'électricité. — Photographie des paroles.

I. L'Electricité et la transmission de la Pensée. — Le besoin de communiquer au loin sa pensée existe depuis qu'il y a des hommes. Aux cris de nos premiers ancêtres succédèrent les signaux de feux allumés sur des tours ou sur des montagnes. C'est ainsi que les Chinois, avant l'ère chrétienne, signalaient les mouvements des hordes tartares, que les Grecs annoncèrent la prise de Troie, que les Carthaginois communiquaient avec la Sicile. De siècle en siècle, ces moyens primitifs furent perfectionnés, mais il faut arriver à la fin du dix-huitième siècle pour trouver un système de télégraphie capable de rendre de réels services. C'est en 1791 que le Français CLAUDE CHAPPE imagina le télégraphe aérien qui fut adopté en France en 1793 et se répandit bientôt dans toute l'Europe¹; mais la transmis-

sion était longue et impossible en temps de brume ou de pluie.

A cette époque, on ne connaissait encore que les propriétés statiques de l'Électricité. Or ces propriétés se manifestent sous des tensions très élevées qui rendaient illusoire toutes les précautions prises pour isoler du sol les lignes aériennes, si bien que toute transmission devenait impossible au delà de quelques mètres. LESAGE, de Genève, avait imaginé, en 1774, un télégraphe électrique comprenant 24 fils affectés chacun à une lettre de l'alphabet ; dans ces fils on lançait la décharge d'une machine électrique ; les mouvements des balles de bureau placées aux extrémités indiquaient les lettres transmises. Après que VOLTA eut trouvé, avec sa pile, le moyen de produire l'électricité à basse tension, on vit apparaître, à Munich, le télégraphe SOMMERING où les balles de bureau précédentes étaient remplacées par des voltamètres. En 1820, OERSTEDT découvrait l'électromagnétisme et AMPÈRE entrevit aussitôt la possibilité de transmettre des signaux par les mouvements de l'aiguille aimantée ; il remplaça donc les voltamètres par des aiguilles aimantées qui déviaient lors du passage du courant. SCHILLING, à Saint-Petersbourg (1832), en combinant les indications des aiguilles arriva à n'en conserver que cinq, tandis que STEINHEIL, à Munich (1837), adaptait à l'aiguille d'un galvanomètre une plume chargée d'encre, et l'obligeait à tracer sur une bande de papier des traits différents suivant la direction du courant. Ce télégraphe ne fut pas exploité, mais il fit faire à son auteur une découverte capitale ; c'est la possibilité de supprimer l'un des fils et de compléter le circuit par la terre. Dès que le physicien ARAGO eut découvert l'aimantation temporaire du fer par le courant, on s'aperçut que l'électro-aimant permet de transmettre facilement des signaux à une grande distance. C'est à SAMUEL MORSE², de Charlestown, qu'est due l'invention du premier télégraphe fondé sur les mouvements de l'armature de l'électro-aimant. Son appareil est encore employé de nos jours sur les lignes d'importance secondaire. L'idée de Steinheil n'a pas été abandonnée et nous la retrouverons dans les télégraphes sous-marins.

Le principe du télégraphe électrique³ est extrêmement simple. Supposons un électro-aimant placé à une petite

distance d'une armature mobile ; chaque fois que le courant passera dans l'électro-aimant, l'armature sera attirée et elle reviendra à sa position première, grâce à un ressort antagoniste, lorsque le courant sera interrompu. Il est donc facile d'imprimer un mouvement de va-et-vient à cette armature placée à distance ; et ces mouvements alternatifs, convenablement combinés en durée et en nombre, donneront naissance à une série de signaux conventionnels à l'aide desquels on pourra transmettre la pensée. Tout télégraphe électrique comprend donc : 1° la *pile* qui engendre le courant ; 2° le *fil de ligne*, qui le transmet d'une station à l'autre ; 3° le *manipulateur*, qui règle les intermittences du courant à la station de départ ; 4° le *récepteur*, qui enregistre les dépêches à la station d'arrivée.

Les télégraphes électriques de Bréguet et de Morse. — Le premier télégraphe en usage sur les lignes françaises fut le **télégraphe à cadran de Bréguet**, imaginé en 1852. On le trouve encore aujourd'hui dans les bureaux de la Compagnie d'Orléans. Le manipulateur comprend une manette que l'on déplace devant un cadran présentant les lettres de l'alphabet et possédant une encoche pour chaque lettre. Au moyen d'un électro-aimant, l'aiguille du récepteur reproduit les mêmes mouvements et s'arrête devant la lettre correspondante. Ce télégraphe ne nécessite aucun apprentissage ; c'est la simplicité de sa manœuvre qui l'a fait conserver dans les gares et certains postes de block-system. Son inconvénient est de ne laisser aucune trace des dépêches échangées.

Dans le **télégraphe écrivant de Morse**, au contraire, on les enregistre au fur et à mesure de leur réception sur une bande étroite de papier qu'un mouvement d'horlogerie entraîne automatiquement. Le *manipulateur* est formé d'un levier métallique communiquant constamment avec la ligne ; quand on appuie sur une poignée isolante dont il est muni, le courant passe dans la ligne aussi longtemps que le contact est établi. Le *récepteur* comprend un électro relié à la ligne ; après l'avoir traversé, le courant va se perdre dans le sol qui joue ainsi le rôle de fil de retour. Quand le courant passe, l'électro attire une armature fixée à un levier dont l'extrémité appuie une bande de papier contre une petite roue im-

bibée d'encre ; on obtient un point ou un trait suivant la durée du courant, c'est-à-dire suivant qu'au poste transmetteur le courant établi a été bref ou long. Une combinaison de

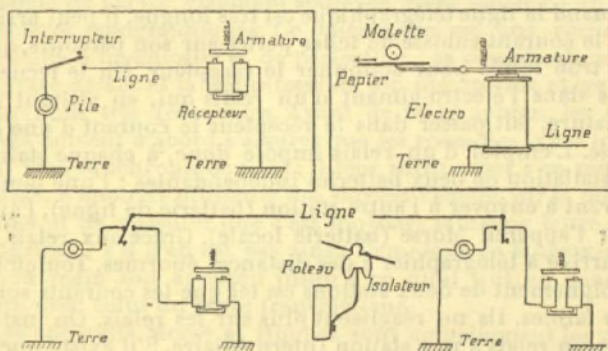


FIG. 66. — Principe de la télégraphie électrique.

FIG. 67. — Schéma d'un récepteur Morse.

FIG. 68. — Disposition schématique d'un poste double télégraphique.

points et de traits fournit les lettres, les chiffres et les différents signes dont on a besoin.

Chaque poste télégraphique doit pouvoir transmettre et recevoir ; il doit donc posséder à la fois un manipulateur et un récepteur ; au repos, le manipulateur correspond, d'une part, avec la ligne et, d'autre part, avec le récepteur. Dans les bureaux peu importants, on utilise comme pile des groupes d'éléments Leclanché ; dans les autres, des éléments Daniell ou Callaud. Aujourd'hui, on tend de plus en plus à remplacer les piles par des accumulateurs quand on est à proximité d'une usine électrique.

L'appareil Morse paraît exiger une longue expérience ; les télégraphistes qui l'emploient journellement ne tardent pas à en acquérir une telle habitude qu'il leur suffit d'écouter les mouvements du levier pour comprendre la dépêche *au son*. Dans certains bureaux, on a supprimé le système inscripteur. Les signaux sont définis par le bruit que fait le levier quand il heurte ses vis de butée ; ce bruit est renforcé par une sorte

de caisse sonore. Par contre, la *réception au son* est très fatigante, car elle exige du télégraphiste une attention soutenue ; de plus, elle présente l'inconvénient de ne laisser aucune trace matérielle des transmissions.

Quand la ligne télégraphique est très longue, il peut arriver que le courant subisse de telles pertes sur son parcours, qu'il soit trop faible pour actionner le récepteur. On le recueille alors dans l'électro-aimant d'un *relais* qui, en attirant son armature, fait passer dans le récepteur le courant d'une *pile locale*. L'emploi d'un relais impose donc, à chaque station, l'installation de deux batteries indépendantes : l'une pour le courant à envoyer à l'autre station (batterie de ligne), l'autre pour l'appareil Morse (batterie locale). Grâce aux relais, on est arrivé à télégraphier à des distances énormes. Toutefois si l'éloignement de deux stations est tel que les courants soient trop faibles, ils ne réagissent plus sur les relais. On installe alors un relais à une station intermédiaire. S'il existe une ou plusieurs stations transmettrices, on peut, automatiquement et sans l'intervention d'aucun employé, communiquer télégraphiquement aux distances les plus éloignées, à travers tout un continent par exemple.

Le Télégraphe imprimeur de Hughes. — Le système Morse est le meilleur des télégraphes au point de vue de la simplicité et de la solidité, mais ce n'est pas le plus rapide. Si, au départ du télégramme, on est déjà obligé de faire en moyenne trois signes par lettre, à l'arrivée il faut une certaine habitude. On a cherché à obtenir une lettre pour chaque émission de courant : ce résultat est atteint avec les **télégraphes-imprimeurs** dont le plus connu est celui du professeur américain HUGHES. Le mécanisme de ce télégraphe est très compliqué, mais le principe est simple. Le manipulateur est une sorte de clavier portant les lettres de l'alphabet gravées sur ses touches ; le récepteur est une roue horizontale portant les mêmes lettres gravées sur son pourtour et enduite d'encre grasse (*roue des types*). Quand on presse sur les touches du manipulateur, un électro-aimant presse une bande de papier contre la roue des types ; si les deux appareils sont bien réglés, ce sont les mêmes lettres qui se trouvent imprimées. Les bandes sont alors découpées, collées sur une feuille de papier et li-

vrées ainsi au public. La roue des types tourne à raison de 100 à 120 tours par minute ; un régulateur vertical à force centrifuge règle la vitesse ; cette roue ne s'arrête pas lorsque la bande de papier, vivement soulevée, vient toucher l'un des caractères typographiques. Ce télégraphe est une véritable merveille d'ingéniosité et de perfection ; sa complication est un grave défaut et la délicatesse de son mécanisme exige des réparations très fréquentes. Avant de télégraphier, les employés doivent d'abord s'assurer que les roues des types tournent bien synchroniquement : il leur suffit, pour s'en rendre compte, d'appuyer plusieurs fois successivement sur la même touche et de s'assurer que c'est toujours la même lettre qui s'imprime ; s'il n'en est pas ainsi, l'employé de la deuxième station règle son appareil jusqu'à ce qu'il soit en concordance avec celui du poste transmetteur.

Les appareils Morse et Hughes sont actuellement les plus employés dans tous les pays. Les dispositifs qui permettent de relier les différentes stations entre elles constituent une question très importante et très spéciale dans la pratique.

La Télégraphie multiple. — Le télégraphe Morse est un appareil très simple et très robuste, mais qui ne peut guère transmettre qu'une quinzaine de mots à la minute : l'appareil imprimant de Hughes ne nécessitant qu'un signal par lettre, fournit facilement un travail double, soit trente mots à la minute. Mais le nombre des dépêches à expédier journellement entre Paris et une grande ville comme Lyon, Marseille, Bordeaux est considérable et dépasse de beaucoup ce que peut fournir un appareil unique. On a bien essayé de doubler et de tripler les fils de transmission, mais c'était là une mauvaise solution au point de vue économique car l'établissement d'une ligne est toujours une opération fort coûteuse. LORD KELVIN a établi une formule qui permet de calculer, pour une ligne donnée, le temps strictement nécessaire à la transmission d'un signal ; pour la ligne Paris-Lyon, c'est environ $1/30$ de seconde ; or l'employé ne peut transmettre plus de cinq signaux par seconde, donc le fil est inutilisé pendant les $5/6$ du temps. On a cherché à mieux employer le fil de ligne, et c'est ce qui a conduit à l'invention des appareils à transmissions multiples : tel le télégraphe Baudot employé en

France où il dessert les longues lignes aériennes du bureau central de Paris.

Cet appareil permet de relier, en même temps, à la même ligne, plusieurs appareils récepteurs, deux, trois, quatre, et même plus. Le télégraphe Baudot reproduit les signes en caractères ordinaires; il appartient à la classe des typotélégraphes. A chaque poste tourne synchroniquement un appareil essentiel : le *répartiteur*, qui met en communication, successivement, les différents appareils de l'une des stations avec les appareils correspondants de la seconde station; comme l'arbre du répartiteur fait 3 tours par seconde, chacune des 4 paires d'appareils peut télégraphier 3 fois par seconde. Un métronome indique au télégraphiste de chaque appareil le moment où il doit envoyer le signe; la transmission des lettres se fait au moyen de 5 signes permettant de réaliser 31 combinaisons et, par suite, de reproduire les lettres de l'alphabet, les chiffres et les signes ⁴. Théoriquement, chaque appareil peut transmettre 180 lettres à la minute, soit 720 lettres avec les quatre appareils; en pratique, il ne faut pas compter sur plus de 400 lettres avec un Baudot quadruple et 800 avec un Baudot octuple.

La Télégraphie simultanée. — Continuellement se fait sentir le besoin d'une rapidité de transmission toujours plus grande. Les journaux exigent des dépêches dont la longueur augmente tous les jours, en particulier pour reproduire *in extenso* les débats parlementaires ou les discours. Supposons un rapport parlementaire de 300 000 lettres; le temps nécessaire pour le transmettre avec un appareil Hughes serait d'environ quarante heures; temps réduit à douze heures avec un Baudot quadruple, qui, du reste, n'existe pas partout. Or ce temps est encore beaucoup trop long, et il a fallu trouver des systèmes de transmissions beaucoup plus rapides.

Les télégraphistes les plus habiles parviennent rarement à envoyer plus de cinq signaux par seconde. Or un récepteur sensible peut en enregistrer correctement jusqu'à 80 et même 100. Si l'on a au préalable imprimé sur une bande de papier la dépêche sous forme de trous, il est possible de faire passer cette bande de papier à n'importe quelle vitesse et de transmettre ainsi très rapidement les indications qu'elle

porte. C'est là le principe du télégraphe automatique de **Wheatstone**. La perforation se fait par des dispositifs commodes et peut être effectuée pour une longue dépêche, par plusieurs personnes; un employé perfore de 30 à 40 mots par minute et le transmetteur peut en envoyer 120 à 130, c'est-à-dire utiliser le travail de trois ou quatre employés. Une ligne unique suffit ainsi pour assurer le service, quand il en aurait fallu quatre avec les manipulateurs ordinaires. A l'arrivée, la bande imprimée par le récepteur est partagée entre trois ou quatre employés qui traduisent les signaux de Morse et rédigent les feuilles à remettre aux destinataires⁵.

Un autre perfectionnement apporté au télégraphe a permis d'expédier sur le même fil deux dépêches, soit dans un sens, soit en sens contraire, de façon à doubler le rendement de chaque ligne. C'est la **télégraphie duplex**. Evidemment, on peut envoyer des courants en même temps de

chaque côté, mais ceux-ci ne se traversent pas : il donnent, au contraire, naissance à un courant résultant. Dans ces conditions, le courant envoyé par le premier bureau ne doit pas faire fonctionner l'appareil Morse de ce bureau même, mais bien l'appareil de la seconde station ; inversement, le courant simultanément de la seconde station ne doit pas mettre en marche son propre récepteur mais bien celui de la première station. Ces desiderata sont plus faciles à remplir qu'on ne pourrait le croire au premier abord ; on y arrive en réglant convenablement des résistances. Dans le système **TOMASI**, par exemple, deux courants, dont l'un est plus intense que l'autre, circulent alternativement le long du fil de la ligne ; l'un des récepteurs recevra le courant de faible intensité, l'autre le courant de forte intensité. Dans le système **quadruplex** appliqué aux appareils Morse, quatre employés assis devant quatre manipulateurs correspondant au même fil, expédient chacun des dépêches. Il est facile de concevoir que les courants étant intermittents, il est des moments, très courts

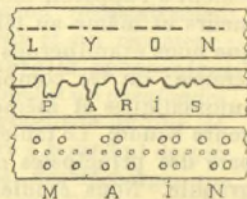


FIG. 60. — Écritures conventionnelles utilisées en télégraphie. (De haut en bas : Morse, Siphon Recorder, Wheatstone.)

d'ailleurs, où le fil de la ligne n'en reçoit pas. Partant de là, chaque employé envoie à tour de rôle une lettre de sa dépêche, et pour qu'il n'y ait pas de confusion, il est averti du libre passage par un électro-aimant distributeur. Avec l'habitude, on arrive à une très grande vitesse. Ce procédé est employé en Angleterre et en Amérique.

Les systèmes duplex et quadruplex s'appliquent non seulement à l'appareil Morse, mais aussi aux télégraphes imprimeurs et même au télégraphe sous-marin (*siphon-recorder*) que nous examinerons rapidement dans la suite de cette conférence; on les combine également avec les transmissions automatiques et même avec les transmissions multiples du genre Baudot. Le tableau suivant montre le rendement comparé des principales méthodes actuellement usitées en télégraphie. Nous étudierons plus loin le télégraphe Pollak Virag qui peut transmettre 40 000 mots à l'heure.

Appareil.	Nombre moyen de mots transmis en une heure.	
	Transmission simple.	Duplex.
Morse.	De 400 à 500.	De 800 à 1 000.
Hughes.	— 900 à 1 000.	— 1 800 à 2 000.
Wheatstone.	— 1 600 à 1 800.	— 2 600 à 3 200.
Baudot quadruple.	— 3 000 à 3 200.	— 5 000 à 6 000.
Siphon recorder.	— 900 à 1 200.	— 1 800 à 2 400.

Lignes télégraphiques et leurs accessoires. — Les lignes télégraphiques aériennes sont généralement constituées par des fils de fer galvanisés de 3 à 5 millimètres de diamètre, selon la longueur des portées; on a recours aussi au bronze phosphoreux ou siliceux qui est meilleur conducteur du courant, ce qui permet de réduire le diamètre et le poids du fil. Les fils sont isolés par des *cloches de porcelaine* fixées sur des supports en bois ou en fer. Les *poteaux* sont en bois de sapin injecté de substances préservatrices, sulfate de cuivre ou créosote, plantés à 80 ou 100 mètres de distance. Quand les fils doivent traverser une ville, on les fait en cuivre et on les

place le long des voûtes des égouts après les avoir convenablement isolés. Il existe en France plusieurs lignes souterraines interurbaines; la plus longue a 860 kilomètres; elle relie Paris et Marseille. En Allemagne, toutes les villes importantes sont reliées par des canalisations souterraines; on emploie alors des câbles formés de plusieurs fils de cuivre isolés électriquement.

Chaque bureau télégraphique comprend nécessairement une source d'électricité, un manipulateur et un récepteur : il doit être muni, en outre, de divers appareils accessoires dont les principaux sont une sonnerie d'appel et un parafoudre. La sonnerie a pour but d'avertir le télégraphiste qu'une dépêche va lui être transmise. Le parafoudre a pour but de préserver les appareils, et aussi les employés, des décharges que les courants développés dans la ligne, sous l'influence des orages, pourraient produire à l'intérieur des postes. Il existe de nombreux modèles de parafoudres. Le plus simple comprend un fil fin de plomb ou d'alliage de plomb très fusible et que traverse le courant avant d'arriver aux appareils; si la foudre tombe sur la ligne, elle fond instantanément le fil fin et la communication avec les appareils est supprimée. Le parafoudre évite les dégâts et les accidents qui résulteraient d'une violente décharge, mais il n'empêche pas les perturbations que provoquent les aurores boréales, les orages magnétiques, dont les manifestations, sans être assez intenses pour brûler le fusible, le sont suffisamment pour actionner les électro-aimants. Si l'employé novice ne parvient pas à déchiffrer les hiéroglyphes célestes, il peut néanmoins se convaincre de l'identité de la foudre et de l'électricité.

La Télégraphie sous-marine. — Les télégraphes qui viennent d'être décrits ne peuvent être utilisés pour la télégraphie sous-marine, car les lignes sont immergées dans un milieu conducteur et doivent être isolées; de plus, elles doivent présenter une résistance suffisante aux tractions.

Un câble sous-marin est formé d'une partie conductrice et d'une partie isolante et protectrice. La partie conductrice ou âme est un faisceau de fils de cuivre d'environ 1 millimètre de diamètre chacun, tordus ensemble. La partie isolante et protectrice est formée de plusieurs couches de gutta-percha

alternant avec des couches de goudron, puis d'une couche de filin goudronné, enfin d'un revêtement protecteur formé de fils d'acier enveloppés de chanvre goudronné et enroulés en hélice. Les câbles sous-marins sont exposés à toutes sortes d'accidents : animaux marins qui les rongent, ancrs, engins de pêche qui peuvent les briser, frottement des parties extrêmes contre les rivages.

Quand une ligne sous-marine ne dépasse pas 600 kilomètres, il est possible d'effectuer les transmissions à l'aide des appareils Morse, Hughes et Baudot; mais, au delà de cette longueur, il faut y renoncer, et cela pour deux motifs : d'abord, parce que le conducteur, ayant une résistance énorme, exigerait, pour actionner un électro-aimant, des tensions qui compromettraient l'enveloppe isolante; ensuite, parce que le câble est un véritable condensateur électrique de grande capacité. Il en résulte que le courant est affaibli par la charge électrostatique du câble, et que le temps nécessaire pour la transmission des signaux distincts est considérablement augmenté⁶. Ce retard est proportionnel à la capacité et à la résistance du câble : en outre, les courants dus au magnétisme terrestre peuvent troubler les courants télégraphiques.

La faible intensité du courant transmis entraîne l'emploi de récepteurs très sensibles. On a d'abord employé le *galvanomètre de lord Kelvin*; selon qu'au poste de départ l'extrémité du fil de ligne est mise en communication avec le pôle positif ou avec le pôle négatif de la pile, la déviation du miroir du récepteur se produit d'un côté ou de l'autre. On obtient ainsi deux signaux différents que l'on peut combiner comme le point et le trait du système Morse. Mais outre que cet appareil ne laisse aucune trace des signaux qu'il fournit, l'observation en est très fatigante. Aussi LORD KELVIN, à qui l'on doit la plupart des progrès de la télégraphie sous-marine, a-t-il imaginé un appareil qui permet d'inscrire la dépêche sur une petite bande de papier. Cet appareil est le siphon enregistreur ou *Siphon recorder*. C'est un galvanomètre a périodique, à cadre mobile et à aimant fixe. Un cadre formé de fil de cuivre isolé est placé entre les deux pièces polaires d'un aimant puissant; il est suspendu par un fil de cocon passant sur une poulie et renferme à son intérieur un cylindre de fer doux ayant pour effet d'augmenter l'intensité du champ

magnétique. Quand le courant passe dans le cadre, celui-ci est dévié de sa position d'équilibre, dans un sens ou dans l'autre, selon le sens du courant lancé. Les mouvements du cadre sont transmis à un tube de verre courbé en siphon et contenant une encre très fluide.

Quand le cadre est en mouvement, le trait tracé sur un papier mû par un mouvement d'horlogerie devient sinueux : les dents à droite ou à gauche correspondent aux courants positifs ou négatifs lancés dans le manipulateur : ce sont les signaux qui correspondent aux points et aux traits du système Morse.



FIG. 70. — Câble sous-marin pour les grandes profondeurs.

C'est en 1851 que fut posée la première ligne sous-marine, entre Douvres et Calais, mais le premier câble immergé fut rapidement détruit par le mouvement des vagues qui le faisaient frotter contre les roches; peu après, l'Angleterre fut reliée à l'Irlande, la France à l'Algérie et à la Corse (1857). Le premier câble transatlantique date de 1858. Depuis cette époque, les lignes sous-marines se sont multipliées partout, assurant les communications instantanées entre tous les pays ⁷ du Globe.

Le Télégraphe dans le Monde. — Il serait puéril d'entreprendre l'énumération de tous les services que rend le télégraphe. Chacun a pu apprécier, en maintes circonstances, les bienfaits de cette découverte. Les relations de famille ou d'amitié, les relations d'affaires sont sans cesse servies par l'électricité. L'astronomie et la météorologie en font aussi un large usage.

Le télégraphe a donné une physionomie spéciale au monde économique actuel. Tous les pays du Globe ont rapidement multiplié leurs lignes télégraphiques. En 1911, la France possédait 180 000 kilomètres de lignes télégraphiques et 19 252 bureaux qui ont expédié près de 50 millions de télégrammes (la moitié par le poste central de Paris). Les Etats-Unis comptent plus de 400 000 de kilomètres de lignes télégraphiques.

Les communications télégraphiques sous-marines ont été

accaparées par l'Angleterre. Elle a tressé un immense réseau de câbles quienserre le monde entier. Ce réseau est presque exclusivement la propriété d'une même compagnie, *Easter Telegraphy Co*, qui s'est affilié la plupart des autres compagnies anglaises, assurant ainsi à l'oeuvre télégraphique une unité de conception et de direction incomparables.

La France a tardivement compris le danger de laisser ses principales colonies à la merci du réseau britannique. Depuis longtemps, elle communique avec la *Corse* (2 câbles), l'*Algérie-Tunisie* (5 câbles), mais l'*Afrique occidentale* n'a été soustraite à la servitude britannique que depuis la pose du câble de Brest-Dakar (1905), et le *Congo français* que depuis la pose du câble de Cotonou à Libreville, qui relie les lignes aériennes. Dans l'*Indo-Chine*, la France a immergé le câble Tourane-Amoy qui se raccorde aux lignes étrangères, et le tronçon Saïgon-Pontianak qui est l'amorce d'une ligne sur Madagascar. Depuis 1898, la France peut communiquer directement avec l'*Amérique* par son câble Brest-cap Cod (Boston) lequel se ramifie sur l'Angleterre et le Canada, les Etats-Unis, les Antilles, les Guyanes et le Brésil. Le réseau mondial des câbles télégraphiques fait le tour du monde depuis 1902, date de l'achèvement du câble Vancouver-îles Viti. Les premières dépêches ont été échangées entre Londres et Ottawa en passant par la mer des Indes et le Pacifique.

II. La transmission de la Parole. — Nous avons vu que le télégraphe permet de transmettre la pensée humaine à travers l'espace, mais il nécessite la présence d'une personne intermédiaire pour reproduire les mots en écriture télégraphique. Avec le **téléphone**, au contraire, il n'est plus nécessaire de se déranger et d'avoir recours à d'autres personnes ; c'est là encore une des belles applications de l'électricité.

Comment la transmission des sons peut-elle être obtenue par l'électricité ? Il faut d'abord se rappeler qu'un son n'est pas autre chose qu'un rapide mouvement alternatif déterminé par le choc ou par le frottement et transmis jusqu'à l'oreille par un milieu élastique⁸. Transmettre un son revient donc à *transmettre des vibrations, c'est-à-dire des mouvements mécaniques*. A ce titre, le téléphone n'est qu'un dérivé du télégraphe ; mais la rapidité avec laquelle les vibrations se suc-

cèdent et surtout les nuances si délicates et si compliquées qui forment le langage articulé furent d'abord considérées comme des obstacles à peu près insurmontables.

Jadis, on ne connaissait, pour augmenter la portée des sons, d'autre moyen que de les canaliser dans des *tubes acoustiques* ; mais comme dans ce cas, le milieu élastique n'est autre que l'air lui-même, il en résulte une forte diminution d'intensité et une grande lenteur dans la transmission. On songea bientôt à transmettre le son par les solides, dans lesquels le son se propage beaucoup mieux que dans l'air et, en 1782, DOM GAUTHEY, de l'ordre des Bénédictins, imagina un appareil formé de tubes de métal enchâssés les uns dans les autres, et transmettant les coups frappés à l'une des extrémités jusqu'à l'autre extrémité de la ligne. Le *téléphone à ficelle*, dû au physicien ROBERT-HOOKE, fournissait le même résultat et entraînait moins de dépenses ; les paroles, émises dans un cornet métallique, font vibrer une membrane tendue qui constitue le fond, sont transmises par un fil de soie ou de chanvre à la membrane d'un appareil identique, laquelle suit tous les mouvements de la première et reproduit toutes ses vibrations, c'est-à-dire tous les sons qui ont été émis. CH. BOURSEUL, employé des télégraphes français, indiqua, le premier, le principe de la téléphonie électrique : « Imaginez que l'on parle près d'une plaque mobile assez flexible pour ne perdre aucune des vibrations produites par la voix : que cette plaque établisse et interrompe successivement la communication avec une pile, vous pourrez avoir à distance une autre plaque qui exécutera en même temps exactement les mêmes vibrations ». » P. REIS, instituteur allemand, réalisa le dispositif indiqué par Bourseul et le présenta à la Société de physique de Francfort-sur-le-Mein, en octobre 1861 ; mais personne n'entrevit l'avenir réservé à la téléphonie et l'expérience de Reis fut bien vite oubliée. C'est en 1876 que ELISAH GRAY et GRAHAM BELL¹⁰ trouvèrent en même temps ce que devait être définitivement le téléphone et que SIR WILLIAM THOMSON baptisa du nom de « merveille des merveilles ». Les premières expériences publiques eurent lieu à l'Exposition internationale de Philadelphie (juin 1876), lors du centenaire de l'Indépendance américaine.

Le téléphone électromagnétique de Bell. — L'appareil de BELL, qui suscita un mouvement énorme de curiosité était d'une étonnante simplicité, et il peut nous servir à comprendre le principe du téléphone. En arrière d'une membrane de fer doux, très mince et très flexible, encastrée dans l'extrémité évasée d'un étui de bois, se trouvait un barreau aimanté, enveloppé d'un fil en hélice. Ce fil était recouvert de soie et il allait aboutir à un autre appareil identique, car ce téléphone peut servir à la fois de *transmetteur* et de *récepteur*,

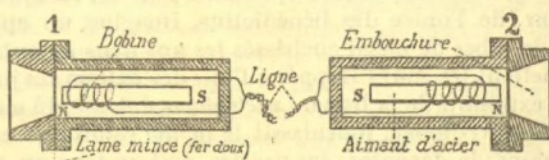


FIG. 70. — Téléphone Bell.

1. Transmetteur. — 2. Récepteur.

suivant que l'on parle devant le pavillon de l'étui ou qu'on l'applique contre l'oreille. Quand on émet un son au voisinage de la plaque du transmetteur, les vibrations transmises à ladite plaque l'éloignent et l'approchent périodiquement du pôle de l'aimant en face duquel elle se trouve. Les lignes de force de ce champ varient donc de position, et le flux de force qui pénètre le circuit de la bobine varie périodiquement. Le circuit téléphonique se trouve alors le siège de courants alternatifs qui, reçus dans l'enroulement du récepteur, y produisent des variations correspondantes et synchrones des précédentes. La plaque vibrante de l'écouteur se trouve alors animée de vibrations, et une oreille placée à son voisinage perçoit le son même émis devant la plaque du parleur.

Ainsi constitué, le *téléphone n'est pas autre chose qu'une petite machine magnéto-électrique* et la *transmission téléphonique n'est qu'un exemple de transport d'énergie par courants alternatifs*, énergie très minime, il est vrai, mais qui n'en met pas moins en jeu le même processus de transformations. Nous retrouvons, dans le fonctionnement du téléphone, un exemple des multiples transformations de l'énergie électrique,

sur lesquelles nous avons attiré à maintes reprises l'attention du lecteur. L'énergie mécanique des vibrations sonores communiquées à la plaque du parleur est transformée en énergie électrique, laquelle, sous l'apparence de courants induits de forme alternative, parcourt le circuit des bobines téléphoniques et actionne le récepteur. Ici, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique manifestée par les vibrations de la lame vibrante du récepteur. Les courants mis en jeu dans ce transport d'énergie sont d'intensité extrêmement faible; ils ne dépassent pas le $1/100\ 000$ d'ampère¹¹.

Le téléphone transmet : la *hauteur des sons*, puisque chaque vibration du son émis produit un courant correspondant et que le nombre des courants d'induction est rigoureusement égal au nombre de vibrations du son; les variations d'*intensité des sons*, car, si le son est plus intense, la plaque de fer est repoussée plus fortement, et les courants d'induction sont, par suite, eux-mêmes plus intenses¹²; enfin, il reproduit le *timbre des sons*, car si une particule vibre de façon complexe avec une amplitude tantôt plus grande, tantôt plus petite, plus rapidement ou plus lentement, ces divers modes de vibrations sont changés en courants électriques d'une manière correspondante et font exécuter à la plaque du récepteur des vibrations complexes identiques. Le téléphone Bell peut donc transmettre la parole et le chant.

Les transmissions lointaines. — Dès 1876, des communications téléphoniques furent installées avec ce téléphone magnétique, mais en raison de courants anormaux sur les fils conducteurs, des effets d'induction causés par les fils voisins, des dérivations accidentelles, etc., la portée se trouva restreinte à quelques centaines de mètres. Il ne faut pas oublier pourtant que c'est le téléphone Bell qui a prouvé la possibilité de transmettre des sons par l'électricité; il a suffi, pour arriver à la perfection actuelle, de renforcer les effets de ce type initial.

Dans le téléphone Bell, les paroles prononcées produisent non seulement des changements d'intensité, mais encore engendrent elles-mêmes des courants. Cette condition n'est pas nécessaire. Supposons qu'un courant soit déjà produit par un élément galvanique; il suffira de déterminer, par les paroles ou les sons, des variations dans l'intensité de ce cou-

rant; on pourra ensuite transformer ces variations en paroles au moyen d'un récepteur. Telle est l'idée nouvelle sur laquelle repose le **microphone** inventé par HUGHES⁴³. Or, le charbon est un conducteur dont la résistance est élevée, et cette résistance varie beaucoup suivant la pression du point de contact de deux charbons : si donc deux baguettes de charbon se touchent à peine et sont parcourues par un courant, les vibrations acoustiques déterminent entre elles un contact plus ou moins intime et modifient la résistance du circuit, il en résulte des variations considérables dans l'intensité du courant qui parcourt le circuit. Une très petite différence de pression des deux charbons l'un contre l'autre suffit à produire des variations considérables de courant. On entend fort bien une mouche marcher sur la caisse sonore supportant les charbons, d'où le nom de *microphone* donné à l'appareil. Le *microphone* joue le rôle de transmetteur, et le *téléphone* fonctionne uniquement comme récepteur; il est parcouru par un courant de pile, et la parole ne sert qu'à renforcer ou affaiblir l'intensité de ce courant.

Pour les *petites distances* (de 20 à 50 mètres), le circuit comprendra, au poste transmetteur, un microphone traversé par le courant d'une pile, et, au poste récepteur, un téléphone de Bell dont la bobine est traversée par le même courant. Pour les *grandes distances*, entre le poste transmetteur et le poste récepteur, il est nécessaire de faire usage de transformateurs pour augmenter la force électromotrice du courant qui circule sur la ligne. Si le circuit de la pile et du transmetteur comprend le primaire d'un transformateur, les variations d'intensité dans le primaire donneront aux bornes du secondaire des forces électromotrices d'induction suffisamment élevées pour que des courants d'intensité appréciable puissent traverser les fils de ligne reliés aux bornes de ce circuit secondaire. Au poste récepteur, les fils de ligne aboutissent aux bornes du secondaire d'un nouveau transformateur, le circuit à fil gros et court de celui-ci comprenant le circuit du récepteur. Chaque station doit pouvoir jouer le rôle de poste transmetteur et de poste récepteur; d'où la disposition de la figure 71 qui n'est pas sans analogie avec le transport de force à distance par courants alternatifs.

Microphones et Récepteurs. — Le premier microphone de Hughes se composait simplement d'une baguette de charbon reposant sur deux blocs de charbon fixés sur une planchette de résonance. On emploie aujourd'hui des microphones à plusieurs baguettes dans lesquels le courant n'est jamais complètement interrompu et qui sont, en outre, d'une sensibilité plus grande; tel est le microphone Ader où il existe vingt

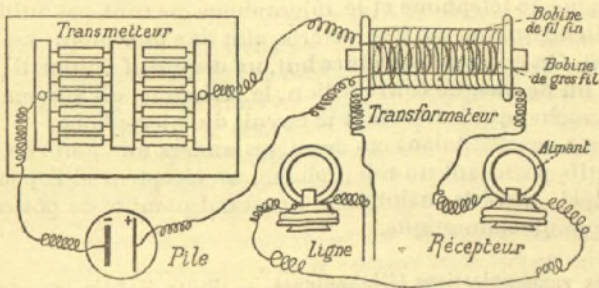


FIG. 71. — Schéma de l'accouplement des divers appareils constituant un poste téléphonique.

contacts variables. Il est évident que plus les points de contact variables entre les charbons sont nombreux, plus grandes sont les variations de courant que l'on peut produire en parlant; plus le son transmis est fort, plus on peut le transmettre loin. En partant de ce principe, on a construit des microphones à grenaille, parmi lesquels celui de BERLINER fut le premier répandu; ceux de SIEMENS et HALSKE sont très employés en Allemagne.

Le récepteur Ader comprend un aimant recourbé en fer à cheval dont les pôles voisins sont chacun pourvus d'une bobine; la plaque vibrante est actionnée par deux pôles, aussi la sensibilité de l'appareil est-elle plus grande et les vibrations de la plaque de fer doux sont plus nettes pour un même courant.

Il faut deux appareils différents pour transmettre la voix et la recevoir: un microphone ou transmetteur, pour parler; un téléphone ou récepteur pour entendre. Chacune des deux

stations doit donc comprendre : un téléphone, un microphone, une pile et deux bobines d'induction. Les connexions sont établies de manière que, dans chaque station, la pile soit fermée sur le microphone correspondant à la bobine primaire, tandis que les deux téléphones et les bobines secondaires correspondantes sont réunis à la ligne. Comme éléments de piles, on prend généralement des piles Leclanché qui sont suffisamment puissantes, très constantes et coûtent fort peu. Lorsque le téléphone et le microphone ne sont pas utilisés, les éléments doivent être ouverts, afin de s'user moins rapidement. On a imaginé, dans ce but, un dispositif automatique : à la fin de chaque conversation, le téléphone est suspendu à un crochet qui interrompt le circuit du microphone.

On a construit dans ces dernières années une foule de dispositifs possédant un microphone, un récepteur et l'appareil d'appel ; il existe maintenant un grand nombre de postes de téléphonie domestique.

Les communications téléphoniques. — Pour établir les correspondances entre particuliers, il a fallu grouper un certain nombre d'abonnés et relier leurs appareils à un poste central chargé de recueillir les demandes de communication et d'effectuer les connexions voulues pour mettre les correspondants en relation. Nous ne pouvons entrer dans le détail de l'installation d'un réseau téléphonique, aussi nous contenterons-nous de donner une idée de la façon dont on met en communication deux abonnés appartenant à deux bureaux différents.

Soient les bureaux A et B. Au bureau A se trouve un tableau auquel aboutissent les lignes des abonnés et les lignes des bureaux B, C..., etc., reliés au bureau A. Il en est de même au bureau B. Les lignes se terminent par des appareils appelés *jacks*. Un jack est une ouverture cylindrique formée de deux pièces métalliques isolées reliées aux deux fils de la ligne téléphonique. Une *fiche* qu'on enfonce dans cette ouverture porte les deux extrémités d'un deuxième circuit téléphonique. En arrière du jack, une dérivation aboutit à un *annonceur* qui peut être une sonnerie, mais qui est le plus souvent une petite lampe électrique placée sur le numéro de l'abonné : cette lampe s'allume quand l'abonné demande la communication. Supposons que l'abonné n° 1 du bureau A

veille communiquer avec le n° 5 du bureau B. L'abonné n° 1 décroche ses récepteurs, ce qui ferme le circuit de sa pile sur la ligne; l'annonciateur n° 1 du bureau s'allume. L'employée, qui a constamment un récepteur à l'oreille, introduit sa fiche dans le jack n° 1 et se met en communication avec l'abonné. Celui-ci ayant indiqué la communication désirée, l'employée réunit le jack n° 1 au jack du bureau B. Au bureau B, l'employée se met en communication avec celle de A, et, après avoir reçu l'indication du numéro demandé, elle réunit le jack de l'abonné n° 5 au jack du bureau B⁴⁴. Celui-ci sera prévenu par la sonnerie de son poste, décrochera ses récepteurs, et sera alors en communication avec son correspondant. Quand la conversation est terminée, les deux correspondants replacent les récepteurs sur les crochets afin de mettre chacun leur sonnette dans le circuit.

Au début, l'administration des téléphones reliait chaque abonné avec le bureau central par un fil unique et utilisait le retour du courant par la terre comme on le fait en télégraphié. Il a fallu renoncer à ce dispositif économique, car, à cause des phénomènes d'induction, il se produisait dans les récepteurs des bruits étrangers souvent assez intenses pour dominer le bruit des conversations. Aujourd'hui, le fil de ligne est toujours double; on le constitue d'ailleurs en bronze siliceux, car les intensités des courants qui le traversent étant faibles la résistance de la ligne doit être la plus petite possible. Les fils téléphoniques sont portés par les mêmes poteaux que les fils télégraphiques, et afin que les courants qui traversent ces derniers ne puissent produire de courants d'induction fâcheux dans le circuit téléphonique, on croise de distance en distance les fils téléphoniques. Il est difficile de faire disparaître tous les bruits anormaux qui viennent troubler les conversations par téléphone⁴⁵.

La Téléphonie automatique. — En raison des plaintes nombreuses contre le service téléphonique, on a cherché à supprimer le personnel des bureaux et à rendre automatiques les manœuvres nécessitées pour faire communiquer entre eux deux abonnés quelconques. La *téléphonie semi-automatique* consiste à mettre à la disposition d'un groupe d'abonnés un poste automatique relié au bureau central par un seul

circuit : la *téléphonie automatique*, au contraire, se propose de résoudre complètement le problème. Un grand nombre de systèmes sont déjà mis en usage, surtout à l'étranger : *système BERLINER*, modification du *système STROWGER*, qui a donné de très bons résultats en Allemagne ; *système BETULANDER*, en usage en Suède ; *système LORIMER*, qui est en pleine activité en Amérique et qui a été mis à l'essai à Lyon en 1910. La description de ces appareils, qui semblent posséder la volonté intelligente que leur a communiquée l'inventeur, nous entraînerait trop loin ; nous ferons remarquer que l'automatisme n'est pratique qu'autant qu'elle se présente sous l'aspect d'un appareil très simple et dont tous les organes sont facilement accessibles et interchangeables.

Téléphones haut parleurs et Théâtrophones. — Le téléphone capable d'être utilisé par plusieurs personnes à la fois, ce qui rendrait possible les auditions musicales et théâtrales par un groupe de personnes, a tenté depuis longtemps les constructeurs. On a cherché d'abord à augmenter la sonorité de la membrane et à obtenir des sons plus forts en combinant les effets d'une pile avec ceux de l'aimant. En 1900, M. GERMAIN, inspecteur des télégraphes, réalisa des expériences concluantes ; plus tard, en 1903, M. DUCRETET proposa un nouvel appareil ; enfin, à différentes reprises, M. DUSSAUD, de Genève, a soumis à l'Académie des Sciences de Paris, des modèles variés de téléphones amplificateurs. Il a constaté que le rendement du transmetteur s'améliore quand on augmente le nombre des membranes vibrantes de la caisse de résonance, et qu'une amélioration analogue s'obtient au transmetteur quand on augmente le nombre des facettes à chacun des pôles de l'électro-aimant ; chaque facette ayant en face d'elle une plaque vibrante. En se servant de deux postes où sont appliqués ces principes, on peut faire entendre à toute une salle les paroles transmises. Ces **téléphones haut parleurs** permettent d'enregistrer sur un phonographe, à une grande distance, des conversations, des discours, des auditions de chant et de musique.

Le premier essai de transmission à distance d'une audition musicale remonte à 1881. L'Opéra était relié au Palais de l'Industrie, où les chants et l'orchestre se faisaient entendre. Les

auditions à domicile datent de 1884 ; les communications sont données par le poste central relié avec les principaux théâtres. L'usage du théâtrophone est très répandu en Amérique ; à Paris, il s'est formé une société mettant les abonnés en communication avec les principaux théâtres. De semblables téléphones peuvent être dissimulés dans les prisons, dans les ateliers, les bureaux et renseigner sur les conversations qui s'y tiennent. Nous verrons plus loin comment la téléphonie sans fil a conduit à des résultats remarquables les auditions théâtrales à distance.

Lignes urbaines et interurbaines. — En France, les réseaux téléphoniques sont exploités par l'Etat. Il existe à Paris un bureau central pouvant desservir directement 30 000 abonnés sans passer par les bureaux de quartier. En France, le téléphone n'a pas encore la faveur dont il jouit à l'étranger. Paris ne compte que 1 abonné pour 180 habitants, tandis que Stockholm en possède 1 pour 23. Les Etats-Unis sont parvenus à organiser ce service d'une manière absolument parfaite. Le service de New-York et de Chicago offre de grandes difficultés en raison du grand nombre des offices centraux, des abonnés et de l'intensité avec laquelle se déroule la vie dans ces deux grands centres. A New-York, il y a 310 000 téléphones, 53 offices centraux, 38 hôtels de téléphones, 1 250 000 conversations par jour. Le bureau central téléphonique de Hambourg, mis en service en 1911, est le plus grand du monde ; il compte 1 100 000 jacks individuels et 1 500 employés.

Les grandes villes sont maintenant reliées par deux ou trois lignes ; on téléphone aujourd'hui de Paris à Londres, à Berlin, à Rome, à Vienne, à Madrid ; malheureusement la résistance de la ligne et sa capacité électrostatique s'opposent à la transmission pour ainsi dire indéfinie de la parole.

On cherche en téléphonie un relais aussi efficace que les relais télégraphiques. La meilleure solution pour réduire les effets de capacité d'un câble est de leur opposer les effets de self-induction. C'est sur ce principe que reposent les bobines Pupin que l'on embroche de distance en distance sur le câble à améliorer.

Les essais entrepris depuis 1909 par deux ingénieurs suédois, MM. EGNER et HOLMSTROM ont montré qu'avec le micro-

phone de leur invention, *la téléphonie à grande distance est parfaitement réalisable*. Ils ont pu communiquer de Stockholm à Berlin (1 290 km.), puis de Stockholm à Cologne (1 512 km.) enfin de Stockholm à Paris (2 270 km.). En Amérique, des circuits téléphoniques existent entre New-York et Denver, distantes de 3 600 kilomètres, et l'on espère mettre en communication New-York et San Francisco distantes de 5 400 kilomètres. L'Amérique est le pays de choix pour de pareilles lignes téléphoniques; elles ne peuvent s'implanter et prospérer que dans un pays où d'un bout à l'autre on parle la même langue et où l'activité des affaires vient justifier et rémunérer les frais d'établissement.

Le Télégraphone et l'arc chantant. — Bien que le téléphone rende d'immenses services pour relier directement deux personnes éloignées, il lui manque cependant une qualité; celle de *laisser automatiquement des traces écrites des communications*, ce qui serait utile dans le cas de communication importante ou d'absence de la personne appelée au téléphone. Ces conditions sont réalisées par le **télégraphone** de l'ingénieur danois POUlsen, appareil que l'on a pu voir fonctionner, en 1900 à l'Exposition universelle de Paris. C'est une sorte de phonographe, dans lequel *l'inscription et la reproduction de sons s'effectuent à distance par un procédé magnétique* au lieu de s'effectuer par des moyens mécaniques. Il se compose d'un fil d'acier passant entre les pôles d'un petit électro-aimant dont les bobines sont en communication avec un téléphone : les courants qui se trouvent induits dans le circuit téléphonique, quand on parle devant la membrane du téléphone, produisent entre les pôles de l'électro-aimant un champ magnétique variable d'où résulte une aimantation transversale du fil d'acier, plus ou moins intense et de sens variable. La parole est ainsi fixée magnétiquement. Pour la reproduire, il suffit de faire repasser le fil d'acier aimanté, dans le sens correspondant à la phase d'inscription, entre les pôles de l'électro : des courants induits sont développés dans les bobines de l'électro, et sont transmis au téléphone dont la membrane vibre et reproduit les sons inscrits. La reproduction des sons au moyen de cet appareil est excessivement fidèle et débarrassée de tous ces bruits parasites qui sont si

désagréables dans le téléphone et le phonographe ordinaire¹⁶.

Une autre invention appartenant au domaine de la téléphonie est celle de l'arc chantant ou par ant. Supposons que l'on place dans le circuit d'une batterie d'accumulateurs une lampe à arc, une résistance et un transformateur formé de deux bobines séparées (l'intérieure étant parcourue par le courant des accumulateurs; l'extérieure par celui d'un élément réuni au microphone). Si l'on parle devant le microphone, il se produit dans son circuit des courants d'intensité variable, qui agissent sur la bobine intérieure, produisent des courants qui se superposent au courant continu; il en résulte des détentes et des compressions périodiques de l'air qui se traduisent à nos oreilles par des sons. On arrive ainsi à ce résultat surprenant de faire répéter par l'arc les sons que l'on prononce devant le microphone. Avec certains dis-

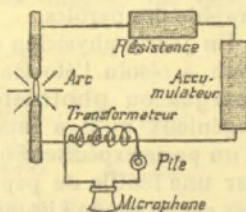


FIG. 72. — L'arc chantant. Schéma d'un dispositif pour réaliser l'arc chantant.

positifs, on peut faire parler l'arc assez fort pour qu'il soit entendu distinctement dans une grande salle; il reproduit très bien la parole, le sifflet, le chant, les timbres des différents instruments; le son est très pur, car il est produit par l'arc lui-même, sans intermédiaire de membranes métalliques ou autres.

Applications du Téléphone. — Elles sont innombrables et nous n'entreprendrons pas de les énumérer; elles se rencontrent sur terre comme sur mer; pendant la paix comme pendant la guerre, dans les mines comme dans la nacelle des ballons et dans toutes les branches de la Science. Le téléphone est entré dans nos mœurs au point de constituer un véritable besoin. Le nombre des abonnés augmente, dans les principales villes, d'une façon très rapide, et ce développement est la preuve la plus frappante des services que l'invention de Bell rend à la civilisation moderne. L'habitude des communications instantanées s'est si bien implantée que le développement du téléphone a entraîné celui du télégraphe.

III. La transmission des Images par l'Électricité. — Après s'être chargée de transmettre à travers l'espace nos paroles et nos pensées, l'électricité, véritable fée au service de l'humanité, nous offre maintenant le moyen de dessiner et d'écrire à distance. Dans la dernière partie de cette conférence, nous passerons rapidement en revue les applications récentes et déconcertantes de l'électricité, que l'on a dénommées : téléphotographie, téléautocopie, téléautographie, télévision, photographie des paroles.

Un jeune physicien allemand, M. KORN, professeur à Munich, a résolu l'étonnant problème de la télégraphie des images ou phototélégraphie. Grâce aux appareils fort ingénieux qu'il a imaginés, on peut aujourd'hui envoyer d'un poste expéditeur une photographie et la faire apparaître sur une feuille de papier sensible au poste récepteur situé à des centaines de kilomètres. Au *poste expéditeur* on concentre au moyen d'une lentille les rayons d'une lampe électrique sur une toute petite ouverture pratiquée dans la paroi d'un cylindre de verre sur lequel se déroule, à la manière d'un rouleau de phonographe, le cliché sur pellicule. Ainsi, le cliché tout entier passe successivement sous le rayon lumineux qui le traverse et le pénètre, ainsi que la couche transparente sur laquelle il est posé, avec une intensité plus ou moins grande, suivant qu'il rencontre un point plus ou moins impressionné par la photographie. Une plaque de sélénium, placée à l'intérieur du cylindre, reçoit en même temps les rayons, en quelque sorte tamisés à travers la pellicule; le sélénium est un métal dont la conductibilité électrique est partiellement sensible à la lumière et varie avec son intensité. Des fils électriques, mettant cette plaque de sélénium en communication avec le poste récepteur, sont parcourus par des courants qui traduisent les variations de la lumière. Au *poste récepteur* se trouvent une lampe et une lentille identiques à celles du poste expéditeur; mais le cylindre en verre est remplacé par une chambre noire contenant le cylindre qui tourne et autour duquel est enroulé le papier sensible. Un galvanomètre, composé d'une feuille d'aluminium entre deux fils de cuivre, est placé à la façon d'un écran devant la chambre noire; quand un courant arrive, la feuille d'aluminium laisse pénétrer un rayon lumineux, dans la chambre

noire, et la feuille de papier sensible est impressionnée. C'est précisément cette danse du galvanomètre qui fait qu'au poste récepteur, chaque point du papier sensible qui se déroule sur le cylindre derrière le trou de la chambre noire est impressionné à tour de rôle par la lumière de la lampe électrique.

Le procédé de M. BERJONNEAU exclut le sélénium et n'emploie, pour assurer la transmission des images, que des

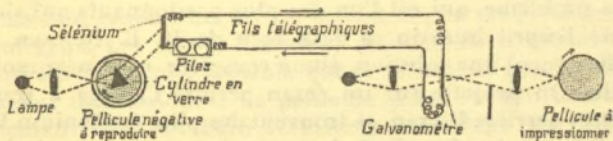


FIG. 73. — La téléphotographie. Dispositif de M. Korn.

moyens purement électriques et mécaniques ; il offre l'avantage de pouvoir utiliser non plus exclusivement les lignes téléphoniques isolées à deux fils, mais bien n'importe quel fil télégraphique ou câble sous-marin. On commence par transformer l'image à transmettre en épreuve de similigravure, constituée par conséquent par un pointillé très fin, dans lequel les points sont d'autant plus rapprochés qu'ils correspondent à des parties plus foncées de l'image. L'épreuve de départ est tirée sur une feuille mince de cuivre et enroulée sur le cylindre du poste expéditeur ; ce cylindre, animé d'un mouvement hélicoïdal réglé au 1/6 de millimètre, se déplace en contact avec un crayon fixe dont la mine est remplacée par un fil de platine relié au circuit électrique de la ligne. Dans celle-ci il envoie une succession rapide de courants dont la longueur est proportionnelle aux contacts du crayon avec le pointillé de la simili. Le récepteur est sensiblement le même que celui de M. Korn ; il possède un relais qui substitue, au courant faible de la ligne, le courant d'une pile locale.

On conçoit quelles peuvent être les applications de la téléphotographie : transmission rapide des photographies d'actualité destinées à illustrer les journaux¹⁷ ; recherches d'ordre judiciaire, la photographie pouvant arriver à la frontière ou

aux ports d'embarquement bien avant le coupable; transmission d'une signature photographiée, etc. Actuellement, la transmission télégraphique des images exige une dizaine de minutes pour des milliers de kilomètres; quand on pourra les raccourcir jusqu'à $1/3$ de seconde, le rêve de la télévision sera une réalité; on assistera alors sur l'écran d'une salle de projections, aux événements qui se produisent en d'autres villes, tout comme nous assistons aujourd'hui aux scènes animées des cinématographes.

Ce problème, qui est l'un des plus passionnants qui aient hanté l'esprit humain, a déjà reçu de M. E. RUHMER, de Berlin (1909) une solution, sinon complète, mais néanmoins réelle. On projette sur un écran perforé l'image à transmettre; derrière l'écran, se trouvent des piles à sélénium très sensibles qui répondent instantanément aux variations d'éclairage qui les frappent. Par un procédé tenu secret, l'image apparaît sur l'écran de réception, lequel est placé devant des piles à sélénium représentant la même disposition que celles de poste de départ.

La transmission électrique de l'écriture est réalisée par un grand nombre d'appareils qui ont surgi de toutes parts depuis 1909 : téléautographes de GRUHN, de GRAYS de RITCHE; téléautocopiste de SÉMAT; téléstéréographe de BELIN. Dans le téléautographe Gruhn, par exemple, on écrit le message à l'aide d'un crayon spécial sur une tablette; les mouvements du crayon sont transmis par des leviers articulés à des plots de contact qui agissent sur la résistance du circuit et par conséquent sur le courant lancé dans la ligne. Le récepteur comprend deux galvanomètres à miroir; un rayon lumineux réfléchi par les deux miroirs vient impressionner une bande de papier photographique et reproduit les déplacements de la pointe du crayon transmetteur; la bande de papier passe automatiquement dans des bains révélateur et fixateur et sort de l'appareil en présentant le fac-similé de l'écriture de l'expéditeur. L'appareil peut fonctionner sur une ligne téléphonique.

La photographie des paroles. — M. MARAGE, professeur libre à la Sorbonne, a trouvé le moyen de photographier les paroles, de les saisir au passage et de les fixer à jamais. Son appa-

reil est une modification du **télégraphe Pollak-Virag** qui peut transmettre quarante mille mots à l'heure, dont nous ferons comprendre ici le principe. La dépêche destinée à être envoyée est écrite à l'avance au moyen d'une machine à écrire qui, au lieu de tracer les lettres, les représente par une série de perforations. Ce papier perforé, placé dans l'appareil transmetteur, laisse passer, selon la position et la grandeur des trous, des courants plus ou moins longs qui se suivent à la file. A l'autre bout du fil télégraphique, ces courants font osciller un miroir devant lequel est placé un faisceau lumineux. Les rayons lumineux réfléchis de ce miroir tombent sur un papier sensible qui se déroule et qui est diversement impressionné. La pellicule passe ensuite automatiquement dans un bain révélateur puis dans un bain de fixage, et avant que le télégramme du poste transmetteur ne soit complètement expédié, on voit, à l'autre bout du fil, apparaître la bande mouillée contenant les premiers mots écrits très nettement. Pour inscrire photographiquement les sons et la parole, il suffit de remplacer le papier perforé par un microphone. Les sons font vibrer également le miroir mobile et les faisceaux lumineux représentant les vibrations acoustiques impressionnent le papier sensible. On obtient un tracé assez semblable à celui que l'on voit sur les rouleaux de phonographes. Cet appareil trouve son application dans l'étude du chant.

Avec cette conférence, au cours de laquelle nous avons vu l'Électricité transmettre à travers l'espace la pensée et la parole de l'Homme ainsi que son écriture et ses dessins, il semble que nous ayons épuisé les merveilleuses facultés de l'Électricité. Il n'en est rien pourtant. Nous la verrons, dans la conférence prochaine, se débarrasser des fils qui, jusqu'à présent avaient été considérés comme indispensables, traverser l'espace sans aucun conducteur et réaliser cette merveilleuse nouveauté, la Télégraphie sans fil.

NOTES DE LA ONZIÈME CONFÉRENCE

1. La première ligne établie fut celle de Paris à Lille (1794) ; elle comprenait seize postes. Chaque poste comportait une tour surmontée d'un mât vertical, au sommet duquel se trouvait un fléau mobile sur une poulie en sa partie moyenne et portant à chaque extrémité un bras capable de tourner autour d'une poulie. Le mouvement était transmis à l'appareil par un système de cordes. Il y avait plusieurs vocabulaires : un premier signal indiquait lequel on devait consulter, un second nommait la page, et un troisième le numéro d'ordre de la phrase ou du mot transmis. Une communication de Paris à Lille demandait quatre heures.

2. MORSE (1791-1872), fils d'un pasteur de Charlestown (Etats-Unis), se livra d'abord à la peinture. La lecture des expériences d'Œrstedt, d'Arago et de Franklin le mit sur la voie de son télégraphe électromagnétique. Muni d'une subvention du Sénat, il put établir le modèle qui le fit connaître dans le monde entier. La première ligne de télégraphie électrique en France fut établie de Paris à Rouen en 1844.

3. Du grec *télé*, loin, et *graphéin*, écrire.

4. Alphabet Baudot :

A ou 1	+ — — — —	E ou 2	— + — — —	Il s'agit d'une combinaison de courants positifs et de courants négatifs au moyen d'un clavier à 5 touches.
B ou 8	— — + + —	F ou 4	— + + + —	
C ou 9	+ — + + —	G ou 7	— + — + —	
D ou 0	+ + + + —			

5. En Amérique, l'expéditeur a la faculté de préparer lui-même ses bandes, en se servant des perforateurs que les compagnies mettent à la disposition de leurs abonnés. Les dépêches sont tarifées d'après la longueur des bandes perforées et non plus d'après le nombre de mots.

6. Quand on voulut appliquer le système Morse au premier câble transatlantique, on s'aperçut qu'il n'était pas possible d'échanger plus d'un mot par minute.

7. La pose des câbles sous-marins est une délicate opération qui nécessite des navires spéciaux. La France possède comme flotte télégraphique, les navires suivants : la *Charente* qui appartient à l'Etat, l'*Amiral-Caube* et le *Pouyer-Querlier* (Compagnie française des câbles télégraphiques), le *François-Arago* (Soc. indust. des téléphones). Le câble français Brest-cap Cod mesure 5 790 kilomètres de longueur et pèse plus de 9 millions de kilogrammes ; il a été placé en 1898 par la Société industrielle des téléphones.

8. Pour l'étude du son, voir G. EISENMENGER, *la Physique* (même collection), troisième conférence.

9. Extrait d'un article de Ch. Bourseul paru dans *l'Illustration* du 26 août 1854.

10. GRAHAM BELL, né à Edimbourg en 1847, docteur en philosophie de l'Université de Wurtzbourg (Allemagne), professeur de l'Institution des

sourds-muets de Boston. On rapporte que c'est en cherchant à guérir sa femme, sourde-muette, qu'il inventa le téléphone. Gray et Bell déposèrent leur demande de brevet le même jour (14 février 1876), à deux heures d'intervalle, au bureau des patentes de Washington. Bell avait la priorité.

11. L'expérience montre que l'on peut se servir comme plaques vibrantes de plaques de tôle plus ou moins épaisses, ou même les supprimer. Le fonctionnement de l'appareil est en réalité plus compliqué que nous l'avons indiqué.

12. L'intensité du son reproduit est plus faible que celle du son émis à cause des pertes d'énergie qui accompagnent chaque transformation.

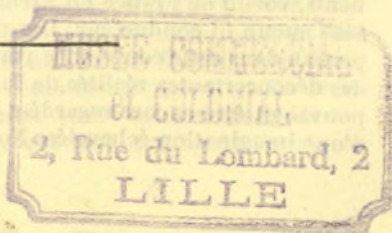
13. C'est l'inventeur du télégraphe imprimeur. Son microphone date de 1877.

14. Quand les postes sont très nombreux, comme c'est le cas pour les grandes villes, on fait usage de grands tableaux, appelés *multiples*, qui permettent de réaliser toutes les combinaisons voulues de bureau à bureau, ou d'abonné à abonné en passant par plusieurs bureaux centraux.

15. Chacun connaît le crépitement caractéristique dénommé *bruit de friture*. Ces vibrations anormales sont dues à plusieurs causes : joints défectueux des fils déplacés sous l'action du vent ou de l'ébranlement du sol, variation du magnétisme terrestre et de l'électricité atmosphérique. Des dérives s'établissent parfois d'un fil à l'autre et amènent des confusions entre les diverses correspondances. Une différence de température entre les deux postes extrêmes suffit quelquefois pour rendre les paroles complètement inintelligibles.

16. Cet intéressant appareil, construit par la Société du télégraphe à Copenhague, ne s'est pas encore introduit dans la pratique courante, mais la reproduction étonnamment nette des sons qu'il fournit, fait espérer qu'il ne restera pas à l'état de curiosité scientifique. Il est probable même qu'il constituera, dans l'avenir, un instrument d'une importance capitale dans le commerce et le journalisme. D'ailleurs, le télégraphe a été chargé d'une lourde tâche au congrès des techniciens à Copenhague (1910) : celle d'enregistrer les communications en langues étrangères, à défaut de sténographes possédant les connaissances techniques et linguistiques nécessaires.

17. Un service régulier est établi entre l'*Illustration* de Paris et le *Daily Mirror* de Londres. Toutes les nuits, pendant deux heures, on emprunte la ligne téléphonique Paris-Londres et l'on transmet sous forme d'images les informations intéressantes de la journée. Les appareils fonctionnent parfaitement et les photographies sont très nettes si l'état de la ligne est satisfaisant. Le fonctionnement simultané du télégraphe et du téléphone couvre les images de balafres.



ONZIÈME CONFÉRENCE

LES ONDES ÉLECTRIQUES A TRAVERS LE MONDE

LES PHÉNOMÈNES D'OSCILLATION ÉLECTRIQUE ET DE RÉSONANCE,
TÉLÉGRAPHIE, TÉLÉPHONIE ET TÉLÉMÉCANIQUE SANS FIL

Les phénomènes de la décharge oscillante. — Les ondes hertziennes et la théorie électromagnétique de la lumière. — La Télégraphie sans fil. — Réception et émission des ondes hertziennes. — La Télégraphie sans fil dans le monde et ses diverses applications. — La direction des ondes : boussoles et phares hertziens. — Les mystères de la radiotélégraphie. — La Téléphonie sans fil et le théâtrophone. — La Télémécanique sans fil et le transport d'énergie à distance.

Les phénomènes électriques étudiés au cours des conférences précédentes nous ont mis en présence de bien des faits surprenants et merveilleux, mais peut-être n'ont-ils pas excité autant d'étonnement que cette application stupéfiante — inconcevable encore il y a quelques années — la **télégraphie sans fil**. Depuis notre enfance, en effet, nous étions habitués à considérer que l'électricité avait besoin de fils pour la véhiculer, et voilà que ces fils aujourd'hui s'éliminent, que les dépêches franchissent les mers et les continents, volent de France en Afrique, d'Europe en Amérique, sans aucun fil conducteur. Les phénomènes qui nous occuperont dans cette conférence vont nous donner l'explication des déconcertantes réalités de la Science actuelle, qui, hier, pouvaient être encore regardées comme le produit des rêves d'une imagination échevelée. Nous entrerons dans un de ces

laboratoires où le savant peut, à son gré, transmettre sa pensée et ses paroles à des milliers de kilomètres, diriger des ballons, des aéroplanes ou des navires, faire partir, à bord de ceux-ci, des coups de canon, hisser des signaux au sommet de leurs mâts, sans d'autre intermédiaire que l'air qui nous entoure.

Les phénomènes de l'influence électrostatique, ainsi que les phénomènes d'induction, nous ont déjà présenté de remarquables manifestations d'actions à distance, mais elles étaient, dans tous les cas, limitées à de courtes longueurs. Il y a là ébranlement de l'éther, mais ébranlement faible, alors que, par les courants alternatifs à haute fréquence, l'ébranlement est tel qu'il peut se communiquer à travers l'éther, à des centaines et même à des milliers de kilomètres. La télégraphie sans fil n'a pas été, pour les savants, une découverte absolument inattendue comme le fut celle des rayons X, mais tout au contraire, elle est le résultat d'une suite de découvertes successives et d'observations dues aux physiciens les plus célèbres des deux mondes comme HERTZ, MAXWELL, THOMSON, LODGE, BRANLY, etc. La télégraphie sans fil s'explique très simplement en considérant que *l'éther, milieu homogène et élastique qui remplit l'atmosphère, transmet d'un point à un autre, par ondulations, par ondes, la Chaleur, la Lumière, l'Électricité, ou toute autre forme que peut prendre l'énergie universelle* ¹.

Phénomènes de décharge oscillante. — L'étude des phénomènes physiques montre que les ondes sonores sont dues à des vibrations sonores ayant pour siège le corps qui émet le son et que transmet l'éther. Comment obtenir des vibrations électriques ?

FEDDERSEN a montré, par l'analyse de l'étincelle faite au miroir tournant, qu'un condensateur électrique peut dans certaines conditions se décharger d'une manière oscillante. Chacun sait que si l'on réunit les deux armatures d'une bouteille de Leyde chargée, en les faisant communiquer au moyen de fils que l'on approche l'un de l'autre, une étincelle jaillit entre les deux conducteurs avant qu'ils arrivent à se toucher. En faisant varier la résistance de ce circuit, Feddersen reconnut que tant que la résistance est

supérieure à une certaine quantité, la décharge se produit en un seul temps d'une des boules à l'autre; l'image donnée par le miroir tournant est une bande lumineuse sans discontinuité. Quand la résistance devient inférieure à cette quantité, la *décharge* devient *oscillante*; au lieu d'avoir lieu en un seul temps, elle se produit de la première boule à la seconde, puis de la seconde à la première, et ainsi de suite jusqu'à ce que la décharge de l'appareil soit complète. Il se produit un va-et-vient entre les deux armatures pendant tout le temps de la décharge, va-et-vient analogue au mouvement d'une lame vibrante déplacée de sa position d'équilibre. L'image de l'étincelle au miroir tournant au lieu d'être une bande lumineuse présente alors, non seulement une suite de discontinuités, mais un certain nombre de bandes transversales dont l'aspect indique bien l'alternance du sens des décharges successives².

La période des décharges oscillantes que réalisa FEDDERSEN était de l'ordre du *millionième de seconde*. Le savant allemand HERTZ³, on constituant le condensateur par deux plaques de cuivre munies de boules placées à 5 ou 6 millimètres l'une de l'autre, obtint des décharges oscillantes dont la période est de l'ordre du *cent-millionième de seconde* et peut atteindre le *billionième de seconde*. Le condensateur se présente alors comme une sorte de diapason électrique et, une fois chargé, effectue une vibration électrique intense pendant le *billionième d'une seconde*, mais l'amplitude va en diminuant dans les fractions de seconde suivantes, de sorte que l'appareil ne tarde pas à revenir au repos. Pour entretenir les vibrations de cet appareil, HERTZ imagina de mettre les armatures de son condensateur avec les pôles d'une bobine de Ruhmkorff en activité. L'étincelle qui se manifeste conserve alors son caractère oscillant. *De cette étincelle part alors une succession ininterrompue d'oscillations électriques qui se propagent tout autour*. L'appareil ainsi réalisé est l'*excitateur de Hertz*⁴.

Les ondes hertziennes. — Les décharges oscillantes donnent naissance dans l'espace environnant à des *ondes électriques* qui se propagent comme les ondes sonores et comme les ondulations que l'on remarque autour du point où un cail-

lou est tombé dans l'eau. Ces ondes, étudiées avec beaucoup de soin par Hertz, sont appelées **ondes hertziennes**.

Les oscillations électriques qui se produisent agissent par induction sur les corps conducteurs voisins et, de tous les objets métalliques placés dans la salle, on peut tirer des étincelles. Mais l'effet est beaucoup plus grand sur un conducteur *accordé*, c'est-à-dire sur un conducteur dont la durée d'oscillation est la même que celle de l'excitateur. Ce conducteur fonctionne comme un résonnateur acoustique : s'il est capable de produire des oscillations de même fréquence que l'excitateur, il fournit, même à grande distance, des étincelles. Hertz a employé un cercle formé d'un fil conducteur présentant une coupure; il réglait les dimensions pour obtenir la **résonance**. Qu'on place ce **résonnateur de Hertz**, dans le voisinage de l'excitateur, à 2 mètres, à 4 mètres, à 20 mètres, à travers portes et murs, on constatera toujours, dans l'obscurité, la production d'une étincelle qui indique l'existence d'un courant dans ce cercle de cuivre. Cette étincelle reproduit même, avec une fidélité remarquable, les irrégularités de celle de l'excitation : *elle dénote la propagation d'une action électrique, depuis l'excitateur qui la produit jusqu'au résonnateur qui la décèle*.

L'espace environnant un excitateur en activité, espace dans lequel un résonnateur est susceptible de fonctionner, constitue le **champ hertzien** créé par cet excitateur. Si l'on dispose à une certaine distance, devant l'excitateur, un écran métallique, et que l'on éloigne graduellement de l'excitateur un résonnateur dont le plan est maintenu parallèle au plan de l'écran, on observe les phénomènes suivants : à une certaine distance de l'excitateur, une étincelle se manifeste au résonnateur, un peu plus loin les étincelles deviennent plus rares et cessent complètement; elles réapparaissent à une certaine distance au delà, deviennent plus nombreuses, puis disparaissent. En somme, le *résonnateur*, éloigné par degrés de l'excitateur, *manifeste des alternatives de fonctionnement et d'extinction dans des régions fixes et déterminées*. Tout rappelle, dans cette expérience, la propagation du son et l'existence des ondes sonores. Le phénomène précédent est très complexe, il nous suffit de savoir qu'il est *périodique* et nous dirons seulement qu'il est dû à l'interférence des

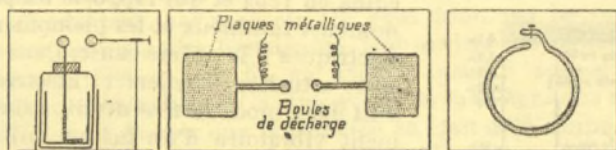
ondes électriques directement émises par l'excitateur et des ondes réfléchies sur l'écran métallique⁶. Le résonnateur met donc en évidence des ondes électriques stationnaires déterminées entre l'excitateur et l'écran par cette interférence. Comme en acoustique, on appellera *ventres* les endroits où le résonnateur fonctionne ; les ventres étant séparés par des *nœuds*. Comme en acoustique encore, on appellera *longueur d'onde* le double de la distance constante qui sépare deux ventres⁶. Cette longueur d'onde est l'analogue de la distance qui sépare deux arêtes consécutives d'ondes produites à la surface de l'eau.

Les courants alternatifs ordinaires correspondent à des ondes dont la longueur se mesure en kilomètres et on ne peut les étudier à ce point de vue ; mais avec le dispositif de Hertz, on arrive à produire des ondes dont la fréquence est assez grande pour que les longueurs d'onde soient assez petites pour être étudiées. HERTZ réalisait des fréquences de 100 000 et la longueur d'onde était 3 mètres ; avec des fréquences 1 000 fois plus grandes, la longueur d'onde est évidemment 3 millimètres. Les ondes lumineuses qui impressionnent notre œil ont une longueur bien plus faible, comprise entre 4 et 8 millièmes de millimètre. *Les ondes électriques sont des ondes de grande longueur*. Ces ondes de grande longueur ne se déplacent pas en ligne droite comme les ondes courtes de la lumière, *elles sont capables de s'incurver autour des obstacles* à la manière des ondes sonores.

Il est facile de calculer la **vitesse de propagation** des ondes hertziennes. Puisque le mouvement se transmet d'une longueur d'onde pendant la durée d'une vibration, on aura la vitesse de propagation en multipliant la longueur d'onde par la fréquence. HERTZ a réalisé pratiquement les essais et fait les calculs, il a trouvé 300 000 kilomètres par seconde. M. BLONDLOT, en France, et d'autres physiciens sont arrivés au même résultat, même par des procédés différents.

Ce résultat est d'une importance capitale. *Cette vitesse de 300 000 kilomètres par seconde est précisément celle de la lumière*. Or c'est cette vitesse si élevée de la lumière qui avait amené à affirmer que les ondes lumineuses se transmettent par une substance très tenue et élastique : l'éther. Nous devons donc maintenant conclure, ce que nous avons

admis par anticipation, que *les ondes électriques se propagent aussi par l'éther*. Nous pouvons pousser plus loin cette assimilation et dire : les ondes lumineuses et les ondes électriques sont deux phénomènes identiques, des *vibrations de l'éther* qui ne diffèrent les unes des autres que par leur grandeur. Les ondes lumineuses visibles ont des longueurs d'onde qui varient suivant la couleur, entre 4 dix-millièmes



Les oscillations électriques.

FIG. 74.
Décharge oscillante
d'un
condensateur.

FIG. 75. — Excitateur
de Hertz.

FIG. 76.
Résonnateur
de Hertz.

de millimètre pour le violet et 8 dix-millièmes de millimètre pour le rouge. Les ondes électriques atteignent quelques centimètres ou quelques mètres, mais le passage des ondes lumineuses aux ondes hertziennes se fait insensiblement. En résumé, on peut dire : *les ondes de l'éther ayant une courte durée de vibration nous apparaissent comme des ondes lumineuses, tandis que les ondes de l'éther d'une durée de vibration relativement très grande ne se manifestent plus que par leurs effets d'induction : ce sont les ondes hertziennes.*

Dans une étude plus complète de ces phénomènes, nous pourrions montrer qu'il est possible de répéter, au moyen des ondes électriques, les phénomènes auxquels donnent naissance les ondes lumineuses. C'est ce qu'a mis en évidence l'illustre savant HERTZ. Les ondes électriques se réfléchissent sur des miroirs métalliques, mais comme les longueurs d'onde sont grandes, il faut de grands miroirs ; elles se réfractent à travers un prisme (on prend généralement un grand prisme de bitume) ; elles peuvent interférer et se pola-

riser tout comme les ondes lumineuses; enfin, nous avons vu qu'elles se propagent avec la même vitesse que ces dernières.

Théorie électromagnétique de la lumière. — Toutes ces propriétés communes aux ondes électriques et aux ondes lumineuses sont venues apporter une confirmation expérimentale des plus précieuses à la théorie que le physicien anglais MAXWELL

édifia en 1864 et qui rapporte les phénomènes lumineux et les phénomènes électriques à la même cause. Dans les idées actuelles, Lumière et Électricité sont deux modes différents du mouvement vibratoire d'un même milieu. Pour nous, une source de lumière, une bougie allumée par exemple, n'est autre chose qu'un faisceau de très petits excitateurs de Hertz, de très petites bouteilles de Leyde qui se déchargent continuellement, entretenus qu'ils sont par la combustion du corps lumineux; ils envoient ainsi tout autour d'eux un mouvement vibratoire auquel notre œil ou la plaque photographique sont sensibles. Augmentons un peu la dimension de ces excitateurs, la source cesse d'être lumineuse pour demeurer seulement calorifique; elle envoie tout autour d'elle un mouvement vibratoire auquel un thermomètre ou notre sens du toucher sont sensibles. Accroissons

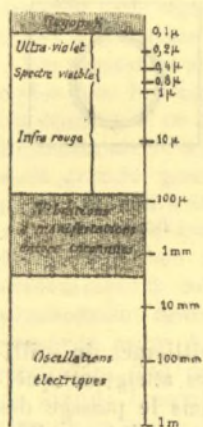


FIG. 77. — Les vibrations de l'éther se manifestent par des propriétés différentes suivant leur fréquence.

encore dans de très grandes proportions les dimensions de ces excitateurs de Hertz hypothétiques, nous arrivons à des dispositifs de quelques millimètres, qui d'ailleurs ont été réalisés, et cette fois-ci, la source n'émet plus que des ondes électriques que nos sens sont impuissants à saisir, mais qu'un résonnateur de Hertz peut mettre en évidence. En quoi diffèrent ces trois ordres de phénomènes? Par leur seule fréquence. De fréquence égale ou inférieure à 50 billions par seconde, ce sont des vibrations électriques; 100 fois plus

rapides, c'est-à-dire se produisant 5 trillions de fois par seconde, elles deviennent *vibrations calorifiques*; 10 000 fois plus rapides, ayant lieu 500 trillions de fois par seconde, elles impressionnent la rétine, ce sont des *ondes lumineuses*.

La Télégraphie sans fil. — Par ce qui précède, nous avons vu qu'il est possible de produire des ondes électriques se propageant dans l'espace et qu'il est possible aussi de déceler ces ondes à une distance plus ou moins considérable au moyen du résonnateur, par exemple. On peut donc, par les ondes électriques ou ondes hertziennes, transmettre des signaux à distance. C'est ce que fit, en 1896, MARCONI ⁷ auquel est attribuée généralement la découverte de la télégraphie sans fil. On vient de voir que le principe en était déjà connu. Le mérite de Marconi fut de mettre en évidence, par des expériences bien conduites, la possibilité de lancer dans l'espace, à des distances considérables, des signaux invisibles. La portée des transmissions n'est limitée que par l'intensité des ondulations et par la sensibilité des récepteurs. Depuis les expériences initiales, elle s'est rapidement accrue. Les distances franchies lors des essais du professeur russe POPOFF furent de 1 500 mètres d'abord, puis de 5 kilomètres. Marconi installa, entre l'île de Wight et Bournemouth, deux postes éloignés l'un de l'autre de 23 kilomètres, puis des stations d'études ont été établies entre Boulogne et Douvres, entre Nice et la Corse, avant que les transmissions d'un continent à l'autre puissent être réalisées.

On a d'abord cherché à améliorer la réception des ondes et l'on s'est basé pour cela sur les phénomènes produits par les ondes électriques. En 1890, M. BRANLY observa que si l'on place, dans le circuit d'une pile et d'une sonnerie électrique, un tube de verre de 3 à 5 millimètres de diamètre contenant de la limaille métallique que maintiennent en place deux pistons conducteurs, la résistance de la limaille est telle que le courant ne passe pas ; mais si l'on vient à produire dans le voisinage une décharge oscillante, la limaille devient conductrice, se *cohère*, et la sonnerie fonctionne. Il suffit ensuite d'un petit choc sur le tube pour ramener la limaille à son état primitif. Ce phénomène a servi de base au *cohéreur de Branly* ou *radio-conducteur* ; ce fut le premier récep-

teur des ondes employé dans la télégraphie sans fil dont il a facilité les premiers progrès. On conçoit que si la sonnerie est remplacée par le récepteur d'un télégraphe Morse, celui-ci imprimera un trait pour une décharge très courte. Aujourd'hui, cet appareil n'est plus employé : il manque de régula-

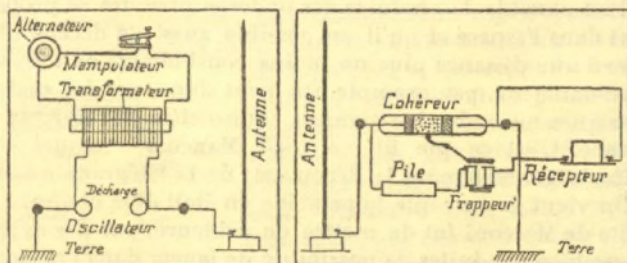


FIG. 78. — Schéma d'un dispositif de la télégraphie sans fil. A gauche, poste transmetteur ; à droite, poste récepteur.

rité. On possède aujourd'hui des dispositifs présentant sur lui de sérieux avantages. On les désigne du nom de **détecteurs d'ondes**.

Le hasard a montré que les ondes électriques sont capables de modifier le magnétisme d'un fil d'acier qui passe à l'intérieur d'un petit appareil d'induction dont la bobine primaire est reliée au sol et la bobine secondaire réunie à un téléphone. La modification de magnétisme se traduit par un crépitement dans le téléphone. C'est là le principe du **détecteur magnétique de MARCONI**, dont le seul inconvénient est de ne pouvoir être relié à un appareil imprimeur Morse.

Les ondes électriques semblent annihiler la résistance qu'éprouve un courant à traverser un électrolyte ; sur ce fait est basé le **détecteur électrolytique de FERRIÉ**. Il se compose d'une petite cuve où l'on électrolyse l'eau acidulée par l'acide sulfurique au moyen de deux électrodes de platine inégales. On établit entre ces électrodes une différence de potentiel à l'aide d'une pile dans le circuit de laquelle on a placé un téléphone ; si la différence de potentiel est insuffisante pour produire l'électrolyse, le téléphone reste silencieux, mais

si une onde arrive, l'électrolyse se produit et le téléphone résonne. Les crépitements dans le téléphone sont longs ou brefs selon que les ondes émises ont été longues ou brèves. Ce détecteur est d'une sensibilité extrême : il permet d'entendre à plusieurs centaines de mètres les étincelles des trembleurs de sonnette, d'entendre approcher un nuage longtemps avant qu'il arrive au voisinage de l'appareil ; c'est lui le plus employé actuellement dans les stations de télégraphie sans fil ⁸.

La réception des ondes hertziennes. — En indiquant quelques-uns des phénomènes produits par les ondes électriques, nous avons vu que la réception des ondes est une opération réalisable de plusieurs façons. Primitivement, on cherchait à obtenir sur une feuille de papier des points et des traits en accouplant un cohéreur avec un récepteur Morse. On préfère aujourd'hui recevoir les signaux hertziens dans des appareils téléphoniques dont la sensibilité et la régularité de fonctionnement sont très supérieures à celles des cohéreurs ; c'est le bruit affaibli de l'étincelle d'émission que l'on perçoit dans le téléphone. On y trouve un grand avantage car les décharges électriques des orages lointains, les variations d'électrisation de l'atmosphère produisent dans l'éther des ondes plus ou moins irrégulières qui font vibrer les appareils des postes récepteurs. Ceux-ci enregistrent alors des signaux incompréhensibles appelés « parasites » et la bande imprimée devient illisible ; avec les pays chauds, où les courants électriques naturels sont intenses, les communications devenaient souvent impossibles. *L'emploi des récepteurs téléphoniques* a permis de triompher de bien des obstacles, pourtant les bruits parasites des pays tropicaux couvrent parfois les émissions des postes radiotélégraphiques : les communications avec l'Afrique occidentale restent difficiles seize heures sur vingt-quatre, et impossibles avec le Sahara.

Un nouveau progrès était nécessaire pour triompher des bruits électromagnétiques du désert. On a imaginé de correspondre non pas au moyen de bruits, mais au moyen d'émissions renfermant au moins 500 à 600 séries d'ébranlements de l'éther par seconde, ce qui donne dans le téléphone un *son musical* de hauteur correspondante à ce nombre de vibrations.

Le *la* normal étant fourni par 435 vibrations à la seconde, si l'on télégraphie sans fil avec des émissions de fréquence 870 par seconde, on échange dans l'espace des *la* qui sont l'octave supérieur du *la* normal. Chaque poste peut ainsi envoyer sa note et monter sa gamme. Or les sons musicaux se distinguent du vacarme produit dans le téléphone par les courants provenant de l'atmosphère surchauffée ou humide des déserts et des forêts tropicales.

Les modifications apportées à la réception des ondes hertziennes ont entraîné des modifications dans le mode d'émission de ces ondes ; aussi devons-nous décrire très rapidement les procédés suivis dans les postes récents de télégraphie sans fil pour l'émission des ondes qui doivent se transmettre à d'énormes distances.

L'émission des ondes hertziennes. — Le mode d'émission que nous avons décrit précédemment ne saurait être qu'un procédé de laboratoire, car la distance à laquelle il permet de transmettre des signes ne dépasse pas 20 mètres dans les circonstances les plus favorables.

Or, l'énergie des vibrations est d'autant plus grande que la capacité du conducteur déchargé est elle-même plus grande ; on est donc amené à monter en parallèle plusieurs bouteilles de Leyde. Par ce moyen, on obtient une étincelle oscillante, et les ondes déterminées dans l'éther sont beaucoup plus longues que celles fournies par l'oscillateur de Hertz : 200, 300, 500, 1000 mètres suivant la grandeur des bouteilles de Leyde. On a reconnu que c'était là une condition excellente pour la transmission à de grandes distances⁹. Seulement un système de bouteilles de Leyde n'a, seul, aucune portée au loin, parce qu'il constitue un système fermé. *Il faut donc réunir un système fermé avec un système ouvert, de manière que les vibrations électriques soient produites dans le système fermé, mais lancées dans l'espace par le système ouvert.* C'est ce que l'on obtient en faisant agir, par induction, les oscillations du circuit fermé sur un circuit ouvert constitué par un simple fil. Ce fil porte le nom d'**antenne**. C'est à Marconi que revient le mérite d'avoir, le premier, reconnu la valeur de l'antenne.

L'expérience a montré que, toutes choses égales, la portée

d'une station transmettrice et la netteté de la réception étaient maxima pour certaines dimensions des antennes. Cela tient à ce que les antennes participent, au point de vue électrique, aux vibrations électriques qu'elles reçoivent¹⁰. Pour augmenter l'énergie radiante, on donne généralement aux

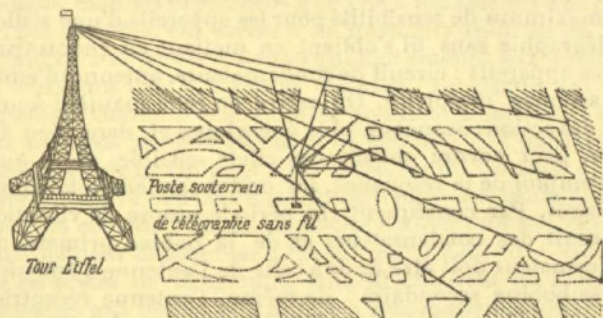


FIG. 79. — Station radio-télégraphique du Champ-de-Mars à Paris.

antennes un grand développement : on les constitue par un réseau de câbles qui s'étalent dans l'espace. Ces câbles sont réunis à la partie inférieure en un seul câble qui est en relation avec les appareils de transmission ou de réception, tandis qu'à la partie supérieure ils sont retenus par des attaches isolantes fixées à des mâts. La figure 79 montre le dispositif des antennes de la Tour Eiffel, à Paris.

D'une manière générale, pour obtenir des ondes de grande longueur et pouvoir mettre en jeu une énergie considérable, on utilise le système suivant (*accouplement indirect*). Le courant est produit soit par une bobine de Ruhmkorff actionnée par des accumulateurs, soit par un transformateur industriel à haute tension. Une batterie de condensateurs est chargée par le circuit induit et la décharge s'effectue dans l'éclateur en traversant un solénoïde de longueur variable qui devient le siège d'oscillations agissant par induction sur un autre enroulement faisant suite au premier. Sur le circuit primaire de la bobine de Ruhmkorff, on a placé un manipulateur Morse qui permet de produire des séries d'ondes électriques longues

et brèves. Les deux boules de l'éclateur sont reliées, l'une à l'antenne, l'autre au sol.

Installation d'un poste de télégraphie sans fil. — Un poste complet doit évidemment comprendre un *transmetteur* et un *récepteur* (détecteur et récepteur téléphonique).

Le maximum de sensibilité pour les appareils d'une station de télégraphie sans fil s'obtient en mettant en **résonance** tous les appareils : circuit de condensateurs, antennes d'émission, antenne réceptrice. On arrive de cette manière à produire des actions beaucoup plus énergiques et, dans bien des cas, on peut encore obtenir des effets sensibles alors que, sans l'emploi de la résonance, les ondes seraient totalement inefficaces. Par conséquent, la période propre de vibration du circuit des condensateurs et de la bobine primaire du transformateur doit être égale à celle de l'antenne d'émission avec sa bobine secondaire ; de même, l'antenne réceptrice et les appareils qui lui sont reliés doivent avoir la même période que l'antenne émettrice. On obtient cette **syntonie**, d'une part, en réglant dans le circuit primaire les condensateurs, la capacité et la self-induction des fils ; d'autre part, en faisant communiquer les antennes avec des spires dont on utilise un nombre plus ou moins grand ; on peut ainsi accorder l'antenne sur n'importe quelle longueur d'onde de la station transmettrice. C'est là un avantage très appréciable pour les stations de côtes ou les postes militaires, car, dans ces cas, il arrive que plusieurs stations envoient simultanément des télégrammes. Pour les navires, il est inutile que la syntonie soit aussi rigoureuse, de façon que l'on puisse toujours recevoir des communications, sans qu'il soit nécessaire d'accorder les appareils sur la longueur d'onde qui arrive.

La précision de l'accord d'un circuit électrique sur un autre dépend encore de l'**amortissement des ondes**. L'énergie électrique des ondes qui exécutent des mouvements oscillatoires dans les conducteurs, se transforme peu à peu, par la résistance des conducteurs, en chaleur Joule, ce qui a pour effet d'amortir les oscillations. Or, *la syntonie est d'autant plus facile à réaliser que les ondes sont moins amorties* ; et comme c'est l'étincelle, créatrice des ondes, qui constitue la cause de l'amortissement, il semble que les ondes non

amorties ne pourront être obtenues que si l'on arrive à engendrer les vibrations autrement que par l'étincelle. Le savant danois POULSEN, inventeur du télégraphone (conférence X), a indiqué une méthode spéciale pour produire des vibrations rapides non amorties ; elle repose sur le principe de l'arc chantant, mais les espérances que l'on a fondées sur elle ne se sont pas réalisées. On arrive à de meilleurs résultats en employant de *très petites étincelles* qui font émettre aux antennes des vibrations très faiblement amorties. Le circuit des condensateurs donne à l'antenne la première impulsion ; aussi cette méthode porte-elle le nom de méthode de **l'excitation par impulsion**. On peut ainsi produire un nombre d'étincelles fort élevé pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines. Or plusieurs centaines de ces étincelles donnent *un son musical* d'une hauteur déterminée : les *étincelles chantent*. C'est ainsi que les postes de télégraphie sans fil émettent les *étincelles chantantes* qui feront entendre un son musical dans le téléphone du poste récepteur¹¹.

Avant d'examiner le développement pris, à l'heure actuelle, dans le monde entier par la télégraphie sans fil et les nombreuses applications de ce nouveau mode de communication, il convient, pour résumer, de considérer que *les bases du développement récent de la télégraphie sans fil* sont, en prenant comme point de départ les expériences de Hertz : 1° l'emploi de l'antenne ; 2° la production d'ondes de grandes longueurs (100 à 3 000 mètres) dans le circuit des condensateurs ; 3° l'accouplement indirect des antennes, aussi bien avec le circuit des condensateurs qu'avec le cohéreur ; 4° la syntonisation de tous les appareils d'émission et de réception ; 5° l'augmentation de l'énergie émise ; 6° la modification possible de la longueur d'onde employée au poste émetteur et réalisation facile de l'accord des appareils d'émission sur les ondes qui arrivent ; 7° l'emploi, grâce à l'excitation par impulsion, d'ondes le moins possible amorties.

La Télégraphie sans fil dans le Monde. — Les progrès de la télégraphie sans fil sont si rapides que l'avenir de ce nouveau moyen de communication paraît devoir dépasser les espérances les plus optimistes. Aujourd'hui, on échange des radiotélégrammes à des distances considérables en utilisant une

énergie infime et cela par tous les temps. On peut converser à 2 500 kilomètres de distance (Paris-Athènes) en utilisant l'énergie d'un petit moteur d'automobile de 10 à 12 chevaux; les télégrammes franchissent l'Atlantique, alors qu'en 1893 Hertz n'envoyait encore des signaux qu'à quelques mètres de distance. Toutes les nations possèdent aujourd'hui des stations de télégraphie sans fil sur leur territoire et ont installé des appareils sur leurs vaisseaux; aussi le nombre des stations croît-il d'année en année ainsi que le nombre des dépêches envoyées¹². Au 1^{er} janvier 1909, le nombre des stations terrestres était de 92 et celui des stations de bord, 416; ces nombres sont devenus 136 et 619 au 1^{er} janvier 1910, et se sont élevés respectivement à 219 et 988 au 1^{er} janvier 1911. De grands projets actuellement à l'étude viendront encore les accroître dans de grandes proportions.

Les premières stations puissantes ont été établies à Poldhu (Angleterre) et au Cap Cod (États-Unis) à 5 000 kilomètres de distance. La Tour Eiffel reçoit régulièrement les communications de la station de Glace-Bay (Canada). La compagnie allemande Telefunken a établi une forte station à Nauen près de Berlin, avec une antenne de 100 mètres de hauteur; la Compagnie américaine Fessenden a établi deux stations, l'une à Boston (États-Unis), l'autre à *Machrihanish* (Écosse), distantes de 4 800 kilom., avec des antennes de 150 mètres de hauteur. La France possède la plus belle antenne du monde grâce à la Tour Eiffel¹³; sa station radiotélégraphique du *Champ-de-Mars*, dont le rôle est exclusivement militaire, est remarquable en outre par la portée obtenue en raison de la faible puissance mise en jeu. La Tour Eiffel est entendue par le poste Marconi de Glace Bay (Canada) avec une force de 13 chevaux seulement; elle a perçu les signaux envoyés de Rufisque (Sénégal), à une distance de 4 700 kilomètres avec 7 chevaux; or, les grands postes de l'étranger mettent en jeu des centaines et même des milliers de chevaux. La longueur d'onde normale obtenue avec les appareils à étincelles rares est de 2 200 mètres. L'alternateur à résonance BÉTHENOD y fournit des étincelles fréquentes ou musicales; au moyen d'une simple manette, on envoie les décharges correspondant à la note que l'on désire. — D'autres stations puissantes sont en voie de réalisation en Italie, en République Argentine,

mais il est probable que la Tour Eiffel restera le poste radio-télégraphique le plus puissant et deviendra la station centrale du réseau international.

La Tour Eiffel communique avec Fez (Maroc), et communiquera bientôt avec Colomb-Béchar (Sud-Oranais), Abomey (Dahomey), Djibouti, etc. On envisage la possibilité d'encercler le globe d'un réseau d'ondes hertziennes partant de Paris



FIG. 80. — Tracé du réseau mondial de la télégraphie sans fil française.

pour y revenir, après avoir relié entre elles les possessions françaises disséminées dans les cinq parties du monde¹⁴. L'Allemagne et l'Angleterre se proposent chacune de son côté de couvrir le monde d'un réseau hertzien. — Tous ces projets, qui semblaient des utopies il y a peu de temps, paraissent aujourd'hui d'une réalisation certaine grâce à l'emploi des émissions musicales fournies par les alternateurs à résonance. La légèreté de ces alternateurs et leur faible encombrement leur donnent des avantages fondamentaux et leur trouvent une place sur les voitures automobiles, les navires, les ballons dirigeables, les aéroplanes.

La télégraphie sans fil a trouvé, jusqu'ici, son application la plus importante sur mer dans les communications des navires avec la terre ferme et des navires entre eux; les antennes sont fixées aux mâts, tandis que sur terre elles sont supportées par les phares. Les transatlantiques reçoivent tous les jours les dépêches des continents et peuvent rédiger un journal de bord; de la station de Poldhu, elles sont envoyées dans un rayon de 2 000 kilomètres à onze heures du matin et à onze heures du soir, quatre fois de suite afin que tous les navires puis-

sent les recevoir, même s'ils sont occupés à correspondre avec d'autres navires. Le 24 janvier 1909, grâce à la télégraphie sans fil, sept cent soixante naufragés furent sauvés lors de la collision du transatlantique *Republica* par le vapeur italien *Florida*. La plupart des grands steamers ont leurs appareils de télégraphie sans fil¹⁵. Les expériences de télégraphie sans fil à bord des dirigeables et des aéroplanes sont déjà nombreuses. Aux manœuvres de 1910, le dirigeable *Clément-Bayard* put émettre des radio-télégrammes nettement enregistrés à plus de 100 kilomètres ; le poste ne pesait pas plus de 60 kilogrammes ; la mise à la terre de l'antenne — long câble pendant de la nacelle — était remplacée par les liaisons de la nacelle et de la carcasse métallique. A bord des aéroplanes, les expériences sont conduites par le capitaine BRÉNOT ; l'énergie électrique est fournie par le moteur même de l'aéroplane et l'équipage télégraphique, tous accessoires compris, est de 20 kilogrammes ; l'antenne est un câble nu de 1 millimètre de diamètre, en bronze téléphonique, et de 120 mètres de longueur.

Les applications de la télégraphie sans fil. — La télégraphie sans fil ne peut naturellement pas lutter avec la télégraphie ordinaire dans la pratique courante, mais elle la remplace chaque fois que les communications par fils sont impossibles ou trop difficiles à réaliser.

Par la télégraphie sans fil, il est facile d'envoyer l'heure par-dessus les mers à tous les navigateurs. La Tour Eiffel envoie l'heure de l'Observatoire de Paris, tous les jours, à onze heures et à minuit, dans un rayon de 3 000 kilomètres ; sur mer comme sur terre, les postes connaissent ainsi l'heure exacte à une seconde près ; c'est une précision que les méthodes ordinaires ne donnent pas. Grâce à ces données horaires, les marins peuvent « faire le point », c'est-à-dire déterminer d'une façon précise l'endroit où ils se trouvent. Dans certains pays, on a commencé à utiliser la télégraphie sans fil pour la transmission des observations météorologiques au Service central ; Gibraltar, par exemple, envoie chaque matin ses observations à Londres ; la dépêche est copiée au passage de la Tour Eiffel et transmise au Bureau central météorologique. La radiotélégraphie est encore utile pour la détermination des longitudes ; en effet, si deux observateurs, situés l'un en A,

l'autre en B, notent chacun l'heure de son collègue et la sienne, l'écart entre les deux heures fournira la différence de longitude de leur position respective. La télégraphie sans fil revêt une importance particulière en *temps de guerre*; elle permet, en effet, de relier constamment les différents corps de troupes soit au quartier général, soit aux places fortes : les grandes manœuvres, la guerre russo-japonaise, l'expédition du Maroc, les expériences faites toutes les jours, montrent tout le parti que l'on peut en tirer; on peut même communiquer avec les trains lancés à toute vitesse. On a établi des *postes mobiles* d'une portée de 100 à 200 kilomètres; il leur faut une syntonisation parfaite afin de se garantir contre les émissions d'ondes étrangères; les mâts servant de supports d'antennes sont formés de tubes d'acier télescopiques et peuvent atteindre 26 mètres : l'antenne est du type parapluie à quatre brins; tout le matériel est réparti en deux voitures. Enfin, le professeur CEREBOTANI vient d'imaginer un *récepteur de poche* destiné aux détachements et mêmes aux hommes isolés envoyés en reconnaissance et permettant de recevoir les ordres transmis, dans un rayon de 30 à 40 kilomètres; l'appareil présente l'aspect et les dimensions d'un chronomètre, le cadran porte les lettres de l'alphabet, des mots ou des signes conventionnels devant lesquels s'arrêtera l'aiguille influencée par les ondes hertziennes; l'arrivée d'une dépêche est annoncée par une sonnerie analogue à celle de certaines montres.

La direction des ondes. Boussoles hertziennes et phares hertiens.

— Le grief capital, que l'on a fait jusqu'ici à la télégraphie sans fil, c'était de rayonner dans toutes les directions, de ne pas assurer le secret des dépêches, qui peuvent être captées par n'importe quel poste situé dans la zone d'action, et, en outre, d'amener, par la superposition et le mélange des ondes, une confusion qui ne pouvait que s'accroître avec l'augmentation du nombre de postes et le développement du système. Aussi a-t-on cherché à orienter les ondes dans une direction déterminée, à les diriger dans l'espace, à leur donner en un mot les avantages de la télégraphie avec fil. MM. BELLINI et TOSI, ingénieurs, anciens officiers de la marine italienne ont découvert un procédé merveilleux. Aux antennes

de télégraphie sans fil, ils ajoutent deux autres antennes disposées dans un plan perpendiculaire au leur; le poste se complète par un appareil spécial d'orientation auquel les inventeurs ont donné le nom de **radiogonometre**, c'est-à-dire qui mesure les angles de direction des ondes. Cet appareil, ou *boussole hertzienn*e présente un cadran divisé en 360 degrés et apparaît comme le centre de rayonnement de nombreux fils électriques embrassant les 360 degrés. On peut télégraphier dans la direction du 52° degré, par exemple, et dans cette direction seulement, les ondes sont transmises. Pour la réception, un dispositif analogue permet de s'orienter pour recevoir les ondes venant d'un point quelconque de l'horizon. Le système Bellini-Tosi a été appliqué, en 1910, au poste de Boulogne-sur-Mer, et installé sur les bâtiments de la Compagnie transatlantique⁴⁶; les navires munis de cet appareil peuvent se repérer eux-mêmes sur les postes de télégraphie sans fil de la côte, avec la même facilité que par un temps clair en observant les feux du littoral. C'est là le plus remarquable progrès de la télégraphie sans fil qui nous a déjà habitués à tant d'étonnement depuis son récent avènement.

En 1911, le ministère des Travaux publics a décidé l'établissement de trois **phares hertziens** pour la protection de la navigation maritime en temps de brume. Les trois postes seront établis aux lieux suivants : Ouessant, île de Sein, bateau-feu à 7 milles du cap de la Hève; ils émettront chacun un signal caractéristique.

Les mystères de la télégraphie sans fil. — Tous les problèmes que soulève la merveilleuse découverte de Hertz ne sont pas encore élucidés. A mesure que les postes s'éloignent les uns des autres, la courbure de la Terre constitue un obstacle de plus en plus considérable; quel est alors le *mode de propagation des ondes*? traversent-elles uniquement l'air? On est resté longtemps avant de se demander quel pouvait être le rôle probable de la conductibilité de la terre; on admet aujourd'hui que les ondes glissent à la surface du Globe. On a, en effet, remarqué que, sur mer, on peut télégraphier à des distances plus considérables que sur la terre; or, l'eau de mer conduit les ondes électriques beaucoup mieux que le sol. *L'influence de la lumière solaire sur la propagation des ondes*

semble être néfaste; il se produit une véritable absorption des ondes hertziennes pendant le jour. On pense que cette absorption est due à l'ionisation des molécules gazeuses de l'air sous l'effet des radiations ultra-violettes de la lumière solaire. Les ondes de grande longueur et de petite amplitude sont moins facilement absorbables que les ondes courtes et de grande amplitude. M. Marconi a pu obtenir des ondes de 8000 mètres, et il a constaté que l'énergie reçue pendant le jour était plus forte que celle réceptible la nuit. A Buenos-Aires (République Argentine), à 9 600 kilomètres de Clifden (Irlande), les signaux de Clifden sont souvent reçus avec autant de netteté le jour que la nuit. L'explication donnée actuellement n'est pas complète. La portée de la transmission varie souvent sans raison connue : on cite un navire dont le rayon d'action ne dépasse pas 200 milles devenu capable de transmettre à une distance six fois plus grande, sans que l'état météorologique, magnétique, électrique de l'atmosphère paraisse modifié. Enfin, des navires, incapables de se mettre en communication proche, ont pu facilement impressionner des appareils lointains; ainsi pendant l'hiver de 1909, le steamer *Coronia* se trouvant dans la Méditerranée n'a pu communiquer avec les stations italiennes, alors qu'il échangeait des dépêches avec les côtes anglaises et hollandaises.

En somme, la télégraphie sans fil n'est encore qu'à ses débuts; les phénomènes sur lesquels elle repose ne sont pas complètement connus, et nous ne faisons encore qu'entrevoir les services que la radiotélégraphie peut rendre à l'humanité.

La Téléphonie sans fil. — L'arc voltaïque que nous avons vu transformer les méthodes métallurgiques peut aussi à l'occasion se transformer en un chanteur ou un causeur délicat; après avoir donné lieu à de curieuses expériences qui mettent bien en évidence sa souplesse et sa docilité (arc chantant, arc parlant, arc téléphone, arc microphone, arc phonographe), il a fourni la meilleure solution actuelle au problème de la téléphonie sans fil.

La téléphonie sans fil repose sur une expérience de DUBDELL que nous allons brièvement rappeler. Si entre les deux charbons d'un arc alimenté par du courant continu, on branche

un circuit formé d'un condensateur et d'une bobine de fil isolé, l'arc qui était silencieux émet tout à coup un son dont la hauteur dépend du choix de la bobine et du condensateur. On dit alors que le circuit est en *résonance*, c'est-à-dire qu'un courant alternatif prend naissance et se renforce à l'intérieur du courant dérivé, se superposant dans l'arc au courant primitif d'alimentation. Le son produit par l'arc est une conséquence de la présence de ce courant alternatif; les variations rapides et périodiques de l'intensité de ce courant se traduisent, en effet, par des variations correspondantes du volume de l'arc. Ces variations à leur tour engendrent les modifications de pression qui sont nécessaires à la production du son. En somme, au moyen de l'arc voltaïque et d'un courant approprié, on peut produire des courants alternatifs très rapides (30000 à 40000 par seconde), auxquels on a donné le nom d'*ondes entretenues*; celles-ci sont capables de transmettre à de grandes distances des phénomènes d'induction très énergiques. Faisons agir par induction la bobine du circuit sur une seconde bobine reliée, d'une part, avec une antenne et, d'autre part, avec un microphone relié à la terre. Par ce dispositif, on peut envoyer, au moyen de l'antenne, des ondes électromagnétiques dont la périodicité sera réglée par le circuit de résonance. Si l'on parle devant le microphone, les ondes émises auront leur amplitude modifiée; le détecteur d'ondes du récepteur accusera ces fluctuations, et le son qui en résultera dans le téléphone reproduira les ébranlements sonores du poste de départ. Avec un appareil très simple, M. POULSEN put, en 1903, réaliser des expériences encourageantes, mais les premiers succès en téléphonie sans fil ne datent que de 1906; à cette époque, il put téléphoner de Berlin à Copenhague (460 kilomètres). Avec des appareils plus perfectionnés, M. DE FOREST a fait des expériences démonstratives entre la Tour Eiffel et Villejuif; en avril 1909, les lieutenants de vaisseau COLIN et JEANNE ont pu converser très distinctement entre la Tour Eiffel et Melun (50 km.) et même à 110 kilomètres, au large de Toulon. Le système Poulsen vient d'être installé en Californie où il fournit une portée de transmission de 500 kilomètres. En téléphonie sans fil, le « bruit de friture » si intolérable en téléphonie ordinaire, et qui est dû aux perturbations extérieures, se trouve complètement atténué.

Au moyen d'un transmetteur d'une sensibilité inouïe, le *dictographe*, imaginé en Amérique par Rühmer, on a pu réaliser le **théâtrophone sans fil** qui permet d'écouter un opéra ou un concert à domicile. Depuis 1910, il existe à New-York sur le toit du Métropolitan-Opera, un poste radio-téléphonique permettant de transmettre à une vingtaine de stations réceptrices éparses, un opéra tout entier. En face de la scène deux dictographes, de la dimension d'une carte à jouer, reçoivent les ondes sonores qui seront transformées en ondes électriques; celles-ci parviennent à l'antenne du poste transmetteur et rayonnent librement dans l'espace. Aux postes récepteurs, les chants sont rendus dans toute leur harmonie et leur puissance vocale. Les paquebots pourvus du récepteur radio-téléphonique peuvent aujourd'hui offrir à leurs passagers le plaisir d'entendre un opéra parfaitement joué.

La Télémechanique sans fil. — La télémechanique sans fil est une généralisation de la télégraphie sans fil, elle repose comme elle sur la conductibilité intermittente des reconducteurs. La fermeture d'un circuit de pile par le rayonnement d'une étincelle permet de déterminer au loin, sans fil de ligne, un effet quelconque et en particulier une action mécanique; par exemple, il est possible d'enflammer des matières combustibles, de provoquer des explosions, d'allumer des lampes, de mettre en marche un moteur, si l'énergie nécessaire au fonctionnement des appareils disposés à la station d'exécution n'exige qu'un déclenchement pour produire et entretenir l'effet commandé. De même qu'en télégraphie sans fil, le poste central d'émission est capable d'agir sur tous les postes récepteurs qui se trouveront à sa portée. Il faudra établir la syntonisation du poste central et de l'un des postes récepteurs pour assurer entre eux une communication exclusive; grâce à une syntonisation automatique, on pourra éliminer tout risque de perturbation due à l'action des ondes étrangères.

Par la télémechanique, les radiations hertziennes pourront pénétrer dans les arsenaux, les casernes, les poudrières (elles traversent des murs de pierre de 1 mètre d'épaisseur), charger comme des bouteilles de Leyde les navires de fer et

produire l'explosion des soutes, des poudrières et des obus; en 1909, à Toulon, on fit exploser à distance des caisses de poudre. Les ondes hertziennes pourront servir à la transmission de l'énergie à distance, et déjà bien des expériences concluantes ont été faites; un ingénieur anglais a pu alimenter une lampe située à 4 ou 5 milles de la source d'électricité, et l'on a déjà pu diriger des torpilles sans aucun fil métallique. Les expériences de M. GABET, en France, pour la direction des torpilles par ondes hertziennes remontent à l'année 1907; la torpille est soutenue par un flotteur porteur d'une antenne de télégraphie sans fil et emporte environ 300 kilogrammes d'explosifs; sa longueur est de 9 mètres environ. On cherche à appliquer ce procédé à la direction des bateaux de sauvetage qui pourront lutter contre les flots sans compromettre des vies humaines, à la direction des ballons, des cerfs-volants munis d'appareils photographiques, et des aéroplanes.

Les expériences de M. WIRTH, professeur à Nuremberg, faites en 1911, sur le Wansee, près de Berlin, ont tenu du prodige. Une embarcation de 15 mètres de longueur, munie de batteries d'accumulateurs et d'un gouvernail électrique, fut mise en mouvement et dirigée par les ondes hertziennes; on put même faire partir à bord des coups de feu et actionner des signaux. Une commission maritime étudie actuellement, en Allemagne, les applications possibles de cette découverte.

Cette conférence, par l'étude rapide des ondes hertziennes et de leurs applications, nous a mis en présence des plus merveilleuses découvertes de la science moderne. Au moyen de ces ondes, dont aucun de nos sens ne peut nous indiquer la présence, l'homme fait parvenir instantanément sa pensée et ses paroles à l'autre bout du monde. Avec elles, les distances n'existent plus, et rien ne nous permet de dire ce qu'elles sont encore capables de faire pour le plus grand bénéfice de la Science et de l'Humanité.



NOTES DE LA ONZIÈME CONFÉRENCE

1. Au sujet de l'éther et de la transmission des ondes sonores et lumineuses, voir G. EISENMENGER, *la Physique* (même collection).

2. Le phénomène électrique de la décharge oscillante présente une analogie intéressante avec le phénomène suivant d'hydraulique : deux vases communicants contiennent de l'eau, et le tube de large section qui les réunit est commandé par un robinet. Si ce robinet est à peine ouvert, grande résistance au passage du liquide, les deux surfaces des liquides viennent dans le même plan *sans oscillation* (image de la décharge ordinaire s'effectuant en un seul temps). Au contraire, si le tube est large et grandement ouvert, il se produit des *oscillations*, dont l'amplitude diminue peu à peu à cause des frottements (décharge oscillante).

3. HERTZ, physicien allemand (1857-1894). Remarqué et encouragé par Helmholtz, il fut nommé professeur à Karlsruhe et c'est là qu'il accomplit les travaux qui ont immortalisé son nom.

4. Les boules sont plongées dans l'huile de vaseline, car elles s'altèrent rapidement à l'air.

5. Le même fait se passe quand on laisse tomber deux pierres dans l'eau à une certaine distance l'une de l'autre. En certains points de la surface de l'eau, les mouvements transmis s'annulent, car, en ces points, on peut avoir un creux provenant de l'une des pierres et un relief venant de l'autre pierre.

6. On a vu en acoustique (voir G. EISENMENGER, *la Physique*, même collection), que la longueur d'onde d'un son est le chemin parcouru par le son pendant la durée d'une vibration. Si v est la vitesse du son, n le nombre de vibrations par seconde, l la longueur d'onde, on a $v = nl$. Pour la *normal* la longueur d'onde est $340 \text{ m} : 435 = 0 \text{ m. } 78$.

7. MARCONI, né en 1875, électricien italien. Ses premières expériences furent faites avec le concours de l'administration anglaise des postes et télégraphes. En 1899, il envoya, en présence des délégués d'une commission française, une dépêche de Boulogne à Douvres.

8. Il faut encore mentionner les *détecteurs thermiques*. Ce sont des thermocouples formés de deux corps conducteurs qui se touchent, mais autant que possible par un seul point. Quand des ondes faibles viennent à les rencontrer, un courant thermique prend naissance : l'appareil réagit et fait entendre un crépitement dans le téléphone qui lui est raccordé. On choisit, comme substances de contact, un métal d'une part, et du graphite, de la galène, du bioxyde de manganèse d'autre part. Le poste de la Tour Eiffel utilise aussi le *détecteur à cristaux* du capitaine BRENOR, dont la résistance varie suivant que le contact entre l'un de ces cristaux et une petite surface de platine est léger ou intime. Ces variations de résistance correspondent à des variations de l'accord du poste récepteur avec les ondes agissantes.

9. Les longueurs d'onde avec lesquelles on télégraphie sans fil aujourd'hui varient de 100 à 3 000 mètres.

10. Quand l'antenne est constituée par un simple câble métallique, son mode vibratoire rappelle celui des tuyaux sonores ; si elle ne communique avec la terre que par l'intermédiaire d'une résistance considérable, elle se comporte comme un tuyau fermé aux deux bouts, c'est-à-dire que la longueur est un multiple entier de la demi-longueur des ondes qui y excitent la résonance (*système direct*). Si elle communique franchement avec le sol, elle se comporte comme un tuyau fermé à l'un des bouts, c'est-à-dire que la longueur est un multiple impair du quart de celle des ondes qui provoquent la résonance (*système indirect*). Si les antennes sont constituées par un groupe de câbles métalliques, ces lois cessent de s'appliquer, mais le maximum d'action exige un certain accord des antennes avec la longueur des ondes émises.

11. On obtient encore des émissions musicales soit au moyen d'éclateurs tournants (Marconi), soit au moyen d'alternateurs à fréquence élevée du type ordinaire à fer tournant (système allemand Telefunken).

12. Du 1^{er} mai 1910 au 30 avril 1911, les messages entre Clifden (Irlande) et Glace-Bay (Canada) forment 812 200 mots.

13. L'antenne est constituée par six câbles métalliques de 5 millimètres de diamètre réunis au poste par un câble unique vertical. Au sommet de la Tour les six fils sont amarrés isolément sur une poutre fixée transversalement sur la lanterne du phare, afin de répartir les tractions qui atteignent 6 000 kilogrammes par grand vent, tout en donnant un isolement électrique suffisant pour des tensions qui dépassent 1 million de volts.

14. Il suffirait d'une douzaine de postes de télégraphie sans fil pour relier non seulement nos colonies à la métropole mais encore pour ceinturer la Terre, d'un flot ininterrompu d'ondes françaises, par Maroc-Tombouctou-Sénégal-Dahomey-Djibouti-Madagascar-Pondichéry-Saïgon-Nouvelle-Calédonie-Îles Marquises-Martinique. L'établissement de ce réseau ne coûterait pas plus de 12 millions.

15. A bord du *Mauretania* (ligne de New-York-Liverpool), un grand coureur de Londres a transformé plusieurs cabines en un salon d'exposition. Les visiteuses peuvent faire leurs commandes à Londres par la téléphonie sans fil et trouver leurs toilettes prêtes à l'arrivée. Sur des lignes plus longues, la livraison pourrait avoir lieu à la première escale. Des salons analogues vont être installés sur les autres paquebots de la Compagnie Cunard.

16. La *Provence* a été pourvue la première de la boussole hertzienne. Le navire a pu marcher par brume épaisse sans crainte de collision, sans dévier de sa route et sans ralentir sa vitesse : les officiers ont pu déterminer avec une exactitude remarquable la direction de plusieurs navires sans les voir, bien entendu. Le commandant Poncelet conclut, dans son rapport, que cette invention est destinée à révolutionner les méthodes de navigation.

MUSÉE COMMERCIAL
ET INDUSTRIEL
2, Rue du Lombard,
LILLE

DOUZIÈME CONFÉRENCE

L'ÉLECTRICITÉ ET LES ÊTRES VIVANTS

PHÉNOMÈNES PRODUITS CHEZ LES ANIMAUX ET LES VÉGÉTAUX

L'Électricité qui sauve : Électrophysiologie, Électrodiagnostic, Électrothérapie. — L'Électricité qui endort et l'Électricité qui tue; anesthésie et électrocution; accidents électriques. — L'Électricité et la végétation; électroculture et motoculture électrique. — L'Électricité dans la Science et l'Électricité de demain.

Les conférences précédentes nous ont montré combien l'Électricité varie sa forme et ses effets. La même Électricité qui ébranle la Terre par ses éclairs et ses tonnerres, qui fait tourner avec rapidité les puissantes machines de nos usines et fait fonctionner les organes si menus du microphone et du téléphone qui, sous la forme d'ondes porte, à l'autre bout du monde notre pensée, notre parole et même nos actes, cette même Électricité qui peut porter partout, d'une manière invisible la destruction et la mort, sait aussi fournir à l'humanité un soulagement dans les maladies et, souvent même, une complète et miraculeuse guérison. Cette conférence sera consacrée à l'examen rapide des principaux phénomènes produits, par l'Électricité, sur les animaux et les végétaux et aux moyens employés pour les favoriser ou les empêcher; elle se terminera par une vue générale sur le chemin parcouru au cours de ces conférences et sur le rôle que jouera, dans un avenir prochain, la fée Électricité.

I. L'Électricité qui sauve. — Les propriétés curatives de

l'électricité ont été utilisées dans l'antiquité. Les anciens savaient, pour en avoir fait la douloureuse expérience, que certains poissons donnent de violentes commotions et ils avaient pensé que ces secousses auraient peut-être le pouvoir de ranimer les membres paralysés; ce traitement avait été plusieurs fois couronné de succès¹; mais la rareté des poissons électriques et surtout l'ignorance des lois auxquelles sont soumises leurs décharges ne permirent pas à cette méthode d'entrer dans la pratique courante. Dès que furent connus les phénomènes électriques, l'idée vint naturellement de les employer à la guérison des maladies nerveuses. Les applications médicales de l'électricité ont précédé toutes les autres, contrairement à l'évolution naturelle des sciences. Cette anomalie s'explique par ce fait que, parmi les manifestations les plus apparentes qui furent d'abord connues, l'action de la décharge sur les muscles et sur les nerfs parut seule susceptible d'être utilisée. On se souvient de l'expérience de la bouteille de Leyde qui donna à MUSSCHENBROECK une secousse épouvantable et rendit WINCKLER si malade pendant huit jours qu'il crut avoir une attaque de fièvre chaude; c'est aussi avec une bouteille de Leyde que l'abbé NOLLET fit, devant Louis XV, tressaillir et sauter à l'unisson une compagnie de deux cent quarante gardes françaises, et peu de temps après tous les moines d'un couvent de Chartreux, peu habitués « à une telle unanimité d'impression ! »

C'est KRÜGER, à Holmstadt, qui semble avoir appliqué le premier, en 1743, l'électricité statique à la cure des maladies; en 1746, KLYN guérissait une femme paralysée depuis deux ans en lui tirant de petites étincelles avec une bouteille de Leyde, et JALLABERT, en 1748, après deux mois de traitement une paralysie ancienne du bras droit. La découverte de VOLTA provoqua de nouvelles expériences dans cette voie. GALVANI soumit des paralytiques à l'action du courant, et DE HUMBOLDT découvrit l'action sur le cœur et les sécrétions des plaies. De nombreuses expériences furent faites surtout sur des suppliciés. Opérant sur le corps d'un assassin, le docteur URE et quelques physiologistes, arrivèrent à Glasgow, en 1818, à un résultat prodigieux : le cadavre respira violemment, la jambe fléchie se détendit brusquement, les muscles du corps furent agités convulsivement, tous les muscles de la face furent mis

en action d'une manière effrayante et avec des sentiments divers, rage, angoisse, désespoir, sourire affreux, à tel point que plusieurs des assistants s'évanouirent et d'autres furent malades pendant plusieurs jours. Le docteur DUCHENNE, de Boulogne-sur-Mer, réussit à démontrer d'une façon irréfutable l'efficacité des courants d'induction sur les maladies nerveuses et personne n'a contribué plus que lui au progrès de cette branche de la science.

Toutes les formes sous lesquelles on connaît l'Électricité sont utilisées aujourd'hui; les charges de haut potentiel, les courants continus ou interrompus, les courants d'induction, les courants alternatifs à faible ou grande intensité, à haute ou basse tension, à moyenne ou haute fréquence; les radiations lumineuses ultra-violettes, celles qui émanent de la cathode d'un tube de Crookes ou du mystérieux radium, ont apporté leur part de contribution au soulagement des misères humaines, avec d'autant plus de succès que les différentes formes de l'électricité s'adaptent aux différentes formes des maladies. Dans les pages qui suivent nous examinerons successivement, d'une façon très rapide et forcément incomplète, *l'électrophysiologie, l'électrodiagnostic et l'électrothérapie.*

Action des courants sur les êtres vivants : Electrophysiologie. — Les effets produits par le **courant galvanique** dépendent de l'état permanent ou variable du courant. Si l'on applique deux électrodes spongieuses sur le corps d'un animal, le *courant continu* traverse le corps comme nous l'avons vu traverser les électrolytes, c'est-à-dire avec transport de substances, donc modification du milieu organique — lequel peut être assimilé à une cuve électrolytique contenant une solution étendue de sel marin; — par le déplacement des ions chlore et des ions sodium. En imprégnant les électrodes d'un liquide choisi à l'avance, on pourra faire pénétrer tel ou tel ion à l'intérieur du corps; *lithium*, par exemple, pour le traitement de la goutte; *iode* à l'intérieur des articulations. Or quelques milligrammes d'iodures pénétrant sous la forme d'ions électriques auront plus d'effet que plusieurs grammes y parvenant sous la forme ordinaire, ce qui exigerait une absorption de plusieurs centaines de grammes par l'estomac. A côté de cette *action physico-chimique* du courant à travers

les tissus, il faut noter son *action physiologique* sur les différents organes. C'est à BABINSKI que l'on doit les travaux les plus récents et les plus importants sur cette question. Appliqué sur les tempes, le courant produit un ensemble de phénomènes qui constitue le **vertige voltaïque**; sur les nerfs moteurs, il se produit une *excitation* au pôle négatif et une *action calmante* au pôle positif; sur les nerfs sensitifs, une sensation de picotement et de chaleur accusée surtout au pôle négatif. En thérapeutique humaine, le pôle négatif est irritant, excitant, hypertrophique, hémophylique, autrement dit, il augmente la douleur si elle existe, ou fait saigner s'il y a tendance à l'hémorragie, et dans ce cas on doit le rejeter, mais il excite la nutrition et on devra l'appliquer sur les membres atrophiés. Inversement, le pôle positif du courant continu est calmant, sédatif, atrophique, hémostatique; la douleur cède à son application, une tumeur perd de son volume, une hémorragie s'arrête. Un *courant interrompu* peut donner des **secousses musculaires** à l'ouverture et à la fermeture du courant suivant des lois qui ont été établies par le célèbre physiologiste allemand ERB; sur les centres nerveux, on obtient l'**inhibition cérébrale** ou **narcose électrique** (LEBUC, 1902) et l'on a montré (ZIMMERN, 1903) qu'il existe une relation intime entre l'épilepsie vraie et la narcose électrique.

Le **courant faradique** appliqué à l'organisme est capable de déterminer des phénomènes moteurs, des phénomènes sensitifs et des phénomènes vaso-moteurs; c'est la modalité électrique la plus fréquemment utilisée pour provoquer la **contraction musculaire**. Au moyen d'une bobine de Ruhmkorff, on obtient, à chaque ouverture du courant, une secousse musculaire; si le nombre d'excitations dépasse une certaine limite (20 à 30 par seconde), le muscle n'a pas le temps de se relâcher, il reste raccourci et atteint d'une sorte de tremblement particulier qui constitue le **tétanos physiologique**; à mesure que le nombre des excitations augmente, le tétanos devient de plus en plus énergique; mais entre 2 500 et 3 000 excitations par seconde, il diminue et finit par disparaître (D'ARSONVAL). Les excitations tétanisantes sont accompagnées d'une *atrophie de la substance musculaire avec lésions de la fibre musculaire elle-même*².

L'application de l'électricité statique ou franklinisation (du nom de FRANKLIN) peut être générale (*bain statique*) ou locale (*souffle, étincelles, friction*). Quand un sujet est placé sur le tabouret isolant et soumis au **bain statique**³, il ne sent pas autre chose qu'un frémissement dans les cheveux qui se dressent sur la tête, et sur la figure, la sensation que donneraient des fils d'araignée; les sécrétions sont augmentées, la température augmente, ainsi que les combustions respiratoires, la tension artérielle, la fréquence du pouls. Au total, l'action du bain statique est *stimulante* et *régulatrice*, elle se recommande aux ralentis de la nutrition chez lesquels les déchets sont mieux éliminés et les aliments mieux utilisés, et aussi aux personnes atteintes de dermatoses. Le **souffle électrique** s'obtient en déchargeant un corps électrisé au moyen d'une pointe; on l'applique souvent sur la tête à l'aide d'un disque armé de plusieurs pointes, ce qui permet de réaliser la **douche électrique**. Le souffle statique (le vent négatif souffle plus fort que le vent positif) produit : un abaissement de la température locale, ce qui fait dire aux malades qu'il souffle une « bise glaciale »; une action analgésique très nette mise à profit pour le traitement des névralgies; des actions vaso-motrices, augmentation de la sécrétion lactée et amélioration de la voix chantée. L'**étincelage** produit aussi des effets sensitifs (*piqûre, brûlure*), des effets moteurs (*contractions*) qui dépendent du signe de l'étincelle, de sa longueur, du diamètre des excitateurs et de la densité électrique (BORDIER), enfin des effets vaso-moteurs se traduisant par la *coloration rouge de la peau*.

Les courants de haute fréquence ont donné lieu à d'importantes études. Le *petit solénoïde* ou circuit de haute fréquence qui relie les armatures externes des condensateurs animés de vibrations alternatives possède une résistance très faible mais possède une notable self-induction; aussi, pour des courants à oscillations très rapides, il constitue une résistance considérable. On peut placer le sujet en dérivation sur le petit solénoïde, car le courant préfère passer par un circuit résistant mais sans self que par le petit solénoïde : c'est le principe des *applications directes* de haute fréquence; ou bien dans le solénoïde, car les courants qui le traversent sont capables de développer des phénomènes d'induction puissants : c'est le principe

de l'*autoconduction*, appliquée à l'homme par M. d'ARSONVAL¹. Quand on fait circuler dans le corps un courant alternatif à potentiel très élevé capable d'allumer une lampe à incandescence de 100 bougies (110 volts) on est frappé de constater que *la sensation est absolument nulle*. Pour expliquer ce phénomène déconcertant, on admet que les nerfs ne répondent aux excitations que dans des limites déterminées. De même que le nerf optique est insensible pour les vibrations au-dessous de 393 trillions (rouge) et au-dessus de 728 trillions (violet), de même la secousse musculaire, qui se traduit par le tétanos de 30 à 3 500 excitations par seconde, diminue au-dessus de ce chiffre et disparaît complètement pour des excitations plus nombreuses. M. d'ARSONVAL a constaté que l'*autoconduction* augmente les échanges respiratoires et la quantité de chaleur dégagée; il y aurait une diminution de la tension artérielle, de sorte que la haute fréquence a été préconisée contre l'hypertension artérielle et la maladie dans laquelle on la rencontre le plus souvent, l'*artériosclérose*; il y a aussi augmentation du volume et de la richesse en azote de l'urine et destruction des microbes ainsi que de leurs toxines.

Réactions des organes aux courants électriques : Electrodiagnostic.

— L'électrodiagnostic qui, dans l'esprit de beaucoup de médecins, ne comprend que l'examen électrique des nerfs et des muscles, jouit en réalité d'un domaine beaucoup plus étendu; son importance devient chaque jour plus grande, car il permet, dans beaucoup de cas d'accidents du travail, de faire la part de la lésion elle-même et celle de l'exagération, d'éliminer nombre de « *sinistroses* », de fixer la date probable de la guérison et de diriger convenablement un traitement. L'électrodiagnostic est basé *sur les réactions des nerfs et des muscles*, quand il s'agit de paralysie; *sur le vertige voltaïque* qui peut révéler la nature névropathique ou organique de bien des maladies de l'oreille, et, chez les malades névropathiques avérés, d'établir la part qui revient à la névropathie et celle qui est due aux lésions organiques; *sur la résistance électrique du corps humain* qui est variable suivant les états pathologiques: elle est augmentée dans l'épilepsie, la mélancolie dépressive, l'hémiplégie, la paralysie

infantile, les états fébriles et cachectiques, le diabète, la sclérodermie; elle est diminuée dans le goitre exophtalmique par exemple.

L'étude du pouls, de la circulation sanguine, du cœur et des poumons trouve des aides précieux dans des appareils comme le *sphygmophone*, qui révèle par son microphone les bruits réguliers ou anormaux dont les artères et les veines sont le siège; le *stéthoscope*, qui possède aussi un récepteur téléphonique; de même que l'étude des cavités naturelles, dans le *polyscope* qui permet de faire pénétrer dans le corps de minuscules lampes à incandescence; enfin chacun sait que, grâce à la *fluoroscopie* et à la *radiographie*, les replis les plus secrets des organismes vivants sont rendus visibles et impriment même leur image sur la plaque photographique. Déterminer avec la plus rigoureuse précision la position d'une balle ou de n'importe quel corps étranger, voir battre le cœur, assister à l'accomplissement des fonctions vitales, découvrir les anomalies de ces fonctions et les lésions des organes profonds, sont autant de problèmes que la science médicale n'osait pas même se proposer avant que fussent connus les merveilleux effets de la décharge électrique.

La première application qui a été faite des rayons X, dans l'art médical, a été la *radioscopie* qui permet d'obtenir, sur un écran de papier enduit de platinocyanure de baryum, l'ombre des os du squelette et des corps égarés dans les tissus, au milieu des chairs transparentes aux rayons de ROENTGEN. La *radiographie* donne le moyen de fixer sur une plaque photographique les silhouettes obtenues sur l'écran fluorescent; après quelques minutes de pose, la plaque est développée d'après les méthodes ordinaires et le cliché, une fois révélé, peut donner des épreuves sur papier. Ce nouveau procédé d'investigation a donné les plus heureux résultats: *en chirurgie* pour la recherche des corps étrangers tels que les aiguilles, projectiles, pièces de monnaie, objets divers introduits accidentellement dans les tissus ou les cavités naturelles, pour l'examen des fractures, des luxations, des affections inflammatoires des os; *en médecine*, pour préciser le diagnostic des affections des organes du thorax et notamment de la tuberculose, pour reconnaître la nature de quelques déformations ou dépôts articulaires, malformations de la croissance,

présence de calculs dans le rein, la vessie, la vésicule biliaire, etc.⁵.

Applications médicales de l'électricité : Electrothérapie. — Les applications de l'électricité à l'art de guérir sont de plus en plus nombreuses ; on le conçoit facilement étant données les formes multiples que l'électricité est susceptible de prendre. L'organisme humain étant infiniment délicat, les effets se graduent d'une façon très variable, et il n'est pas jusqu'au sens des courants qui n'exerce une grande influence.

Les traitements principaux employés en électrothérapie sont : la **franklinisation**, la **galvanisation** et la **faradisation**, noms rappelant FRANKLIN, GALVANI et FARADAY qui ont laissé leur nom attaché, le premier, à l'*électricité statique*, le deuxième au *courant continu*, le dernier aux *courants induits*.

La **franklinisation** consiste dans l'application des machines électrostatiques (Wimshurst, par exemple) ; elles fournissent de l'électricité à haut potentiel, mais à faible dose. Elle exerce une action remarquable sur la nutrition et devient un calmant, un sédatif puissant dans les maladies nerveuses. Dans la **galvanisation**, on utilise le courant des piles tantôt pour ses propriétés chimiques, tantôt pour son action thermique : les piles au bichromate sont les plus usitées, parce qu'elles fournissent un courant assez intense sous un faible volume, mais on fait aussi un large usage des accumulateurs. Les *propriétés chimiques* du courant sont utilisées dans l'*électrolyse*. Le pôle positif est utilisé pour coaguler l'albumine et la fibrine dans la profondeur des tissus, il convient spécialement au traitement des anévrysmes ; le pôle négatif au contraire sert à détruire certains tissus pathologiques, tels que les tumeurs érectiles, les polypes naso-pharyngiens, les rétrécissements, etc. Sous le nom de *biélectrolyse*, on désigne un mode de traitement qui consiste à intercaler dans le même circuit le tissu morbide et le remède qu'on y applique. L'électrolyse produit quelquefois les effets les plus inattendus : un nègre soudanais qui, atteint d'une maladie nerveuse, fut soumis au traitement électrique, vit sa peau devenir aussi blanche que celle d'un Européen ; l'électrolyse avait détruit, au bout de quatre mois de traitement, le pigment sous-cutané du malade.

Les *propriétés calorifiques* du courant le font employer dans la cautérisation de certaines plaies, l'application des pointes de feu, le traitement des tumeurs, l'ouverture des abcès, etc. La **faradisation** consiste dans l'emploi des machines d'induction; les courants discontinus, alternatifs ou de même sens, agissent sur le système musculaire et sur le système nerveux. Par les secousses et par les contractions qu'ils provoquent, ils opèrent généralement une révulsion salutaire et surexcitent la sensibilité émoussée. Nous avons vu comment le docteur URE avait tenté de ramener à la vie le cadavre d'un pendu; si elle est impuissante à ressusciter un mort, l'électricité peut, du moins, rétablir les fonctions respiratoires, momentanément abolies, des noyés et des asphyxiés; elle rend aux muscles une partie de leur élasticité et de leur énergie perdues et se trouve être d'un grand secours dans le traitement de la paralysie et de presque toutes les maladies nerveuses. La **d'arsonvalisation**, imaginée par le professeur D'ARSONVAL, est l'application électrique la plus populaire par l'efficacité de son action sur toutes les maladies de la circulation, notamment l'artériosclérose. La **radiothérapie** ou traitement par les rayons X compte déjà de nombreux succès; ces rayons détruisent, sans douleur ni cicatrices, les formations néoplasiques, modifient rapidement les tissus enflammés et sont essentiellement microbiocides. Enfin, les aimants même ont été utilisés: ils paraissent aptes à faire cesser une douleur névralgique ou même une paralysie locale⁶.

II. L'Électricité qui endort et l'Électricité qui tue.

— Une lampe à incandescence de seize bougies à verre bleu, placée à 10 centimètres des yeux du patient dont la tête est recouverte d'un voile bleu foncé, produit, au bout de trois minutes, une anesthésie suffisante pour que l'extraction d'une dent ne soit accompagnée d'aucune sensation (docteur REBARD, Genève, 1905). Les courants continus, interrompus à brefs intervalles, produisent aussi l'anesthésie (docteur LEDUC, Nantes, 1910); on a pu opérer l'amputation de quatre doigts aux pieds d'un malade sans aucune douleur, le malade continuait la conversation avec les chirurgiens; le courant était fourni par une batterie de 100 ampères, interrompu six à sept mille fois par minute. Mlle D^e ROBINOVITCH se sert con-

stamment de l'anesthésie électrique locale pour ses opérations chirurgicales ; on réalise facilement l'insensibilité de l'avant-bras au moyen de 25 volts. Avec 5 ou 6 volts pour 1 milli-ampère, on endort un lapin ; le courant doit passer graduellement, puis l'animal tombe sur le flanc du côté de la cathode. Le lapin peut rester ainsi pendant plusieurs heures ; aussitôt le courant interrompu, il saute sur ses pattes et présente des symptômes de bien-être.

A côté de l'électricité qui guérit, il y a aussi l'électricité qui produit des effets fâcheux et qui tue. La mort de RICHMANN, à Saint-Pétersbourg, survenue au cours d'un orage, a montré qu'on n'attirait pas sans danger la foudre dans son laboratoire. Des effets bizarres se produisent parfois chez les individus foudroyés, comme la mort debout ou assis, le déshabillement complet avec transport au loin des vêtements, la production sur le corps d'images photographiques d'objets avoisinants, etc. Les accidents observés sur les victimes de la foudre sont nombreux : production d'exanthèmes, urticaires, érysipèles, épilation de tout le corps ; paralysies diverses, surdité, brûlures, syncopes, arrachement de la langue et des yeux. Après la mort, on trouve chez les sujets la rigidité des membres, une flaccidité insolite, une putréfaction rapide, ou parfois l'inverse, le ramollissement des os, l'affaissement des poumons, la fluidité du sang. Pour BROWN-SÉQUARD le mécanisme d'action de la foudre serait double : inhibition par épuisement instantané de toutes nos forces dynamiques, asphyxie par la contracture des muscles respiratoires. Dans le premier cas, la putréfaction est avancée, dans le second, elle est retardée.

La science a parfois des révélations qui déconcertent. Nous avons vu qu'un courant de très haute fréquence (500 000 par exemple) peut traverser le corps sans provoquer la moindre sensation ; si la fréquence est faible (100 à 200), par exemple, l'animal est foudroyé, il y a électrocution. Souvent par des impulsions de courants électriques, se succédant dans le rythme même de la respiration, on peut obtenir une respiration artificielle suivie, dans la plupart des cas, par la respiration spontanée et par le rétablissement de la vie du sujet⁷. Ce procédé peut s'appliquer aux personnes amenées au contact d'une canalisation électrique d'une tension allant

jusqu'à 2 000 volts ; en appliquant la respiration artificielle par voie électrique, on peut ranimer le malade ; il en est de même pour le cas de syncope pendant la narcose par le chloroforme ou l'éther. En Amérique, l'électrocution a trouvé une application dans le passage de vie à trépas des condamnés à mort, des rats et des souris.

Avec la diffusion croissante de l'électricité, les **accidents électriques** se sont multipliés au point d'éveiller, dans tous les pays, l'inquiétude des pouvoirs publics. En France, les rapports des inspecteurs du travail signalent annuellement sept ou huit cents accidents. Les courants continus ne sont mortels pour l'homme que s'ils atteignent 1 500 volts ; les courants alternatifs industriels sont dangereux parce que leur fréquence est faible (40 à 150 par seconde) ; la mort survient par paralysie du cœur et inhibition des centres nerveux respiratoires. La coupure des conducteurs électriques restés au contact avec la victime ne doit être faite que si le courant est alternatif, car, dans le cas d'un courant continu, l'extra-courant de rupture serait fatal. On écarte le conducteur à l'aide d'un bâton, d'une canne ou avec la main garantie par une couverture de laine ; dans le cas d'un courant continu, on coupe le conducteur au moyen d'un instrument tranchant à manche non métallique. La victime est ensuite portée dans un local aéré, on desserre les vêtements et l'on s'efforce de rétablir la respiration et la circulation. Il convient de commencer toujours par la traction rythmée de la langue, en appliquant en même temps, s'il est possible, la méthode de la respiration artificielle ; d'autre part, on ramène la circulation en frictionnant la surface du corps, en faisant respirer du vinaigre. Si l'on possède sous la main de l'oxygène, on le fait respirer à la victime pour hâter la fin des symptômes de l'asphyxie. Depuis que l'instruction de l'Académie de médecine a été rendue publique et affichée dans les ateliers et les usines, on ne compte plus le nombre des personnes rappelées à la vie et pour ainsi dire ressuscitées.

III. L'Électricité et la végétation. — Depuis longtemps on s'est rendu compte de l'accroissement visible des végétaux après l'orage : ce phénomène n'a rien de surprenant si l'on considère que la plante, pour utiliser les principes fertilisants

du sol et pour fabriquer ses aliments hydrocarbonés, a besoin d'une certaine quantité d'énergie. L'électricité atmosphérique apparaît comme un facteur prépondérant de la production des matières végétales : l'exubérance de la végétation tropicale est en rapport avec l'état électrique de ces régions, et l'affaiblissement de la végétation autour des grands arbres est dû pour une large part à la modification qu'ils introduisent dans l'état électrique de l'air. L'idée d'appliquer au développement des végétaux cultivés l'électricité atmosphérique ou d'autres sources (électroculture) remonte déjà au dix-huitième siècle ; de nombreux chercheurs ont proposé des appareils divers pour capter l'électricité de l'atmosphère et du sol (BERTHOLON, SPECHNEW, KINNEY, YODKO, PAULIN). L'appareil de M. PAULIN, directeur de l'Institut agricole de Beauvais, comprend une grande tige de paratonnerre supportée par un mât en bois et reliée à un réseau de fils métalliques enfouis dans le sol ; avec quatre appareils de ce genre par hectare, il a pu récolter des pommes de terre vingt et un jours plus tôt qu'à l'ordinaire et avec 50 p. 100 d'excédent de recette. Depuis 1903, les essais culturaux du lieutenant BASTY au jardin militaire d'Angers ont fourni des résultats dignes de retenir l'attention des agriculteurs. Sous l'influence des courants telluriques captés par un paratonnerre de 2 mètres seulement pour les plantes à basses tiges (betteraves, fraisiers, etc.), lequel s'enfonce dans le sol jusqu'à la région atteinte par les racines, il a obtenu dans une zone ayant pour rayon la hauteur aérienne de la tige un accroissement très net de la végétation. Les nombreux faits observés depuis longtemps, et précisés dans ces dernières années, ont nettement montré que l'électricité atmosphérique peut être un auxiliaire puissant pour l'agriculture, et il est vraiment à souhaiter de voir bientôt l'électroculture être l'objet d'expériences sur de grandes surfaces cultivées.

On a demandé aussi au courant électrique de détruire les insectes nuisibles qui s'opposent à un développement normal des plantes et l'on a constaté qu'il s'acquitte fort bien de sa tâche en faisant passer dans le sol un courant de 0,000 005 d'ampère sous une tension de 500 000 volts.

La lumière électrique renfermant les mêmes rayons que la lumière solaire, il était intéressant d'étudier son action sur

les végétaux. Les études expérimentales entreprises en 1880 par H. SIEMENS furent reprises par M. Gaston BONNIER, le savant professeur de Botanique de la Sorbonne. Il a constaté que la lumière électrique continue, sous verre, provoque chez une plante herbacée un grand développement avec verdissement intense et différenciation de la structure des organes ; la lumière électrique directe, au contraire, est nuisible par les rayons ultra-violetes qu'elle contient. Ces expériences n'ont reçu aucune consécration pratique.

L'électricité qui a transformé si profondément de nombreuses industries, qui en a créé de nouvelles, s'est introduite aussi dans les fermes, commence à vaincre la tranquille routine du paysan et à modifier le travail des champs. En agriculture, comme dans les diverses opérations industrielles, il y a des outils à mouvoir, des charrois à exécuter, des bâtiments à éclairer, et dans toutes ces circonstances, les machines électriques sont tout naturellement indiquées. Toutes les machines agricoles : batteuses, faucheuses, moulins, pompes, qui fonctionnent souvent à la vapeur, peuvent être actionnées par des moteurs électriques ; une rivière torrentueuse est une source d'énergie et d'ailleurs, grâce à la transmission d'énergie à distance, quelques fils suffiront pour aller de toutes parts animer une vaste propriété. De tous côtés, de louables efforts sont faits, des concours d'appareils de motoculture électrique sont organisés, pour abaisser le prix et généraliser l'emploi de ces nouvelles machines. Qu'elle paraît antique maintenant la simple et poétique charrue, péniblement traînée par deux bœufs, à côté de ces machines rapides qui fendent et creusent la terre en sillons réguliers. Partout, le progrès pénètre, la science transforme ; la routine du paysan a cédé, et les merveilles électriques ont eu enfin raison de son apathie calculée et de l'entêtement qu'il mettait à repousser loin de lui toutes les innovations troublantes d'une civilisation victorieuse.

L'Electricité dans la Science actuelle et l'Electricité de demain. — Maintenant que nous sommes arrivés au terme de ces conférences, nous ne pouvons nous empêcher de jeter un coup d'œil rapide sur l'immense et magnifique domaine que nous venons de parcourir. Que nous sommes loin du jour où les

Phéniciens rapportèrent sur leurs vaisseaux l'ambre qui attire les corps légers ! Les travaux immortels de FARADAY et d'AMPÈRE ont été le point de départ d'une évolution si rapide qu'en un demi-siècle environ elle a transformé les conditions de toutes les industries et, par suite, celles de la vie sociale elle-même. Chaque fois que l'on a cru voir l'électricité limiter son domaine, l'étude de quelque phénomène nouveau a ouvert de vastes horizons aux yeux des savants émerveillés ; les diélectriques ont suscité les travaux de MAXWELL et de HERTZ qui ont conduit à la découverte des ondes et de la télégraphie sans fil, tandis que les phénomènes électriques produits dans les gaz raréfiés ont fourni des résultats de la plus haute importance au point de vue philosophique. Dans le tube de CROOKES, où règne le vide presque parfait, les conditions se simplifient et se rapprochent de celles qui se réalisent dans l'immensité des espaces interplanétaires. Alors on a pu pénétrer le mystère de la constitution de la matière et de la nature de l'électricité.

La matière, considérée autrefois comme inerte et capable seulement de restituer l'énergie qui lui a été fournie, apparaît aujourd'hui comme un colossal réservoir d'énergie d'où l'on peut obtenir chaleur et électricité. Dans la science actuelle, les tourbillons d'éther constituent les particules électriques (*électrons*) dont la réunion constitue la *matière* ; ces électrons existent dans les tubes de Crookes où ils sont projetés sous l'action d'un courant (*rayons cathodiques*) ; en frappant contre un obstacle ils produisent des ébranlements de l'éther (*rayons X*). D'autres ébranlements de l'éther accompagnent les décharges électriques et se propagent sous forme d'ondes (*ondes hertziennes*) avec la vitesse de la lumière.

Quand on frotte un corps, qu'on le place sous l'influence d'une source d'électricité, ou qu'on le soumet à un ébranlement de l'éther, comme un rayon lumineux, on ne fait pas autre chose que de transformer la matière en électricité, de dissocier la matière. *L'électricité est une manifestation de la dissociation de la matière.* Un aimant engendre un nombre presque illimité de lignes de forces, absolument comme un fragment de *radium* engendre une quantité presque illimitée de chaleur ; le phénomène de *radio-activité induite* présente une grande analogie avec l'*aimantation induite* par le voisi-

nage d'un corps aimanté. L'énergie intra-atomique de l'aimant étant presque inépuisable, un seul aimant peut fournir un nombre de lignes de forces presque indéfini ; or l'*induit* qui coupe les lignes de forces laisse écouler un *courant électrique*. Il en résulte qu'en voyant fonctionner une dynamo, nous pouvons dire que *c'est l'énergie intra-atomique de la matière dissociée qui apparaît sous forme d'électricité*. C'est dans l'immense réservoir des forces contenues dans la matière que se trouve l'explication de la plupart des phénomènes, depuis l'électricité qui nous éclaire jusqu'à la chaleur solaire d'où la vie dérive. « *Le domaine de l'électricité, disait HERTZ, s'étend sur toute la nature.* »

Des progrès sont à réaliser dans la production de l'électricité. En attendant que la science puisse extraire l'énergie que recèle la matière, elle transformera en électricité l'énergie des cours d'eau, de la force du vent et des marées, de la chaleur solaire. On ne considère plus comme chimérique l'idée de transporter à travers l'espace, sans fil conducteur, de grandes quantités d'énergie, de sorte que le lieu de production pourra facilement alimenter les lieux d'utilisation. Et comme l'éther nous amène, en quantité énorme et d'une distance considérable, toute l'énergie dont nous pouvons disposer sur la Terre, peut-être un jour viendra où l'on pourra capter cette électricité et l'asservir à nos besoins les plus divers.

En supprimant les besognes serviles, en ennoblissant chaque jour la tâche du travailleur, en assurant partout le bien-être, en facilitant les communications de pays à pays, de continent à continent, en permettant les conversations d'un hémisphère à l'autre et, bientôt peut-être, la vision de ce que l'on fait à l'autre bout du monde, l'Électricité, contribuera sans doute à rapprocher les hommes les uns des autres, à les faire mieux connaître, à amener la satisfaction de ce besoin de fraternité et de concorde que ressentent tous les peuples, à rendre d'autre part la guerre impossible entre eux, à établir enfin, en un même idéal de progrès scientifique, l'entente universelle.

NOTES DE LA DOUZIÈME CONFÉRENCE

1. On cite dans l'antiquité de nombreux cas de guérison de la *goutte* par les décharges des torpilles. Dioscorides propose le même remède pour les maux de tête. Les indigènes d'Afrique, près de la rivière de Calaha, guérissent leurs enfants en les mettant au contact des torpilles. Chez les poissons électriques (*gymnotes* d'Amérique, *malaptérure* du Nil, *torpilles* des mers d'Europe) l'organe électrique est formé aux dépens de véritables plis musculaires; la décharge est assez forte pour tuer un animal gros comme un canard. (Voir G. EISENMENGER, *Manuel de Sciences naturelles*. Paris, 1912.) Les phénomènes électriques de la matière vivante seront traités dans un volume de cette collection : *la Biologie et ses phénomènes*.

2. Bien des paralysies faciales ont été aggravées parce qu'on a fait faire au malade sans règle et sans soin « un peu d'électricité ». On a l'habitude de répéter, dans le public, que l'électricité est un agent qui, « s'il ne fait pas de bien, ne fait du moins pas de mal ». On vient de voir qu'elle peut ruiner un muscle sain et plus facilement encore un muscle malade.

3. Le patient est relié à l'un des pôles de la machine par un conducteur métallique qu'il tient à la main. Dès que la machine fonctionne, le sujet isolé se trouve porté au même potentiel que le collecteur auquel il est relié; il est placé dans un champ électrostatique, et comme l'électricité s'échappé par tous les points du corps du sujet, celui-ci se trouve baigné par un courant électrique puissant.

4. D'ANSONVAL, physicien français, né en 1851; professeur au Collège de France; membre de l'Académie de médecine et de l'Académie des sciences.

5. Les renseignements fournis par cette nouvelle méthode ne sont nullement pathognomoniques, au moins dans certaines circonstances. Elle nous renseigne seulement sur la forme, les dimensions, la situation et le changement de perméabilité des tissus, permet quelquefois d'y apercevoir des néoformations pathogènes; mais n'en indique pas toujours la nature. Elle vient comme complément des autres moyens d'exploration physique, mais ne saurait nullement les supplanter, ni les remplacer.

6. En terminant cet exposé, nous appellerons l'attention sur un certain genre d'exploitation dont le public est trop souvent victime. Le charlatanisme ne perd jamais ses droits, et la crédulité humaine est sans bornes. Des bagues, des ceintures sont vendues à des prix exorbitants avec la garantie qu'une application sur l'épiderme déterminera un soulagement profond quelle que soit d'ailleurs la maladie à traiter. La transpiration cutanée ne tarde pas à les transformer en un élément de pile à liquide unique se polarisant en quelques instants, et l'intensité du courant tombe à zéro. L'action est donc nulle, et il ne faut pas le regretter, car le courant continu est dangereux, quand son action se prolonge.

7. Au laboratoire Edison, Mlle ROBINOVITCH a électrocuté un lapin que plusieurs docteurs considérèrent comme mort. Or, par des excitations rythmiques sur la région du cœur et à la base de la colonne vertébrale, le cœur, au bout de trois minutes remît à battre et les poumons reprirent leur fonctionnement; une demi-heure après, l'animal trotte dans la salle.

MUSEE COMMERCIAL

et COLONIAL

TABLE DES MATIÈRES

Rue du Lombard, 2

LILLE

Avant-propos. IV

PREMIÈRE CONFÉRENCE

L'électricité d'autrefois

Phénomènes les plus anciennement connus : attraction, aimantation, électricité atmosphérique

I. L'énergie électrique. — Ses métamorphoses. — Son étude à travers les siècles. — Son domaine. — II. Phénomènes d'électrisation par frottement. — Tension électrique ou potentiel. — Pouvoir des points. — III. Phénomènes d'électrisation par influence. — L'étincelle électrique. — IV. Phénomènes fondamentaux du magnétisme. — L'attraction magnétique. — V. Phénomènes d'aimantation par influence. — L'hystérésis. — VI. Phénomènes dus au magnétisme terrestre. — La boussole. — VII. Phénomènes électriques de l'atmosphère : aurores boréales, orages. I

DEUXIÈME CONFÉRENCE

L'électricité d'hier

Le frottement, l'influence et l'énergie chimique, comme sources d'électricité

Machines à frottement et à influence. — Phénomènes de condensation ; condensateurs et bouteille de Leyde. — Le courant électrique. — La loi d'Ohm. — Électricité de contact. — La pile électrique. — Phénomènes de polarisation. — Piles hydro-électriques. — Piles sèches. — Phénomènes et piles thermo-électriques. — Les accumulateurs. — Inconvénients de ces divers générateurs. 33

TROISIÈME CONFÉRENCE

L'électricité d'aujourd'hui

Les phénomènes d'induction et les dynamos, Mesure des courants

Phénomènes magnétiques produits par le courant électrique. — Phénomènes d'aimantation dus aux champs magnétiques. — Explication des phénomènes magnétiques. — Les phénomènes d'induction. — Phénomènes de self-induction. — Les machines d'induction. — Les dynamos

à courants continus. — Les dynamos à courants alternatifs ou alternateurs. — Les dynamos à courants triphasés. — La loi de Joule et les courants dérivés. — Mesure des courants continus et des courants alternatifs. — Les compteurs d'électricité 64

QUATRIÈME CONFÉRENCE

L'électricité d'aujourd'hui (suite)

Transformation, transport et distribution de l'électricité

I. La transformation des courants et les transformateurs. — La bobine de Ruhmkorff. — Les usines électriques modernes. — II. Reversibilité des dynamos. — Transport de force par l'électricité. — Les transports à haute tension et à grandes distances. — III. Distribution de l'énergie électrique. — Systèmes employés. — Distribution de l'énergie électrique à Paris. — Rôle des transports de force. 97

CINQUIÈME CONFÉRENCE

L'électricité, source de lumière

Arc électrique et lampe à incandescence

Conséquences de la loi de Joule. — Échauffement des conducteurs. — L'éclairage électrique, ses progrès, ses principes, ses deux solutions : la lampe à incandescence et l'arc électrique. — I. *La lampe à incandescence* (lampes à filaments de charbon et lampes à filaments métalliques). — Dépenses comparatives et consommation. — II. *L'arc électrique* (arc à air libre et arc en vase clos). — Charbons et régulateurs. — Lampes à arc électrique. — III. Installation et avantages de la lumière électrique. — IV. *Les applications de la lumière électrique* : dans la maison, dans l'industrie, dans la navigation et dans les théâtres. 124

SIXIÈME CONFÉRENCE

L'électricité, source de chaleur

Électrothermie et chauffage électrique

I. Les fours électriques (fours à arc et à résistance ; fours sans électrodes). — Applications électrothermiques de l'arc électrique. — Métallurgie de l'aluminium, du fer et de l'acier. — Le carbure de calcium et le carborundum. — Les engrais chimiques de Norvège. — Soudure et travail électriques des métaux. — Forgeage, trempe, recuit électriques. — II. Le chauffage électrique. — Principes et appareils. — Chauffage électrique des théâtres, magasins, appartements. — La cuisine électrique et les banquets électriques. — Stérilisation électrique de l'air. — Allumage et allumage électriques. 153

SEPTIÈME CONFÉRENCE

L'électricité, agent chimique

Électrolyse. Effluve. Electrochimie

Les phénomènes de l'Électrolyse. — Leurs lois, leurs conséquences, leur explication. — Les actions secondaires de l'Électrolyse. — Opérations électrolytiques. — La Galvanoplastie : reproductions artistiques, électrotypie, gravure électrolytique. — Les dépôts adhérents (cuvrage, dorure, argenture, nickelage). — L'Électrometallurgie. — L'Électrochimie. — L'Électrolyse dans l'industrie. — L'Effluve et l'Ozone. 171

HUITIÈME CONFÉRENCE

L'électricité, force motrice

Les électro-aimants. Les moteurs électriques. La traction électrique

I. Transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. — II. Les électro-aimants et leurs applications. — Sonneries et appels électriques. — Les avertisseurs et la manœuvre des signaux. — L'heure électrique. — III. Le moteur électrique. — Moteurs à courants continus et moteurs à courants alternatifs. — L'outillage électrique. — IV. La traction électrique. — Tramways à trolley et à conducteur souterrain. — Les locomotives électriques. — Métropolitain et Nord-Sud. — Funiculaires. — Électrification des chemins de fer en France et à l'étranger. — Les monorails. — Les automobiles électriques. — Navigation et aérostation électriques. 196

NEUVIÈME CONFÉRENCE

L'électricité à travers les gaz raréfiés

Phénomènes de rayonnement d'ionisation et de luminescence

La décharge électrique dans les gaz aux pressions moyennes. — Les rayons cathodiques et les phénomènes qu'ils produisent. — Phénomènes d'ionisation des gaz. — Les rayons de Roentgen ou rayons X. — Fluorescence et phosphorescence. — Transformation des rayons X par la matière : rayons S et rayons T. — Les phénomènes radio-actifs. — Le rayonnement du radium. — Luminescence et éclairage : lampe à vapeur de mercure, lampe quartz, lumière de Moore. — La luminescence du néon. — Phénomène photo-électrique et rayonnement ultra-violet. 228

DIXIÈME CONFÉRENCE

La pensée, la parole et l'image à travers l'espace

Télégraphie, téléphonie, télévision, télé mécanique

I. L'Électricité et la transmission de la pensée. — Télégraphes électriques et télégraphes imprimeurs. — Télégraphie multiple et télégraphie simultanée. — Les lignes télégraphiques et leurs accessoires. — La Télégraphie sous-marine. — Le Télégraphe dans le monde. — II. La transmission de la parole. — Télégraphie électromagnétique. — Les transmissions lointaines. — Microphones et récepteurs. — Les communications téléphoniques. — Téléphonie automatique. — Téléphones haut-parleurs et théâtrophones. — Le télégraphe et l'arc chantant. — III. La transmission des images par l'électricité. — Photographie des paroles. 256

ONZIÈME CONFÉRENCE

Les ondes électriques à travers le monde

Les phénomènes d'oscillation électrique et de résonance, télégraphie, téléphonie et télé mécanique sans fil

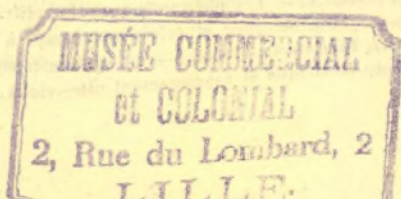
Les phénomènes de la décharge oscillante. — Les ondes hertziennes et la théorie électromagnétique de la lumière. — La Télégraphie sans fil. — Réception et émission des ondes hertziennes. — La Télégraphie sans fil dans le monde et ses diverses applications. — La direction des ondes ; boussoles et phares hertziens. — Les mystères de la radiotélégraphie. — La Téléphonie sans fil et le théâtrophone. — La Télé mécanique sans fil et le transport d'énergie à distance. 286

DOUZIÈME CONFÉRENCE

L'électricité et les êtres vivants

Phénomènes produits chez les animaux et les végétaux

L'Électricité qui sauve : Électrophysiologie, Électrodiagnostic, Électrothérapie. — L'Électricité qui endort et l'Électricité qui tue ; anesthésie et électrocution ; accidents électriques. — L'Électricité et la végétation ; électroculture et motoculture électrique. — L'Électricité dans la Science et l'Électricité de demain. 313



LIBRAIRIE GÉNÉRALE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE

H. DESFORGES

29, Quai des Grands-Augustins, 29 — PARIS (6^e)

ENVOI FRANCO CONTRE MANDAT-POSTE

Vient de Paraître

H. DE GRAFFIGNY

INGÉNIEUR CIVIL

LE PETIT
Constructeur Électricien

MANUEL PRATIQUE

POUR CONSTRUIRE SOI-MÊME

PILES. — ACCUMULATEURS. — PETITES DYNAMOS ET MOTEURS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES. — BOBINES. — ÉLECTROS. — LAMPES A ARC. — TÉLÉPHONES
TÉLÉGRAPHIE SANS FIL. — MOTEURS A CHAMPS TOURNANTS, ETC.

1 vol. in-12 de 200 pages, illustré de 132 fig. explicatives dessinées par l'Auteur, 1910.
Broché..... 2 fr. 50 | Relié percal. tranches rouges. 3 fr. 50

PRÉFACE

L'électricité est surtout une science expérimentale, et ce caractère la rend particulièrement attrayante pour les amateurs de travaux manuels; On peut affirmer que l'on ne peut bien connaître les diverses propriétés de cette forme de l'énergie qu'à la condition de les étudier, non pas seulement dans les livres, qui ne peuvent donner que des théories mathématiques et des explications forcément incomplètes, mais encore et surtout en expérimentant et en répétant les phénomènes décrits par les physiciens. On se rend ainsi beaucoup mieux compte de ces phénomènes que par la seule lecture d'un ouvrage qui en donne le compte-rendu.

Mais, objectera-t-on, il est fort coûteux de se monter un cabinet d'électricité pourvu des appareils permettant de reproduire les diverses expériences relatives à la lumière, au transport de l'énergie, à l'électrochimie. Cette observation est fondée, mais on peut répondre qu'il n'est pas indispensable de se procurer tous ces instruments chez le fabricant, et d'ailleurs la chose perdrait une grande partie de son charme. Il est incomparablement plus rationnel, et surtout plus profitable à tous égards, d'exécuter *soi-même* ces appareils en se procurant simplement les matériaux convenables.

Maintenant, en admettant comme exactes ces prémisses, est-il réellement possible à l'amateur d'obtenir des résultats satisfaisants? On pourrait en douter en examinant les catalogues des maisons de fournitures électriques vendant des modèles soignés. Cependant rien n'est plus certain et l'auteur même de l'ou-

PIERRE ROGER & C^{IE}, ÉDITEURS

54, RUE JACOB. — PARIS

La Géologie et ses phénomènes, (12 conférences) par G. EISENMENGER. Un volume in-8° écu, avec 82 gravures et 10 planches hors-texte. Broché 4 fr.
(Ouvrage adopté par le Ministère de l'Instruction publique)

La Chimie; son Rôle dans la Vie quotidienne (12 conférences) par le Docteur LASSAR-COHN, professeur à l'Université de Königsberg. 1 vol. in-8° écu, broché. 4 fr.
(Ouvrage adopté par le Ministère de l'Instruction publique)

Le Machinisme; son Rôle dans la vie quotidienne, (12 conférences) par MAX DE NANSOUTY. 1 vol. in-8° écu, 28 planches hors-texte, broché 4 fr.
(Ouvrage adopté par le Ministère de l'Instruction publique)

La Physique; son Rôle et ses Phénomènes dans la Vie quotidienne (12 conférences) par G. EISENMENGER, Docteur ès-Sciences. 1 vol. in-8° écu, broché 4 fr.

Les Végétaux et leur Rôle dans la Vie quotidienne, (10 conférences) par D. BOIS, assistant au Muséum, professeur à l'École coloniale, et E. GADECEAU. 1 vol. in-8° de 380 pages, broché 4 fr.
(Ouvrage adopté par le Ministère de l'Instruction publique)

Collection " LES PAYS MODERNES "

L'Allemagne au Travail, par Victor CAMBON, Ingénieur E. C. P. Un vol. in-8° écu, 24 planches hors-texte (9^e édition revue et augmentée. 1911) Broché. 4 fr.

Aux Pays Balkaniques: Montenegro, Serbie, Bulgarie, par A. MUZET, ingénieur civil. 1 vol. in-8° écu, 26 photogravures et 1 carte. Broché 4 fr.

La Russie et ses richesses par Etienne TARIS, ingénieur, ancien élève de l'École polytechnique. Un vol. in-8° écu avec 24 photogr. hors-texte et 1 carte (2^e édition). Broché. 4 fr.

La Chine Moderne, par Edmond ROTTACH (2^e édition). Un vol. in-8° écu, 26 gravures hors texte, 1 carte. Broché 4 fr.