

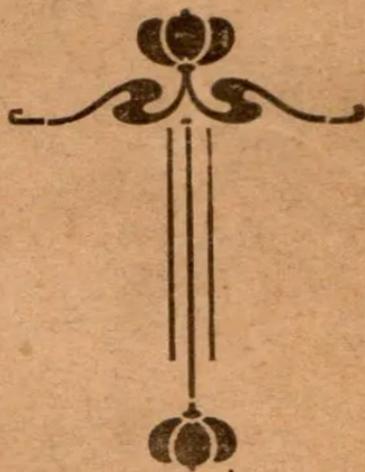
H. DE GRAFFIGNY

*travaux de l'Association
A.S.S.S.*

L'Électricité

en

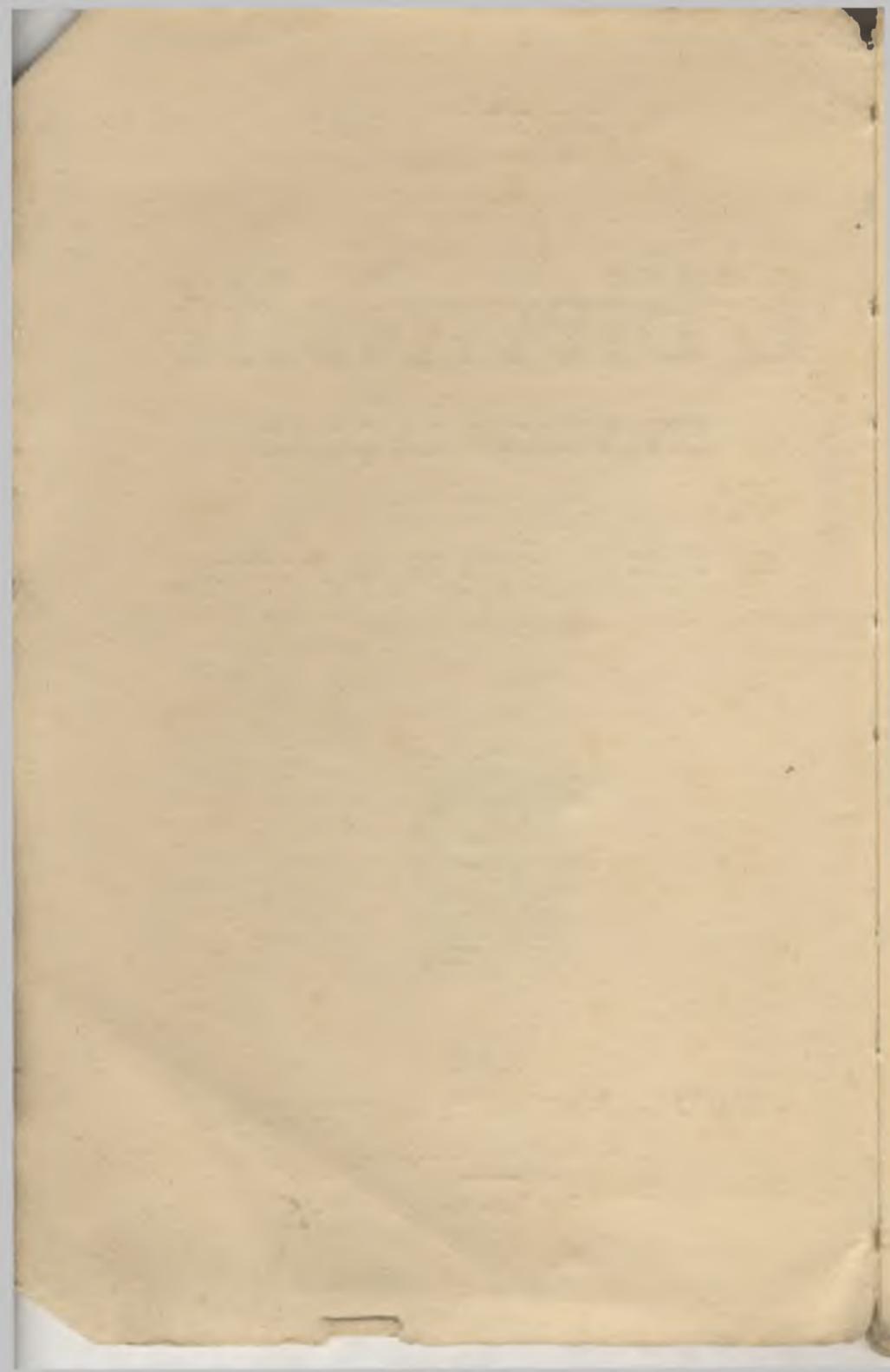
20 LEÇONS



ALBIN MICHEL

Editeur

22, Rue Huyghens, PARIS.



Spencer

L'Électricité

EN VINGT LEÇONS

*Paris
Gauthier-Villars
Léon Oudin*

PRINCIPAUX OUVRAGES DE H. DE GRAFFIGNY

Sur L'ÉLECTRICITÉ

- Guide manuel pratique de l'Ouvrier électricien.** 1 vol. in-16 avec 341 fig. (3^e édition).
- L'Ingénieur électricien.** 1 vol. avec 109 fig. (13^e édition).
- L'Électricité pour Tous.** 1 vol. in-8^o avec 175 figures. (15^e mille).
- La Construction pratique et les applications de la bobine d'induction, dite Ruhmkorff.** 1 brochure avec 89 figures.
- L'Électricité de haute fréquence et de haute tension.** 1 brochure avec 37 fig.
- Manuel pratique du Télégraphiste et du Téléphoniste.** 1 vol. in-8^o avec 95 fig. (2^e édition).
- L'Éclairage électrique dans les appartements.** 1 vol. in-16 avec fig. et plans (2^e édition).
- Album de plans de pose de téléphones.** 1 vol. gr. in-8^o avec 38 plans de pose dessinés par l'auteur.
- Album de plans de pose d'éclairage électrique.** 1 vol. in-8^o avec 36 plans.
- L'Électricité dans l'Automobile.** 1 vol. in-16 avec 65 fig.
- Le Petit Constructeur électricien.** 1 vol. in-18 avec 130 fig. dessinées par l'auteur.

H. DE GRAFFIGNY

INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN

L'Électricité

EN VINGT LEÇONS

OUVRAGE ILLUSTRÉ DE 60 FIGURES

DESSINÉES PAR L'AUTEUR

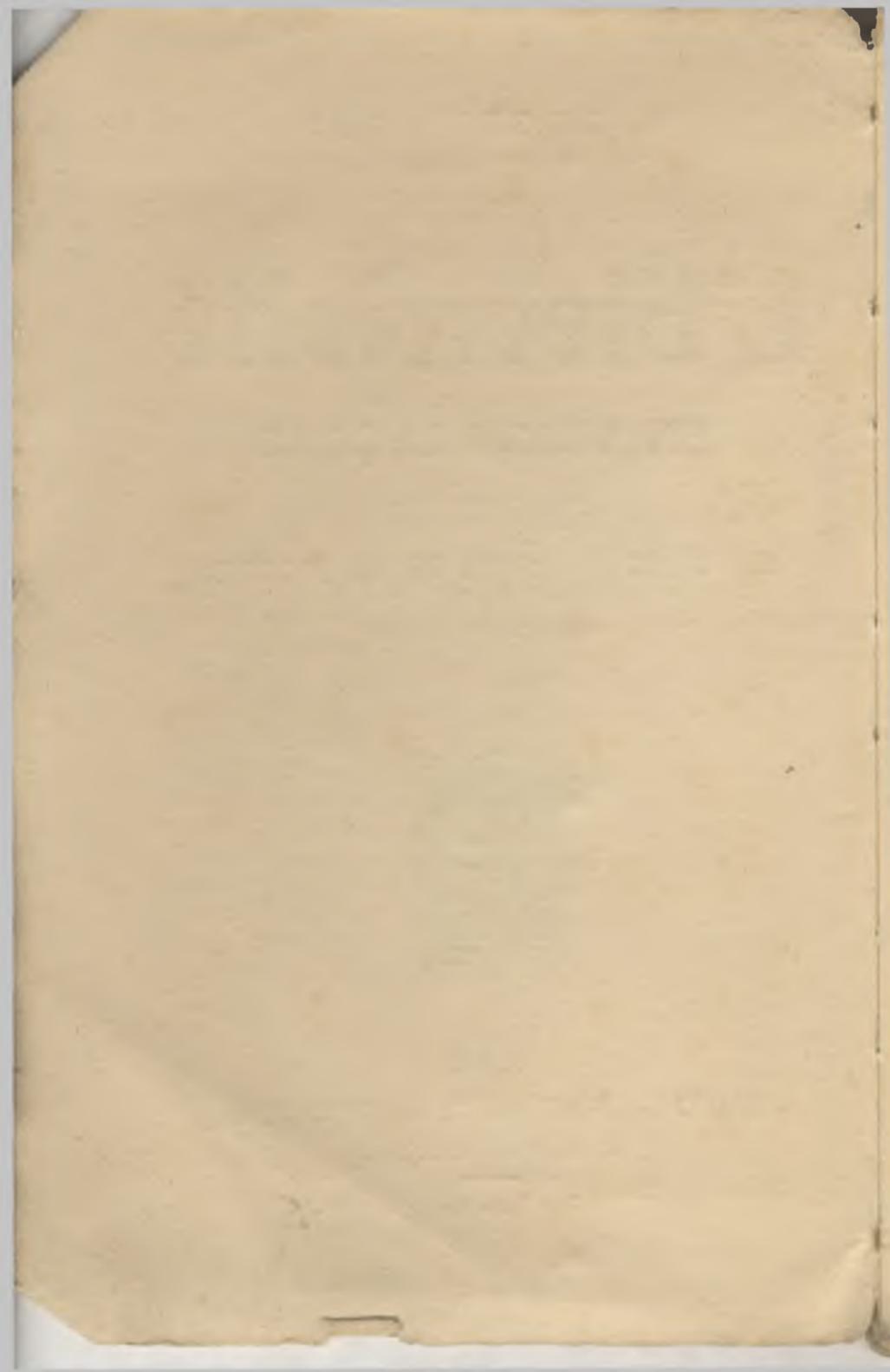


PARIS

PAUL PACLOOT, ÉDITEUR

4, RUE CASSETTE, 4

Tous droits réservés.



L'Électricité

EN VINGT LEÇONS

PREMIÈRE LEÇON

L'Électricité statique

Nature de l'Électricité. — L'électricité, qui se présente à nos sens sous des apparences très variées, n'est autre chose qu'une forme particulière de l'Énergie perpétuellement en action dans l'univers. C'est un mouvement vibratoire extrêmement rapide se rapprochant beaucoup, par son mode de propagation, de la lumière. Comme cette dernière, elle se transmet par ondes successives dans toutes les directions de l'espace, et la seule différence qui existe entre les ondes électriques et les ondes lumineuses, c'est que celles-ci sont beaucoup plus courtes et se succèdent infiniment plus vite que celles-là, bien que leur vitesse de propagation soit la même pour les unes comme pour les autres, c'est-à-dire de trois cent mille kilomètres environ par seconde. Alors que les ondes électriques mesurent plusieurs décimètres, plusieurs mètres et même plusieurs kilomètres de longueur, c'est à peine si les ondes lumineuses mesurent une fraction de millimètre, mais pendant qu'il en naît de 400 à 760 trillions par seconde, il ne se produit, pendant le même temps,

que quarante ou cinquante milliards de vibrations électriques. C'est ce que l'on nomme la *fréquence* des ondes, qui est incomparablement plus grande pour la lumière que pour l'électricité, bien que le chemin parcouru dans l'unité de temps soit le même pour ces deux formes de l'énergie.

L'Électricité dans l'atmosphère. — Le résultat des recherches sur l'état de l'électricité à la surface du globe et dans l'atmosphère, est que, dans l'état normal, le globe terrestre est chargé d'électricité *négative*, tandis que l'atmosphère est *positive*. A la surface du sol, où s'opèrent des échanges continuels, l'état est neutre. Autrement dit, on peut comparer le niveau du sol au zéro du thermomètre. A mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, la tension de l'électricité augmente de plus en plus. Il en est de même si l'on s'enfonce dans les entrailles du sol, la tension s'accroît également, mais le sens est inverse, et de même qu'autour du zéro du thermomètre, on a les degrés + (au dessus de zéro, et — au dessous de zéro), pour l'électricité on a les charges *positives* ou + et les charges *négatives* ou —.

L'évaporation considérable qui s'effectue à la surface des océans dans les régions équatoriales, charge d'électricité positive les nuages qui, transportés par les courants supérieurs, vont vers les régions polaires où ils influencent le sol qui se charge d'électricité négative et donnent naissance au phénomène connu sous le nom d'*aurore boréale*, ainsi qu'aux courants *telluriques* ou magnétisme terrestre que décèle l'aiguille aimantée de la boussole, et enfin, lorsque les circonstances météorologiques s'y prêtent : température élevée, dépression barométrique, etc., aux orages.

Les orages. — On sait que les nuages ne sont

que le résultat de la condensation partielle de la vapeur d'eau en suspension dans l'air. Puisqu'ils sont chargés d'électricité positive, la tension de cette électricité peut s'accroître d'autant plus que l'air ambiant est sec et chaud, mais cette tension n'est pas également répartie dans toute la masse vaporeuse, dont la densité n'est d'ailleurs pas partout la même. Les nuages dont le *potentiel* (degré d'électrisation) est le plus élevé réagissent sur les autres en y développant, — en y *induisant* suivant le terme exact, — de l'électricité de signe contraire au leur. La même influence s'exerce sur le sol, et on a en présence des charges d'électricité à des potentiels différents, que le moindre changement

dans l'état extérieur tend à annuler afin de rétablir l'équilibre. Mais ce retour à l'équilibre ne peut se produire que par une décharge allant du point où le potentiel est plus élevé à celui où il l'est moins. Cette décharge s'opère sous l'aspect d'un trait de feu éblouissant, dont le trajet est plus ou moins étendu et sinucux, suivant les résistances opposées à sa propagation. Ce trait de feu, dont la durée est très courte, à peine quelques millièmes de seconde, — est l'*éclair* ou la *foudre* ; il est accompagné d'un bruit caractéristique, de durée variable suivant les circonstances atmosphériques et le relief du sol, et appelé *tonnerre*. Inutile, pensons-

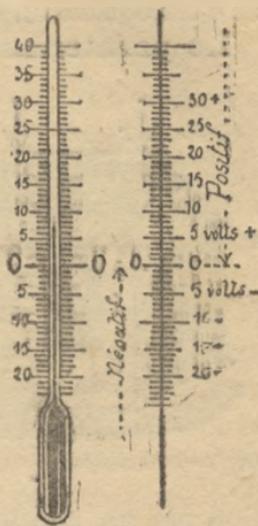


Fig. 1. — Comparaison entre l'échelle thermométrique et la graduation électrique.

nous de rappeler que ce fracas, quelquefois terrifiant, qui caractérise un orage, ne présente cependant aucun danger. Seul l'éclair, la décharge disruptive entre les nuages et le sol, peut causer des accidents, et c'est contre lui qu'il convient de se protéger.

Le paratonnerre. — Dans le but d'obliger les

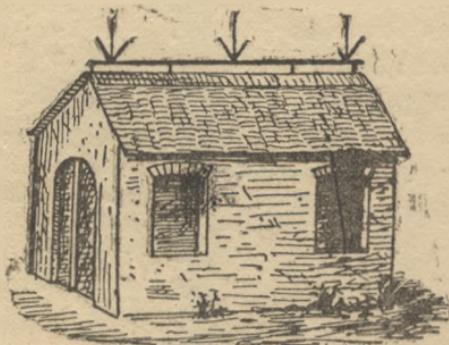


Fig. 2. — Maison pourvue de paratonnerres Melsens.

charges électriques des nuées de s'écouler dans la terre, qui constitue le réservoir commun, le savant américain Franklin avait imaginé d'élever sur les édifices des tiges de fer aiguës, en communica-

tion par un conducteur métallique avec le sous-sol humide, ces tiges offrant un chemin aisé à la décharge. Mais l'expérience n'a pas tardé à montrer la médiocre efficacité de ces tiges isolées, et un physicien belge, Melsens, a formulé les lois rationnelles auxquelles doivent obéir les paratonnerres pour ne pas devenir plus dangereux qu'utiles. En raison de l'instantanéité du phénomène appelé *coup de foudre* ou *décharge disruptive*, il faut offrir à l'énergie qui se dissipe, un chemin d'écoulement suffisant. Les paratonnerres seront donc composés de tiges courtes mais nombreuses, verticales ou obliques, couronnant le faite de l'édifice à protéger et réunies, d'abord les unes aux autres, puis à la charpente métallique, aux conduites d'eau et au sol. On obtient ainsi une espèce de cage métallique, à l'intérieur de laquelle se trouve la maison, qui est dès lors à l'abri des ra-

vages du tonnerre lequel agit quelquefois avec la brutalité d'une véritable explosion.

Premières idées relatives à l'électricité. — Thalès de Milet, philosophe grec qui vivait 600 ans avant notre ère, avait remarqué la singulière propriété que présentait l'ambre jaune d'attirer les corps légers après qu'on l'avait frotté. En parlant de ce phénomène, Pline écrivait : « Quand le frottement lui a donné la chaleur et la vie, l'ambre attire les brins de paille comme l'aimant attire le fer ». Là se bornèrent les connaissances des anciens sur l'électricité. Ce n'est qu'à la fin du xvi^e siècle que Gilbert, médecin anglais, attira de nouveau l'attention des physiciens sur ces particularités, en démontrant que beaucoup d'autres substances : le verre et la résine entre autres, pouvaient acquérir la propriété attractive par le frottement. Toutefois le nom d'*électricité*, qui vient d'*elektron*, ambre, resta à ce phénomène et à tous ceux de même ordre.

Pour expliquer les faits remarquables, on adopta l'hypothèse de deux électricités contraires, que l'on désigna sous le nom d'électricité *vitree* ou positive se dégageant sur le verre frotté et l'électricité *résineuse* ou négative, obtenue en frottant un bâton de cire à cacheter, et l'on considéra ces électricités comme des « fluides » distincts, semi-matériels. Mais les travaux des savants modernes ne devaient pas tarder à ruiner ces théories erronnées. Coulomb, Faraday, Maxwell et Hertz démontrèrent l'analogie existant entre l'électricité et la lumière, et, sans rien préjuger de sa nature intime, prouvèrent que c'était non un fluide, mais un mode particulier de mouvement, une vibration d'amplitude et de fréquence déterminées.

L'électricité statique. — L'électricité se mon-

tre à nos sens sous différents aspects, suivant qu'elle paraît stationnaire ou, au contraire en mouvement dans un conducteur, elle est dite *statique* ou *dynamique*, mais ce n'est en réalité qu'une apparence et on ne conserve ces dénominations que pour classer les phénomènes et faciliter leur étude. Il n'y a qu'une seule espèce d'électricité, et si les effets que l'on remarque sont si variés, cela tient uniquement à l'état de repos ou de circulation dans lequel elle se trouve et de son *potentiel*. Le potentiel est donc une qualité caractéristique dont on peut donner une idée en disant qu'il est, pour la propagation de l'électricité, l'analogue de la température pour la propagation de la chaleur, ou de la différence de niveaux hydrostatiques pour l'écoulement des liquides. Par conséquent, *différence de potentiel* en langage électrotechnique, correspond à l'idée de différence de niveau entre deux points possédant des potentiels différents ou situés à des niveaux différents.

Le seul procédé connu, au début, pour dégager de l'électricité, consistait à frotter avec un chiffon de flanelle un bâton de cire à cacheter ou une baguette de verre, mais on n'obtenait, de cette façon, que des quantités minimes de ce « fluide ». On imagina donc des procédés plus parfaits et des machines à frottement permettant de recueillir des charges notables d'électricité. On donna à ces machines le nom de *machines statiques*; elles permettaient de développer des charges d'électricité de très haut potentiel et de reproduire, — sur une très petite échelle, bien entendu, — les grands phénomènes de la nature, en donnant ainsi une preuve de l'identité existant entre l'étincelle jaillissant du conducteur de la machine et la flèche étincelante de la foudre éclatant au sein des nuées.

DEUXIÈME LEÇON

La bouteille de Leyde et la condensation de l'électricité

Les machines statiques. — Tout appareil permettant de faire apparaître de l'électricité, présente deux caractéristiques ou *constantes* particulières, représentant, l'une la quantité d'électricité qu'il peut dégager dans l'unité de temps, l'autre la différence de potentiel de cette électricité. Dans une machine à frottement, la quantité est proportionnelle à la vitesse de rotation et à l'étendue de la surface frottée, mais indépendante de la surface du frotteur et de sa pression. Elle est limitée par les pertes qui se produisent dès que le potentiel atteint un certain chiffre, assez élevé avec ce genre d'appareil.

Le modèle encore le plus usité de machine statique, est celui de Wimshurst qui fournit de très bons résultats. Il se compose de deux plateaux en verre mince laqué ou en ébonite, auxquels une manivelle permet de communiquer un mouvement de rotation rapide et en sens inverse l'un de l'autre. Ces plateaux portent chacun une série de petits secteurs triangulaires, taillés dans une feuille d'étain, de 15 à 20 suivant le diamètre des plateaux, et disposés sans

se toucher dans le sens du rayon. Deux conducteurs diagonaux correspondant à chaque plateau, sont munis de brosses métalliques qui balaient les secteurs passant devant elles. Deux peignes, ayant leurs pointes tournées vers la surface des plateaux, sont disposés aux extrémités d'une ligne horizontale et recueillent l'électricité dégagée pendant la rotation pour la transmettre aux boules d'un excitateur à manche isolant mobile.

La machine de Wimshurst, qui peut comporter un nombre plus ou moins grand de plateaux réagissant les uns sur les autres, demande moins de force que les machines à frottoirs telle que celle de Ramsden. Toutefois, après les premiers instants de la mise en marche, on éprouve une certaine résistance pour la faire tourner ; cela tient à ce que le travail mécanique dépensé par l'opérateur, se trouve transformé en électricité.

Les machines statiques sont caractérisées par la production de charges d'électricité de très haut potentiel, mais de faible quantité. Si l'on veut les comparer avec ce que fournit un générateur d'électricité dynamique, nous dirons qu'un élément de pile Daniell au sulfate de cuivre peut donner un courant constant de *1 ampère* sous une différence de potentiel de *1 volt*. (Nous verrons un peu plus loin la signification de ces mots), alors qu'une Wimshurst développe des charges dont le potentiel atteint de 50 à 60 000 volts, mais avec une intensité de 40 à 50 *milliampères* au plus. Les constantes sont donc bien différentes dans ces deux appareils.

Invention de la « bouteille de Leyde ». — Lors des premières recherches sérieuses sur l'électricité statique, vers 1740, on avait remarqué que,

lorsqu'on augmentait la surface des conducteurs en rapport avec les frottoirs fixes, en leur adjoignant des tubes de fer-blanc, de laiton ou de carton recouvert d'étain, isolés et suspendus à ces conducteurs, la capacité de la machine se trouvait notablement accrue. On eut ensuite l'idée de séparer ces conducteurs secondaires de leurs supports pour les transporter à distance, et c'est ainsi que l'on fut amené à l'idée de la bouteille de Leyde, ou condensateur électrique.

C'est en 1746 qu'un physicien hollandais, Muschenbroek expérimenta pour la première fois — et bien involontairement — cet appareil. Il avait, en compagnie de son élève Cunéus, électrisé une bouteille à demi-remplie d'eau et placée sur un support isolant. N'ayant rien remarqué d'extraordinaire après cette électrisation, il saisit à pleine mains ce récipient pour le transporter près de là, tout en s'appuyant machinalement de l'autre main sur le conducteur de la machine, quand il reçut dans les bras et jusque dans la poitrine, une commotion si violente et si imprévue, que pour la couronne de France, dit l'expérimentateur, il n'aurait pas recommencé.

La nouvelle de ce phénomène ayant été communiquée à l'Académie des Sciences, on reproduisit l'expérience, mais en prenant des précautions pour atténuer la secousse qui avait tant surpris et effrayé le physicien batave. Franklin et Æpinus étudièrent de près ce que l'on avait appelé la « bouteille de Leyde » et en fournirent l'explication scientifique.

Cette bouteille est un flacon de verre très mince de dimensions quelconques, mais à goulot large et court, et que l'on remplit de feuilles d'or battu ou de clinquant, avant de le fermer par un bouchon

scellé à la cire et traversé par une tige de cuivre descendant jusqu'au fond, alors qu'extérieurement cette tige se recourbe en crochet. La bouteille est recouverte extérieurement, jusqu'aux trois quarts de sa hauteur, par une feuille d'étain collée, et qui double également le fond. Ce revêtement constitue l'*armature extérieure* de la bouteille, alors que les feuilles d'or ou de clinquant forment l'*armature interne*. Le verre qui les sépare est le *diélectrique* ou isolant.

Condensateurs électriques. — En suspendant la bouteille Leyde par son crochet au conducteur d'une machine statique en mouvement, les armatures se chargent d'électricité de signe contraire et cette charge est proportionnelle à l'épaisseur du verre les séparant. Lorsque la charge est opérée et que la bouteille est au même potentiel que la source, on peut retirer le flacon de son support, le transporter sur un plateau isolant et effectuer avec elle les mêmes expériences que l'on peut répéter avec la machine.

Pour obtenir des effets plus saisissants, on réunit plusieurs bouteilles semblables, et de grandes dimensions, de *jarres*, suivant le terme, que l'on réunit par quatre ou par six dans des boîtes intérieurement doublées d'étain afin d'associer les armatures externes, les armatures internes étant, d'autre part, réunies toutes ensemble. On peut ainsi disposer d'une très grande surface totale, permettant d'emmagasiner une quantité beaucoup plus grande d'électricité à haut potentiel.

On remarque que la capacité de cet appareil, qui constitue un véritable condensateur de la charge électrique, est proportionnelle à la surface des armatures, sa variation étant inverse à la distance les séparant. La nature de l'isolant interposé influe éga-

lement sur cette capacité ; d'ailleurs il absorbe une partie de la charge reçue, ainsi qu'on le démontre avec un modèle de bouteille pouvant se démonter en trois pièces : les deux armatures et le diélectrique. En effet, après avoir déchargé ces armatures en les mettant en relation ensemble par un arc métallique, on les déboîte, puis, après les avoir ainsi séparées, on les remonte à leur place et on peut encore tirer une vive étincelle de décharge résiduelle.

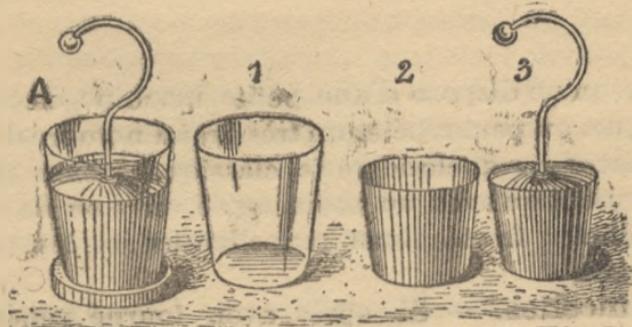


Fig. 3. — Bouteille de Leyde démontable. — A. La bouteille montée. — 1. Diélectrique. — 2. Armature externe. — 3. Armature interne.

On donne encore d'autres formes aux condensateurs électriques, mais le but poursuivi est toujours d'avoir la plus grande capacité possible sous le moindre volume. Cette capacité électrique des condensateurs s'évalue en unités dites *farads* (de Faraday, le célèbre physicien anglais), et correspondant à une quantité d'électricité de 1 coulomb sous une différence de potentiel de 1 volt.

Les condensateurs électriques reçoivent encore des applications pour la production des ondes électriques utilisées en télégraphie sans fil et le développement des courants de haute tension et grande fréquence employés en thérapeutique.

TROISIÈME LEÇON

Expériences sur l'Électricité statique

Lorsqu'on dispose d'une petite machine électrostatique, on peut répéter un très grand nombre d'expériences en quelque sorte classiques; bien plus facilement qu'avec un morceau de verre ou de cire à cacheter frotté. Nous rappellerons ici les plus connues.

Étincelles. — Si, après avoir tourné pendant quelques instants la manivelle commandant le mouvement de rotation des plateaux, on approche l'index plié d'un des conducteurs métalliques, on fait jaillir une étincelle qui cause une légère piquûre accompagnée d'une contraction musculaire d'autant plus violente que la machine est plus puissante. Pour éviter cette commotion, on peut tirer les étin-

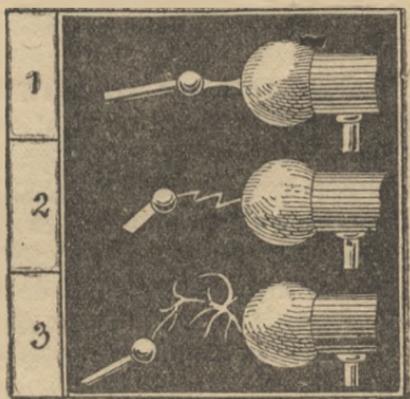


Fig. 4. — Formes diverses d'étincelles.

celles à l'aide d'un excitateur à manches isolants ; cette disposition permet d'étudier toutes les particularités de ce trait de feu qui présente toutes les apparences d'un éclair en miniature. L'expérience permet de se rendre compte que les charges d'électricité de signe contraire tendent à se réunir et ne restent maintenues à la surface des conducteurs que par la résistance offerte par l'air à leur passage. Si cette résistance vient à diminuer ou la tension électrique à augmenter, la décharge s'opère alors avec production de lumière et de bruit, c'est-à-dire par étincelle. La distance explosive varie avec le potentiel, la forme des corps, leur degré de conductibilité et la résistance du milieu interposé. Quand la décharge est bruyante et lumineuse, elle est dite *disruptive* ; lorsqu'elle s'effectue silencieusement sous forme d'aigrettes violacées peu visibles, on l'appelle *effluve*.

Tourniquet et carillon électriques. — En suspendant au conducteur métallique de la machine une tringle horizontale, à laquelle trois timbres sonores sont accrochés par des chaînettes, tandis que deux boules de laiton formant battant ou marteau sont intercalées entre ces timbres et retenus par des fils de soie, lorsqu'on fait fonctionner la machine, les boules isolées se chargent d'électricité de signe contraire de celle des timbres, qu'une chaîne relie à la terre. Il se produit alors une attraction et les boules viennent frapper le bord des

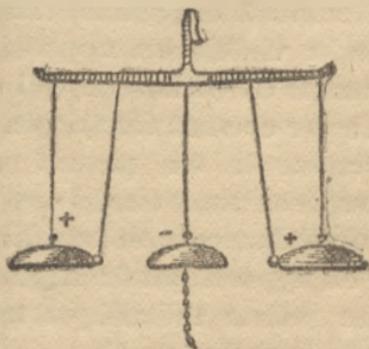


Fig. 5. — Carillon électrique.

timbres vibrants, mais aussitôt que le contact a eu lieu, c'est une répulsion qui succède à l'attraction et chasse les boules qui viennent ainsi choquer alternativement contre le timbre central et les timbres extrêmes, produisant ainsi un véritable carillon si le son de chacun de ces timbres est différent.

Lorsqu'on fixe, en un point quelconque de la surface arrondie des conducteurs de la machine, une pointe aiguë, on ne peut plus obtenir de celle-ci la

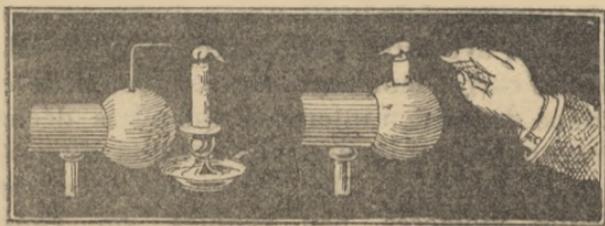


Fig. 6. — Le vent électrique.

moindre charge. On a beau tourner la manivelle, l'électricité dégagée s'échappe, et cet effet peut être rendu visible en approchant de cette pointe la flamme d'une bougie qui est instantanément soufflée par ce vent électrique. Inversement, en posant une bougie allumée sur le conducteur de la machine en activité, et en approchant de la flamme une pointe métallique tenue dans la main, on produit l'extinction subite de la bougie. Dans l'obscurité, le vent électrique apparaît comme une houppe ou un pinceau d'effluves violets s'échappant de la pointe. On peut encore mettre en évidence ce dégagement d'é-

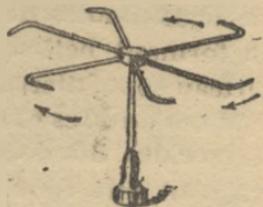


Fig. 7. — Tourniquet.

lectricité en montant sur un axe vertical vissé sur le conducteur un petit tourniquet à six branches horizontales se recourbant à angle droit non loin de leur extrémité. La réaction résultant de l'échappement de la charge électrique, détermine le mouvement de rotation du tourniquet sur son axe, en sens inverse de la direction des pointes.

Tube et bouteille étincelants. — Le premier de ces appareils est constitué par un tube de verre mesurant environ 20 centimètres sur lequel on colle à la suite l'un de l'autre, de petits losanges découpés

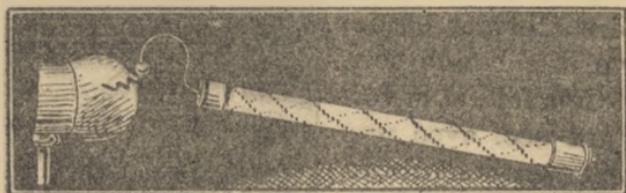


Fig. 8. — Tube étincelant.

dans du papier d'étain que l'on dispose en spirale, de manière à ne laisser entre eux que des vides très petits. Aux extrémités du tube sont deux viroles de laiton, dont l'une est mise en communication avec le sol par une chaînette, et l'autre avec le conducteur de la machine statique. Lorsque celle-ci fonctionne, des myriades d'étincelles jaillissent entre les pointes des losanges et produisent une véritable traînée de feu très visible dans l'obscurité.

Quant à la bouteille étincelante, c'est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est remplacée par une couche de vernis incolore que l'on a saupoudré, avant son séchage, de limaille de cuivre. Lorsqu'on relie cette bouteille par le crochet de son armature interne, à la machine en fonctionnement.

l'autre armature étant en communication avec le sol, de longues et brillantes étincelles éclatent sur la limaille en produisant un très bel effet.

Le dessin lumineux. — On prend une feuille d'étain très mince que l'on découpe en bandelettes très étroites à l'aide d'un canif, puis un carreau encastré dans un cadre en bois. On badigeonne ce carreau de vernis à la gomme-laque et on colle les bandelettes l'une à côté de l'autre et à une très petite distance en les réunissant alternativement en haut et en bas par des bandelettes plus courtes, de manière à former en définitive une bande continue. Cela fait, et le vernis étant sec, avec une lame bien tranchante en guise de crayon, on trace le contour d'un objet quelconque : tête d'homme ou d'animal, bouquet de fleurs, etc., en produi-

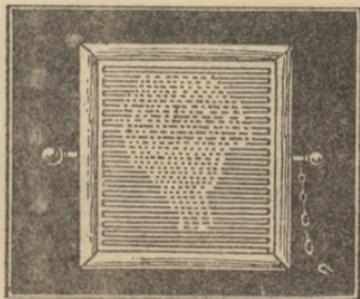


Fig. 9. — Dessin lumineux.

sant des solutions de continuité dans les bandelettes, dont une extrémité est mise en rapport avec la machine et l'autre avec le sol. Lorsque la décharge jaillit, une étincelle éclate entre toutes les pointes des losanges métalliques, comme dans le tube étincelant, et reproduit en points de feu à la surface du carreau, le dessin que l'on a tracé.

Production de l'électricité sans machine. — On peut développer des charges d'électricité statique sans aucun appareil, simplement avec une feuille de papier blanc que l'on fait chauffer et qu'on étend ensuite sur une surface isolante, telle qu'un carreau de vitre, une plaque d'ébonite ou de résine,

etc. On frotte ensuite cette feuille avec la paume de la main pendant quelques instants, et le papier se charge d'électricité ; pour s'en convaincre, il suffit de détacher la feuille de son support, on sent alors une résistance très appréciable, et la feuille paraît attachée au verre par un réseau invisible qui se brise avec un crépitement sec. Si l'on fait glisser le papier jusqu'au bord de la table, il y restera fixé, n'y adhérât-il que par l'un de ses angles. Si on l'applique contre une porte et qu'on le frotte vivement, il restera attaché au panneau. Si l'on opère sur deux feuilles superposées, on pourra les faire glisser l'une sur l'autre sans qu'elles se séparent, mais, si l'on vient alors à les abandonner brusquement, on pourra constater un mouvement marqué de recul tendant à ramener la parfaite juxtaposition des feuilles. Enfin en se plaçant dans l'obscurité et en frottant la feuille avec une brosse après l'avoir fortement chauffée au préalable, on pourra en tirer une petite étincelle très visible en approchant le doigt plié de la surface du papier.

Expériences avec la bouteille de Leyde. — Lorsqu'on possède une machine statique et une

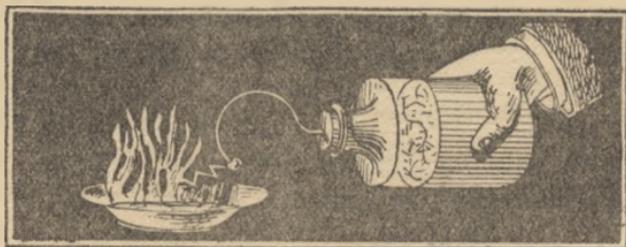


Fig. 40. — Inflammation de l'éther par l'étincelle de la bouteille de Leyde.

bouteille de Leyde de grandes dimensions, ou mieux une batterie de jarres, on peut répéter un grand

nombre d'expériences très intéressantes. C'est ainsi que, par la décharge de ce condensateur on peut foudroyer de petits animaux, et donner la commotion électrique à plusieurs centaines de personnes à la fois, se tenant par la main, comme le fit l'abbé Nollet en 1763. Mais les effets les plus curieux sont ceux ayant pour but une action calorifique. C'est

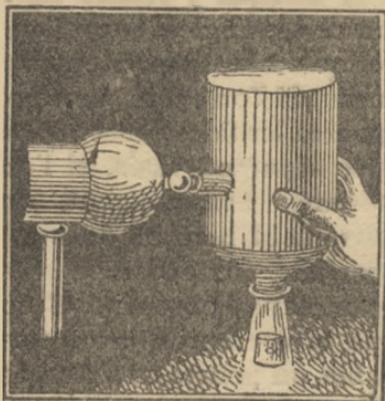


Fig. 41. — Pistolet de Volta.

ainsi que la décharge d'une forte bouteille peut produire l'inflammation d'une substance volatile telle que l'éther, l'essence minérale, l'alcool, et peut même porter à l'incandescence un fil de fer de faible diamètre. Les fils de platine, d'or, d'argent très fins sont fondus et volatilisés. On peut

encore percer une carte de visite et même une lame de verre assez épaisse par l'étincelle.

Non seulement on peut produire ainsi des phénomènes physiologiques et calorifiques, mais encore des effets lumineux et chimiques, parmi lesquels il convient de signaler la décharge dans le vide, à l'aide de l'*œuf électrique*, et la synthèse de l'eau à l'aide de l'eudiomètre ou *pistolet de Volta*, récipient de fer blanc que l'on remplit d'un mélange, en proportions convenables, d'hydrogène et d'oxygène produits par la décomposition de l'eau à l'aide de la pile. On fait jaillir l'étincelle électrique au sein de ce mélange qui détonne bruyamment, en produisant la combinaison des deux gaz sous forme de vapeur

d'eau. Ainsi l'électricité permet d'effectuer successivement l'analyse et la synthèse des corps.

Telles sont, sommairement rappelées et décrites, les expériences classiques que l'on peut répéter à l'aide de l'électricité statique, et qu'il était utile de mentionner avant d'en arriver à une autre forme de l'énergie : l'électricité dynamique.

QUATRIÈME LEÇON

L'électricité dynamique Le courant électrique

Découverte de l'électricité dynamique. — C'est au physicien italien Galvani qu'est due l'expérience fondamentale de l'électricité dite *dynamique*, à laquelle le nom fut longtemps donné de *galvanisme* en l'honneur de son découvreur, et de laquelle ont découlé par la suite toutes les découvertes modernes.

Pour répéter cette expérience, on écorche une grenouille vivante ; on la coupe au-dessous des membres antérieurs, puis on met à nu les nerfs lombaires que l'on aperçoit de chaque côté de la colonne vertébrale sous forme de filets blanchâtres. On prend alors un arc métallique composé de deux métaux dissemblables : cuivre et zinc et, introduisant l'une des branches entre les nerfs et la colonne vertébrale, on touche les muscles de la cuisse avec l'autre. A chaque contact, ces muscles se contractent et les membres s'agitent comme si cette moitié de grenouille était vivante. Galvani attribua ce phénomène à l'existence d'une électricité propre à l'animal, et admit que cette électricité se développait au contact des nerfs qu'il chargeait comme des armatures de bouteille de Leyde, l'arc métallique ne servant que d'excitateur.

Cette théorie adoptée par de nombreux physiologistes qui admirèrent la réalité de cette électricité animale, eut aussi de nombreux contradicteurs, dont les principaux furent Fabroni et Volta, compatriotes de Galvani. Volta établit la théorie du contact, qui fut battue en brèche par d'autres savants, et finalement Fabroni démontra que l'électricité résultait de l'action du liquide organique acidulé imprégnant les tissus animaux, c'est-à-dire de la réaction chimique se produisant entre ce liquide et le métal. C'est ainsi que fut établie d'une manière irréfutable la théorie de la force électromotrice, qui fut adoptée par la suite par tous les savants, et c'est cette théorie qui explique le fonctionnement des générateurs d'électricité dynamique appelés *piles*, du nom de l'appareil primitif inventé par Volta, nom qui a été conservé, bien que les modèles actuels de générateurs de ce genre ne ressemblent plus en rien à l'objet que ce nom évoque dans l'esprit.

Pile de Volta. — *Théorie de son fonctionnement.* —

La pile de Volta se composait d'une série de *couples* ou *éléments*, en formes de disques empilés les uns sur les autres (d'où la désignation de l'appareil) toujours dans le même ordre. Chaque élément était formé par la superposition d'un disque de cuivre, d'un disque de zinc et d'une rondelle de drap imbibé d'eau acidulée sulfurique, les deux disques métalliques étant soudés ensemble pour établir un contact parfait protégé contre l'oxydation. Ces rondelles superposées étaient maintenues entre trois colonnettes de verre scellées à leur base sur un socle en matière isolante, et placées de telle manière que, si la première était un zinc, la dernière était un cuivre ou inversement.

On peut considérer la pile voltaïque ainsi constituée : zinc-eau acidulée-cuivre, comme formant une

chaîne continue dans laquelle une différence de potentiel s'établit successivement entre chacun des corps en contact. Il s'établit une première différence

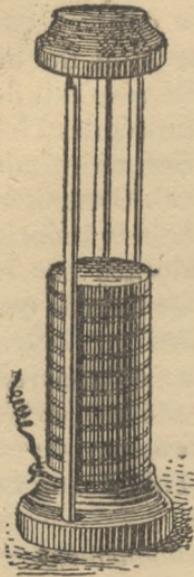


Fig. 42. — Pile de Volta.

entre le cuivre et le zinc, une deuxième entre ce métal et l'eau acidulée qui l'attaque, une troisième entre cette dernière et le cuivre suivant. Ces différences de potentiel obéissent à la loi formulée par Volta par laquelle la différence de potentiel entre les substances extrêmes est égale à la somme algébrique des différences de potentiel des substances intermédiaires. Cette loi s'applique à la pile tout entière, c'est-à-dire à l'ensemble des éléments superposés, aussi bien qu'à un seul élément, et on désigne sous le nom de *force électromotrice* le résultat de ces différences de potentiel additionnées. On comprend donc que cette force électromotrice peut

être variable, suivant la nature des substances entrant dans la composition de la pile et qu'elle change avec chaque système.

Explication de quelques termes techniques.

— On désigne sous le nom de *pôle positif* l'extrémité de la pile où l'électricité positive prend le potentiel maximum, et sous celui de *pôle négatif*, l'extrémité où le potentiel est négatif avec la même valeur absolue. Dans la pile à colonne de Volta, le pôle positif est celui vers lequel sont tournés les disques de cuivre. D'ailleurs, dans toute pile ou générateur chimique d'électricité, les éléments étant toujours composés d'une substance inattaquable par les aci-

des, comme le platine ou le charbon, ou peu attaquable comme le cuivre, et d'un métal soluble, tels que le zinc, le fer, le magnésium, etc., c'est toujours à la matière inattaquable que correspond le pôle positif, et au métal attaquable le pôle négatif.

On donne le nom d'*électrodes* aux disques ou plaques constituant les parties essentielles de la pile. et celui de *rhéophores* aux points où s'attachent les fils conducteurs formant le *circuit extérieur*. Le liquide excitateur où baignent les électrodes est l'*électrolyte*, et sa composition varie suivant le système de pile.

Théorie de la production du courant. — Si l'on vient à réunir par un fil conducteur les électrodes terminales zinc et cuivre de la pile de Volta, il se produit une décharge électrique allant du pôle positif au pôle négatif, pour revenir de celui-ci à l'autre à travers la pile, ce qui complète le circuit. Tout se passe d'abord comme si l'on réunissait l'une à l'autre par un conducteur, les deux armatures d'une bouteille de Leyde, mais on s'aperçoit aussitôt que la décharge, au lieu d'être *instantanée* comme avec ce condensateur, est *continue*, et qu'elle se poursuit pendant tout le temps que dure l'action chimique. On a donc donné le nom de *courant électrique* à ce phénomène du transport continu de l'électricité d'un pôle à l'autre de la pile. Ce courant ne prend naissance qu'au moment où cette communication entre les pôles est établie. On dit que le *circuit est fermé*, alors qu'il est *ouvert*, si les pôles ne sont pas en relations.

On a donné à ce dégagement d'énergie électrique, résultant de la présence de deux métaux hétérogènes, ou d'un métal attaquable et d'une substance inerte, quoique bonne conductrice, dans un bain acidulé, l'explication théorique suivante :

Une molécule de l'eau contenue dans le récipient

avec les électrodes, est en équilibre par rapport à l'affinité chimique de l'hydrogène et de l'oxygène constituant ce liquide. Si l'on ajoute de l'acide, cet équilibre va se trouver rompu : l'oxygène ira se fixer sur le zinc pour former avec lui un oxyde, tandis que la molécule de ce métal sera animée d'un mouvement égal mais de sens contraire. L'hydrogène de l'eau mis en liberté sera sollicité par une force égale et

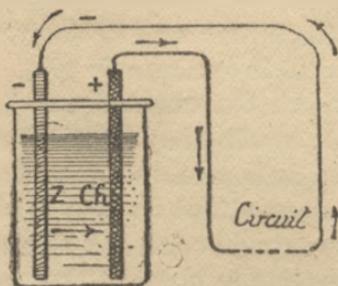


Fig. 13. — Théorie de la production du courant.

contraire à celle de l'oxygène, mais cette action n'étant contrebalancée par aucune force opposée, puisque le cuivre ou le charbon n'ont pas assez d'affinité avec l'oxygène pour se combiner avec lui à la température ordinaire, il faut bien que cette action se mani-

feste d'une manière quelconque : elle donne donc naissance à un travail que l'on désigne sous le nom de *force électromotrice*.

Le courant électrique dépend donc des affinités des corps mis en présence, de la quantité de métal attaqué et de la résistance que le liquide excitateur et le circuit extérieur présentent. Il ne peut donc prendre naissance qu'après que les deux électrodes ont été mises en communication par un conducteur plus ou moins long et que le circuit se trouve fermé, parce que, à ce moment, l'équilibre se trouve rompu et les électrodes à des potentiels différents. Autrement, chaque électrode prend le potentiel électrique qui lui est propre, et l'équilibre est établi.

Résumé. — Tel est le principe du fonctionnement des appareils dégagant de l'électricité par la réaction

chimique d'un acide sur un métal. L'électrode inattaquable ne sert donc qu'à recueillir la différence de potentiel de l'acide, laquelle est supérieure au potentiel du métal attaqué. Le courant dure autant que la réaction chimique, et il s'arrête lorsque l'acide est neutralisé ou le métal épuisé. La pile agit donc d'une façon analogue à un réservoir dont l'eau cesse de couler quand la provision contenue dans ce récipient est épuisée. Le courant électrique cesse lorsque la provision de matières transformables est consommée et que la réaction chimique prend fin.

CINQUIÈME LEÇON

Les grandeurs et unités électriques

Détermination du potentiel et de la force électromotrice. — En mécanique, on désigne sous le nom de *potentiel* une fonction particulière des forces agissant sur un corps. Dans le cas d'un liquide soumis à l'action de la pesanteur seule, cette fonction est proportionnelle à la hauteur de la masse de liquide considéré au-dessus d'un niveau donné pris comme origine. On peut donc, par suite, dire que le mouvement du liquide est dû à une différence de niveau existant entre le point de départ et le point d'arrivée. Or, cette différence de niveau correspond exactement à la différence de potentiel existant entre deux points donnés d'un circuit électrique. Cette différence de potentiel est due à la *force électromotrice* qui prend naissance dans une foule de phénomènes physiques, chaque fois que survient un déplacement d'énergie. Ainsi, quand on attaque un métal par un acide, quand on fait mouvoir une spire de fil conducteur dans un flux de force magnétique ou électrique, que l'on chauffe le point de soudure de deux métaux hétérogènes, etc., une différence de potentiel est créée, qui est caractérisée par une force électromotrice en rapport, soit avec les affinités

chimiques, soit avec la quantité de travail mise en jeu.

Ainsi que le physicien Coulomb l'a démontré, les forces électriques et les forces newtoniennes peuvent être exprimées d'une manière identique, bien qu'on ne soit pas fixé sur l'essence intime de ces forces. Quoi qu'il en soit, de même qu'à une différence de niveau entre deux points d'une colonne liquide correspond une pression évaluable en kilogrammes par centimètre carré, à une différence de potentiel électrique correspond une pression qui s'évalue en *votts*, et c'est cette pression qui détermine le mouvement des masses électriques.

Circulation du courant. — Pour donner une idée du mode de circulation du courant électrique, on a l'habitude de comparer ce mouvement à celui de l'eau dans une conduite et nous ne manquerons pas à cet usage classique. Que l'on s'imagine donc un réservoir rempli d'eau, posé sur un support plus ou moins élevé et relié par un tuyau, d'abord à un manomètre puis à un moteur hydraulique pouvant être isolé du réservoir par un robinet. C'est là une conception simple, qu'il est facile de se représenter à la pensée sans qu'il soit besoin de schéma; elle suffit cependant à représenter le mécanisme du courant électrique.

L'effort que pourra développer le moteur hydraulique dépendra : 1° de la hauteur de la colonne d'eau, c'est-à-dire de la hauteur à laquelle le réservoir sera placé; 2° de la section du tuyau ou du degré d'ouverture du robinet, qui permettra de laisser passer plus ou moins d'eau, suivant que la résistance opposée à la circulation sera faible ou élevée. Le débit dans la conduite sera donc proportionnel à la différence de niveau entre le moteur et le réservoir,

moins la résistance opposée par le robinet et les frottements du liquide à l'intérieur du tuyau. Il en est exactement de même pour un courant électrique : le *débit* ou intensité du courant (qui s'exprime en *ampères*) est rigoureusement proportionnel à la différence de potentiel ou à la pression ou tension du courant, exprimée en *volts*, moins les résistances opposées à sa propagation. C'est ce que résume la formule $I = E : r$, dans laquelle I est l'intensité, E la force électromotrice et r la résistance.

Unités fondamentales. — Ainsi que l'on s'en rend compte par ce qui précède, l'électricité constitue bien, maintenant, une science exacte se rattachant par des lois mathématiques à la théorie mécanique. Un système complet de mesures et d'unités a été adopté par le Congrès des Electriciens de 1881, afin de caractériser quantitativement entre eux les phénomènes électriques. Les *unités fondamentales* ont été basées sur des relations fournies par la physique, et sont au nombre de trois : l'unité de *longueur* qui est le centimètre ; l'unité de *masse*, qui est le *gramme-masse*, et l'unité de *temps*, qui est la *seconde*. Les initiales de ces unités (centimètre-gramme-seconde), ont créé la dénomination générale de *système c. g. s.*

De ces unités fondamentales se déduisent les *unités dérivées*, au moyen des relations que fournissent la mécanique et la physique. On obtient ainsi les unités de surface, de volume, de densité, de vitesse, de puissance, de travail, etc. Les plus indispensables à connaître sont l'*unité d'accélération*, qui représente l'accélération d'un mobile animé d'un mouvement uniforme, dont la vitesse est de 1 centimètre par seconde. A la latitude de Paris, cette accélération due à la pesanteur, est de 9 m. 81 par

seconde. L'*unité de force* est la force qui communique une accélération de 1 centimètre par seconde à une masse de 1 gramme; on la désigne sous le nom de *dyne*, elle équivaut à 1/981 de gramme, la valeur du gramme-masse correspondant à 981 dynes. L'*unité de travail* est le travail accompli par l'unité de force dépassant son point d'application de l'unité de longueur et suivant sa propre direction; on lui donne le nom d'*erg*, et elle correspond à un 98 cent millième de kilogrammètre. C'est pourquoi, en raison de sa petitesse, on lui substitue dans la pratique le *kilogrammètre*, qui représente la quantité de travail nécessaire pour soulever à 1 mètre de hauteur un poids de 1 kilogramme.

Unités pratiques d'électricité. — Les unités pratiques employées pour la mesure de l'énergie électrique et des courants sont, 1° le *volt*, unité de force électromotrice ou de pression; 2° l'*ampère*, unité d'intensité et de débit; 3° l'*ohm*, unité de résistance, ces trois unités étant reliées l'une à l'autre comme, dans le système métrique, le mètre linéaire, le mètre carré et le mètre cube. Viennent ensuite le *joule*, unité de travail; le *watt*, unité de puissance, le *coulomb*, unité de quantité; le *farad*, unité de capacité, le *gauss*, unité d'intensité de champ magnétique, le *gilbert*, unité de force magnétomotrice; le *henry*, unité d'induction; le *ærsted*, unité de résistance magnétique, et le *maxwell*, unité de flux magnétique.

Le *volt*, unité de force électromotrice ou de tension, est représenté assez exactement par la tension d'un élément de pile Daniell au sulfate de cuivre. Cette force électromotrice, résultant des influences mises en jeu: affinités chimiques, dépense de travail mécanique, etc., correspond à la hauteur de la

colonne d'eau dans une distribution hydraulique ou à la pression de la vapeur dans une chaudière. L'*ampère*, unité d'intensité, représente la quantité d'électricité qui traverse un circuit présentant une résistance de 1 ohm, lorsque la différence de potentiel est de 1 volt; cette unité s'entend par seconde. L'*ampère-heure* vaut donc 3600 ampères.

La résistance à la circulation du courant électrique dans les canalisations et appareils cause une *perte de charge* graduelle, et elle est proportionnellement inverse à la conductance de cette canalisation. Elle présente son analogue en hydraulique dans le frottement de l'eau le long des conduites et à la difficulté que le liquide rencontre dans son mouvement.

La loi établie par le physicien Ohm, régit ce phénomène, et sa connaissance est indispensable. Elle s'énonce comme suit: *L'intensité d'un courant électrique est directement proportionnelle à sa force électromotrice et inversement proportionnelle à la résistance du circuit qu'il doit parcourir*, ce qui s'exprime en abrégé par la formule indiquée plus haut. Cette loi fondamentale relie les trois termes et permet de calculer, dans un réseau de conducteurs, l'une de ces variables quand on connaît les autres.

Le volt et l'ampère constituent donc les deux éléments de la valeur d'un courant. Quand on connaît l'intensité et la tension, rien n'est plus simple ensuite que de déterminer la puissance du courant, l'énergie circulant dans l'unité de temps. Il suffit de multiplier ces deux termes l'un par l'autre; le produit s'énonce en *watts*.

On peut ensuite convertir les unités pratiques déterminant la valeur de la puissance électrique en unités mécaniques, c'est-à-dire en kilogrammètres,

par l'application de la règle suivante : On divise le nombre de watts obtenu par l'unité d'accélération (9.81) et le produit donne des kilogrammètres.

(1 watt = $\frac{1}{9,81}$, soit environ 1 dixième k. g. m.)

L'unité mécanique appelée *cheval vapeur*, dont la valeur est de 75 kilogrammètres, correspond donc à environ 736 watts.

L'énergie électrique étant la puissance électrique en fonction du temps ; elle s'exprime en *watts-heure*, de même que l'énergie mécanique, qui s'évalue en *chevaux-heure*.

Cette énergie se mesure à l'aide de compteurs spéciaux appelés *wattmètres*.

La tension des courants se mesure avec des galvanomètres à fil très fin et très résistant, et l'intensité avec ce même genre d'appareil, mais dont le cadre

galvanométrique est entouré d'un fil gros et court. Le premier de ces galvanomètres est donc un *voltmètre* ; l'autre est un *ampéremètre*, et leur cadran est respectivement gradué en *volts* ou en *ampères*. Ces appareils de mesure se font encore avec inscription automatique des variations à l'aide d'un système enregistreur à mouvement d'horlogerie.

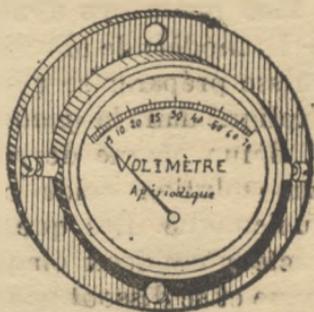


Fig. 14. — Voltimètre à cadran.

SIXIÈME LEÇON

Les piles électriques primaires

Les premiers systèmes de piles chimiques.

— Le modèle de pile électrique le plus simple qu'on puisse préparer se compose, ainsi que cela a été expliqué dans la *quatrième leçon* d'une lame de zinc et d'une plaque de matière inerte plongées dans une solution acide contenue dans un récipient quelconque. Dès que l'on réunit par un fil conducteur ces deux plaques hétérogènes, le zinc s'attaque et se dissout peu à peu dans l'eau acidulée, en la décomposant et donnant naissance à un courant électrique circulant du point où le potentiel est le plus élevé vers celui où il l'est le moins, c'est-à-dire du pôle positif au pôle négatif. L'oxygène provenant de l'eau décomposée se fixe sur le zinc en s'alliant avec lui pour former du sulfate de zinc qui se dissout. L'hydrogène mis en liberté se dégage sous forme de bulles qui adhèrent à l'électrode positive. Il en est de même dans tous les systèmes de piles.

On remarque immédiatement qu'en raison de ce phénomène, le courant dégagé ne tarde pas à aller en diminuant. En effet, l'hydrogène, après avoir rempli tous les pores de l'électrode inattaquable, ordinairement en charbon aggloméré, forme tout

autour de lui une gaine de bulles immobiles ou animées d'un lent mouvement ascensionnel. Cette gaine n'est pas conductrice, et on ne peut s'en débarrasser que par l'agitation du liquide ou de la plaque : si on ne l'élimine pas par un procédé quelconque, il en résulte que les nouvelles quantités d'hydrogène provenant de la décomposition de nouvelles portions d'eau, ne peuvent plus arriver jusqu'au contact de l'électrode et y apporter le courant. Celui-ci s'affaiblit donc de plus en plus, bien que la réaction chimique soit loin d'être terminée, et l'on dit que la pile s'est *polarisée*. C'est à combattre et à retarder le plus possible ce phénomène de la *polarisation*, que les milliers d'inventeurs qui ont voulu perfectionner l'invention de Volta se sont évertués, en variant la composition du liquide excitateur et en lui ajoutant des substances capables d'absorber l'hydrogène ou de dégager de l'oxygène.

La disposition en colonne d'une série de disques de métaux, donnée par Volta à son appareil, était fort incommode et ne permettait d'obtenir que pendant très peu de temps un courant très faible. Les efforts des successeurs du savant physicien se portèrent donc sur les moyens d'augmenter, avec la durée du fonctionnement, la quantité de courant débitée. On commença d'abord par disposer les lames de cuivre et de zinc dans des récipients ou auges séparées les unes des autres, de manière à pouvoir additionner les forces électromotrices de tous les couples. On augmenta la surface des plaques plongeant dans l'électrolyte en les roulant ou les contournant en S, et on s'efforça de combattre ainsi l'affaiblissement rapide du courant.

Divers systèmes de piles modernes. — La première combinaison vraiment rationnelle de gé-

nérateur électrique par réaction chimique qui ait paru, est celle connue sous le nom du physicien anglais Daniell, mais qui est due en réalité au savant français Becquerel. Ce système consiste à maintenir à saturation, par l'adjonction d'un réservoir contenant des cristaux, un bain acidulé de sulfate de cuivre constituant, avec une plaque de ce métal, le pôle positif. Le pôle négatif se compose d'un cylindre de zinc baignant dans une solution d'acide sul-

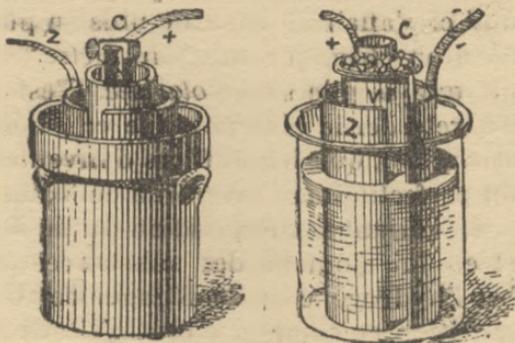


Fig. 15. — Pile Bunsen.

Fig. 16. — Pile Daniell au sulfate de cuivre.

furiqué au vingtième et entourant le vase poreux renfermant la dissolution de sulfate de cuivre. Cette pile, qui a reçu par la suite, de nombreuses modifications dues à Vérité, Callaud, Meidinger, Carré, etc., dégage un courant très constant aussi a-t-elle reçu de nombreuses applications, notamment dans la télégraphie et l'horlogerie.

La pile de Grove est l'une de celle qui fournit le courant le plus intense. Elle est plus connue sous le nom de Bunsen, bien qu'en réalité le modèle actuellement en service ait été agencé par Archembeau. Elle comporte quatre pièces emboîtées l'une dans l'autre, et qui sont : 1° un récipient en grès

vernissé; 2° un cylindre de zinc fendu suivant sa génératrice et amalgamé avec soin; 3° un vase ou diaphragme en porcelaine poreuse de forme cylindrique, et 4° un prisme quadrangulaire en charbon de cornue constituant le pôle positif. Le vase de grès, qui contient les autres pièces, est rempli d'eau acidulée sulfurique et le vase poreux reçoit de l'acide azotique concentré. Le courant est très intense et très constant, mais l'élément dégage pendant son fonctionnement des émanations d'acide hypo-azotique fort désagréables.

La pile au bichromate de potasse ou de soude possède également une force électromotrice élevée, mais elle se polarise plus rapidement que la précédente. Elle se présente sous deux formes distinctes : le modèle dit à liquide unique, créé par Poggen-dorf, et le modèle à deux liquides dû à Fuller. Dans le premier système, l'électrolyte est à la fois exciteur et dépolarisant : c'est une solution plus ou moins concentrée de bichromate et d'acide sulfurique; les électrodes, composées de deux plaques de charbon disposées de chaque côté d'une lame de zinc amalgamée, plongent dans cette solution et leur immersion est réglée par un treuil ou tout autre procédé. Dans le modèle à deux liquides, le récipient extérieur contient la solution dépolarisante de bichromate où baigne l'électrode de charbon qui présente une très grande surface, et au centre se trouve le vase poreux, rempli d'eau acidulée et contenant la lame de zinc amalgamé.

Il n'est pas de système sur lequel l'effort des chercheurs se soit autant porté que la pile au bichromate, et parmi les modèles qui ont joui d'une certaine vogue, il convient de citer la *pile-bouteille* de Grenet, la *batterie à treuil*, à liquide sursaturé, de

G. Trouvé, la *pile impolarisable et siphonide* de Cloris-Baudet, la *pile domestique* de Radiguet, les *pires portatives* de Laroche, Gauzents, Buchin, les *éléments en cascade et à écoulement* de Chutaux, Camacho, Jarriant, Hospitalier, etc., etc. La liste

pourrait être indéfiniment allongée, mais la plupart de ces modifications n'ayant eu qu'une vogue éphémère, il semble inutile de les décrire ici.



Fig. 17.

Pile-bouteille au bichromate.

Il ne serait pas juste de taxer de la même manière les piles au sel ammoniac inventées par G. Leclanché et perfectionnées par ses successeurs. Ces générateurs, contrairement aux précédents, n'ont pas l'inconvénient de s'user en circuit ouvert; elles ne dépensent, et leur matière active ne se détruit que pendant le travail. La pile Leclanché est d'ailleurs universellement connue et appréciée de-

puis l'année 1870, et elle a, seule, rendu possibles les applications domestiques de l'électricité, où il n'est besoin de courant que par intervalles avec des périodes de repos. Les trois modèles en service sont celui à *vase poreux*, celui à *plaques agglomérées*, et enfin celui dit à *sac*, le plus perfectionné et le plus puissant, dont l'électrode positive est un aggloméré composé de charbon de cornue et de peroxyde de manganèse, et l'électrode négative un crayon ou un cylindre de zinc non amalgamé. Ces deux pièces baignent dans une solution saturée de sel ammoniac dans l'eau ordinaire, sans le moindre acide.

Les piles thermo-électriques. — En 1821, le physicien Seebeck montra que le mouvement de la chaleur dans un circuit métallique donnait naissance à un courant électrique. Il prit une lame de cuivre et une lame de bismuth chauffées à leur point de soudure, et reconnut qu'une différence de potentiel se produisait entre l'endroit chauffé et l'extrémité froide, et le courant électrique ainsi développé était d'autant plus intense que la différence de température était plus grande entre les deux points considérés. Cette expérience réussit également bien avec un circuit composé d'autres métaux que le cuivre et le bismuth ; le professeur Becquerel étudia le pouvoir thermo-électrique des métaux, et les lois qu'il formula à ce sujet furent complétées plus tard par Pouillet, qui démontra que le caractère principal de ces générateurs était de ne posséder aucune résistance intérieure, et que la température du point chauffé pouvait être portée jusqu'à 300 degrés avec certains métaux tels que le fer et le palladium. Mais la force électromotrice du courant était très faible : 0,02 volt par élément.

Malgré ces inconvénients, divers modèles de piles thermo-électriques dus à Nobili, Melloni, Clamond, Gülcher, de Noé, etc, ont été créés, mais ce sont plutôt des curiosités de laboratoire que des appareils pratiques, car la dépense de chaleur qu'ils exigent est tout-à-fait hors de proportion avec la puissance recueillie dans le circuit extérieur.

SEPTIÈME LEÇON

Les Accumulateurs ou piles secondaires

Historique de l'invention de l'accumulateur.

— L'idée de l'accumulateur électrique est relativement ancienne. Dès l'année 1802, Ritter observait le phénomène de la polarisation de la pile sur des électrodes en platine. Grove, et plus tard Poggendorf, firent les mêmes observations, et en 1856 le physicien de la Rive reprit ces études en recouvrant les électrodes de peroxyde de plomb. Mais c'est en 1860 que G. Planté songea à tirer parti de cette polarisation, que, jusqu'à lui, on n'avait pensé qu'à supprimer, et qu'il, mit à profit la curieuse propriété de *reversibilité* de ce phénomène pour constituer une sorte de réservoir d'électricité dynamique, auquel il donna le nom de *pile secondaire*, le générateur à action chimique servant à le remplir conservant son nom de *pile primaire*. Mais les premiers appareils de Planté présentaient le gros inconvénient d'une capacité électrique très limitée, obtenue à grand'peine, et que l'on chercha, par la suite à accroître. Un perfectionnement important fut d'abord réalisé en 1880, par l'électricien Faure qui indiqua le moyen de réduire à son minimum la durée de la préparation des électrodes, et depuis cette époque diverses améliora-

tions de détail ont encore été apportées à ces appareils.

Théorie de l'accumulateur au plomb. —

Quand on fait passer un courant dans des lames de plomb baignant dans de l'eau acidulée sulfurique, le métal se trouve réduit par l'action de l'électrolyse, et une petite partie de la plaque, en rapport avec le pôle positif de la source d'électricité, se transforme en peroxyde de plomb, tandis que celle-ci, reliée au pôle négatif, se change en plomb spongieux. Si l'on réunit ensuite les deux électrodes l'une à l'autre par un conducteur, on constate que celui-ci est traversé par un courant électrique qui dure pendant tout le temps que le plomb met pour revenir à son état primitif. Telle est l'expérience réalisée par Planté, qui sut ainsi tirer parti du phénomène, désastreux pour les piles primaires, de la polarisation, en l'utilisant pour constituer un véritable accumulateur d'électricité dynamique.

Son appareil se composait de 2 lames de plomb roulées en spirales et maintenues écartées l'une de l'autre par des bandelettes de caoutchouc intercalées entre elles ; elles étaient plongées dans un bain d'eau acidulée sulfurique remplissant un récipient cylindrique en verre. Le courant, fourni par deux couples de Bunsen réunis en tension (par leurs pôles de nom contraire), oxydait la lame reliée au pôle positif et réduisait l'oxyde au pôle négatif ; la décharge ramenait ensuite les lames à leur état primitif. On parvint à emmagasiner ainsi, sous un poids de 2 kilos, 7 ampères-heure. Autrement dit, le courant restitué sous une différence de potentiel de 2 volts en moyenne avait une intensité de 1 ampère pendant 7 heures. C'était peu, et cependant, pour arriver à une pareille capacité, il fallait soumettre préalable-

ment les feuilles de plomb à des charges et des décharges très répétées et très nombreuses. Cette opération préliminaire constituait ce que l'on appelait la *formation*.

Accumulateurs à formation artificielle. —

Le chimiste Faure s'avisa qu'il était possible de supprimer cette période obligatoire de l'appareil Planté, ou tout au moins de ne pas demander à l'électricité d'effectuer ce travail. Cette formation n'ayant d'autre but que de transformer le plomb en peroxyde, ne pouvait-on se contenter de prendre ces oxydes tels qu'on les trouve dans le commerce, sous forme de minium ou de litharge, et d'en composer une pâte que l'on appliquerait sur les feuilles de plomb, qui ne serviraient plus alors que de supports et de collectrices de courant?... C'est ce que tenta Faure, mais sans réussir tout d'abord à faire

adhérer cette pâte d'oxyde à une feuille plate. D'autres chercheurs furent plus heureux en donnant à la plaque de plomb la forme d'un grillage à barreaux entrecroisés très serrés et en encastrant la pâte ou *matière active* dans les vides de cette grille. Telle fut l'origine de l'accumulateur à *pastilles* ou à *oxydes rapportés* et à *formation artificielle*, cette

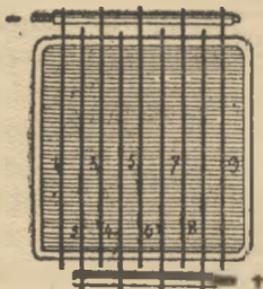


Fig. 48. — Élément d'accumulateur à 9 plaques. (Vue en plan).

dernière opération étant ramenée à son minimum de durée.

Ainsi donc, il existe deux types bien distincts d'accumulateurs au plomb : les premiers sont ceux de Planté, dans lesquels les oxydes font partie intégrante des électrodes, et les autres sont ceux dérivant

du type primitif Faure où les oxydes sont fabriqués par méthodes chimiques et appliquées sur une grille de support en plomb antimonié inattaquable dans l'acide. Enfin il existe encore une catégorie intermédiaire, participant de ces deux types, et où une âme en plomb pur formée suivant les procédés Planté, est recouverte d'oxyde suivant le procédé Faure.

Fabrication des accumulateurs. — Dans les modèles actuels, à formation artificielle ou mixtes, les plaques positives sont des grilles obtenues soit en les fondant dans un moule, soit en les soumettant à l'action d'une machine-outil, sorte de raboteuse qui creuse de profondes rainures à la surface de la plaque. Les creux sont ensuite remplis de la pâte de minium malaxée avec de l'eau acidulée, et la plaque est soumise à une forte pression sous une presse hydraulique. Après quelques jours, cette pâte est partiellement décomposée et transformée en oxyde et en sulfate de plomb. Cette réaction terminée, on commence la formation, qui ne demande que quelques jours pour être parfaite. La dépense d'énergie, pour cette opération indispensable, se trouve donc réduite au strict minimum. Si la grille est en plomb pur, elle s'oxyde elle-même quelque peu; le service journalier complète peu-à-peu sa formation, qui est complète lorsque les oxydes artificiels ont fini par disparaître, décollés à la longue de leur support par le phénomène du *foisonnement* qui dilate les pastilles pendant la charge et les détache de leurs alvéoles. A la plaque Faure succède donc à ce moment la plaque Planté formée pendant le travail quotidien.

Propriétés des accumulateurs. — Les modèles actuels d'accumulateurs ont une capacité moyenne

de 25 ampères-heure par kilogramme de plaques. Leur charge doit s'effectuer avec une intensité de courant de 2 ampères au kilo, mais, dans les types dits à *charge rapide*, la durée de cette opération peut être considérablement réduite, et amenée à 2 heures et même une heure, mais au détriment de la capacité. De même, le régime normal de décharge doit être tel que cette période dure dix heures. Le rendement de l'appareil atteint alors 90 p. 100 en ampères-heures et 80 en énergie. C'est dire que le

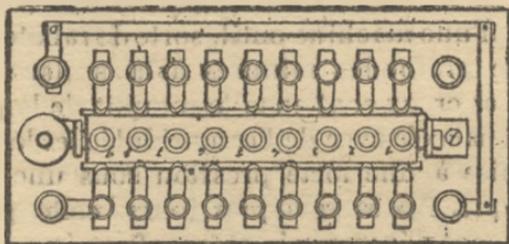


Fig. 49. — Coupleur à main de Planté, pour charger une batterie d'accumulateurs en quantité et la décharger en tension.

plomb ne restitue pas intégralement l'énergie électrique qu'il a transformée en travail chimique récupérable ; il en absorbe une partie pour effectuer la transformation.

Les applications des accumulateurs électriques sont très nombreuses dans l'industrie, en raison des avantages particuliers qu'ils présentent comme régulateurs et comme magasins transportables d'énergie. Mais on leur reproche, non sans raison, leur poids excessif et leur détérioration rapide, aussi les efforts des électriciens modernes se portent-ils sur les moyens de substituer un autre métal au plomb, problème presque résolu d'ailleurs à l'heure actuelle.

HUITIÈME LEÇON

Les Aimants et le Magnétisme

Les aimants naturels et les aimants artificiels. — On désigne sous le nom d'*aimants* des substances qui présentent la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux tels que le nickel, le cobalt, le manganèse et le chrome. On distingue les aimants dits *naturels* et les aimants *artificiels*. Les premiers, dits *pierres d'aimant*, sont composés d'un oxyde de fer nommé par les chimistes *oxyde magnétique de fer*. Cet oxyde est un corps très répandu dans la nature, mais ce n'est qu'accidentellement qu'il présente la force attractive qui caractérise les aimants.

Les aimants *artificiels* sont des barreaux ou des aiguilles d'acier trempé, qui présentent les mêmes propriétés que les premiers, non pas naturellement, mais parce qu'on les leur a communiquées par divers procédés. Mais quelle que soit l'origine des aimants, qu'ils soient *naturels* ou *artificiels*, ils possèdent les mêmes propriétés générales. Leur puissance attractive décroît comme le carré des distances et diminue quand la température s'élève, pour reprendre sa valeur lorsque la température revient à son chiffre primitif, pourvu toutefois qu'on n'ait pas

dépassé une certaine limite, car, à la température du rouge, l'aimantation cesse et se trouve anéantie.

Le pouvoir attractif des aimants, est quelque fois appelé *force magnétique*, et on donne le nom de *magnétisme* à cette curieuse propriété.

Caractéristiques des aimants. — Les aimants ne possèdent pas également répartie dans toute leur masse, la force magnétique. En effet, si l'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on en voit une grande quantité s'attacher aux extrémités, sous formes de houppes hérissées, mais l'adhérence décroît rapidement à mesure que l'on s'éloigne des



Fig. 20. — Aiguille aimantée.

extrémités jusqu'à la partie médiane du barreau où elle est nulle. Cette région, où l'action magnétique est insensible, a reçu le nom de *ligne neutre*, et les extrémités, où se manifeste le maximum d'attraction, sont les *pôles* de l'aimant. Si l'on donne au barreau la forme d'une aiguille, que l'on dispose en équilibre sur un pivot vertical, et qu'on l'abandonne à elle-même, on verra cette aiguille, après une série d'oscillations, se fixer dans une position d'équilibre invariable, à laquelle elle reviendra toujours d'elle-même si on l'en écarte. On remarque en outre que c'est toujours vers le même point de l'horizon que se dirige toujours une extrémité de l'aiguille toujours la même. Enfin si l'on approche de cette première aiguille, un autre barreau aimanté, on constate que l'attraction n'a lieu que lorsqu'on met en regard deux pôles déterminés, autrement, c'est une répulsion qui se produit. C'est ce que l'on exprime par la loi suivante : « Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de nom contraire s'attirent ».

Causes de l'aimantation et du magnétisme.

— On admet généralement que la terre exerce sur les aimants une action à distance analogue à celle de la pesanteur. Il nous faut déterminer la nature de cette action ainsi que sa provenance. Rappelons d'abord que, lorsqu'une masse quelconque est soumise à l'influence d'un système de forces, celles-ci peuvent se réduire, dans le cas le plus général, au système plus simple d'un couple et d'une force unique. Le *couple* tend à faire tourner la masse, tandis que la *force* tend à lui imprimer en même temps un mouvement de translation. Or, on a constaté par des mesures très précises qu'un barreau de fer doux ne pèse pas davantage après qu'avant l'aimantation. Donc, la force n'a pas de composante verticale, et elle n'a pas non plus de composante horizontale puisque ce barreau placé sur un disque de liège flottant à la surface de l'eau, ne se déplace ni dans la direction du nord ni dans celle du sud qui est son plan d'équilibre. La force magnétique de la terre se réduit donc à un couple, et l'existence de ce couple est un fait expérimental, indépendant de toute hypothèse sur l'origine du magnétisme terrestre. Le couple terrestre est complètement défini quand on connaît sa direction en un lieu donné et le moment de l'action qu'il exerce sur un aimant. Cette direction est déterminée, et l'on parvient à décomposer les forces du couple magnétique terrestre à l'aide d'aiguilles aimantées montées sur un axe horizontal ou vertical et constituant la partie essentielle d'instruments nommés *boussole d'inclinaison* et *boussole de déclinaison*.

Origine du magnétisme terrestre. — On a pu mesurer l'action exercée par la terre sur un pôle d'aimant et déterminer ainsi la valeur de l'intensité

du magnétisme terrestre. Ces recherches ont montré que l'on pouvait considérer l'écorce terrestre comme étant constamment parcourue par une quantité de magnétisme variable, qui est la cause première des effets constatés sur l'aiguille aimantée, et à laquelle on a donné le nom de *courants telluriques*. Les expériences de nombreux chercheurs, en France et en Allemagne, ont montré qu'il y a une telle ressemblance entre les courbes des courants telluriques et les courbes isodynamiques réunissant tous les points d'égale déclinaison et de même intensité magnétique, qu'on pouvait se demander si la cause de la déviation de l'aiguille n'était pas les courants telluriques. C'est là une hypothèse qui avait déjà été formulée par Ampère, et dont on a pu vérifier depuis, l'exactitude.

Les fantômes magnétiques. — La formation des houppes de limaille dont nous avons parlé plus haut, a pour cause l'aimantation par influence des

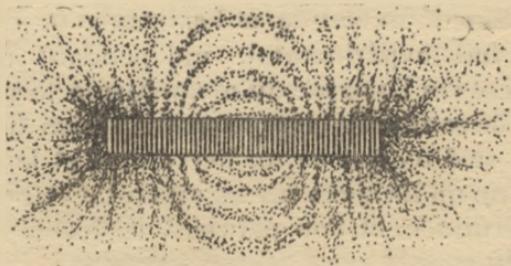


Fig. 21. — Spectre magnétique.

parcelles de métal qui viennent s'attacher aux pôles du barreau aimanté. Les grains immédiatement en contact avec ce barreau deviennent autant de petits aimants et agissent par influence sur les grains voisins ; ceux-ci agissent de même sur les suivants et ainsi de suite, jusqu'à une certaine distance des

pôles où l'influence finit par s'annuler. Ce phénomène ne se produit pas d'ailleurs seulement au contact, mais avec d'autant plus d'énergie que cette distance est plus réduite et que le barreau est plus fort. C'est ainsi que l'on produit les *fantômes* ou *spectres magnétiques*, nom sous lequel on désigne la disposition en courbes symétriques que prend la limaille de fer sous l'influence d'un barreau aimanté. On obtient ces courbes en posant sur un barreau horizontal, une feuille de carton mince que l'on saupoudre de limaille fine à l'aide d'un petit tamis. Sous l'influence des pôles de l'aimant qui se fait sentir à travers le carton, la limaille se dispose spontanément en courbes régulières allant d'un pôle à l'autre et changeant de direction aux extrémités du barreau.

Ce sont ces courbes magnétiques qui donnèrent à Faraday l'idée des *lignes de force*, nom qu'il donna aux lignes suivant lesquelles s'exercent les attractions et les répulsions magnétiques, et que déterminent parfaitement les *fantômes* dont nous venons de parler.

Faisceaux magnétiques. — Autrefois, on fabri-

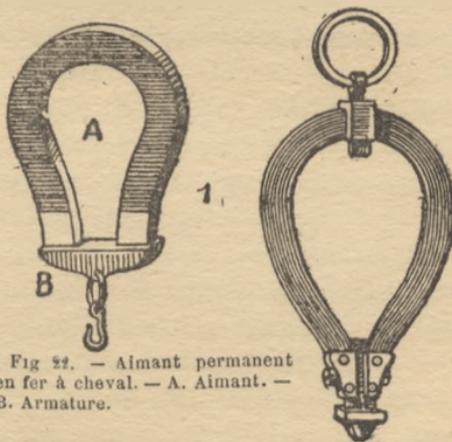


Fig. 22. — Aimant permanent en fer à cheval. — A. Aimant. — B. Armature.

Fig. 23.
Faisceau magnétique.

quait les aimants artificiels en mettant en contact le barreau d'acier à aimanter avec une pierre d'aimant, d'après les procédés dits de la *simple touche*, de la *double touche* et de la *touche séparée*. Par la suite, on a aimanté des barres à l'aide du courant électrique, et on a constaté que le résultat était d'autant meilleur que l'aimant était composé d'un plus grand nombre de lames métalliques juxtaposées. Tel a été le mode de construction adopté par la suite, notamment pour les grands aimants de démonstration de Clémandot et de Jamin, dits *faisceaux magnétiques*, et qui ont été fréquemment employés par la suite comme producteurs de champs magnétiques, ainsi que nous l'expliquerons ultérieurement.

NEUVIÈME LEÇON

Électromagnétisme

Qu'entend-t-on par électromagnétisme ? —

L'électromagnétisme est la partie de la physique qui embrasse l'étude des courants électriques dans leur action réciproque les uns sur les autres, et celles de la production des phénomènes magnétiques au moyen de l'électricité.

La circulation d'un courant électrique dans un conducteur est toujours accompagnée de la formation autour de ce conducteur d'une zone d'influence, analogue par ses propriétés et les phénomènes qu'il présente, à un champ magnétique engendré par un aimant, et composé de lignes de force, dont le tracé affecte la forme de lignes parallèles et concentriques. Il s'ensuit donc que les actions des courants les uns sur les autres, sont régies par les lois auxquelles obéissent les lignes de force et que le champ énergétique développé par un courant est identique à celui d'un aimant. Ampère, fondateur de la science de l'électromagnétisme, a formulé les lois suivantes qui portent le nom de *lois d'Ampère* :

1° Deux courants parallèles de même sens s'attirent ; deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent ; 2° deux courants faisant entre eux un

certain angle s'attirent et tendent à se placer parallèlement l'un à l'autre quand ils s'approchent ou s'éloignent tous deux du sommet de l'angle; ils se repoussent si l'un s'approche du sommet tandis que l'autre s'en éloigne, ou inversement; 3° deux courants rectilignes et parallèles agissent l'un sur l'autre avec une force proportionnelle au produit de leurs intensités par leur longueur, divisé par le carré de la distance.

Maxwell, mathématicien anglais a complété comme suit les lois d'Ampère :

Quand un circuit mobile traversé par un courant électrique, est mis en présence d'un aimant, il se déplace de manière à embrasser le plus possible du flux magnétique engendré par cet aimant. L'action d'un pôle aimanté sur un élément du courant est régie par une loi due à Laplace et qui permet de déterminer l'intensité du champ produit par un courant lorsqu'on a toutefois affaire à une forme simple de circuit.

Les solénoïdes. — L'action directrice de la terre sur les courants, comparable à celle qu'elle exerce sur les aimants, a révélé, une fois bien étudiée,

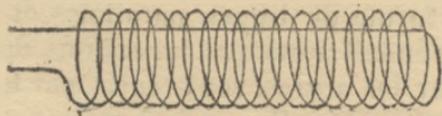


Fig. 24. — Solénoïde.

l'identité existant entre ces deux ordres de phénomènes, et cette identité est rendue frappante par l'examen du *solénoïde* imaginé par Ampère. Cette désignation est appliquée à une hélice composée de nombreuses spires, à une sorte de ressort à boudin formé par un fil de cuivre recouvert de soie dans

lequel circule un courant électrique provenant d'une pile. Il se produit, à l'intérieur de cette espèce de cage formée d'un seul barreau roulé en tire-bouchon et appelée *cylindre électrodynamique* ou *solénoïde*, un champ magnétique, ou pour parler plus exactement, électrique, parallèle aux spires, et on remarque, que lorsqu'un courant traverse ce cylindre, celui-ci agit exactement comme un aimant. Si l'on présente à un solénoïde suspendu par son milieu ou posé sur un pivot, l'un des pôles d'un fort barreau aimanté, il y a attraction ou répulsion, suivant que les pôles de l'aimant et du solénoïde mis en présence sont de même nom ou de nom contraire. La seule différence, c'est que, dans un solénoïde les pôles sont exactement aux extrémités tandis que, dans les aimants, ils sont à une certaine distance de ces extrémités.

Electro-aimants. — En enroulant plusieurs couches de fils superposées sur une bobine dont le noyau est constitué par un barreau de fer doux, on obtient ce que l'on appelle un *électro-aimant*. Les lignes de force engendrées par les solénoïdes formés par la suite des spires traversent le métal, très perméable pour ces lignes, beaucoup plus même que l'air, et il en résulte qu'elles induisent dans le fer un nombre de lignes de force, ou autrement dit un *flux* beaucoup plus considérable que celui qui serait induit dans l'air.

Un électro-aimant se compose d'un barreau de fer doux de section cylindrique, ployé en **U** (électro en fer à cheval), ou de deux barreaux identiques, réunis par une barre plate dite *culasse*. Ces barreaux remplissent le vide intérieur central de deux bobines sur lesquelles est enroulé par couches régulières, un fil de cuivre recouvert de soie ou de coton et de dia-

mètre variable suivant l'application qu'il s'agit de régulariser.

La puissance des électro-aimants est proportionnelle à l'intensité du courant, au nombre de tours du conducteur sur les bobines et à la racine carrée du diamètre des barreaux. Si l'on considère une ligne continue, que l'on peut appeler *ligne d'induction*, et qui sera tangente en chaque point à la direction du champ, l'intégrale de cette ligne continue la *force magnétomotrice* de l'électro, c'est-à-dire le tra-

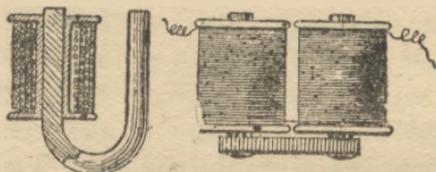


Fig. 25 et 26. — Electro-aimants en fer à cheval (coupe) et à culasse plate (élévation).

vail nécessité pour le déplacement de l'unité de pôle tout autour du circuit considéré, ou ligne d'induction.

Induction magnétique. — La valeur de l'induction magnétique dans un barreau de fer doux dépend de l'intensité du champ magnétique dans lequel il est plongé, mais cette loi n'est pas tout à fait exacte, car, dans un barreau soumis à une aimantation variable ou intermittente, il y a un retard à la désaimantation qui empêche le décollement de l'*armature*, ou pièce de fer venant s'appliquer sur les faces polaires, lorsque le courant a cessé de passer. Ce retard qui s'observe avec des barreaux dont le fer n'est pas absolument pur, est dû à ce que l'on nomme *force coercitive* ou *magnétisme rémanent*, mais il se produit aussi avec du fer recuit quand l'armature est en contact constant avec les pôles.

Dans ce cas, l'armature étant aimantée par influence, les deux pôles, au moment de l'interruption du courant, réagissent sur le fer de l'électro pour y maintenir deux pôles de nom contraire, de là une aimantation qui persiste ensuite tant que dure le contact et qui cesse avec lui. Ce phénomène porte le nom d'*hystérésis*, et il entraîne une production de chaleur, par conséquent une perte d'énergie dont il est nécessaire de tenir compte dans la construction des appareils.

Quand on déplace dans un champ magnétique créé par un aimant ou un électro-aimant, un conducteur il se développe dans celui-ci un courant électrique de très courte durée. C'est à ce phénomène qu'on donne le nom d'*induction*.

Différents aspects et lois de l'induction. —

Il y a lieu de distinguer, suivant leur provenance, trois catégories de courants *induits*, suivant que l'induction qui leur donne naissance résulte de l'influence d'un courant: c'est l'induction *voltaique*, d'un aimant, ou induction *magnétique* et encore de la terre (induction *tellurique*). A ces trois modes d'induction correspondent trois catégories de courants induits proprement dits, auxquels on peut ajouter l'induction d'un courant électrique sur son propre circuit ou *self-induction*. Les lois de l'induction ont été formulées comme suit par Maxwell, Faraday et Lenz :

1° Lorsqu'un circuit fermé se déplace dans un champ magnétique quelconque, de manière à faire varier le flux qui le traverse, il devient le siège d'un courant temporaire ou induit qui dure tant que la variation de flux a lieu. La force électromotrice donnant lieu à cette circulation d'électricité est égale en valeur au rapport de la variation de flux au temps qu'elle met à se produire, ou encore au taux de la

variation du flux rapporté au temps. Si le flux pénètre positivement dans un circuit, toute diminution de ce flux donne lieu à la production d'une force électromotrice positive autour du circuit.

2° Quand un conducteur rectiligne se déplace dans un champ magnétique de façon à couper des lignes de force avec une vitesse donnée, il se développe entre ses extrémités une différence de potentiel en rapport avec cette vitesse, dans le cas où le conducteur et le déplacement sont tous les deux normaux à la direction du champ.

3° Tout déplacement relatif d'un circuit et d'un champ développe un courant induit qui tend à s'opposer au mouvement.

En combinant cette dernière loi à celle de Maxwell, on voit que le sens de tout courant induit dans un circuit est tel, pour une variation de flux donnée, qu'il s'oppose à tout instant à cette variation par l'action du flux qu'il produit lui-même. En ce qui concerne la quantité d'électricité induite dans un circuit par la variation du flux, on peut la considérer comme indépendante de la durée de variation de ce flux.

Si deux circuits se trouvent en présence et que l'un d'eux soit traversé par un courant variable, le flux engendré par ce dernier parcourra en tout ou partie l'autre circuit. Le coefficient d'induction mutuelle de ce système sera le rapport du flux de force embrassé par le second circuit à l'intensité du courant circulant dans l'autre. Le phénomène de self-induction, dit aussi *extra-courant*, est analogue : la pénétration du flux induit à travers le circuit même qui lui donne naissance, crée une force électromotrice de sens contraire à celle qui produit la circulation du courant dans le circuit. Cet effort de réaction

appelé *force contre-électromotrice*, est le rapport du flux de force totale produit par le circuit à l'intensité du courant qui y circule, mais cette définition ne peut toutefois être exacte qu'au cas où le circuit est plongé dans un milieu de perméabilité magnétique constante.

Telles sont les données fondamentales de la branche de la science appelée *électromagnétisme* fondée par Ampère, Oersted, Faraday et Arago, et dont les théories, judicieusement appliquées ont permis de réaliser les merveilles modernes et de créer le télégraphe, la dynamo et le téléphone dont nous nous occuperons dans les pages qui vont suivre.

DIXIÈME LEÇON

La bobine d'induction

Production des courants d'induction. — Quand un courant induit naît dans un circuit fermé, sous l'influence d'un autre courant, celui-ci est appelé courant *inducteur* ou *primaire*, et le circuit influencé, parcouru par les courants induits, est dit *induit* ou *secondaire*.

L'induction voltaïque se produit dans trois circonstances : quand le courant inducteur commence ou finit, quand son intensité augmente ou diminue, et enfin lorsque sa distance au circuit induit s'accroît ou décroît. On donne la démonstration de ces phénomènes au moyen d'un appareil devenu classique et se composant de deux bobines pouvant pénétrer l'une dans l'autre, la plus petite entourée d'un solénoïde en gros fil conducteur, l'autre recouverte d'un fil plus fin enroulé sur plusieurs épaisseurs. Le gros fil est mis en rapport avec une source d'électricité voltaïque : une pile ordinairement, et le fil fin avec un galvanomètre. On emboîte la petite bobine dans le vide central de la grosse et on constate qu'aussitôt que le courant de la pile passe dans le gros fil, l'aiguille du galvanomètre dévie, indiquant le passage d'un courant dans le fil fin avec lequel l'autre n'est cependant nullement en communication di-

recte. Lorsqu'on coupe l'arrivée du courant de la pile le galvanomètre dévie de nouveau, mais en sens inverse de la première fois. Ces deux courants induits sont instantanés, ou, pour être plus exact, d'une très courte durée, à peine une fraction de seconde. Le courant induit prenant naissance au moment de la rupture du circuit inducteur est de même sens que le courant primaire, alors que le courant induit se produisant au moment de la fermeture du circuit inducteur est de sens inverse de celui ci.

Les mêmes effets sont obtenus lorsque, au lieu de faire passer, puis d'interrompre le passage du courant primaire dans la bobine de gros fil, on l'enfonce et on la retire de la bobine de fil fin. On peut encore remplacer la bobine inductrice traversée par le courant par un barreau aimanté ou produire des variations brusques d'intensité du courant primaire à l'aide de résistances appropriées : les deux courants induits successivement inverse et direct, traversent le circuit secondaire. Enfin si, au lieu d'introduire et de retirer brusquement le barreau aimanté ou la bobine inductrice, on agit lentement, le galvanomètre n'indique que des courants faibles et d'autant moins intenses que le mouvement a été plus lent.

Induction magnétique. — D'après ce qui précède, on voit que l'on peut produire les courants induits de différentes manières : soit en créant un champ électrique par un courant voltaïque, soit un champ magnétique au moyen d'un aimant. Qu'il s'agisse d'un circuit alternativement ouvert et fermé ou d'un aimant, le résultat est le même, et, en réalité, on ne fait que transformer en énergie électrique le travail mécanique dépensé par le déplacement de l'aimant ou du circuit électrique. C'est ce phénomène qui est mis à profit dans les machines électro-

magnétiques appelées dynamos ou magnéto, lesquelles permettent d'obtenir des courants aussi puissants qu'on le désire.

Cette action des aimants explique, d'autre part, l'accroissement des effets obtenus lorsqu'on dispose dans l'axe de la bobine inductrice sur laquelle est enroulé le circuit primaire, un faisceau de fils de fer très perméable au passage des lignes de force. Dans ce cas, la bobine devient alors un véritable électro-aimant, et les deux actions du courant et de l'aimant sur le circuit induit s'additionnent et augmentent naturellement dans une grande proportion la puissance du courant induit.

Il existe plusieurs dispositifs permettant de donner la démonstration des lois de l'induction. Dans l'appareil Bertin, construit par Ducretet, une longue bobine, reposant horizontalement sur deux supports, contient dans son axe un faisceau de fils de fer et se trouve entourée en son milieu d'une bobine très courte et mobile le long de l'autre. Si l'on fait passer dans la bobine la plus longue le courant d'un élément de pile, en interrompant fréquemment son passage par le jeu d'un interrupteur quelconque, on développe dans la bobine courte une série de courants induits dont la tension est suffisante pour faire briller le filament d'une lampe à incandescence. En intercalant entre les deux bobines une feuille de cuivre, on met en évidence l'influence des diaphragmes et le dégagement des courants dits *de Foucault*, qui nuisent au rendement et doivent être éliminés dans les machines basées sur l'induction.

Bobine de Ruhmkorff. Son principe. — Cet appareil, imaginé en 1841, par le professeur Masson et perfectionné ensuite par le mécanicien-constructeur Ruhmkorff qui rendit son usage pratique, est

basé sur les phénomènes de l'induction mutuelle, qui ont été exposés plus haut, et il comprend deux enroulements concentriques contenant en leur centre un noyau de fer doux feuilleté. Le premier enroulement est constitué par un fil, dont la section est en rapport avec l'intensité du courant primaire devant le traverser, et dont la longueur ne dépasse pas quelques mètres. Les extrémités de ce fil sont en rapport avec deux bornes où se fixent les conducteurs amenant le courant. Par dessus ce fil est roulé

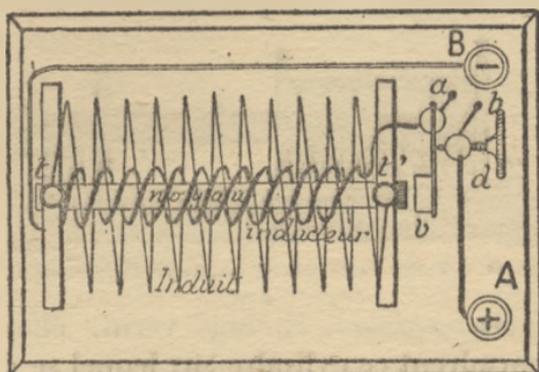


Fig. 27. — Agencement dans une bobine d'induction.

le fil secondaire, dont la section est très faible mais la longueur très considérable et qui vient s'attacher, par ses extrémités à deux autres bornes, ou *rhéophores*.

Pour comprendre le jeu de cette disposition, supposons qu'à un moment donné on lance un courant voltaïque de basse tension dans l'enroulement primaire inducteur : un champ magnétique prend immédiatement naissance, et le flux est renforcé par la présence du noyau de fer central. Le passage de ce flux produit alors un courant dans chaque spire de l'enroulement secondaire superposé à l'inducteur ; tous ces effets s'ajoutent, en raison du **grand** nombre de spires que comporte cet enroule-

ment, et l'ensemble finit par posséder une différence de potentiel très élevée, comparativement à celle du courant primaire. C'est ce qui explique la nécessité de protéger le plus efficacement possible les couches successives de fil constituant l'induit, afin d'éviter toute communication entre des fils situés à des potentiels très différents.

Aspect des bobines d'induction. — Une bobine d'induction affecte l'aspect d'un rouleau disposé horizontalement sur un socle de bois verni, et dont la longueur est double environ du diamètre.

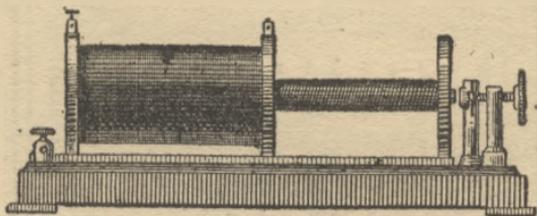


Fig. 28. — Bobine de Ruhmkorff, modèle de démonstration.

Des disques ou *joues*, en bois verni, ébonite ou cristal, encadrent ce cylindre sur lequel se dressent deux pièces de laiton décollétées sur le tour, servant de rhéophores. Les bobines de grande puissance ont un agencement différent de celui-ci et qui a pour but de fournir un isolement supérieur : les enroulements primaire et secondaire sont enfermés à l'intérieur d'une boîte fixée sur le socle, et sont noyés dans de la paraffine fondue remplissant les vides de la boîte. Il ne sort du couvercle que les deux tiges des réophores, avec plateau et pointe réglable.

Dans certains modèles, dits de *démonstration*, les enroulements constituent deux pièces distinctes, l'une fixe : l'inducteur avec son noyau magnétique, l'autre mobile et pouvant recouvrir la partie fixe en glissant le long d'une réglette collée sur le dessus

du socle ; cette partie mobile constituant le circuit induit. Enfin, dans les appareils d'induction dits *électromédicaux*, l'intensité des courants induits est réglée à volonté par un *graduateur*, tube de laiton recouvrant plus ou moins le noyau magnétique et permettant de faire varier le nombre de spires influencées.

Organes d'une bobine d'induction. — Les deux pièces essentielles de cet appareil sont : l'*interrupteur automatique* et le

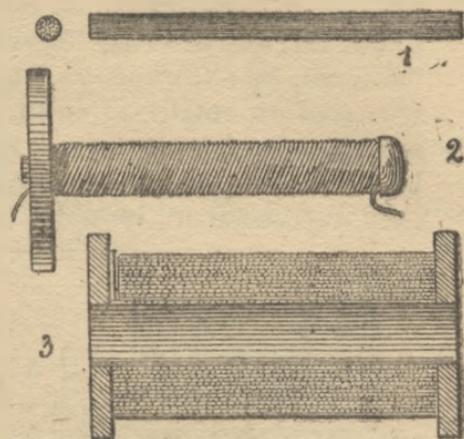


Fig. 49. — Pièces constitutives d'une bobine de démonstration. — 1. Faisceau magnétique. — 2. Circuit primaire inducteur fixe. — 3. Enroulement secondaire induit mobile.

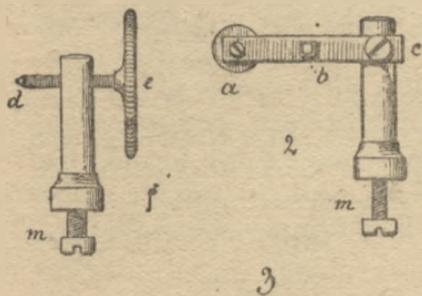


Fig. 30. — Vis platine de réglage.

Fig. 31. — Trembleur à marteau.

Fig. 3. — Feuille d'étain du condensateur.

condensateur. La première est l'organe chargé d'ouvrir et de fermer le circuit de la source d'électricité le plus grand nombre de fois possible par seconde, les courants induits ne se produisant qu'au moment de l'ouverture ou de la fermeture du circuit primaire. Le système le plus usité, pour les petits modèles, est

le *trembleur* de Ruhmkorff, qui utilise les propriétés magnétiques du noyau de fer de la bobine. Pour des modèles plus puissants, on emploie des *vibreurs* rapides, tels que ceux de Carpentier, de Kohl ou de Radiguet, les *interrupteurs à mercure*, à mouvement alternatif ou rotatif, et enfin, pour les très grands modèles, les *interrupteurs à effets électrolytiques* du D^r Wehnelt, qui sont très rapides.

Le *condensateur*, imaginé par Fizeau, joue des

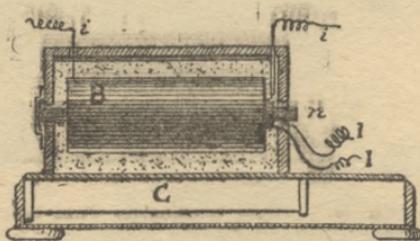


Fig. 34. — Bobine de Ruhmkorff noyée dans la paraffine isolante. — B. Bobine. C. Condensateur.

rôles multiples dans la bobine d'induction, dont il améliore le rendement entre autres avantages. Il est logé à l'intérieur du socle de la bobine et se compose d'un nombre variable

(suivant l'importance des enroulements) de feuilles d'étain, séparées l'une de l'autre par une feuille de papier servant d'isolant. Ces feuilles sont réparties en deux séries, toutes celles de numéro pair étant réunies ensemble et constituent l'une des armatures du condensateur. L'autre armature est formée de toutes les feuilles d'étain de numéro impair associées les unes aux autres dans une pince métallique.

ONZIÈME LEÇON

Effets et applications de la bobine d'induction

Alimentation de la bobine. — On pourrait avancer que toutes les sources d'électricité peuvent être utilisées pour alimenter de courant continu le primaire d'une bobine d'induction, et en réalité toutes les sources connues ont été essayées, mais, il faut le reconnaître, avec plus ou moins d'avantages. Tant qu'il ne s'agit que de petits modèles fournissant jusqu'à 5 centimètres de longueur d'étincelle aux rhéophores, on peut se contenter de piles chimiques, et dans ce cas, rien n'est supérieur à la pile au bichromate, bien que le courant qu'elle fournit soit loin d'être aussi constant que celui débité par des éléments d'accumulateurs. Mais il faut songer à la recharge de ceux-ci, et ce n'est pas toujours facile. On peut encore utiliser le courant continu distribué par les secteurs urbains, mais alors il ne faut pas trop regarder à la dépense, car la tension de ce courant étant toujours trop élevée pour l'alimentation directe de la bobine, il faut l'abaisser au chiffre convenant à celle-ci, ce qui ne se fait pas sans gaspillage d'énergie, quel que soit le procédé employé pour obtenir ce *dévoltagé* indispensable : rhéostats,

transformateurs tournants, clapets électrolytiques, etc. Cette difficulté a cependant été surmontée par quelques constructeurs; les interrupteurs s'accommodent de ces courants de tension relativement élevée et le fonctionnement des appareils est satisfaisant.

Expériences avec la bobine. — *Reversibilité de son fonctionnement.* — On peut répéter, au moyen de la bobine d'induction, un très grand nombre d'expériences fort intéressantes sur l'électricité de haute tension, et nous rappellerons les plus curieuses au cours de cette leçon. Tout d'abord, il est utile de faire remarquer que la bobine, de même qu'un grand nombre d'autres appareils électriques, présente la propriété de la *reversibilité*, et cette propriété peut être mise en lumière à la condition de posséder deux bobines identiques.

Avec ce matériel, complété par un *éclateur* à boules réglables, on peut transformer un courant de pile, de basse tension et d'intensité moyenne, en un courant induit de haute tension mais d'intensité proportionnellement réduite, puis, à travers la deuxième bobine, ce courant de haute tension est ramené à son voltage primitif, ce qui est démontré par les effets produits. Pour cette expérience, les interrupteurs sont supprimés ainsi que les condensateurs, qui restent inertes, les vis de réglage des trembleurs étant serrées à bloc. Les enroulements secondaires des deux bobines sont associés ensemble par leurs rhéophores; le courant de haute tension parvenant à la deuxième bobine, induit un courant de basse tension dans son propre circuit primaire, et l'on opère une double transformation, la seconde inverse de la première, et qui entraîne forcément une dépense considérable d'énergie, et amène un rendement final très inférieur.

La matière radiante. — Le physicien anglais Crookes a démontré en 1879, qu'en poussant la raréfaction à l'intérieur d'un tube de verre jusqu'à quelques millièmes d'atmosphère au plus, on constate des effets calorifiques et mécaniques dus à des radiations invisibles qui, en s'échappant de l'électrode négative (ou *cathode*), viennent frapper la paroi opposée du tube, quelle que soit la position occupée par l'électrode positive (ou *anode*). M. Crookes a considéré ces radiations comme étant dues à un bombardement moléculaire résultant du fait que, par suite de la raréfaction considérable du milieu, la moyenne de libre parcours de ces molécules était notablement augmentée, et il donna à cet état de la matière ainsi dissociée, le nom d'*état radiant*.

Les tubes de Geissler. — Ces tubes sont des tuyaux en verre soufflé, qui se font de toutes les formes, suivant toute sorte de contours et de grandeur pouvant aller jusqu'à 0^m50.

Ils se terminent à leurs extrémités par des boules ovoïdes contenant un fil de nickel ou de maillechort amenant le courant induit ; le vide est opéré dans leur intérieur à un quart de millimètre de pression, non sur de l'air mais sur un gaz dont ils ont été préalablement remplis. La décharge électrique, dans ce milieu raréfié, prend un aspect très

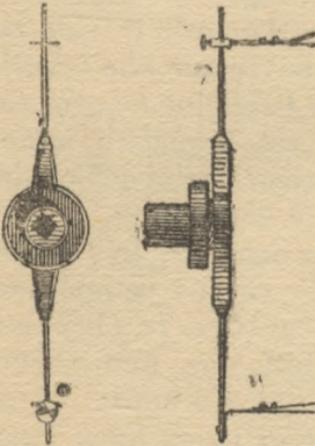


Fig. 34 et 35. — Porte-tubes à pinces réglables pour tubes de Geissler.

curieux : la boule correspondant au pôle positif est remplie d'effluves violacés, et la lumière parcourant

les circonvolutions du tube est *stratifiée*, c'est-à-dire divisée en tranches, en anneaux séparés les uns des autres par des bandes obscures et étroites. Si le vide a été fait sur l'hydrogène, la lumière est blanche ; sur l'azote elle est rose ; sur l'hydrogène carboné (gaz d'éclairage), elle est bleu pâle ; sur l'oxygène elle est rose clair et rouge écarlate sur l'acide chlorhydrique. L'effet est encore bien plus remarquable lorsque le tube Geissler est enfermé à l'intérieur d'une autre enveloppe de cristal contenant un liquide fluorescent, tel que le sulfate de quinine, l'azotate de nickel ou d'urane, le sulfate de cobalt, le formiate de cuivre, etc., qui ajoute sa lumière particulière à celle émanant de la décharge électrique dans le gaz.

La fluorescence. — La fluorescence du verre contenant dans sa masse l'un des sels qui viennent d'être nommés, varie avec le degré de raréfaction du gaz contenu dans le tube. Lorsque le vide est absolument parfait dans le tube (ce que l'on appelle *vide de Hittorf*), la décharge de la bobine ne peut pas passer. Le vide de Crookes est beaucoup moins grand, mais il est encore supérieur à celui de Geissler qui permet à la fluorescence de se produire.

Beaucoup de minéraux donnent de très belles fluorescences sous l'action des rayons cathodiques émanant des tubes à vide de Crookes. La phénakite (aluminat de glucine) produit une fluorescence bleue ; le spadumène (silicate d'alumine et de lithine) a une fluorescence d'un magnifique jaune d'or ; la fluorescence de l'émeraude est cramoisie ; celle du rubis rouge foncé, mais, d'après Crookes, c'est le diamant qui fournit la plus brillante fluorescence, d'une teinte vert clair magnifique.

Rayons cathodiques et rayons X. — Les

rayons cathodiques prenant naissance dans les tubes de Crookes se propagent en ligne droite, et sont arrêtés par les obstacles disposés sur leur trajet, ainsi qu'il est aisé de le démontrer. Ils transportent en même temps une quantité notable d'énergie, susceptible, étant concentrée par un réflecteur, de produire un travail mécanique ou d'amener la fusion de métaux très réfractaires, enfin ils sont sensibles à l'action magnétique de l'aimant, alors qu'il n'en est pas de même des rayons X, qui ne se réfléchissent ni ne se réfractent et ne sont jamais déviés sur

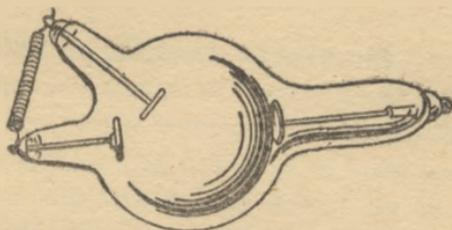


Fig. 37. — Ampoule biamodal pour la production des rayons X.

leur route. Ces rayons, comme les précédents, se dégagent sur l'anode d'un tube de Crookes contenant deux ou trois électrodes, et alimenté de courants de haute tension par une bobine d'induction.

La particularité la plus curieuse des rayons X, lesquels sont invisibles pour l'œil humain, et qui a été surtout utilisée, est de pouvoir traverser les corps opaques pour notre vue et pour la lumière, d'impressionner les plaques photographiques sensibilisées au gélatinobromure, et enfin de décharger les corps électrisés. Il suffit donc, pour avoir la photographie d'un objet dont on veut connaître la structure interne, d'interposer entre la source de rayons X, tube ou ampoule de Crookes et la plaque,

cet objet. La silhouette des parties les plus opaques aux rayons X est reproduite par la plaque impressionnée, et s'il s'agit d'un corps organisé : main humaine, oiseau, souris, etc., la photographie, ou, mieux, la *radiographie* donne l'image du squelette avec ses moindres détails. L'examen peut encore se faire visuellement à l'aide du *fluoroscope*, ou *écran radioscopique*, au platinocyanure de baryum, sensible à l'action des radiations.

Les rayons X ont été découverts par le docteur allemand Röntgen en 1891.

DOUZIÈME LEÇON

La production mécanique du courant électrique

Théorie des machines électromagnétiques.

— Le principe sur lequel se trouve basé le fonctionnement de toutes les machines électriques industrielles est le même que celui de la bobine d'induction, et qui a été exposé au début de la dixième leçon. La seule différence réside dans ce fait que, dans la bobine, les courants induits sont développés par les interruptions de passage d'un courant primaire dans un enroulement spécial, alors que dans les génératrices mécaniques, ces courants induits résultent du déplacement d'un circuit dans un champ magnétique créé par un aimant ou un électro-aimant. On utilise donc, non plus une induction *voltaïque*, mais une induction *magnétique*, d'où le nom de ces machines.

La première machine mettant en pratique les lois de Faraday date de 1835 et fut établie par Pixii : elle se composait d'un aimant mobile devant les pôles d'une bobine fixe. Sexton puis Clarke renversèrent cette incommode disposition et firent tourner la bobine devant l'aimant. En 1849, le professeur Nollet construisit une machine comportant soixante

aimants en fer à cheval entre lesquels tournaient toute une série de bobines associées et contenant des noyaux de fer doux; cette machine fut perfectionnée plus tard par Masson et van Malderen et fut utilisée pour l'éclairage électrique des phares, sous le nom de *machine de la C^e l'Alliance*.

En 1859, Hefner-Alteneck, physicien allemand,

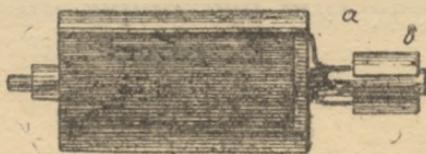


Fig. 38. — Bobine d'Hefner-Alteneck. A. Bobine.
B. Commutateur.

donna à la bobine mobile, dans le fil de laquelle les courants induits prenaient naissance, la forme d'un long cylindre, entaillé sur toute sa longueur pour recevoir le fil conducteur. Les

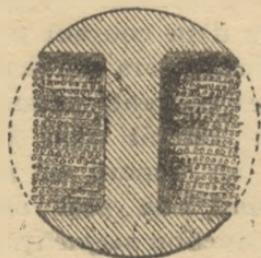


Fig. 39. — Coupe de la bobine
Hefner.

deux parties, en forme de double T, qui restaient apparentes dans ce cylindre, constituaient les faces polaires que l'on disposait en regard des faces polaires d'un aimant. Quelques années plus tard, Wilde utilisa le courant que l'on obtenait en faisant tourner la bobine devant son aimant

permanent pour alimenter ou *exciter* les électro-aimants d'une seconde machine identique, mais de plus grandes dimensions. Le champ magnétique indispensable à la production des courants induits se trouvait donc engendré, dans la première machine, par un aimant permanent, et par un

électro-aimant dans l'autre, disposition que l'on crut longtemps nécessaire, mais qui, en réalité, n'était qu'une complication que l'on n'employa plus que dans des circonstances particulières lorsque les phénomènes de l'induction furent mieux compris.

Les machines magnéto-électriques. — Pendant longtemps on continua à faire exclusivement usage d'aimants permanents (artificiels, bien entendu) comme moyen de créer le champ magnétique dans lequel tournait l'armature Hefner, qui était plus connue sous le nom de *bobine Siemens*, du nom de son constructeur, et même, lorsque plus tard la dynamo se fut vulgarisée, on conserva les aimants excitateurs. Les machines ainsi agencées ont reçu la désignation de *machines magnéto-électriques*, ou, plus succinctement *magnétos*. Elles ont retrouvé, ces temps derniers, un regain de vogue comme procédé commode d'obtenir des étincelles de haute tension produisant l'allumage du mélange d'air et de vapeurs d'essence à l'intérieur des cylindres de moteurs d'automobiles. On les utilise également, au lieu et place des piles Leclanché, sur les réseaux de téléphones pour développer le courant nécessaire à l'appel. Soigneusement construites, les magnétos actuelles ont reçu de très nombreuses applications pour ces deux genres de services cependant bien différents.

Invention de la dynamo. — En 1831, l'électricien Hjorth analysant les effets de la machine de Wilde, affirma qu'il était parfaitement possible d'obtenir de l'énergie électrique sans recourir à l'emploi des aimants permanents pour la création du champ magnétique. Siemens et Wheatstone constatèrent également un peu plus tard qu'il suffisait de faire tourner l'armature entre les pôles d'un

électro aimant, alors que celui-ci n'était traversé par aucun courant, pour qu'il se développât immédiatement, dans le fer de ces électros, une aimantation suffisante pour amorcer la machine. En effet, le fer conserve toujours, si bien affiné et recuit qu'il soit, une faible quantité de *magnétisme rémanent* dont il est difficile de le débarrasser, et suffisant cependant à donner naissance à un très faible courant induit dans le fil de la bobine induite. Ce courant se renforce de plus en plus par les influences mutuelles d'induction des électros sur l'armature et réciproquement, à mesure que la vitesse de rotation s'accroît. Grâce à ce phénomène, les inducteurs en fer sont transformés en électro-aimants, ce qui rend inutile la présence d'une machine distincte pour la création du champ magnétique.

On se rend donc compte qu'en définitive, c'est le déplacement du conducteur ou armature induite qui crée le courant électrique que l'on recueille. Il faut dépenser une certaine quantité de travail mécanique pour obtenir une quantité un peu inférieure d'énergie électrique. (Le rendement atteint et dépasse même 90 p. 100). Les machines électromagnétiques sont donc, par conséquent, des espèces de transformateurs qui rendent du courant électrique en échange du travail qui leur est fourni sous forme de mouvement, et le problème industriel consiste simplement à opérer cette transformation avec le moins de perte possible.

Composition de la dynamo. — La dynamo, dont le principe a été découvert par Gramme, se distingue donc de la magnéto par ce fait qu'elle s'amorce d'elle-même, et fournit elle-même le courant nécessaire à l'alimentation des aimants créant le champ magnétique. Elle est donc à *auto-excitation*

et son organe principal, l'induit mobile, est une invention de Gramme qui est toujours en usage depuis quarante ans.

Cette armature présente la forme d'un anneau circulaire monté sur un arbre central lui transmettant le mouvement de rotation. Cet anneau est composé d'un faisceau de fils de fer recuits roulés en rond de manière à former un cylindre méplat que l'on consolide par des ligatures soudées. Sur cette

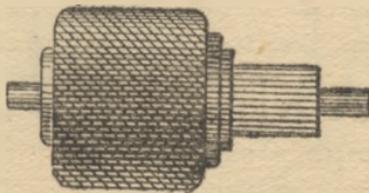


Fig. 4. — Anneau de Gramme et son Collecteur.

bague servant de noyau, sont enroulés une série de bobinages juxtaposés, séparés l'un de l'autre par de la matière isolante intercalée entre eux. Chacun de ces bobinages contient le même nombre de tours de fil de même diamètre, et le fil de chaque bobine est relié d'une part à la bobine qui la suit, et d'autre part à la bobine précédente en même temps qu'à une lame de cuivre isolée, fixée sur un cylindre ou manchon en matière isolante. Autant cet anneau comporte de sections ou de bobines distinctes, autant le manchon, que l'on appelle le *collecteur*, comporte de lames de cuivre. Une fois que les bobinages ont été mis en place, l'anneau est renforcé par des frettes soudées, et il est réuni par des rais de bronze ou des plateaux de serrage à l'arbre de couche central.

Le courant prenant naissance dans chaque spire de fil à mesure qu'elle passe, par suite du mouve-

ment de rotation qui lui est transmis par le collecteur et recueilli par deux balais métalliques ou en charbon frottant sur cet organe, en touchant deux lames diamétralement opposées. Suivant le cas, c'est la totalité du courant produit qui alimente les inducteurs, et la machine est dite alors à *excitation*

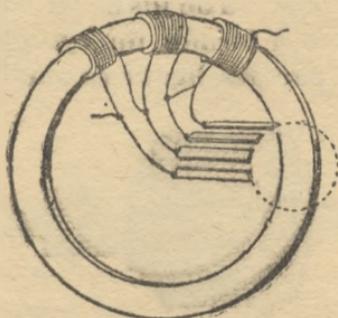


Fig. 41. — Agencement et connexions d'un collecteur (trois bobines seulement sont figurées sur l'anneau).

en série, ou une fraction de ce courant, et la dynamo est *excitée en dérivation*.

Formes données aux inducteurs et aux induits. — Connaissant la valeur du flux de force qui doit traverser un induit, il faut choisir la meilleure forme à donner aux inducteurs pour créer le champ magnétique. Ces organes doivent, par conséquent, répondre aux conditions suivantes : présenter une résistance magnétique minime, avoir des noyaux de longueurs suffisantes pour ne pas exagérer le nombre de couches de fil les recouvrant et éviter tout échauffement nuisible, présenter le moins de dérivations possibles du flux à travers l'air, présenter pour l'enroulement du fil un périmètre minimum pour une section donnée du flux, enfin avoir, pour une force électromotrice donnée,

une auto-régulation d'autant meilleure que le champ est plus intense. Le nombre de pôles n'est pas arbitraire ; il est proportionnel à la puissance développée afin d'obtenir un rendement élevé. Quant aux formes données aux inducteurs par les constructeurs, elles sont très variées, dans le but de répondre aux desiderata qui viennent d'être énumérés.

Les induits peuvent être rangés en quatre catégories distinctes : le *tambour*, dérivant de la bobine Siemens, l'*anneau* Gramme, le *disque*, employé par Brush, Desroziers, Schükert, et le *pôle*, préconisé par Wallace Farmer, mais qui n'est pas usité. La plupart des modifications apportées dans la disposition des induits ont pour but l'augmentation du rendement utile, par suite de la suppression des pertes internes dues aux courants parasites dits de Foucault prenant naissance dans le cuivre et à l'*hystérésis* ou retard à la désaimantation du fer des électros.

TREIZIÈME LEÇON

Les courants alternatifs

Différence existant entre les alternateurs et les dynamos. — Les machines génératrices de

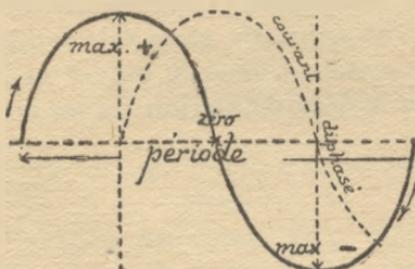


Fig. 42. — Courbe sinusoïdale d'un courant alternatif.

courants alternatifs simples ou à plusieurs phases différent des dynamos dont le principe a été exposé dans la précédente leçon, en ce fait qu'ils fournissent, non plus un courant continu s'écoulant

toujours dans le même sens, comme un filet d'eau dans une conduite, mais une suite de courants sinusoïdaux dont la force électromotrice n'est pas constante comme celle d'un courant continu, mais part de zéro pour atteindre progressivement, en un temps très court, une valeur positive maximum pour revenir aussi progressivement à zéro et descendre à une valeur négative maximum, revenir à zéro pour recommencer toujours dans le même ordre. Le premier courant direct correspond au chemin parcouru par la bobine induite à mesure qu'elle se

rapproche du pôle inducteur, et le courant inverse au chemin parcouru pendant que cette bobine s'éloigne de ce pôle. Le principe est toujours celui de l'induction voltaïque se produisant dans un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique dont il coupe les lignes de force, comme dans les dynamos, mais appliqué différemment. Les courants traversent donc le circuit extérieur tantôt dans un sens, tantôt dans le sens opposé, avec la même rapidité ou *fréquence* que s'opèrent les alternativités dans la machine.

Fréquence des courants alternatifs. — On donne le nom de *période* à l'espace de temps qui s'écoule entre deux instants où le courant développé par un alternateur a le même sens et la même valeur, c'est-à-dire au temps que met une bobine de l'induit à passer d'un pôle inducteur à un autre de même nom. La fréquence est le nombre de changements de direction du courant, autrement dit de périodes complètes qui ont lieu par seconde ou par minute. Ce nombre varie, suivant les systèmes entre 25 et 144 périodes par seconde.

Force électromotrice des courants alternatifs. — Les chiffres adoptés pour la force électromotrice efficace des courants alternatifs varie entre 1000 et 3000 volts, mais dans certaines machines de grande puissance, ce chiffre est très notablement dépassé, et certains modèles peuvent développer des courants dont la tension atteint 25000 volts. De toute façon, ces voltages élevés ne sont employés que lorsqu'il s'agit d'envoyer le courant à une très grande distance de l'usine de production, sans transformation préalable, et cette tension doit être réduite à l'arrivée au voltage convenant à l'application qu'il s'agit de réaliser.

Agencement des alternateurs. — Dans les alternateurs, de même que dans les dynamos, le champ magnétique où tourne l'induit est développé par des électro aimants. Le courant nécessaire à l'excitation de ces inducteurs est fourni soit par une bobine du circuit de l'alternateur lui-même, dont le courant est redressé par un commutateur spécial, soit par une *excitatrice*, petite dynamo dont l'induit est monté sur le même arbre que l'induit de l'alternateur et se trouve entraîné dans le mouvement de celui-ci par une poulie unique. Suivant les dimensions de la machine, l'induit est un anneau Gramme ou un tambour Siemens, ou bien la disposition des pièces se trouve renversée : l'induit est fixe et c'est l'inducteur, auquel on donne alors un grand diamètre, qui tourne. Enfin, dans quelques modèles l'inducteur et l'induit sont fixes tous les deux et situés concentriquement l'un par rapport à l'autre. Une roue dentée tourne dans l'espace laissé entre ces deux organes et par l'action magnétique qu'elle détermine en raison de la présence des noyaux de fer qu'elle porte, elle détermine la production des courants sinusoïdaux dans le circuit induit.

Les alternateurs ne possèdent pas de collecteur ; ils ont simplement deux bagues montées à peu de distance l'une de l'autre sur un manchon en matière isolante entourant l'arbre tournant. Les deux extrémités du fil de l'induit aboutissent à ces bagues. Les balais, qui permettent de recueillir le courant, sont deux frotteurs ordinaires mais on emploie de préférence deux demi-bagues constituées par des lames de ressort en cuivre écroui s'appliquant sur les bagues tournantes. Cet ensemble, dans les machines fournissant des courants de haute tension, est enfermé à l'intérieur d'une boîte à parois de verre, et les

barres de prise de courant sont entourées de caoutchouc afin d'éviter tout danger d'électrocution du personnel chargé de la surveillance.

Les courants polyphasés. — Jusqu'à présent nous n'avons parlé que des courants alternatifs simples, ou *monophasés*, mais il existe également des machines fournissant plusieurs courants alternatifs naissant au cours d'une même période et connues sous le nom d'*alternateurs à courants polyphasés*, mais en fait, on n'utilise que des courants à deux phases ou *diphasés* et à trois phases ou *triphasés*.

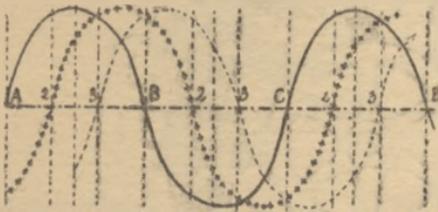


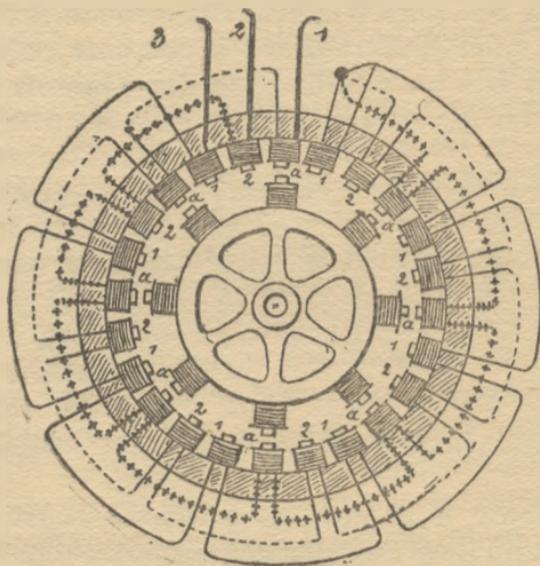
Fig. 43. — Courbes des courants triphasés.

Identiques entre eux comme loi de variation en fonction du temps, ces courants diffèrent dans leur développement simultané, par les moments

où se produisent leurs maxima, autrement dit leurs *phases*.

La phase d'un courant alternatif constitue un élément qu'il est essentiel de connaître, et pour comprendre comment plusieurs courants, de sens successivement direct et inverse peuvent prendre naissance dans une machine unique, il suffit de dire que ce résultat est obtenu d'une manière très simple, rien que par le couplage des bobines de l'induit qui, au lieu d'être couplées à la suite l'une de l'autre, sont couplées de deux en deux pour les courants diphasés, et de trois en trois pour les courants triphasés. Les courants successivement produits se trouvent donc, par cet artifice, *décalés*, les uns par rapport aux autres d'un quart ou d'un tiers de période. L'induit comporte donc deux ou trois circuits distincts

reliés chacun à une bague de prise de courant, et la courbe décrite par les courants affectera l'aspect de deux sinusoïdes parallèles dans le premier cas, et de trois sinusoïdes dans l'autre (courants triphasés). Comme la vitesse de rotation est uniforme, la production de ces courants est périodique, et ils subissent la même série de variations après chaque



Eig. 44. — Disposition des circuits dans un alternateur à courants triphasés.

passage devant le pôle de même nom. Les trois éléments de la fonction sinusoïdale, qui sont la période, la phase et l'amplitude se trouvent donc réunies, mais dans les courants décalés elles ne concordent pas.

Pour entretenir dans des circuits identiques mais distincts, des courants égaux et décalés, les uns par rapports aux autres de fractions quelconques de période, il suffit d'y faire agir des forces électromo-

trices égales, présentant entre elles ces décalages, et ce résultat s'obtient en munissant un alternateur de plusieurs enroulements induits identiques, convenablement disposés par rapport aux pôles inducteurs. Lorsque chacun de ces enroulements est relié séparément à son circuit d'utilisation, la différence de potentiel existant entre deux points d'un des circuits distincts que comporte un alternateur à courants polyphasés est décalée par rapport à la différence de

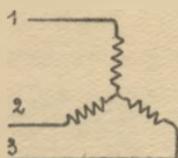


Fig. 45. -- Couplage des courants triphasés en étoile.

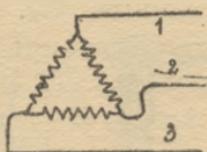


Fig. 46. Couplage en triangle.

potentiel des points correspondants de l'un des autres circuits de la même quantité que les courants traversant les deux circuits comparés, car dans ceux-ci existe le même décalage entre les différences de potentiel considérées et les courants.

Le couplage des courants polyphasés s'opère suivant deux méthodes distinctes, *en triangle* et *en étoile*, qui présentent chacune leurs avantages et leurs inconvénients particuliers et s'emploient dans des circonstances déterminées.

QUATORZIÈME LEÇON

Les Applications de l'Electricité. I. La Lumière

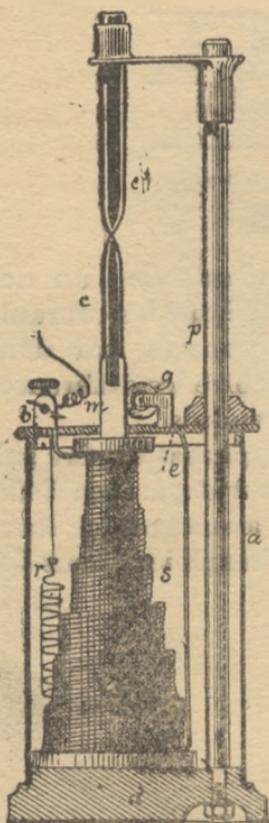


Fig. 47. — Mécanisme d'une lampe à arc voltaïque.

L'arc voltaïque. — La découverte du phénomène de l'*arc voltaïque* est due au chimiste anglais Humphry Davy, qui la produisit pour la première fois en 1813 à l'aide du courant d'une batterie ne comportant pas moins de deux mille éléments.

L'*arc voltaïque* est une étincelle continue résultant de la décharge d'un courant présentant une certaine tension (au moins 35 volts), et qui éclate entre deux pointes en matière très résistante, ordinairement des baguettes de charbon corne ou aggloméré. Lorsque ces baguettes ou crayons sont disposées dans le sens horizontal, la décharge lumineuse, présente la forme d'un crois-

sant à concavité inférieure, d'où le nom qui lui a été donné par Davy. Si le courant traversant le circuit est continu, le charbon positif se creuse en cratère et s'use environ deux fois plus vite que l'autre, alors que l'usure est sensiblement égale pour les deux charbons si le circuit est parcouru par des courants alternatifs simples.

La longueur de l'arc voltaïque, et par conséquent la distance entre les pointes de charbons dépendent de la puissance du courant et elles doivent demeurer constantes, malgré l'usure des crayons, pour un courant donné. Il a donc fallu combiner des mécanismes propres à maintenir l'écartement constant entre les charbons pour assurer la permanence de la lumière. Ces mécanismes sont appelés *régulateurs* ou *lampes à arc*. Il en existe de nombreux systèmes basés sur différents principes.

Lampes à arc. — Tout d'abord on employa des mécanismes à main puis à mouvement d'horlogerie pour commander le déplacement des charbons et maintenir la distance normale entre les pointes. Dans ce dernier cas, le défilement des crémaillères du mouvement d'horlogerie était déclenché par un électro-aimant branché dans le circuit. Par la suite le mécanisme d'horlogerie a été supprimé pour les lampes à arc industrielles, et le réglage a été assuré par le courant seul.

Pour cela, le régulateur se compose, soit d'une bobine à fil fin, soit de deux bobines, l'une enroulée de gros fil et placée dans le circuit, l'autre recouverte de fil fin et mise en dérivation. Le premier système est dit *en dérivation*, l'autre est à *effets différentiels*. Dans le procédé à bobine unique, le courant d'alimentation se partage entre les charbons et la bobine et l'intensité relative des deux fractions est inverse-

sement proportionnelle aux résistances des deux circuits. C'est la force électromotrice du courant qui détermine le fonctionnement ; quand l'arc augmente de longueur, la tension augmente également ; la bobine est traversée par conséquent par un courant plus intense agissant plus fortement sur le noyau de fer qu'elle contient et qui se déplace en raccourcis-

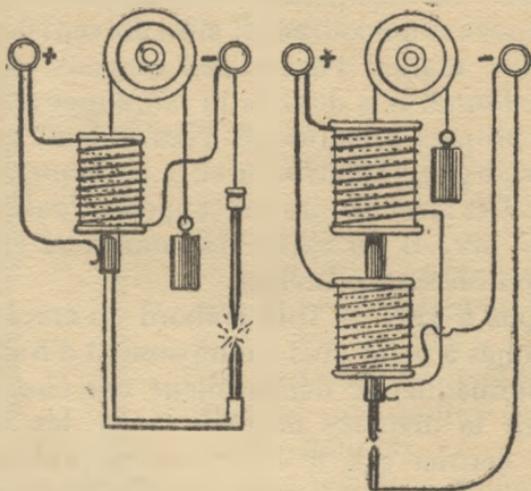


Fig. 48. — Schéma du fonctionnement d'un régulateur à bobine unique à enroulement en dérivation.

Fig. 49. — Régulateur à deux bobines à effets différentiels.

sant l'arc jusqu'à ce que la tension soit redescendue à son régime normal. Ce principe permet le montage et le fonctionnement simultané d'un nombre quelconque de foyers électriques sur un même circuit.

Dans le système à effets différentiels, à deux bobines, l'une en dérivation l'autre en série, l'équilibre est établi par les actions contraires de ces deux enroulements, qui agissent, l'un sur la tension, l'autre sur l'intensité du courant. Cet agencement est avantageux, en raison de sa plus grande sensibilité,

sur les réseaux comportant un très grand nombre de foyers.

Bougies électriques. — Dans le but de supprimer tout mécanisme de réglage, Werdermann avait imaginé les *brûleurs à semi-incandescence* à l'air libre, et qui se composaient d'un crayon de charbon venant s'appuyer par son poids ou la pression d'un ressort, sur la périphérie d'une roulette de même matière. Le crayon était porté à l'incandescence, et le point de contact rayonnait d'une vive lumière. Ce dispositif n'eut qu'une vogue éphémère, comme les *bougies électriques* inventées dans le même but, et à peu près à la même époque par Jablochhoff. Ces bougies étaient formées de deux baguettes méplates de charbon, disposées parallèlement et séparées par un isolant de plâtre et de baryte appelée *colombin*; une *amorce conductrice* en plombagine réunissait les pointes de la bougie et assurait son allumage. La longueur des baguettes était de 30 centimètres et le diamètre des charbons de 4 millimètres. Les bougies Jablochhoff devaient, bien entendu, être alimentées de courants alternatifs simples pour s'user régulièrement.

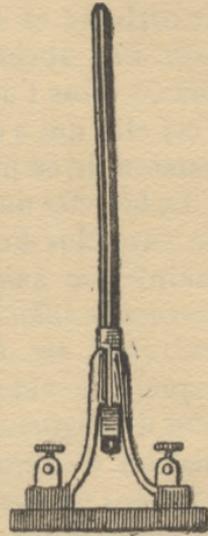


Fig. 50. -- Bougie Jablochhoff et son chandelier.

Les lampes à incandescence. — La lampe à incandescence est basée sur un principe totalement différent du régulateur à arc voltaïque. Dans celui-ci, la lumière est produite par la volatilisation à l'air libre, ou en vase clos comme dans le système Jandus, du carbone porté à une température de plus de trois

mille degrés. Dans la lampe à incandescence, le rayonnement provient de l'échauffement considérable d'un conducteur très résistant au passage du courant placé dans un récipient vide d'air. Les premiers essais dans cet ordre d'idées remontent à l'ingénieur de Changy (1844), mais c'est Edison qui est parvenu à créer la lampe à incandescence à filament de carbone et à la rendre réellement pratique, en 1879. Peu après cette époque, la lampe Edison est entrée dans l'usage universel et l'on peut dire que c'est elle qui a contribué pour une bonne part à l'extension de ce procédé d'éclairage.

La boucle, ou filament, obtenu par carbonisation en vase clos d'une matière à base de cellulose, est maintenue par des pinces en platine passant à travers le *culot* de l'ampoule de la lampe, en cristal uni, strié, etc. transparent ou coloré, ampoule dans laquelle le vide a été opéré afin d'éviter la combustion du filament au contact de l'oxygène. La consommation d'énergie de la lampe à incandescence à filament de carbone est de 2 à 3 watts par bougie, et sa durée moyenne est de huit cents heures environ, après quoi le rendement lumineux baisse considérablement.

Lampes à filaments métallique. — On reproche, non sans raison à la lampe à filament de carbone sa grande consommation de courant pour la lumière réellement fournie, et c'est pourquoi on a cherché une substance susceptible de fournir un meilleur rendement lumineux. On y est parvenu en utilisant au lieu de carbone, un métal excessivement réfractaire aux autres températures et pouvant être étiré en fils extrêmement ténus. Le tantale, l'osmium, le tungstène ont été employés avec avantage, et ils fournissent l'unité de lumière appelée *bougie déci-*

male avec une dépense d'énergie de 1 watt environ, dépense peu supérieure à celle de la lumière à arc voltaïque. La lampe Nernst à bâtonnet composé d'oxydes de terres rares, comme le manchon à gaz d'Auer, n'a pas une consommation supérieure. Sauf au moment de son allumage. L'éclairage le plus économique semble, pour l'instant, être fourni par

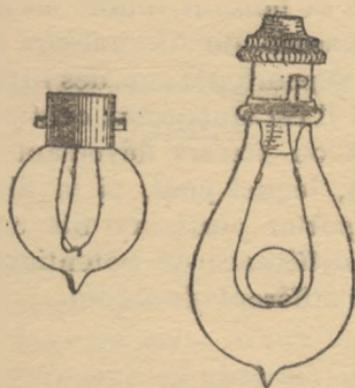


Fig. 51. — Lampe à incandescence à filament de carbone — Fig. 52. — Lampe à filament métallique M. S.

l'arc au mercure, tube de verre dans lequel le vide a été opéré sur un peu de mercure, et qui dépense 0,3 à 0,4 watt par bougie, c'est-à-dire moitié moins que l'arc voltaïque, et le tiers de ce qu'exige la lampe à incandescence filament métallique.

Distribution de l'électricité pour l'éclairage. — Actuellement l'éclairage électrique rivalise avec l'éclairage par la combustion du gaz ou autres produits, et, comme il est beaucoup plus économique d'avoir de vastes usines possédant tout le matériel électromécanique voulu afin d'alimenter un très grand nombre de foyers lumineux, plutôt que de petites stations génératrices particulières à chaque consommateur de lumière, toutes les grandes villes

se sont outillées et possèdent des usines puissantes ou *secteurs de distribution*, analogues aux usines à gaz, et envoyant à ses abonnés, par des canalisations enfouies dans le sol ou supportées sur des poteaux ou des consoles le long des maisons, le courant nécessaire à l'alimentation des lampes à arc et à incandescence. Ce courant, continu ou alternatif, est engendré sous la tension voulue à l'usine, par de puissantes dynamos ou alternateurs actionnés par des moteurs à vapeur ou à gaz, des turbines hydrauliques, etc., et il est amené aux centres à desservir, par des câbles ou *feeders* déversant leur courant dans le réseau, lequel peut, si la distribution est étendue, comporter plusieurs fils ou *ponts* entre lesquels une différence de potentiel constante est maintenue par différents procédés.

QUINZIÈME LEÇON

Applications. — II. La chaleur par le courant.

L'effet Joule. — La théorie mécanique de la chaleur nous apprend que la quantité de mouvement qui disparaît dans un tuyau d'eau par suite du frottement, se transforme en chaleur, de sorte que le tube et l'eau qui s'écoule s'échauffent en raison de la résistance opposée par le tuyau et la vitesse de l'écoulement résultant de la pression, de la hauteur de la colonne d'eau. Un courant électrique qui parcourt un conducteur chauffe de même le fil, et l'échauffement produit dépend de la résistance spécifique du fil et de la quantité d'électricité qui passe. L'intensité du frottement, et par suite celle de la chaleur qui en résulte, est proportionnel au carré de la vitesse. Pareillement, dans un circuit électrique, la dépense de force et de travail mécanique nécessaire pour maintenir un courant dans le circuit est proportionnelle au carré de l'intensité de ce courant c'est-à-dire de sa puissance. La loi de cette action calorifique a été formulée par le physicien Joule, qui l'a énoncée comme suit : « La quantité de chaleur dégagée dans l'unité de temps par le passage d'un

courant dans un conducteur, est proportionnelle à la résistance de ce conducteur et au carré de l'intensité. » Le *joule* constitue donc l'unité de travail. C'est la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur dans un circuit par 1 coulomb sous une différence de potentiel de 1 volt, c'est le quotient de 1 kilogrammètre par 9,81, chiffre représentant l'unité d'accélération.

La chaleur par l'électricité. — Rien ne paraît donc plus facile que d'obtenir de la chaleur à l'aide de l'électricité et de transformer en radiations calorifiques un courant circulant dans un fil, mais, en dehors de l'éclairage par lampes à incandescence, on a relativement fait peu d'usage de cette propriété, souvent en raison du prix élevé de l'énergie consommée. Cependant on est parvenu, au cours de ces années dernières, à éviter le gaspillage, et les appareils proposés présentent un rendement économique satisfaisant. En principe, le chauffage est réalisé en faisant circuler ce courant dans des fils présentant une très grande résistance à sa propagation et enfermés dans des tubes ou des plaques radiantes. Dans le système Parvillée, les plaques chauffantes sont des résistances métallo-céramiques pouvant être portées sans inconvénient à une très haute température.

Appareils de cuisine et de chauffage domestique. — Il existe deux catégories d'appareils de chauffage électrique : ceux destinés particulièrement à élever la température de l'air à l'intérieur des pièces de l'habitation, et les appareils plus spécialement employés pour la cuisson des mets et les divers usages domestiques. La forme généralement donnée aux générateurs calorifiques, ou radiateurs pour appartements, est celle de calorifères, contenant

dans leur intérieur les résistances, qui s'échauffent fortement en raison de l'effet Joule et donnent un rayonnement dont on peut régler à volonté l'intensité. Pour la cuisson des aliments, les fourneaux électriques comportent plusieurs foyers distincts ayant chacun un rôle particulier, et constitués par des groupes de plaques chauffantes qui peuvent être portées jusqu'au rouge vif et supporter une température allant jusqu'à 1200 degrés. La chaleur non utilisée par rayonnement direct, sert à chauffer des plaques intermédiaires sur lesquelles s'achève la cuisson commencée sur les grands foyers. Un fourneau comporte donc au moins un gril à feu vif, un four et un réservoir à eau chaude.

Parmi les appareils d'usage domestique où l'effet calorifique du courant est mis à profit, il convient de citer les bouilloires à eau, d'une capacité de 1/2 à 2 litres, les chauffe-plats, les chauffe-fers à friser, les grille-pain, les théières et samovars, les plats à œufs, les chauffe-assiettes, les chaufferettes pour les pieds, les fers à repasser, les fers à souder, les bains-marie pour colle-forte, etc. Tous ces instruments peuvent se brancher sur les fils de distribution de l'électricité à l'intérieur d'un appartement, au moyen d'un bouchon à broches et d'un cordon souple.

Chauffage industriel. Les fours électriques.

L'arc voltaïque, cette éblouissante lumière que l'on a su diviser et canaliser, est le siège d'une température excessivement élevée, très supérieure à celle des plus violents feux de forge, et qu'on peut évaluer à 350 degrés. On conçoit donc qu'il soit parfaitement possible d'obtenir des résultats extraordinaires avec une source de chaleur aussi puissante. C'est ce qui a été compris par divers techniciens, et l'utilisation rationnelle de ce phénomène a permis de créer une

branche nouvelle de l'électrotechnique industrielle : l'extraction et le traitement de nombreux métaux à l'aide du four électrique, dont la première idée émise en 1853 par le chimiste français Pichon, a été réalisée ensuite en 1878 par Siemens.

Il existe quatre catégories bien distinctes de fours électriques : 1° les fours de laboratoire à résistances métallo-céramiques ou à lame de platine ; 2° les fours à arc proprement dits ; 3° les fours à résistances, et 4° les fours à incandescence ou à résistance superficielle. Les premiers fours à arc voltaïque ont été combinés par Moissan pour ses recherches sur la préparation des métaux ; on fait souvent usage maintenant de fours à arcs multiples qui permettent de mieux répartir la chaleur. Les fours de la deuxième catégorie sont basés sur un principe totalement différent et qui n'est autre que l'effet Joule dont nous avons parlé plus haut, autrement dit l'échauffement d'un corps résistant à la circulation d'un courant électrique dans sa masse. La chaleur produite est proportionnelle à l'intensité du courant, à la résistance du circuit et au temps d'action. La température est beaucoup plus stable et le réglage plus aisé.

Dans une variante de ce système, qui constitue la quatrième catégorie, les électrodes sont réunies par une matière conductrice permettant le passage du courant dès le début de l'opération métallurgique. Cette combinaison donne le moyen d'économiser une grande quantité d'énergie électrique pour un résultat donné.

Applications du four électrique à la métallurgie. — En 1885 les frères Cowles, américains, combinèrent un modèle industriel de four pour la préparation de l'aluminium, modèle auquel ils apportèrent dans la suite divers perfectionnements. En

France, M. Héroult organisa l'un des premiers une usine hydro-électrique dans les Alpes pour traiter la *Bauxite* et en extraire le métal. Ces usines ne tardèrent pas à se multiplier par la suite, et l'aluminium qui coûtait 250 fr. le kilogramme à l'époque où l'on ne connaissait que les méthodes chimiques d'extraction, tomba à 3 francs ! Mais c'est pour la fabrication d'un alliage nouveau : le carbure de calcium, qui attaqué par l'eau ordinaire, dégage un gaz quinze fois plus éclairant que le gaz de houille, l'acétylène, que le four électrique a été le plus utile, car il a permis de créer une industrie nouvelle et des plus florissantes.

Les procédés électrométallurgiques ont encore été appliqués pour la préparation de nombreux métaux et alliages tels que le zinc, le chrome, le ferromanganèse, le cuivre, le chrome, le tantale, le molybdène, le silicium, le tungstène, le vanadium, et le corindon impur : carborundum ou siloxycon. Les fours spéciaux ont été combinés pour la sidérurgie, qui comprend la fonte et l'affinage du fer et de l'acier, et la préparation de produits chimiques tels que la baryte, le sulfure de carbone, le phosphore, et enfin le verre et le champ de ces applications est encore loin d'être fermé aujourd'hui.

SEIZIEME LEÇON

Applications. — III. Le transport de l'énergie à distance

Les premiers moteurs électriques. — Le moteur électrique dérive des recherches d'Ampère, Arago et Faraday sur l'électromagnétisme. Pendant de longues années, on ne connut comme organe capable de transformer en énergie cinétique ou mouvement un courant électrique que l'électro-aimant dont nous avons expliqué la théorie à la 9^e leçon. Aujourd'hui, cet organe constitue encore la pièce essentielle de nombreux mécanismes n'exigeant qu'une faible quantité d'énergie, tels que les récepteurs télégraphiques, les sonnettes à trembleur et les appareils à commande à distance.

Les premiers moteurs électriques qui aient été combinés employaient donc tous, des électro-aimants agissant sur une armature de fer doux mobile, et dont le déplacement était transmis, par diverses combinaisons mécaniques, à un arbre tournant, portant un volant et une poulie de transmissions. La source de courant était une pile primaire. On ne recueillait donc, par cette disposition, que très peu de travail, quel que fût l'agencement des pièces de la machine, et les moteurs à électros les plus puis-

sants construits sur ce principe ne dépassaient pas la puissance d'un cheval-vapeur.

Réversibilité des dynamos. — Les machines électrodynamiques possèdent la précieuse propriété de la réversibilité. C'est-à-dire que, si l'on fait tourner une bobine dans un champ magnétique, le mouvement qui est communiqué à cette bobine se transforme en courant électrique, et qu'inversement si l'on fournit un courant électrique à cette même machine, la bobine se met à tourner rapidement et permet de recueillir, sur l'arbre qui la porte, un certain travail mécanique, dont l'importance est en rapport avec la quantité d'énergie électrique dépensée. C'est cette qualité particulière qui est mise à profit pour constituer les moteurs électriques actuels et comme la dynamo permet d'obtenir le courant à un prix infiniment plus bas que les piles, c'est encore elle qui remplace, comme source primaire, les couples chimiques usités auparavant dans ce but. La machine qui produit le courant est la *génératrice* et celle qui absorbe ce courant pour le rendre sous forme de mouvement rotatif est la *réceptrice*. Une génératrice unique peut alimenter un nombre quelconque de réceptrices développant une puissance totale égale (sauf le rendement et la perte due au transport) à la puissance fournie à la génératrice.

Transport de l'énergie à distance. — La première démonstration publique de la possibilité de transmettre la force motrice à distance par des fils fut fournie en 1873 par Marcel Deprez qui utilisait des dynamos Gramme. La distance franchie était minime : cinq cents mètres à peine. Ces expériences furent reprises en grand en 1886 par le même savant entre Creil et la Chapelle. Une génératrice absorbant 116 cheval x-vapeur envoyait son courant à 36 kilo-

mètres de distance dans une réceptrice qui permettait de recueillir 52 chevaux, soit un rendement de 45 0/0 à peine. C'était un chiffre peu élevé, qui s'il démontrait que le problème était théoriquement résolu, prouvait aussi que la dynamo était insuffisante pour cette application en raison de la difficulté d'obtenir avec elle les très hautes tensions nécessaires pour vaincre la résistance de la ligne de transport quand la distance à franchir était considérable.

En effet, le résultat est très différent, lorsqu'il s'agit de canaliser des courants électriques d'effectuer cette canalisation à haute ou à basse tension, le diamètre et la section des fils — et par conséquent leur prix, — étant proportionnels, non à la tension mais à l'intensité du courant.

Ainsi, s'il s'agit par exemple de transporter 100 chevaux à 10 kilomètres d'éloignement, et que ce transport s'opère sous une différence de potentiel de 100 volts, l'intensité du courant sera de 736 ampères, ce qui exigera une câble de très grande section d'un poids et d'un prix excessifs, alors que, si le transport s'opère à la tension de 10.000 volts, l'intensité n'étant plus que de 7 ampères 3, un fil de cuivre gros comme le petit doigt sera suffisant. Mais les dynamos ne peuvent produire ou recevoir des courants d'un pareil voltage, et c'est pour quoi on a dû les abandonner pour recourir aux alternateurs, qui eux, fournissent aisément des tensions très élevées. Déjà en 1892, M. Brown réalisa le transport à 175 kilomètres de distance, d'une puissance de 100 kilowatts sous une différence de potentiel de 5000 volts, à l'aide des courants triphasés.

Les transformateurs. — Il n'est pas toujours possible, en raison d'une foule de circonstances locales, d'employer l'électricité, tel qu'il serait le plus

économique de se la procurer; souvent aussi les appareils d'utilisation ne sont pas faits pour le courant dont on dispose, et c'est pourquoi on est obligé de recourir à des dispositifs permettant de faire varier à volonté les constantes de ce courant. On donne le nom de *transformateurs* à ces intermédiaires, mais il en est de deux sortes bien distinctes, suivant qu'ils sont appelés ou non à changer, non seulement les constantes mais la forme du courant. Lorsqu'il s'agit de changer un courant alternatif simple ou polyphasé en courant continu, l'appareil est un moteur-générateur, ou une dynamo à plusieurs enroulements, dit *transformateur tournant*. Quand il suffit simplement de modifier, d'invertir les constantes d'intensité et de voltage de courants alternatifs, l'appareil est dit *transformateur statique* et ne comporte aucune pièce mobile. Il est composé de deux enroulements superposés : un de gros fil, l'autre de fil fin, entourant un noyau magnétique fermé. C'est donc une sorte de bobine d'induction dont les deux circuits réagissent l'un sur l'autre en raison de phénomènes d'induction. Si le primaire est traversé par exemple par un courant de 500 volts avec une intensité de 65 ampères, il induira dans le secondaire un courant à la tension de 5000 volts, mais dont l'intensité sera réduite en proportion, c'est-à-dire à 6 ampères 5. Ce courant de haute tension pourra être ainsi transporté à une grande distance par des câbles de diamètre restreint, par conséquent de prix raisonnable. A l'arrivée, comme les lampes ou moteurs ne pourraient consommer du courant à 5000 volts, un second transformateur, dit *dévolteur* (le premier, celui de la station de départ étant dit *survolteur*), abaisse la tension au chiffre voulu pour une distribution normale. Le courant de 5000 volts induit donc, dans

l'enroulement de gros fil de ce second appareil, un courant d'une tension de 110 volts, mais d'une intensité de 275 ampères. La puissance totale du courant, 30250 watts, n'a pas varié : seules les constantes d'intensité et de force électromotrice ont changé, presque sans perte dans les enroulements des transformateurs, dont l'emploi a donné la solution la plus économique du transport à distance des puissances naturelles gratuites (telles que la *houille blanche*, l'eau des torrents), en transformant ces puissances en énergie électrique.

Les moteurs à champs tournant. — Les alternateurs, de même que les dynamos à courant continu, sont *réversibles* et peuvent devenir des

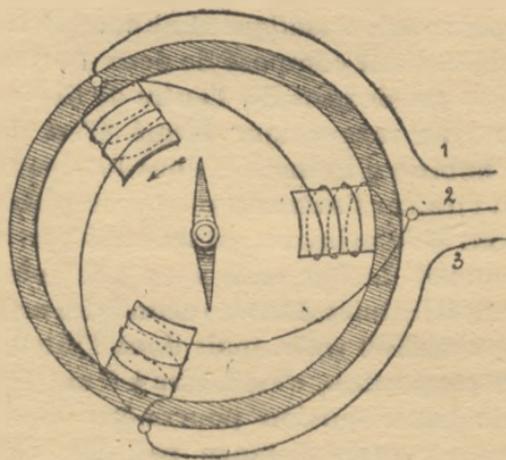


Fig. 53. — Principe des moteurs à champ tournant (trois bobines seulement sont figurées, alimentées par des courants alternatifs décalés d'un tiers de période).

moteurs électriques, si au lieu d'un mouvement de rotation on leur transmet un courant. Mais les moteurs ainsi constitués présentent un grave défaut : ils exigent de tourner synchroniquement, autrement

dit exactement à la même vitesse que la génératrice l'alternateur les alimentant. Si ce synchronisme se trouve détruit par une cause quelconque, il se produit un *décrochage*, et le mouvement s'arrête subitement. C'est pourquoi les moteurs à courant alternatif *synchrones* ont reçu moins d'applications que les moteurs *asynchrones*, à champ magnétique tournant imaginés par Ferraris et Tesla vers 1890. Dans ces réceptrices, les inducteurs sont disposés de telle manière que, étant alimentés de courant polyphasés décalés d'une certaine portion de période, ils donnent naissance à un champ magnétique se déplaçant d'un pôle à l'autre avec une vitesse angulaire précisément égale à la pulsation du courant d'alimentation. Un circuit fermé déposé dans ce champ tend à suivre son déplacement, comme ferait une aiguille aimantée autour de laquelle on ferait tourner un pôle d'aimant. Tel est le principe des moteurs à champ tournant dont le *rotor*, partie mobile disposée concentriquement aux enroulements fixés du *stator*, ne comporte ni collecteur, ni balais frotteurs ni même le plus souvent de bobinages. Ils sont constamment employés sur les réseaux distribuant des courants triphasés, et fournissent la meilleure solution du problème de la transmission de la force motrice à toute distance. Lorsque l'application à réaliser exige l'emploi du courant continu, au lieu du courant alternatif, pour la traction des véhicules la charge des accumulateurs, la commande de nombreuses machines, le moteur à courant alternatif est accouplé à une dynamo, et là encore on obtient le résultat recherché, qui est le transport économique de l'énergie motrice, depuis le point de production jusqu'à celui d'utilisation.

DIX-SEPTIEME LEÇON

Applications. — IV. Electrochimie

Décomposition chimique des corps par le courant électrique. — Dès l'apparition de la pile de Volta, des expérimentateurs constatèrent qu'en faisant passer le courant produit par ce générateur dans une dissolution saline, il se produisait une décomposition : l'oxygène se portait sur le pôle positif et l'hydrogène était libéré. Telle fut la première remarque faite en 1800 sur l'eau ordinaire par les physiciens anglais Carlisle et Nicholson. Un peu plus tard, Humphry Davy, disposant du courant d'une pile de deux mille couples zinc-cuivre (la même qui lui permit d'apercevoir l'arc voltaïque), parvint à isoler plusieurs métaux dont on ne connaissait encore que les sels. Toutefois, ce n'est réellement qu'en 1840 que Faraday créa la science de l'*électrolyse* en soumettant tous ces phénomènes épars, constatés par les chercheurs de tous les pays, au lieu des lois scientifiques, en rattachant à une théorie unique ces réactions jusqu'alors obtenues par des méthodes purement empiriques.

Lois de Faraday. Les équivalents électrochimiques. — Faraday a formulé comme suit les lois des décompositions électrolytiques : 1° La puissance

chimique d'un courant est la même dans toutes ses parties ; 2° le poids de matière décomposée est proportionnel à la quantité d'électricité qui traverse cette matière ; 3° les poids des différents électrolytes décomposés par un même courant, sont proportionnels aux équivalents chimiques des éléments.

L'équivalent électrochimique d'un corps est le poids de ce corps libéré par une courant de l'ampère pendant 1 seconde, autrement dit 1 coulomb. Ainsi cette quantité d'électricité peut libérer 0,010384 milligrammes d'hydrogène, ce chiffre constitue l'équivalent électrochimique de ce corps et est représenté par 1. On obtiendra par suite l'équivalent électrochimique de n'importe quel autre corps en multipliant 0,010384 milligr. par l'équivalent chimique de ce corps.

Pour reproduire l'électrolyse d'une solution saline, il faut que la force électromotrice du courant employé soit supérieure à la force électromotrice qui a engendré la combinaison du corps constituant l'électrolyte. La puissance à dépenser dépend donc de cette force électromotrice et de la quantité de matière à libérer.

Applications des méthodes électro-chimiques. Galvanostégie. — L'électrochimie est une branche de l'industrie moderne qui rencontre tous les jours de nouveaux emplois, et l'on peut citer, parmi ceux-ci la *galvanostégie* ou épuration par le courant électrique des métaux natifs, la *galvanoplastie*, ou reproduction métallique d'objets variés, par moulage, les dépôts métalliques sur toutes surfaces, argenture, dorure, nickelage, etc., enfin la préparation de produits chimiques de toute espèce, solides, liquides ou gazeux. Ce qui différencie l'électrochimie de l'*électrothermie*, dont nous avons parlé dans la xv^e

leçon, c'est qu'elle ne recourt qu'accidentellement, au secours d'une source extérieure de chaleur, afin de déterminer les réactions, qui s'effectuent sous l'influence seule d'une énorme élévation de température dans l'autre cas. L'électrochimie est donc le traitement des matières par *voie humide*, tandis que l'électrothermie, qui emploie uniquement le four électrique, constitue la méthode par *voie sèche*.

C'est surtout pour l'affinage du cuivre qu'on utilise les propriétés séparatrices du courant électrique. De nombreux procédés sont en usage, parmi lesquels on peut citer ceux d'Elmore, de Dumoulin, de Thofern, de Tommasi. Avec une dépense très faible d'énergie, on recueille du cuivre absolument pur, dit *électro*, dépouillé de toutes ses impuretés et des matières étrangères qui le souillaient, et l'opération se solde par un important bénéfice, le cuivre acquérant ainsi une valeur marchande très supérieure.

Galvanoplastie. — Le principe de la galvanoplastie repose sur ce fait que, si la combinaison chimique d'un métal avec un autre est maintenue en dissolution dans l'eau, et le bain ainsi constitué se trouve traversé par un courant, ce sel est décomposé en ses éléments : l'acide se porte sur l'électrode en relations avec le pôle positif de la source, ou *anode*, tandis que le métal se rend à l'électrode négative, ou *cathode*. Si cette cathode est une plaque conductrice, le métal contenu dans le sel chimique rendu libre, s'amasse sur cette plaque, en reproduisant fidèlement ses moindres creux ou saillies. Après un certain temps, lorsqu'on sépare la couche de métal déposée de la cathode, on obtient une reproduction exacte et inverse de celle-ci. C'est-à-dire que les parties en creux de l'original sont reproduites en relief et *vice-versa*. Tel est le principe de la galvano-

plastie, qui a été découvert en 1836 par Jacobi et a reçu depuis cette époque d'innombrables applications.

Il est indispensable, pour que le dépôt métallique puisse s'effectuer, que l'objet que l'on suspend à la cathode soit conducteur de l'électricité. Cette condition essentielle est remplie en recouvrant cet objet d'une couche de plombagine avec une brosse douce. On peut ainsi mettre dans le bain acide un moulage opéré avec une matière plastique quelconque : plâtre, gélatine, gutta-percha, préalablement imperméabilisé. Le dépôt métallique ayant acquis l'épaisseur voulue, on retire le moule du bain, on décolle l'épreuve de l'original, on la nettoie et on la termine en lui donnant la teinte et le montage qui conviennent. Tels sont les principes de la galvanoplastie.

Dépôts galvaniques. — L'emploi de bains d'une composition particulièrement étudiée, permet de faire déposer un métal quelconque sur un autre

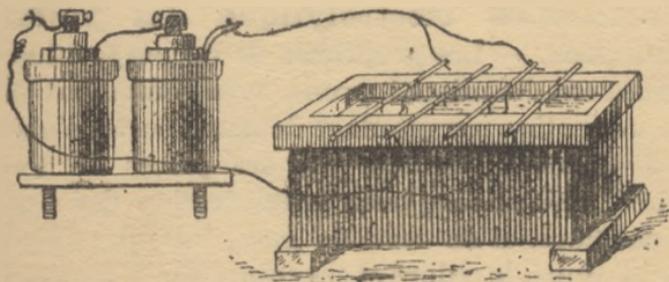


Fig. 54. — Cuve galvanoplastique.

objet métallique suspendu à la cathode, la richesse du bain étant maintenue et conservée en accrochant au pôle positif une anode soluble se dissolvant peu à peu dans le bain qui reste au même degré de concentration. C'est ainsi qu'en électrolysant une solution

de chlorure d'or et de cyanure de potassium, l'or se dépose en couche adhérente sur l'objet placé à la cathode. On peut également au lieu de chlorure, prendre du sulfure ou de l'oxyde d'or, le résultat est le même, Pour l'argenture, le bain est composé de cyanure d'argent et de cyanure de potassium en proportions égales, mais on peut prendre de préférence du carbonate, du borate, du phosphate ou un autre sel d'argent. Les dépôts adhérents de cuivre se font dans des bains acides ou alcalins, à froid ou à chaud comme la dorure. Le nickelage, qui est l'un des dépôts les plus en usage, s'obtient dans des bains de sulfate, chlorure ou azotate de nickel avec du carbonate, du tartrate ou du chlorhydrate d'ammoniaque. Enfin on peut réussir par ces mêmes méthodes, le dépôt électrolytique de n'importe quel métal ou alliage sur un autre, ce qui donne naissance aux opérations dites *laitonnage*, *étamage*, *platinage*, etc. On peut déposer encore ainsi du plomb, du zinc, du palladium, de l'aluminium, sur toutes surfaces.

Fabrication électrolytique des produits chimiques. — Les propriétés de décomposition du courant ont été mises à profit, non seulement pour la reproduction par moulage de toutes sortes d'objets, ou le dépôt de métaux sur des pièces de toutes formes, mais encore pour la fabrication des alcalis, des couleurs, et de certains gazs, tels que l'hydrogène, l'ozone, le chlore et ses composés. L'hydrogène et l'oxygène sont obtenus par la décomposition de l'eau dans des voltamètres spéciaux, puis recueillis et emmagasinés séparément. L'ozone est dégagé à l'état gazeux par l'effluve obscure provenant de la décharge d'une machine électrostatique ou d'une bobine d'induction, on l'emploie pour le blanchiment et la désinfection des locaux. Le chlore et les alcalis,

les hypochlorites sont fabriqués industriellement et en grandes quantités dans plusieurs usines, particulièrement en Allemagne. Le calcium est également préparé par voie électrolytique d'après les procédés du professeur Borchers. Enfin, de nombreuses couleurs à bases métalliques sont fabriquées d'après ces méthodes plus économiques que les anciennes. Tels sont le rouge japonais, le vert mitis, le jaune de cadmium, le vermillon, le bleu de prusse, etc.

DIX-HUITIÈME LEÇON

Applications. — V. Les Télégraphes

Historique de l'échange des signaux. —

L'histoire de la télégraphie, ou de l'échange de signaux à distance, est aussi ancienne que l'humanité elle-même, et tous les moyens ont été employés pour communiquer, malgré l'éloignement, et le plus promptement possible. Tout d'abord, ce furent des signaux optiques, combinaisons de mouvements convenus, visibles de loin pendant le jour, de torches allumées ou de lumières disposées suivant un ordre conventionnel pendant la nuit. Le système le plus perfectionné fut le *télégraphe aérien* de Chappe, qui persista jusqu'en 1843 et ne fut supplanté que par l'extension graduelle du télégraphe électrique, qui fournit une transmission instantanée, sans subir de retards du fait de l'obscurité ou du brouillard. En 1832, le professeur Morse inventa son appareil, avec l'alphabet conventionnel de signaux, et en peu d'années les réseaux de télégraphes se multiplièrent.

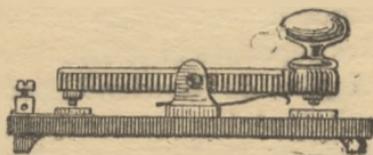
Composition d'un poste télégraphique. — En principe, toute transmission télégraphique se compose de quatre parties essentielles qui sont : 1° la source de courant ; 2° l'appareil transmetteur ; 3° la

ligne de transport ; 4° l'appareil récepteur avec son signal d'appel.

La source de courant est, le plus ordinairement une batterie de piles primaires Leclanché ou Daniell, bien que toute autre source de courant continu puisse être également appliquée. La ligne est un fil de fer galvanisé supporté par des isolateurs en porcelaine fixés à une série de poteaux solidement implantés dans le sol. Quant aux transmetteurs et aux récepteurs, ils présentent des dispositions très variées.

Il n'est plus fait que rarement usage des appareils à cadran de Breguet, dans lesquels une aiguille, se mouvant devant les lettres de l'alphabet inscrites sur ce cadran, épelait successivement les différentes lettres composant le texte d'une dépêche.

Il n'en est pas de même du Morse, qui est toujours en usage et dont le transmetteur est un simple interrupteur permettant d'envoyer dans le circuit



18. 55. — Manipulateur télégraphique Morse.

une suite de courants de durée variable, suivant que l'on appuie plus ou moins de temps sur la poignée du *manipulateur*. Un courant bref est considéré comme un point (.) ; un courant de durée trois fois plus longue constitue un trait (—). De la combinaison de ces deux signaux distincts on a fait tout un alphabet avec lequel on peut composer des mots et des phrases. Le récepteur, à l'arrivée, est un électro-aimant dont l'armature commande le mouven-

de soulèvement d'une étroite bande de papier qui se déroule par l'action d'un mouvement d'horlogerie, et inscrit la trace d'une molette imprégnée d'encre grasse sur laquelle le papier vient s'appliquer. L'inscription automatique des signaux se trouve ainsi réalisée, et il suffit de les traduire en lettres et en mots.

Appareils télégraphiques rapides. — La rapidité des transmissions télégraphiques est limitée par l'habileté manuelle de l'opérateur chargé de la manipulation au poste de départ. D'autre part, il faut, à l'arrivée, opérer la traduction et l'inscription des signaux reçus. Pour gagner du temps, on a donc combiné de nombreux systèmes de transmission rapide, inscrivant à l'arrivée les signaux en caractères d'imprimerie ordinaires. Parmi les appareils actuellement en service, les plus remarquables sont le *télégraphe imprimeur* de Hughes et le *multiple*, de Baudot. Celui-ci peut être monté en quadruple et produire 7.000 mots à l'heure avec un personnel de six agents à chaque poste : quatre qui transmettent, un qui inscrit les dépêches et le directeur du service. Le système *octoplex* de Rowland permet l'envoi simultané de huit dépêches, quatre dans chaque sens sur une ligne unique. Enfin les systèmes *multiplex* de Mercadier et de Siemens-Halske, peuvent fournir des rendements fantastiques : 20 à 25.000 mots à l'heure. Quant au système Korn de Munich, qui dérive du *pantélégraphe* de Caselli, qui fut un moment en service entre Paris et Lyon, et qui est basé, comme celui de Siemens, sur l'utilisation de la téléphotographie, il est destiné à la transmission des clichés ou épreuves photographiques sur pellicules.

Télégraphie sous-marine. — Alors que depuis longtemps déjà, le télégraphe électrique réunissait

les unes aux autres les villes des différents Etats de l'Ancien et du Nouveau Continent, la mer demeurerait comme un obstacle, une barrière infranchissable pour ce procédé d'intercommunication. Il faut en arriver à l'année 1850 pour rencontrer le premier essai de jonction entre deux points séparés par un bras de mer. Le premier câble fût immergé dans la Manche par un nommé Walter Breit, et l'Angleterre

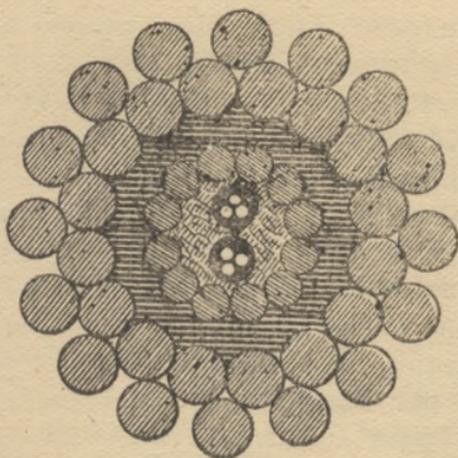


Fig 55. — Coupe d'un câble télégraphique sous-marin.

se trouva reliée à la France et au reste de l'Europe. Mais ce ne fut pas sans peine qu'on réussit quelques années plus tard à réunir télégraphiquement les deux continents à travers l'immense Atlantique. Les premières tentatives échouèrent, et ce ne fut qu'en 1866 qu'un câble put être posé avec plein succès, établissant ainsi une communication entre deux contrées séparées par 5.000 kilomètres de mer.

Les câbles sous-marins doivent, on le conçoit, présenter des conditions d'isolement et de solidité toutes particulières, à cause des efforts de traction considérables qu'ils ont à subir pendant la pose, des

dangers de destruction de toute nature qui les menacent au fond des mers, et enfin des fuites qui peuvent se produire à travers le milieu conducteur où ils séjournent. Toutes ces difficultés ont été surmontées l'une après l'autre, et la télégraphie sous-marine est devenue aussi pratique que la télégraphie terrestre.

Importance de la télégraphie sous-marine.

— Les plus récentes statistiques officielles indiquent que la longueur totale des câbles sous-marins actuellement immergés et en service atteint 386.568 kilomètres, soit près de cent mille lieues pour 1.786 câbles dont 1.450 appartiennent à des administrations d'Etat. Le plus long câble du monde est le *Transpacifique*, qui se rend de Vancouver (Colombie Britannique) à Sydney (Australie), en touchant à Fanning, aux îles Fidji et à Norfolk ; sa longueur totale atteint 15.000 kilomètres. Cette ligne est doublée par un câble de la C^{ie} anglaise *Eastern Télégraph*, qui passe par Saint-Vincent, l'Ascension, Sainte-Hélène, le Cap et Perth, en réunissant ainsi les unes aux autres toutes les colonies anglaises de cette partie de l'Océan. L'Allemagne et les Etats-Unis viennent au second rang, après l'Angleterre pour l'importance de leurs lignes de communications sous-marines, et la France vient presque au dernier rang, et son réseau télégraphique maritime est loin d'être en rapport avec l'étendue de son domaine colonial, ce qui est un tort aussi bien en temps de paix qu'en temps de guerre.

Télégraphie sans fil. — Nous avons expliqué, dans nos premières leçons que les ondes électriques se propageaient dans l'espace avec une rapidité égale à celle de la lumière. Le professeur Branly ayant découvert une substance sensible à ces radia-

tions et qui décelait leur passage, le physicien italien Marconi utilisa cette remarque et basa sur cette découverte un nouveau système d'intercommunication, sans le moindre lien matériel entre les postes en rapport, tout en leur permettant cependant de communiquer à des distances très considérables.

L'appareil transmetteur d'un poste de télégraphie par ondes hertziennes est un manipulateur Morse

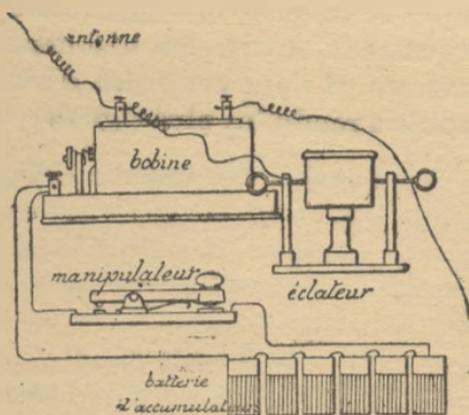


Fig. 57. — Schema d'un poste transmetteur de télégraphie sans fil, par ondes hertziennes.

envoyant dans une *antenne*, long fil isolé tendu verticalement dans l'air, des décharges oscillantes produites par un *oscillateur*, éclateur à boules réuni à un condensateur chargé par une forte bobine de Ruhmkorff. Les *trains d'ondes* se propagent dans l'espace, concentriquement à l'antenne, jusqu'à l'antenne du poste récepteur, laquelle est reliée, soit à un *cohéreur* à limailles de Branly, soit à un *détecteur d'ondes*, détecteur électrolytique ou téléphone; ce dernier, qui permet la lecture des signaux *au son* est le plus sensible. La traduction des trains d'ondes se fait d'après l'alphabet Morse.

La télégraphie sans fil par ondes hertziennes a fait des progrès considérables au cours de ces dernières années ; la portée des signaux a été augmentée, et les postes tels que Nauen (Allemagne) et la Tour Eiffel peuvent envoyer des dépêches à près de 6.000 kilomètres. En France ce procédé d'intercommunication est, comme tous les autres du reste, monopole d'Etat ; ses applications se multiplient, surtout pour l'échange de messages entre navires en marche ou entre la terre et les bâtiments de guerre et de commerce, et dans cet ordre d'idées ce genre de télégraphie a rendu les plus signalés services.

DIX-NEUVIÈME LEÇON

Application. — VI. Le Téléphone

Le téléphone électromagnétique. — Le téléphone, dont on ne saurait plus se passer en raison des services qu'il rend, et en dépit des récriminations souvent justifiées auxquelles donne lieu son usage dans certaines grandes villes insuffisamment outillées pour la clientèle à desservir, le téléphone est encore une invention absolument moderne, car, si l'on peut en faire remonter la première idée à Charles Bourseul (1851), il n'a réellement été réalisé qu'en 1876 par le professeur américain Graham Bell.

Le principe du fonctionnement du téléphone est analogue à celui des autres machines basées sur les phénomènes de l'électromagnétisme et de l'induction. La seule différence réside en ce fait que la quantité d'énergie mise en jeu est extrêmement faible et ne donne lieu qu'à des déplacements moléculaires dans le fer de la rondelle ou diaphragme du téléphone.

Ces mouvements infinitésimaux donnent naissance, dans le fil roulé autour du noyau aimanté des bobines dont les faces polaires sont situées en regard et à une très faible distance du diaphragme, à des

courants induits dont l'intensité dépend des vibrations de la rondelle. Si maintenant ces courants sont transmis par une double ligne de conducteurs à une autre bobine identique à la première et disposée comme elle devant un diaphragme vibrant ils influenceront ce diaphragme en raison de leurs variations d'intensité, et il en résultera que toutes les vibrations de la première rondelle seront exactement reproduites par l'autre et que les sons se trouveront répétés par cette transformation des ondes sonores en courants induits. Le premier appareil sera le transmetteur, et l'autre le récepteur.

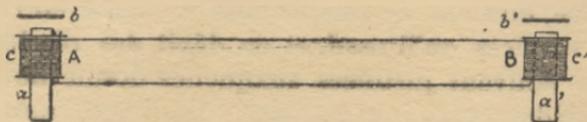


Fig. 58. — Schéma du fonctionnement du téléphone magnétique.

A ses débuts, le téléphone électromagnétique de Bell ne se prêtait qu'à des communications de très peu d'étendue; les sons étaient extrêmement faibles et il fallait une ouïe très sensible pour les saisir. Mais un important perfectionnement ne tarda pas à lui être apporté par la substitution du courant d'une pile aux courants ondulatoires.

Téléphones à piles. Transmetteurs microphoniques. — Ces appareils sont basés sur la remarque suivante, faite par M. le comte du Moncel en 1856 : « L'intensité du courant dans un circuit muni d'un interrupteur est modifiée suivant le degré de pression exercée au point de contact des pièces conductrices de cet interrupteur. » Cet effet s'observe notamment sur le charbon; les variations de pression qu'il subit influent beaucoup sur sa conducti-

bilité et c'est sur ce phénomène qu'est basé le fonctionnement du *microphone*. La première application est due à Edison, mais la résistance d'un contact imparfait a été réalisée surtout par l'électricien anglais Hughes, inventeur du télégraphe imprimeur.

Tous les transmetteurs téléphoniques encore en service sont fondés sur les variations de résistance des contacts imparfaits lorsqu'on fait

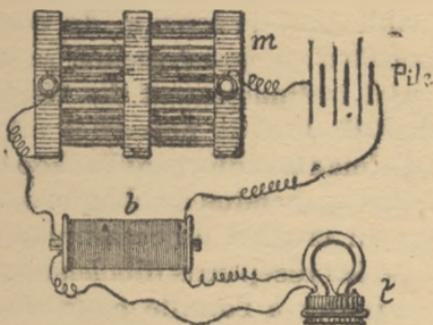


Fig. 39. — Schéma de microphone à bobine d'induction.

varier ce contact sous l'action d'un son articulé. Le charbon est employé de préférence à cause de son inoxydabilité, de sa médiocre conductibilité, de sa diminution de résistance avec la température, et les appareils ne diffèrent les uns des autres que par le nombre des contacts, leur disposition, leur couplage et enfin la disposition donnée à leur enveloppe extérieure.

Agencement des postes. — Un poste téléphonique se compose donc : 1° d'un transmetteur microphonique à crayons ou pastilles de charbon ; 2° d'une pile composée de quelques éléments Leclanché couplés en tension ; 3° d'un commutateur automatique ; 4° d'une sonnerie d'appel et ; 5° d'un ou deux récepteurs ou écouteurs téléphoniques. Le trans-

metteur est ordinairement une planchette vibrante, disposée obliquement ou verticalement et devant laquelle on parle. Les charbons microphoniques sont placés derrière elle à l'intérieur de l'appareil, qui peut être fixe ou transportable, et dans ce dernier cas, être combiné avec l'écouteur sur une même poignée. Lorsque la distance séparant les postes en rapport est considérable, le microphone est complété par une bobine d'induction, qui a pour but d'élever notablement la tension du courant de la pile et d'accroître en conséquence sa portée. Les récepteurs sont ordinairement des téléphones magnétiques de Bell, dont la puissance est accrue par la présence d'aimants renforçant l'action de l'électro-aimant. Ils sont suspendus de chaque côté du transmetteur, l'un au crochet du commutateur automatique. Il existe des récepteurs dits *haut-parleurs* qu'il est inutile de porter à l'oreille pour écouter, car ils rendent des sons très puissants et perceptibles à distance.

Pour se servir du téléphone, on commence par appuyer du doigt sur un bouton d'appel monté sur la tablette du transmetteur. Le courant de la pile du poste appelant, traverse la ligne et va agir sur la sonnette électrique du poste appelé. La personne ainsi prévenue, en décrochant ses récepteurs de leur support, fait jouer automatiquement le commutateur qui retire la sonnette du circuit et dirige le courant dans le téléphone. On peut alors échanger une conversation. Celle-ci terminée, on raccroche les récepteurs, la communication est coupée, le commutateur replace la sonnerie du poste dans le circuit au lieu des téléphones et tout est remis en place pour une nouvelle conversation à distance.

Distribution téléphonique. — Les choses se

passent comme il vient d'être expliqué lorsque le circuit ne se compose que de deux postes. Quand le réseau est étendu, les fils desservant chaque poste aboutissent à un bureau central où se tient en permanence, auprès d'un tableau indiquant la provenance de chaque appel, un employé chargé d'établir suivant les demandes qui lui en sont faites, les connexions de lignes entre le poste appelant et celui appelé. Mais s'il s'agit d'un réseau très développé, tel que celui d'une ville entière comptant des milliers d'abonnés au téléphone, le bureau central est pourvu de tableaux d'appel et de connexion, dits *multiples*, permettant d'effectuer toutes les jonctions soit entre abonnés, soit entre bureaux centraux situés dans les villes ou des quartiers éloignés. Toutes les grandes villes sont maintenant pourvues de réseaux de distribution téléphonique, et reliées ensemble par des lignes spéciales, analogues aux lignes télégraphiques aériennes, mais formées de deux conducteurs en cuivre ou en bronze et non de fils de fer, le retour du courant ne devant pas s'effectuer par la terre pour ne pas nuire à la netteté des communications.

Téléphonie sans fil. — De nombreux chercheurs : Graham Bell et Summer Tainter en 1880, Ruhmer en 1890, ont essayé de transmettre la parole articulée au loin, sans conducteur matériel, en se servant de la conductibilité variable du sélénium suivant que ce métal est plus ou moins éclairé. Bell utilisait la lumière solaire réfléchiée par un miroir sur la membrane argentée d'un tube parlant, et il avait fait connaître son système, qui ne constitua qu'une curiosité de laboratoire, sous le nom de *photophone*. Ruhmer se servait d'un régulateur à arc voltaïque en mettant à profit le phénomène de

l'art parlant découvert par le professeur Th. Simon, et il parvint à transmettre nettement la parole jusqu'à une distance de 7 kilomètres entre les postes expéditeur et récepteur, et il eût pu étendre ces communications jusqu'à 15 kilomètres. Mais ce sont les officiers de marine français Collin et Jeance qui ont porté au plus haut degré de perfection qui ait

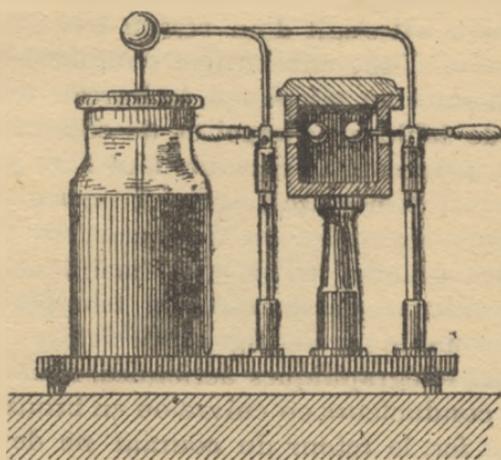


Fig. 60. — Oscillateur électrique pour téléphonie sans fil.

été atteint jusqu'à présent, la téléphonie sans conducteur de transport du courant. Pour cette application, ils utilisaient les *ondes hertziennes entretenues* produites par un mécanisme spécial, et c'est en agissant sur ces ondes que ces savants sont parvenus récemment à faire porter la voix à plus de 200 kilomètres, la distance à vol d'oiseau de Marseille en Corse. Les communications demeurent paraît-il très nettes, et les sons articulés transportés par les ondes électriques, analogues à celles dont il a été question pour la télégraphie sans fil, sont encore perceptibles quand les conditions atmosphériques sont satisfaisantes, à 230 kilomètres.

VINGTIÈME LEÇON

Résumé

Développement mondial de l'électricité industrielle. — Jusqu'à l'époque de l'invention de la dynamo par Gramme, l'électricité était restée plutôt une curiosité de laboratoire, une branche intéressante de la physique, et la seule application qui eût pris quelque importance était la télégraphie. La dynamo, qui permit d'obtenir économiquement des quantités quelconques d'électricité, fit passer cette science dans le domaine industriel, et ce fut l'éclairage qui bénéficia en premier lieu de ce progrès. Les machines se perfectionnant à mesure qu'elles étaient mieux connues, les usages du courant se développèrent. Les moteurs électriques furent appliqués à la commande des machines-outils les plus diverses, puis à la traction des véhicules, électromobiles, tramways sur rails et même chemins de fer. Ils pénétrèrent dans les mines, pour actionner les perforatrices, les haveuses, les ventilateurs, les pompes, puis dans les théâtres, la marine, les ateliers, et on peut affirmer qu'il n'est presque plus aujourd'hui d'industrie qui ne soit peu ou prou tributaire de l'électricité. Et, en même temps que les emplois de la dynamo s'étendaient

dans les villes, des usines nouvelles se créaient dans les sites les plus sauvages des montagnes pour capter la force vive des torrents, de la « houille blanche » et la transformer en énergie électrique, puis en énergie calorifique, pour la fabrication, dans des hauts fourneaux perfectionnés, du fer, de l'acier, de l'aluminium, des alliages du fer, du carbure de calcium, du chlore et des alcalis, des couleurs, etc. Partout l'électricité s'est insinuée et s'est substituée avec avantage aux anciens procédés et aux méthodes surannées et coûteuses de traitement des matières premières et de leur façonnage.

Applications diverses de l'électricité. — Il est encore d'innombrables circonstances où l'énergie électrique, sous l'une ou l'autre de ses formes multiples, se rencontre, et que nous n'avons même pu mentionner dans ce court opuscule, où la place nous est strictement mesurée. Signalons, entre autres, les applications à la thérapeutique, sous forme de courant continu, interrompu, d'induction, de haute tension et grande fréquence, et à la chirurgie pour les cautérisations, l'exploration des cavités du corps et des plaies, le traitement de certaines affections par le rayonnement extra-violet de l'arc voltaïque, ou les bains de lumière, etc. Plusieurs pages seraient nécessaires rien que pour énumérer les applications réalisées de l'électricité depuis un quart de siècle. Citons, au hasard, l'horlogerie électrique et la transmission de l'heure à distance, le telphéragé, la navigation sous-marine, à laquelle l'accumulateur électrique est indispensable, le tannage électrique des peaux, la rectification des alcools, la sénilisation des bois, la soudure autogène par l'électrothermie, les ascenseurs et monte-charges, les sémaphores et avertisseurs à distance pour che-

mins de fer, les enregistreurs et compteurs de toute espèce... Nous n'en finirions pas.

Les données scientifiques, les principes fondamentaux exposés au cours de ces leçons indiquent le point de départ de chacune de ces conquêtes de la science et permettent de se rendre compte du chemin parcouru depuis Volta, le créateur de la pile électrique, c'est à-dire en un peu plus d'un siècle. Si du passé on peut augurer l'avenir, on peut affirmer que la liste des applications de l'énergie électrique est encore bien loin d'être épuisée, bien au contraire. Cette puissance mystérieuse réserve encore à l'homme de nombreuses surprises, et le champ des découvertes et des applications, loin de se restreindre, demeure presque illimité et réserve encore de fructueuses moissons aux savants de l'avenir.

FIN

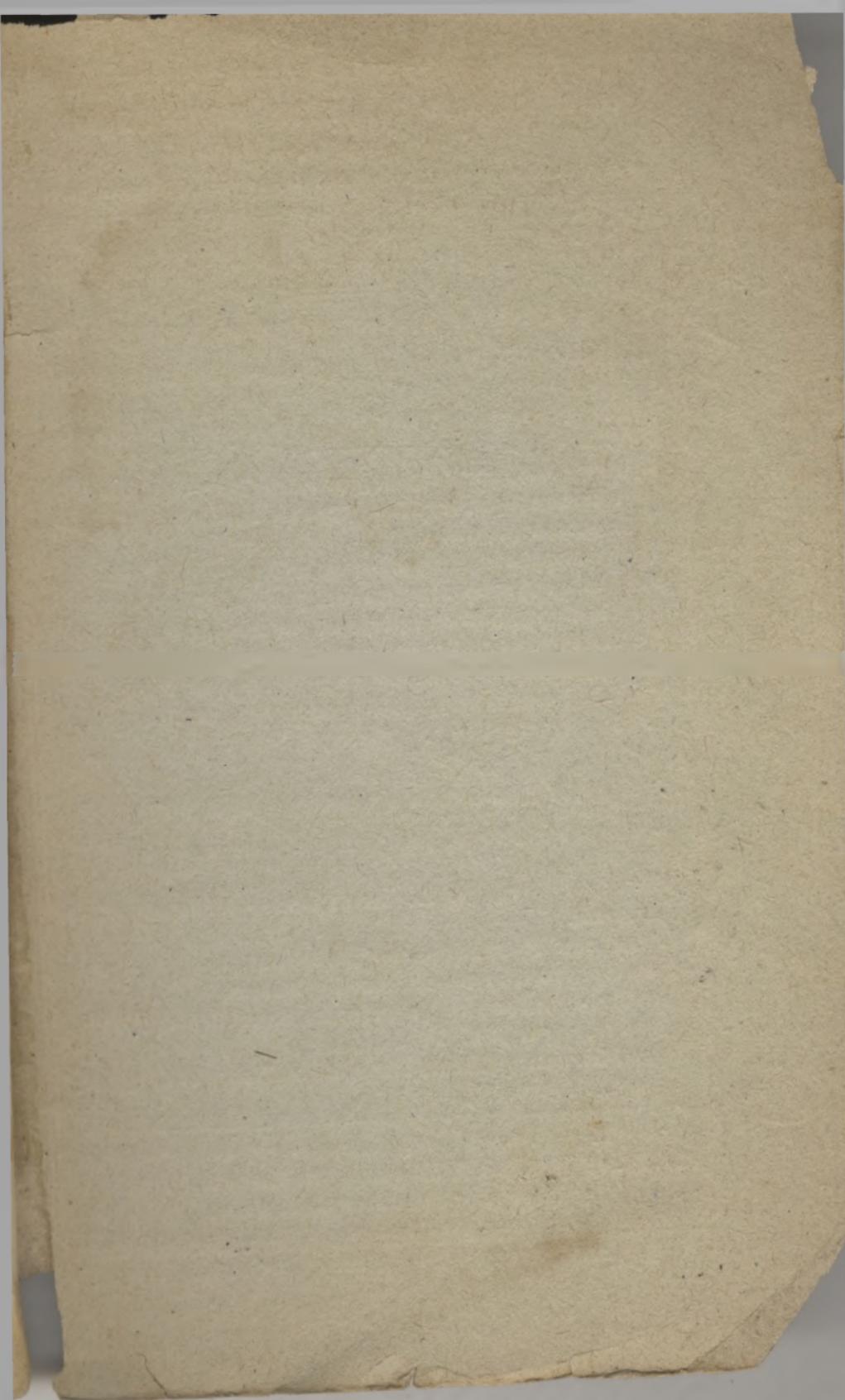
TABLE DES MATIÈRES

<i>Première Leçon.</i> — L'Électricité Statique. — Nature de l'électricité. L'électricité dans l'atmosphère. Les orages. Le paratonnerre. Premières idées des anciens sur l'électricité. L'électricité statique.....	5
<i>Deuxième Leçon.</i> — La Bouteille de Leyde et la condensation de l'électricité. Les machines statiques. Invention de la bouteille de Leyde. Condensateurs.....	11
<i>Troisième Leçon.</i> — Expériences sur l'électricité statique. — Étincelles. Tourniquet et carillon. Tube et bouteille étincelants. Le dessin lumineux. Production de l'électricité sans machine. Expériences avec la bouteille de Leyde.....	16
<i>Quatrième Leçon.</i> — Le Courant électrique. — Découverte de l'électricité dynamique. Pile de Volta. Explication de quelques termes techniques. Théorie de la production du courant. Résumé.....	24
<i>Cinquième Leçon.</i> — Les grandeurs et unités électriques. — Détermination du potentiel et de la force électromotrice. Circulation du courant. Unités fondamentales. Unités pratiques d'électricité.....	30
<i>Sixième Leçon.</i> — Les piles électriques primaires — Les premiers systèmes de piles chimiques. Divers systèmes de piles modernes. Les piles thermo-électriques.	36
<i>Septième Leçon.</i> — Les Accumulateurs ou piles secondaires. — Historique de l'invention des accumulateurs. Théorie de l'accumulateur au plomb. Les accumulateurs à formation artificielle. Fabrication des accumulateurs. Propriétés des accumulateurs.....	42
<i>Huitième Leçon.</i> — Les Aimants et le Magnétisme. — Les aimants naturels et les aimants artificiels. Caractéristiques des aimants. Causes de l'aimantation et du magnétisme. Origine du magnétisme terrestre. Fantômes magnétiques. Faisceaux magnétiques.....	47

<i>Neuvième Leçon.</i> — Électromagnétisme. — Qu'entend-t-on par électromagnétisme. Les Solénoïdes. Electro-aimants. Inductions magnétiques. Différents aspects des lois de l'induction.....	53
<i>Dixième Leçon.</i> — La Bobine d'Induction. — Production des courants d'induction. Induction magnétique. Bobine de Ruhmkorff, son principe. Aspect des bobines d'induction. Organes d'une bobine.....	60
<i>Onzième Leçon.</i> — Effets et applications de la bobine d'induction. — Alimentation de la bobine. Expériences avec la bobine. La matière radiante. Les tubes de Geissler. La fluorescence. Rayons Cathodiques et Rayons X.	67
<i>Douzième Leçon.</i> — La production mécanique du courant électrique. — Théorie des machines électromagnétiques. Les machines magnéto-électriques. Invention de la dynamo. Agencement d'une dynamo. Formes données aux inducteurs et aux induits.....	73
<i>Treizième Leçon.</i> — Les Courants Alternatifs. — Différences entre les alternateurs et les dynamos. Fréquence des courants alternatifs. Force électromotrice des courants alternatifs. Agencement des alternateurs. Les courants polyphasés.....	80
<i>Quatorzième Leçon.</i> — Applications de l'Électricité. — I. La lumière. — L'arc voltaïque. Lampes à arc. Bougies électriques. Les lampes à incandescence. Lampes à filament métallique. Distribution du courant pour l'éclairage.....	86
<i>Quinzième Leçon.</i> — Applications. — II. La Chaleur par le courant. — L'effet double. La chaleur par l'électricité. Appareils de cuisine et de chauffage domestique. Chauffage industriel. Les fours électriques. Applications à la métallurgie..	93
<i>Seizième Leçon.</i> — Applications. III. Transport de l'Énergie à distance. — Les premiers moteurs électriques. Réversibilité des dynamos. Transport de l'énergie. Les transformateurs. Les moteurs à champ tournant...	98
<i>Dix-septième Leçon.</i> — Applications. — IV. Electrochimie — Décomposition chimique des corps par le courant électrique. Lois de Faraday. Les équivalents électrochimiques. Applications des méthodes électrochimiques. Galvanostégie. Galvanoplastie. Dépôts galvaniques. Fabrication électrolytique des produits chimiques, chlore, alcalis, couleurs.....	104

<i>Dix-huitième Leçon.</i> — Applications. — V. Les Télégraphes. — Historique de l'échange des signaux. Composition d'un poste télégraphique. Appareils télégraphiques rapides. Télégraphie sous-marine. Son importance. Télégraphie sans fil.....	110
<i>Dix-neuvième Leçon.</i> — Applications. — VI. Le Téléphone. — Le téléphone électromagnétique. Téléphones à piles. Transmetteurs microphoniques. Agencement des postes téléphoniques. Les téléphones haut-parleurs. Distribution téléphonique. Téléphonie sans fil.....	117
<i>Vingtième Leçon.</i> — Résumé. — Développement mondial de l'électricité industrielle. Applications diverses de l'électricité.....	123

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES



En vente à la **LIBRAIRIE PAUL PACLOT**

4, Rue Cassette, — Paris

et chez tous les libraires : marchands de journaux, kiosques et gares

Nouvelles Collections de Vulgarisation

COLLECTION à 1 fr. le volume (par poste 1.10)

L'Arpentage pratique en 15 leçons, par ED. BAUDSON
(illustré).

La Maison sa construction, son entretien, par BLUYSEN
(illustré).

L'Electricité en 30 leçons, par H. DE GRAFFIGNY (illustré).

L'Aéronautique et l'Aviation en 20 leçons, par H. DE
GRAFFIGNY (illustré).

La Littérature française en 20 leçons, par JOVIGNOT.

Les lois rurales expliquées, par F. LEBOSSÉ.

La Comptabilité en 14 leçons, par A. MÉRAT.

Le Solfège en 20 leçons, par PERPIGNAN.

La Littérature romaine en 20 leçons, par PÜSCH.

La Littérature grecque en 12 leçons, par PÜSCH.

Le Droit usuel en 12 leçons, par STROWSKI.

COLLECTION à 0.60 le volume (par poste 0.65).

Les Jeunes Turcs, par P. FESCH. — Hier, aujourd'hui,
demain.

Jeanne d'Arc, par A. THALAMAS. — L'Histoire et la
légende.

L'Été aux Pyrénées, par E. LABROUE.

Les Sports à la mode, par C. MEILLAC.

La Tuberculose et les défenses naturelles de l'orga-
nisme, par le D^r C. VIEL.

Nos Marsouins, leurs étapes de vaillance et de gloire,
par L. YVERT.

N. B. — Tous les mandats, doivent être adressés à
M. Paul PACLOT, éditeur, 4, rue Cassette, Paris.

Expédition par retour du courrier.

IMP. MONTFARNASSE. — 47, rue de la Gajeté. Paris.