

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	Langlebert, Edmond Jean Joseph (1820-18..)
Titre	Applications modernes de l'électricité : nouvelles machines magnéto-électriques et dynamo-électriques ; machine de Nollet, dite de l'Alliance ; machines Gramme ; éclairage électrique ; arc voltaïque, incandescence, lampe-soleil ; transport à longues distances de la force motrice ; moteurs électriques ; téléphone et microphone ; photophonie ; piles secondaires ou accumulateurs électriques
Adresse	Paris : imprimerie et librairie classiques, maison Jules Delalain et fils, Delalain frères, successeurs, [1883]
Collation	1 vol. (104 p.) : ill. ; 18 cm
Nombre d'images	106
Cote	CNAM-BIB 12 Sar 103
Sujet(s)	Appareils électriques Electricité -- étude et enseignement Installations électriques
Thématique(s)	Technologies de l'information et de la communication
Typologie	Ouvrage
Note	Extrait de la "35e éd. de la Physique, faisant partie du Cours élémentaire d'études scientifiques".
Langue	Français
Date de mise en ligne	21/01/2021
Date de génération du PDF	20/01/2021
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?12SAR103

J. LANGLEBERT
APPLICATIONS MODERNES
DE L'ÉLECTRICITÉ.

COURS ÉLÉMENTAIRE D'ÉTUDES SCIENTIFIQUES, rédigé d'après les nouveaux Programmes officiels des Lycées et des Collèges, prescrits pour les examens du Baccalauréat, par MM. J. LANGLEBERT, professeur de sciences physiques et naturelles à Paris, et E. CATALAN, docteur ès sciences, ancien professeur au lycée Saint-Louis et répétiteur à l'École polytechnique : nouvelle édition, revue et corrigée ; ouvrage composé de 8 parties avec 1300 gravures dans le texte et 6 planches gravées. — br. 20 f.; rel. toile 22 f. Chaque Partie se vend séparément.

Première Partie, Arithmétique et Algèbre, rédigée d'après les programmes officiels, par M. E. Catalan : 10^e édition : 1 vol. in-12. br. 2 f.

Deuxième Partie, Géométrie, suivie de Notions sur quelques Courbes, rédigée d'après les programmes officiels, par M. E. Catalan : 9^e édition : 1 vol. in-12, avec 230 gravures dans le texte. br. 2 f. 50 c.

Troisième Partie, Trigonométrie rectiligne et Géométrie descriptive, rédigée d'après les programmes officiels, par M. E. Catalan : 9^e édition : 1 vol. in-12, avec 30 gravures dans le texte et 4 planches gravées. br. 1 f. 50 c.

Quatrième Partie, Cosmographie, rédigée d'après les programmes officiels, par M. E. Catalan : 12^e édition, entièrement refondue et mise au courant des plus récentes découvertes : 1 vol. in-12, avec 62 gravures dans le texte et 2 planches gravées. br. 2 f. 50 c.

Cinquième Partie, Mécanique, rédigée d'après les programmes officiels, par M. E. Catalan : 12^e édition : 1 vol. in-12, avec 80 gravures dans le texte. br. 1 f. 50 c.

Sixième Partie, Physique, rédigée d'après les programmes officiels, par M. J. Langlebert : 35^e édition, revue et augmentée de plusieurs chapitres sur les applications modernes de l'électricité : 1 fort vol. in-12, avec 335 gravures dans le texte. br. 4 f.

Septième Partie, Chimie, rédigée d'après les programmes officiels, par M. J. Langlebert : 34^e édition, revue et augmentée : 1 fort vol. in-12, avec 143 gravures dans le texte et un cahier chromolithographique. br. 4 f.

Huitième Partie, Histoire Naturelle, rédigée d'après les programmes officiels, par M. J. Langlebert : 43^e édition, entièrement refondue et tenue au courant des progrès de la science les plus récents : 1 fort vol. in-12, avec 500 gravures dans le texte. br. 4 f.

Ce Cours d'Enseignement répond en même temps aux nouveaux programmes officiels de l'Enseignement secondaire classique et de l'Enseignement secondaire spécial des Lycées et des Collèges.

Résumé de philosophie, Éléments de la Méthode et Principes de la Morale, rédigés conformément au programme de philosophie prescrit pour les examens du baccalauréat ès sciences, par M. H. Joly, doyen de la faculté des lettres de Dijon : in-12, br. 1 f.

5a 102

APPLICATIONS MODERNES DE L'ÉLECTRICITÉ

Nouvelles machines magnéto-électriques et dynamo-électriques
Machine de Nollet, dite de l'Alliance; machines Gramme
Éclairage électrique; arc voltaïque, incandescence, lampe-soleil
Transport à longues distances de la force motrice
Moteurs électriques. Téléphone et microphone. Photophonie
Piles secondaires ou accumulateurs électriques

PAR

J. LANGLEBERT

DOCTEUR EN MÉDECINE, OFFICIER D'ACADÉMIE.

EXTRAIT DE LA TRENTE-CINQUIÈME ÉDITION DE LA PHYSIQUE
faisant partie du Cours élémentaire d'Études scientifiques du même auteur.



PARIS
IMPRIMERIE ET LIBRAIRIE CLASSIQUES
MAISON JULES DELALAIN ET FILS
DELALAIN FRÈRES, Successeurs
56, RUE DES ÉCOLES.

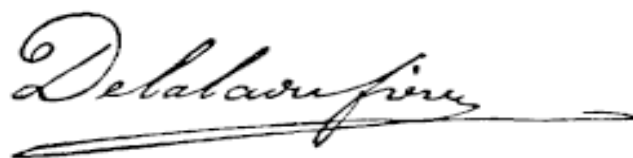
5

On trouve à la même librairie :

Éléments de Zoologie, rédigés conformément au programme de la *Classe de Cinquième*, par *M. J. Langlebert*, professeur de sciences physiques et naturelles : 4 vol. in-12, avec gravures dans le texte, br. 2 f. — cart. 2 f. 25 c.

Éléments de Botanique et de Géologie, rédigés conformément au programme de la *Classe de Quatrième*, par *M. J. Langlebert*, professeur de sciences physiques et naturelles : 4 vol. in-12, avec 400 gravures dans le texte et une carte géologique de la France, br. 3 f. — cart. 3 f. 25 c.

*Toute contrefaçon sera poursuivie conformément aux lois,
tous les exemplaires sont revêtus de notre griffe.
Tous droits de traduction réservés.*

A stylized, cursive signature that reads "Delalaufrère". The signature is written in dark ink and features a long, horizontal flourish extending to the right.

Décembre 1882.

Les savants ne sont pas les seuls à s'intéresser aux applications récentes de l'électricité; la masse même du public cherche à étudier ces découvertes, et à connaître les bienfaits qu'elle sait pouvoir en attendre. Aussi croyons-nous utile de publier en un volume séparé les nouveaux chapitres que M. J. Langlebert, pour se tenir au courant de la science et pour mieux répondre aux derniers programmes universitaires de l'enseignement secondaire, classique et spécial, des écoles normales primaires et des baccalauréats, a dû ajouter à la trente-cinquième édition de son *Cours de Physique*, faisant partie de notre *Cours élémentaire d'Études scientifiques*.

Nos lecteurs trouveront dans ce petit volume, orné de nombreuses vignettes, les nouveaux générateurs d'électricité (machines Gramme, de l'Alliance, etc.), les divers systèmes d'éclairage électrique, le transport à de grandes distances de la force motrice, le téléphone, le microphone, les accumulateurs électriques, décrits avec cet esprit de méthode et cette clarté de style qui ont valu aux livres classiques de M. J. Langlebert la grande popularité dont ils jouissent dans nos établissements scolaires.

La publication séparée de ces nouveaux chapitres aura l'avantage d'offrir à notre clientèle le moyen de compléter les éditions précédentes du Cours de Physique ; elle permettra au public, désireux de s'instruire, de satisfaire sa curiosité, tenue sans cesse en éveil par les merveilleuses applications de cet agent mystérieux qui a pour nom l'ÉLECTRICITÉ.

DELALAIN frères.

TABLE DES MATIÈRES

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

Définitions de ce qu'on appelle, en électricité, tension, force électromotrice et quantité. — Courants électriques; leur intensité. — Lois de l'intensité des courants. — Unités électriques. — Montage des piles ou associations de leurs éléments. 4

CHAPITRE I.

Courants d'induction. — Courants volta-électriques. — Courants magnéto-électriques. — Loi générale des courants d'induction ou loi de Lenz. — Induction des courants sur eux-mêmes; extra-courants. — Premières machines d'induction : bobine de Ruhmkorff. — Machines de Pixii et de Clarke. 48

CHAPITRE II.

Applications modernes de l'électricité. — Nouvelles machines d'induction. — Machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. — Machine de Nollet, dite de l'Alliance. — Machines Gramme. 39

CHAPITRE III.

Éclairage électrique. — Éclairage par l'arc voltaïque; appareils à régulateurs; bougies électriques. — Éclairage par incandescence; incandescence à l'air libre; incandescence dans le vide. — Lampe-soleil. 54

CHAPITRE IV.

Suite des applications modernes de l'électricité. — Réversibilité des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. — Transport de la force motrice. — Moteurs électriques. — Téléphone. — Microphone. — Photophonie; photophone musical; photophone d'articulation. — Piles secondaires ou accumulateurs électriques. 72

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

(Chapitre XXI du *Cours de Physique*.)

Définitions de ce qu'on appelle, en électricité, tension, force électromotrice et quantité. — Courants électriques ; leur intensité. — Lois de l'intensité des courants. — Unités électriques. — Montage des piles ou association de leurs éléments.

Tension et force électromotrice. Quantité d'électricité.

1. *Tension et force électromotrice.* — Prenons un couple ou élément voltaïque (zinc, cuivre et eau acidulée à l'acide sulfurique), le zinc et le cuivre munis chacun d'un fil conducteur. Ces deux fils étant séparés l'un de l'autre, chacun d'eux se chargera d'une certaine quantité d'électricité, négative du côté zinc, positive du côté cuivre, qui tendront l'une et l'autre à se dégager et à se rejoindre, ainsi qu'il est facile de le constater au moyen de l'électroscope. Cet état particulier de l'électricité, cette tendance à s'écouler en dehors de son générateur, est ce qu'on appelle la *tension*, ou encore dans le langage moderne, le *potentiel* électrique, du mot latin *potentia*, puissance (force latente ou en puissance dans les corps).

Si nous représentons par $+e$ le potentiel positif et par $-e$ le potentiel négatif d'un élément de pile, la différence algébrique $2e$ ou *différence de potentiel* entre les deux pôles de cet élément représente précisément sa *force électromotrice*, sous l'impulsion de laquelle s'établira et se maintiendra le courant, dès qu'on réunira les deux pôles par leurs fils conducteurs.

Cette force électromotrice qui, dans un élément de pile, représente la valeur effective de la tension, *dépend uniquement de l'intensité des actions chimiques* qui se produisent entre les substances dont l'élément est formé. Elle est donc *toujours la même* pour chaque élément de pile de composition identique, *quelles que soient ses dimensions*. Elle ne diffère qu'entre des piles de types différents. Une grande et une petite pile du même type, chargées de la même façon, *auront toujours la même force électromotrice, la même tension*. Si on les oppose l'une à l'autre en réunissant par un fil conducteur leurs pôles de même nom, elles se feront équilibre, exactement comme se font équilibre une grande et une petite quantité d'eau dans deux vases communiquants : il n'y aura pas de courant de l'une à l'autre.

2. *Quantité d'électricité.* — La *quantité* d'électricité exprime la masse ou le volume d'électricité que peut fournir une pile dans un temps donné. Contrairement à la tension, qui reste la même pour une même pile, grande ou petite, la *quantité d'électricité varie avec les dimensions de la pile*, c'est-à-dire avec l'étendue des surfaces sur lesquelles s'opère l'action chimique. Une pile dix fois plus grande qu'une autre en surface (les deux piles étant du même type et chargées de la même manière) produira, dans le même temps, dix fois plus d'électricité. Le débit seul pourra varier suivant la résistance du circuit.

Plusieurs phénomènes physiques d'un autre ordre présentent une certaine analogie avec les effets de tension et de quantité électriques, et vont nous permettre, par comparaison, de bien faire comprendre la valeur de ces deux termes *tension* et *quantité*, dont il est généralement difficile de se faire une idée juste.

4° Nous avons vu en hydrostatique (*Cours de Physique*, chap. v) qu'un immense bassin et un autre très petit, tous deux remplis d'eau au même niveau et réunis par un tube ouvert à ses deux bouts, se font équilibre; il n'y a pas de courant de l'un à l'autre (vases communiquants). La pression du liquide, sa tendance à s'échapper au dehors, ce qu'on pourrait appeler

1.

également, pour serrer de plus près l'analogie, sa *tension* ou sa force *hydromotrice*, est donc la même en chaque point des deux bassins situés dans un même plan horizontal. La quantité du liquide, si on lui donne issue, n'interviendra, à ouverture égale, que dans la durée de l'écoulement.

2° De même pour la chaleur, un litre ou mille litres d'eau bouillante, c'est-à-dire à la même température, élèveront un thermomètre au même degré. La *tension* de la chaleur, si l'on peut ainsi dire, sera donc égale de part et d'autre. Sa quantité seule sera différente, étant, à égalité de température, proportionnelle à la masse du liquide, de même qu'en électricité, la quantité de celle-ci est proportionnelle à l'étendue des surfaces actives de la pile.

3° De même encore, en acoustique, la hauteur ou la tonalité du son rendu par deux cordes identiques et également tendues, ce qu'on pourrait ici plus justement encore appeler la *tension* du son, sera la même, quelle que soit l'amplitude des vibrations, la hauteur du son ne dépendant que du nombre des vibrations exécutées dans un temps donné. Mais la grandeur du son, son volume ou *quantité* dépendra de l'amplitude, c'est-à-dire de l'étendue en surface de ces mêmes vibrations.

Ainsi pour l'électricité, même différence, même indépendance, ou à peu près, que pour les liquides, la chaleur et le son, entre la tension et la quantité, la première ne dépendant que de l'activité chimique des éléments qui la produisent, la seconde étant uniquement subordonnée à l'étendue de leurs surfaces actives.

Ces notions de tension et de quantité, que nous venons de chercher à faire sortir de l'obscurité où les ont tenues jusqu'à présent la plupart des auteurs classiques, ne sont pas seulement intéressantes au point de vue philosophique ; elles sont encore, dans la pratique, d'une haute utilité. Comme nous le verrons bientôt, l'intensité des courants électriques, les phénomènes qu'ils produisent, varient, en effet, suivant la tension et suivant la quantité de l'électricité dégagée par ses divers générateurs.

Ainsi, les effets mécaniques et les effets chimiques (force motrice, chocs, commotions, électrolyse) sont principalement subordonnés à la tension.

Les effets calorifiques et lumineux dépendent surtout de la quantité.

Quant aux effets physiologiques, un de nos médecins électriciens les plus distingués, le docteur G. Apostoli, a démontré que la tension est surtout l'excitant direct du système nerveux, tandis que la quantité met principalement en jeu la contractilité musculaire.

Courants électriques ; leur intensité.

3. *Courant électrique.* — Une pile composée d'un seul ou de plusieurs couples ou éléments étant chargée, si l'on réunit ses deux pôles par un fil conducteur, un dégagement d'électricité se produit aussitôt, ayant la forme ou l'apparence d'un *courant* continu, parcourant incessamment le fil interpolaire et la pile elle-même. Quant au sens de ce courant, tout porte à le considérer comme allant, dans le fil interpolaire, du *pôle positif au pôle négatif*, et dans la pile, du *pôle négatif au pôle positif*. Mais comme dans le fonctionnement de la pile, on n'utilise jamais que la partie extérieure du courant, celle qui passe par le fil qui réunit les pôles, on est convenu de désigner spécialement par *sens du courant*, le sens dans lequel se meut l'électricité positive en dehors de la pile.

On nomme *circuit* du courant l'ensemble formé par la pile et les conducteurs interpolaires. On dit que le circuit est *fermé* quand le conducteur interpolaire se continue, sans interruption, d'un pôle à l'autre du générateur électrique (pile ou tout autre appareil). On dit, au contraire, que le circuit est *ouvert*, quand en un point quelconque le conducteur est coupé, et que ses deux bouts sont séparés par un intervalle suffisant pour interrompre toute communication de l'un à l'autre. Dans ce dernier cas, le courant ne pouvant plus passer, tous ses effets sont suspendus. Pour qu'ils se produisent de nouveau, il faut remettre en contact les deux parties séparées du conducteur. Cela s'appelle *fermer le circuit*.

4. *Intensité des courants électriques.* — L'intensité d'un courant électrique, sa puissance ou force vive, dont dépendent ses divers effets, est entièrement subordonnée à la *quantité d'électricité* qui passe, dans un temps déterminé, soit une seconde, par une *section transversale considérée en un point quelconque du conducteur interpolaire*.

L'expérience suivante, due à Faraday, vient confirmer cette définition.

Soit (*fig. 1*) une pile P, dont les deux pôles, positif et négatif, sont réunis par un conducteur CCC, se divisant en A et en B en deux branches de même diamètre et de longueur égale. En V, sur un des points du conducteur entier, est

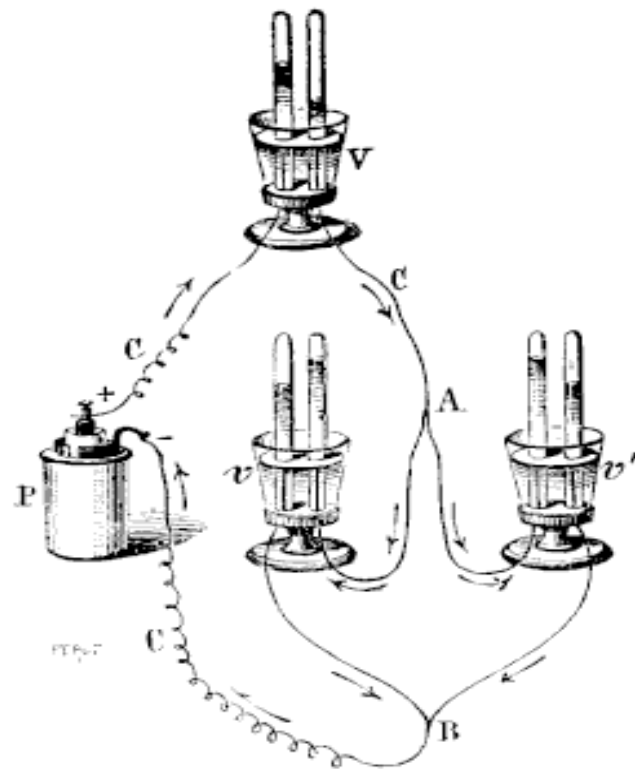


Fig. 1.

intercalé un voltamètre (appareil destiné à mesurer l'intensité des courants électriques par la décomposition de l'eau). En *v* et *v'*, sur les deux branches de la bifurcation, sont également intercalés deux autres voltamètres. Or, l'expérience montre :

1^o Que les quantités soit d'hydrogène, soit d'oxygène dégagées dans les deux voltamètres v et v' sont respectivement égales entre elles ;

2^o Que leur somme est toujours égale à la quantité de l'un ou de l'autre de ces deux gaz dégagée par le voltamètre V .

L'intensité du courant dans le conducteur entier CCC est, par conséquent, double de ce qu'elle est dans chacune de ses branches de bifurcation, où ne passe, en effet, que la moitié du courant total.

Donc, quelque idée que l'on se fasse du courant électrique, que ce soit un fluide impondérable, un flux de l'éther cosmique ou seulement une série de vibrations de ce même fluide, circulant ou se propageant avec une immense vitesse à travers les corps matériels, si l'on prend pour mesure de l'intensité de ces courants leurs effets chimiques (ce qui est le plus simple et le meilleur moyen de l'évaluer), on est conduit à considérer cette intensité comme équivalant, ainsi que nous l'avons dit, à *la quantité d'électricité qui passe pendant un temps déterminé, dans le conducteur intermédiaire*.

Il en est de même encore pour un cours d'eau, dont l'intensité ou force vive est proportionnelle, à vitesse égale, à la masse ou quantité de liquide qui passe, dans un temps donné, par une section transversale considérée en un point quelconque de l'aqueduc.

Lois de l'intensité des courants électriques.

3. *Lois de l'intensité des courants électriques.* — Nous avons vu que la quantité d'électricité que peut fournir une pile quelconque est proportionnelle à l'étendue de ses surfaces actives ; mais le *débit* de cette électricité, la quantité qui, à chaque instant, passera dans le circuit, et dont seule dépend l'intensité du courant, est subordonnée à deux autres conditions non moins essentielles : la *force électromotrice* avec laquelle l'électricité sera poussée au dehors, et la *résistance* totale du circuit, c'est-à-dire la résistance opposée par le conduc-

teur interpolaire et par la pile elle-même au passage de l'électricité.

De même, en hydrodynamique, le volume d'eau débité dans un temps donné par un tube ou un aqueduc est subordonné à la pression qui pousse le liquide et à la résistance que lui oppose le frottement contre les parois des conduites.

Le calcul et l'expérience démontrent que l'intensité des courants électriques engendrés par la pile ou par tout autre générateur est soumise aux deux lois suivantes :

1^o *Elle est directement proportionnelle à la force électromotrice de la pile ;*

2^o *Elle est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit (celle de la pile et celle du conducteur).*

La *force électromotrice* d'un élément de pile dépend exclusivement, ainsi que nous l'avons dit, de son activité chimique.

La *résistance de la pile* varie en raison inverse de l'étendue de ses surfaces actives, du degré de conductibilité du liquide employé, et en raison directe de l'écartement de ces mêmes surfaces, c'est-à-dire de l'épaisseur de la couche liquide qui les sépare.

La *résistance du conducteur* est proportionnelle à sa longueur ; elle est en raison inverse de sa section transversale et de son degré de conductibilité. Elle sera donc d'autant plus grande que le fil interpolaire sera plus long et plus fin ; d'autant plus petite que le fil sera plus court, plus gros et meilleur conducteur.

En résumé, un élément de pile étant donné, fonctionnant sur un circuit formé d'un conducteur d'une certaine longueur, un courant électrique s'établira sous l'influence de la force électromotrice développée par l'action chimique de cet élément. Ce courant prendra une intensité qui dépendra à la fois de cette même force électromotrice et de la résistance totale du circuit (pile et conducteur).

Or, si nous désignons par I l'intensité du courant (quantité d'électricité débitée dans l'unité de temps), par E la force électromotrice, et par R la résistance totale du circuit (pile et conducteur), ces trois quantités seront reliées entre elles par la formule suivante, dite *formule de Ohm*, du nom du physicien qui l'a établie le premier :

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

ce qui veut dire que l'intensité du courant augmente, ainsi que nous l'avons vu, proportionnellement à la force électromotrice du générateur électrique, et diminue proportionnellement à la résistance totale du circuit.

Unités électriques.

6. *Unités électriques.* — Des trois quantités exprimées dans la formule qui précède, deux d'entre elles étant connues, il est toujours facile, par un calcul fort simple, de déterminer la troisième. Connaissant, par exemple, l'intensité I du courant et la résistance R du circuit, on aura pour valeur de la force électromotrice E l'égalité

$$E = IR;$$

et pour valeur de la résistance R

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

Mais l'évaluation numérique de ces trois quantités exige nécessairement pour chacune d'elles la fixation d'une unité à laquelle on puisse la rapporter. De là l'établissement des trois unités électriques, *unité de force électromotrice, unité de résistance et unité d'intensité*, dont nous ne donnerons ici que les définitions sommaires, provisoirement admises par la plupart des physiciens, en attendant que la Commission internationale chargée de leur détermination ait achevé les expériences délicates qui lui permettront d'en fixer définitivement la valeur absolue.

7. *Unité de force électromotrice.* — Cette unité, que l'on désigne sous le nom de VOLT, en souvenir de Volta, est représentée par la force électromotrice d'un élément de Daniell, dans lequel la solution de sulfate de cuivre est remplacée par une solution d'azotate de cuivre. Le motif qui a déterminé le choix de cet élément est la régularité presque parfaite avec laquelle cette force s'y développe. Elle ne varie, en effet, que très peu soit avec la température, soit avec le degré de concentration de l'eau acidulée ou de la solution cuivreuse.

Comparés à l'élément de Daniell, pris pour unité de force électromotrice, l'élément de Bunsen est représenté, en moyenne, par 1,5 volt, celui de Grove par 1,7, celui de Marié-Davy par 1,5, la pile au bi-chromate de potasse par 2,028, l'élément Leclanché par 1,4.

8. *Unité de résistance.* — Cette unité, désignée sous le nom de OHM, est représentée par la résistance d'une colonne cylindrique de mercure à 0°, ayant pour longueur 1 mètre et pour section 1 millimètre carré.

On a choisi le mercure, de préférence à tout autre métal, à cause de la facilité avec laquelle on peut l'obtenir parfaitement pur, et de son état liquide, qui lui donne une constitution physique invariable. Cette unité représente à peu près la résistance d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre (grosseur ordinaire des fils télégraphiques) et de 400 mètres de longueur. Un kilomètre de fil télégraphique a donc une résistance de 10 ohms environ. Si ce fil était en cuivre, sa résistance ne serait que de 2,2 ohms, la résistance du cuivre étant à peu près quatre fois et demi moindre que celle du fer. On voit par cet exemple l'énorme influence que peut avoir sur l'intensité des courants la nature, c'est-à-dire le degré de résistance des conducteurs interpolaires.

9. *Unité d'intensité.* — Cette unité, qui porte aujourd'hui le nom d'AMPÈRE, se déduit immédiatement, d'après la formule de Ohm, $I = \frac{E}{R}$, des deux unités précédentes. Elle représente, par conséquent, l'intensité d'un courant se mouvant dans un circuit de 1 ohm avec une force électromotrice de 1 volt. Cette

unité est principalement employée dans les applications industrielles de l'électricité, telles que l'éclairage et la transmission de force à distance.

Dans la pratique, la mesure des trois quantités qui précèdent s'obtient au moyen d'appareils spéciaux (voltamètres ou galvanomètres) étalonnés et gradués de manière à indiquer directement, par simple lecture, leur valeur en unités et fraction de ces unités.

Montage des piles ou association de leurs éléments. Association en tension ou en série; association en quantité ou en batterie; association mixte.

10. Montage des piles. — L'intensité des courants électriques dépend, ainsi que nous l'avons vu, de la quantité d'électricité débitée dans un temps déterminé, quantité qui elle-même est en partie subordonnée à la tension et, par suite, à la force électromotrice de la pile et à la résistance du circuit. Il importe donc, plusieurs éléments de pile étant donnés, de les disposer entre eux de manière à faire prédominer dans leur action commune soit la tension, soit la quantité, suivant le genre de travail auquel la pile est destinée, et suivant la résistance plus ou moins grande du conducteur intermédiaire. C'est ce qu'on appelle le *montage des piles ou association de leurs éléments*.

L'association des éléments d'une pile peut se faire de trois manières différentes : l'association *en tension ou en série*, l'association *en quantité ou en batterie* et l'association *mixte*.

1^o Association en tension ou en série. — Ce mode d'association (*fig. 2*) s'obtient en unissant les couples ou éléments par leurs pôles de noms contraires. Il est facile de comprendre que si on multiplie, en les groupant de cette façon, les éléments d'une pile, leurs forces électromotrices s'ajoutent, et que, par suite, la tension de la pile devient égale à la somme des tensions de chacun de ses éléments.

Si nous désignons par E la tension ou force électromotrice de chacun de ces éléments et par n leur nombre, la tension de la pile sera donc nE .

Mais il n'en sera pas tout à fait de même pour l'intensité du courant. Cette intensité étant subordonnée, comme nous l'avons vu, non seulement à la tension, mais encore à la résistance du circuit total (pile et conducteur), chaque élément

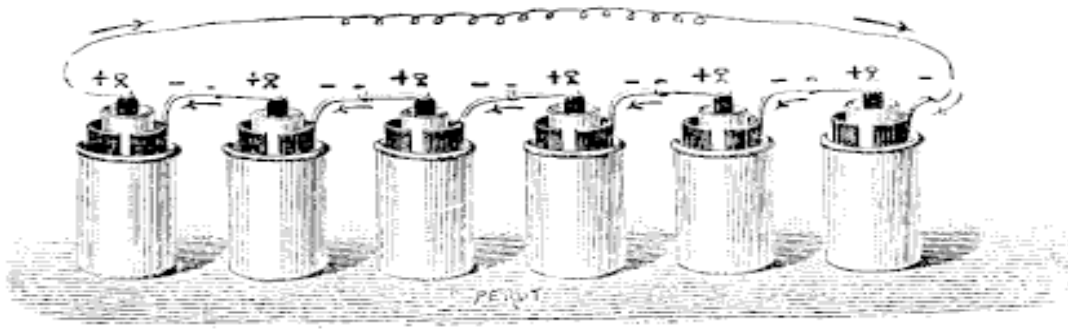


Fig. 2.

ajouté aura nécessairement pour effet d'augmenter la résistance intérieure du circuit (celle de la pile) de sa résistance propre, et, par conséquent, de diminuer dans une certaine proportion l'intensité du courant fourni par la pile.

Soit, en effet, E la force électromotrice de chacun des éléments de la pile, r sa résistance propre et R la résistance du conducteur interpolaire : l'intensité i du courant partiel produit par cet élément sera, d'après la formule de Ohm,

$$(1) \quad i = \frac{E}{r + R}.$$

Soit maintenant n le nombre des éléments qui forment la pile, ayant tous la même force électromotrice E et la même résistance propre r . La résistance R du conducteur restant la même, l'intensité I du courant de la pile ou courant total sera

$$(2) \quad I = \frac{nE}{nr + R}.$$

En comparant ces deux formules, on voit aussitôt que l'intensité I du courant de la pile ne pourra jamais égaler ni , c'est-à-dire n fois l'intensité partielle i de chacun de ses éléments, puisque, en même temps que la tension devient n fois plus grande, la résistance intérieure de la pile s'accroît dans la

même proportion, ce qui augmente d'autant la résistance totale $nr + R$ du circuit.

Toutefois, il est facile de voir que l'intensité I du courant de la pile sera d'autant plus grande et se rapprochera d'autant plus de $n i$, que la résistance r de chaque élément sera plus petite par rapport à la résistance R du conducteur. L'association en tension ou en série convient donc dans ce dernier cas, et il y a avantage, si l'on veut obtenir un courant très intense, à multiplier le nombre des éléments. C'est précisément ce que l'on fait en télégraphie, où la longueur des conducteurs et, par suite, leur résistance considérable exige de fortes tensions.

2^o *Association en quantité ou en batterie.* — Ce mode d'association (*fig. 3*) s'obtient en unissant les éléments par leurs pôles de même nom. Dans ce mode d'arrangement, on ne fait, en réalité, que réunir par leurs surfaces semblables (zinc et zinc, cuivre et cuivre, charbon et charbon, etc.) plusieurs éléments en un seul élément autant de fois plus grand. Cette pile, ainsi constituée, produira donc, dans un temps donné, une quantité d'électricité égale à la somme des quantités fournies par chaque élément, mais sa force électromotrice restera la même que celle de chacun de ses éléments séparés.

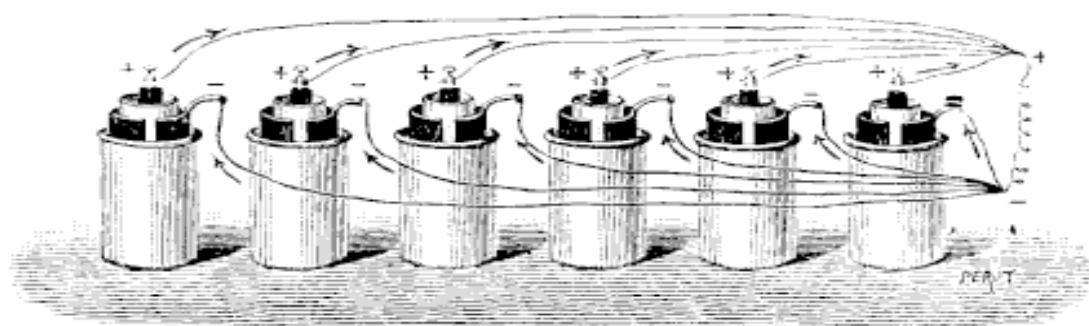


Fig. 3.

Supposons, comme le représente notre dessin, six éléments de Bunsen réunis de cette façon, c'est-à-dire par leurs pôles semblables : la pile qui en résultera agira exactement comme le ferait un seul de ces éléments rendu six fois plus grand. Elle produira donc, dans un temps donné, six fois plus d'électricité, mais sa force électromotrice ne changera pas, celle-

ci, comme nous l'avons vu (2), restant toujours la même pour un même élément de pile, quelles que soient ses dimensions.

Si, dans la pile en tension, la résistance intérieure nr augmente avec le nombre des éléments, elle diminue, au contraire, dans la pile montée en quantité, par suite de la mise en communication des mêmes surfaces, ce qui rend naturellement plus facile le passage de l'électricité à travers la pile, le courant n'ayant plus, d'une part, à traverser les liquides interposés, toujours plus ou moins résistants, et d'autre part, trouvant dans l'agrandissement des surfaces conductrices résultant de leur adjonction une résistance d'autant moins grande.

Soit encore E la force électromotrice de l'un des éléments, r sa résistance intérieure, et R la résistance du conducteur intermédiaire : l'intensité i du courant produit par cet élément sera, comme dans le cas précédent,

$$(3) \quad i = \frac{E}{r + R}.$$

Soit maintenant n le nombre des éléments composant la pile : la résistance intérieure de cette pile par rapport à la résistance r de chacun de ses éléments sera $\frac{r}{n}$, puisqu'elle diminue en raison de leur nombre. On aura, par conséquent, pour l'intensité I du courant de la pile, la résistance R restant la même,

$$(4) \quad I = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}.$$

La pile se comportera donc comme un seul élément dont la résistance serait n fois moindre, et dont la force électromotrice serait la même, celle-ci, ainsi que l'expérience le prouve, restant invariable, quel que soit le nombre des éléments associés de cette façon.

Or, si nous comparons entre elles, comme précédemment, ces deux dernières formules, nous voyons que l'intensité I du courant de la pile sera d'autant plus grande et se rapprochera d'autant plus de ni , c'est-à-dire de la somme des intensités partielles, que la résistance R du conducteur sera plus petite

par rapport à la résistance intérieure r de chacun de ses éléments. L'association en quantité convient donc dans ce dernier cas, et il y a avantage, si l'on veut obtenir un courant très intense, soit à multiplier le nombre des éléments, soit, ce qui est plus simple et revient au même, à se servir d'éléments à grande surface. C'est ce que l'on fait généralement pour obtenir, au moyen de la pile, l'incandescence des fils métalliques ou des charbons destinés à l'éclairage de points peu éloignés.

3° *Association mixte.* — Les deux modes d'association des éléments de pile que nous venons d'étudier, l'association en *tension* et l'association en *quantité*, peuvent se combiner entre eux de manière à réaliser une pile qui ait, suivant les besoins, plus ou moins de tension ou de résistance intérieure : c'est ce qu'on peut appeler *l'association mixte*.

Ainsi, nos six éléments de pile étant donnés, nous pouvons :

a. Les associer par trois en *tension*, de manière à en former deux séries que l'on réunit l'une à l'autre en *quantité* par les fils CC (fig. 4) : la force électromotrice sera dans ce cas $3 E$, et la résistance intérieure $\frac{3r}{2}$.

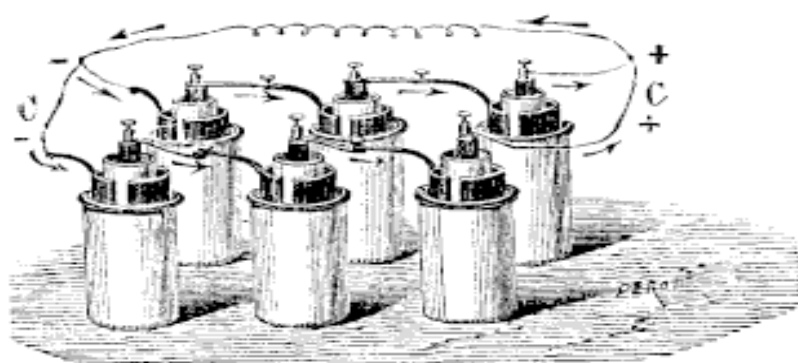


Fig. 4.

b. Les associer par deux en tension et par trois en quantité. La force électromotrice sera dans ce cas $2 E$, et la résistance $\frac{2r}{3}$.

Nous n'avons pas besoin d'insister pour faire comprendre comment, au moyen de calculs fort simples, il sera toujours facile, la résistance R du conducteur extérieur étant connue,

de déterminer la meilleure disposition à donner à un nombre quelconque d'éléments, en vue du résultat à obtenir. Nous nous bornerons à dire, en terminant, que l'expérience et le calcul conduisent à cette conséquence remarquable, que, pour donner au courant son maximum d'intensité, il faut associer les éléments de manière que *la résistance intérieure de la pile soit égale à la résistance du conducteur extérieur*.

L'hydrostatique et l'hydrodynamique nous fournissent encore ici des exemples, dont nous allons profiter pour jeter le plus de lumière possible sur ce sujet important.

1^o Supposons que nos six éléments de pile (*fig. 2 et 3*) soient remplacés par six vases cylindriques de même diamètre entre eux, et contenant chacun une colonne d'eau de même hauteur. Si nous prenons un autre vase de diamètre égal et d'une hauteur suffisante, et si nous y versons nos six colonnes d'eau de manière à les *empiler* verticalement, la pression du liquide sur le fond de ce vase, sa *tension* ou tendance à s'en échapper, en un mot, sa *force hydromotrice*, si l'on peut ainsi dire, sera six fois plus grande que dans chacun des six petits vases séparés. Nous aurons donc ici une sorte de *pile hydraulique montée en tension*, dont la force hydromotrice sera, comme la force électromotrice de la pile, proportionnelle au nombre de ses éléments, représentés par nos six colonnes d'eau.

Supposons maintenant qu'on livre passage au liquide par une ouverture faite au fond du vase, et en mince paroi, afin d'éviter toute résistance : l'intensité du courant, à masse égale, sera six fois plus grande, ou, pour mieux dire, chaque molécule liquide aura, en traversant l'orifice, supposé que l'on maintienne le niveau constant, une force vive six fois plus grande que celle des molécules qui sortiraient par une ouverture faite au fond de l'un quelconque de nos six petits vases. Or, il en serait exactement de même pour une pile électrique montée en tension, dont la résistance intérieure r ne serait qu'une fraction négligeable de la résistance R du conducteur extérieur, prise pour unité. Dans ce cas, en effet, on aurait (formule 2), $I = n E$, c'est-à-dire l'intensité du courant sensiblement proportionnelle au nombre des éléments.

2° Supposons qu'au lieu de verser le contenu de nos six petits vases dans un autre plus haut et de même diamètre, on les place côte à côte sur un même plan horizontal, et qu'on les fasse communiquer tous ensemble, au niveau de leur fond, par des tubes latéraux : nous aurons alors une *pile hydraulique montée en quantité*. La pression du liquide sur le fond de ce vase ainsi devenu six fois plus grand, sa *tension* ou *force hydromotrice*, restera égale, pour chaque unité de surface, à celle qu'il exerçait isolément sur le fond de chacun des six vases, avant leur réunion.

Supposons encore que, par un trou percé en mince paroi dans le fond du grand vase, on donne issue au liquide : l'intensité du courant, la force vive de chacune de ses molécules (supposé toujours qu'on maintienne le niveau constant), ne sera, à l'orifice, ni plus grande ni plus petite que si le liquide s'échappait par une ouverture semblable pratiquée au fond de l'un quelconque des six vases séparés. Or, il en serait encore de même pour une pile électrique montée en quantité, dont la résistance intérieure r ne serait qu'une fraction négligeable de la résistance R du conducteur extérieur, prise pour unité. Dans ce cas, en effet, on aurait (formule 4) $I = E$, c'est-à-dire l'intensité du courant sensiblement égale à celle d'un seul de ses éléments.

Nous terminerons ici notre comparaison entre les liquides et l'électricité dynamique, comparaison féconde en aperçus utiles pour l'enseignement, et que, pour ce motif, nous avons voulu pousser aussi loin que nous le permettaient les limites d'un livre élémentaire. Ajoutons que cette analogie saisissante entre les fluides pondérables et l'électricité offre un très haut intérêt au point de vue de la physique générale. Quel puissant argument à l'appui de l'opinion qui considère le courant électrique comme un flux, un transport véritable de l'éther cosmique à travers les corps matériels ! Aussi bien les nombreux partisans de cette doctrine n'ont-ils jamais manqué de faire valoir cet argument, notamment le P. A. Secchi, dans son admirable ouvrage sur l'*Unité des Forces physiques*, auquel nous emprunterons, pour finir, le passage suivant : « L'ensemble

des faits connus nous conduit à croire que les physiciens versés dans l'étude de la télégraphie n'ont pas tort quand ils parlent de l'électricité comme d'un fluide en mouvement, et quand ils appliquent au courant électrique la terminologie de l'hydrodynamique. Pour eux, non seulement les fils conducteurs fonctionnent exactement comme de véritables tuyaux de conduite, mais encore la pile fait l'office d'un réservoir plus ou moins vaste et prompt à se remplir » (*loc. cit.*, page 380).



CHAPITRE I.

INDUCTION ÉLECTRIQUE.

Courants d'induction. — Courants volta-électriques. — Courants magnéto-électriques. — Loi générale des courants d'induction ou loi de Lenz. — Induction des courants sur eux-mêmes; extra-courants. — Premières machines d'induction : Bobine de Ruhmkorff. — Machines de Pixii et de Clarke.

Induction électrique.

11. *Courants d'induction.* — On donne le nom de *courants d'induction*, ou de *courants induits*, à des courants instantanés qui se développent dans des conducteurs métalliques, sous l'influence des courants voltaïques ou des aimants. De là deux classes de courants d'induction, lesquels ne diffèrent d'ailleurs que par leur origine, savoir :

1° Les courants *volta-électriques*, ou courants produits sous l'influence des courants voltaïques ordinaires;

2° Les courants *magnéto-électriques*, ou courants produits sous l'influence des aimants ou du magnétisme terrestre.

C'est à Faraday que l'on doit la découverte (1831) des courants d'induction, qui jouent aujourd'hui le plus grand rôle dans les applications industrielles de l'électricité.

Courants volta-électriques.

12. *Production des courants d'induction par l'influence des courants voltaïques.* — Soit une bobine en bois M placée, comme le représente la *fig. 3*, dans une autre bobine K. Sur la première bobine est enroulé un long fil de cuivre *ab* revêtu de soie; sur l'autre bobine est également enroulé *dans le même sens* un second fil *cd*; ces deux fils forment par conséquent deux hélices semblables et superposées. Cela fait, si l'on met

2.

les deux bouts *a* et *b* du fil de la bobine M en communication avec une pile, et qu'on place dans le circuit de la bobine K un galvanomètre G dont l'aiguille est au zéro, voici ce que l'on observe :

1° Au moment même où le courant de la pile commence à traverser le fil *ab* de la bobine M, de *a* vers *b* par exemple, l'aiguille du galvanomètre éprouve une déviation qui indique qu'un courant instantané et de *sens inverse* du premier s'est

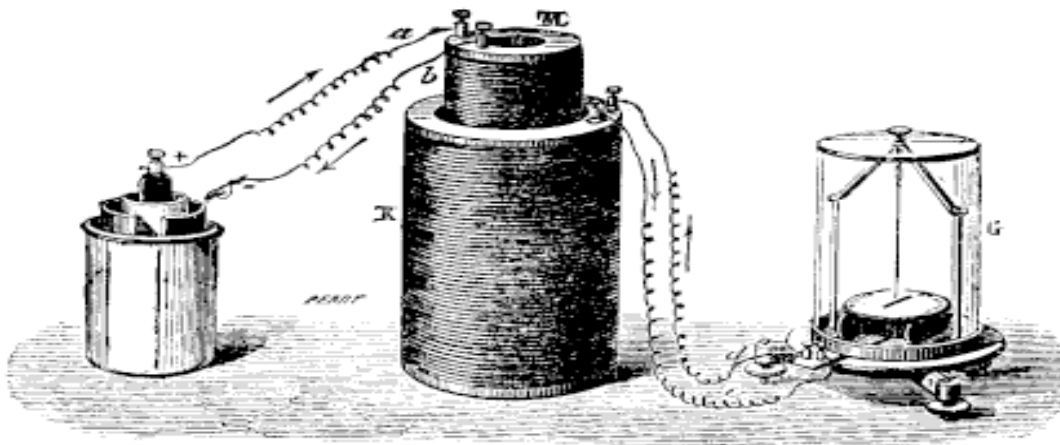


Fig. 5.

développé dans le fil de la bobine K. Cet effet ne dure qu'un instant très court ; car l'aiguille, après quelques oscillations, revient au zéro et s'y maintient tant que le courant voltaïque continue à passer dans le fil *ab*.

2° Si l'on interrompt le courant voltaïque, en supprimant la communication de la pile avec la bobine M, l'aiguille du galvanomètre est de nouveau déviée, mais *en sens contraire* de la déviation précédente ; ce qui prouve qu'à l'instant même où le courant s'est arrêté dans le fil *ab*, un nouveau courant, *direct* cette fois, c'est-à-dire de même sens que le courant *ab*, s'est encore développé instantanément dans le fil *cd*.

Le courant voltaïque *ab* sous l'influence duquel se sont produits les deux courants instantanés dans le fil *cd* s'appelle *courant inducteur*, et ceux-ci *courants induits* ; on dit encore que le fil *ab* est le *fil inducteur*, et le fil *cd* le *fil induit*.

Nous venons, pour mieux faire comprendre ce que sont les courants d'induction, de supposer la bobine inductrice placée dans la bobine induite; mais cela n'est pas nécessaire pour la production de ces courants. Il suffit que les deux bobines soient simplement en regard et à petite distance l'une de l'autre, comme le représente la *fig. 6*. Voici alors ce que l'on peut observer :

1^o Si l'on établit et si l'on rompt successivement la communication de la bobine M avec la pile P, l'aiguille du galvano-

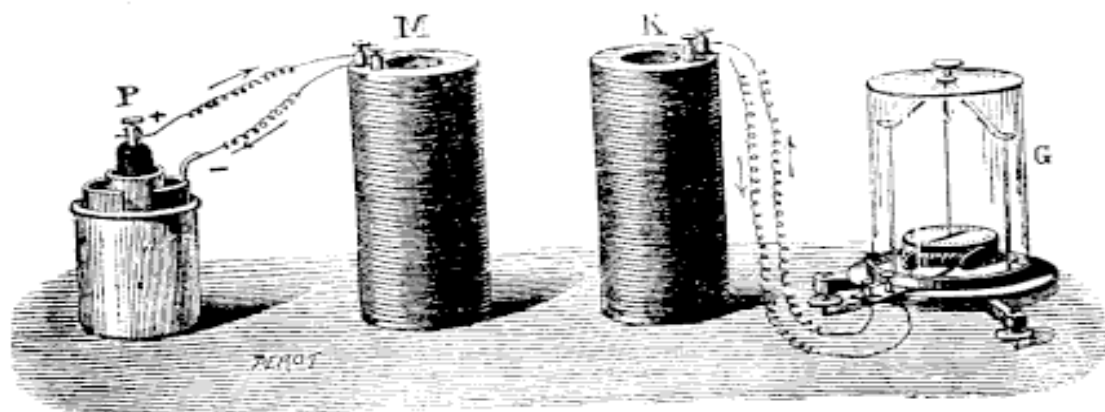


Fig. 6.

mètre G indique encore, comme dans le cas précédent, la production dans la bobine K de deux courants instantanés et successifs, l'un inverse, l'autre direct.

2^o Si, laissant en communication la bobine M avec la pile, de manière à y faire passer un courant continu, on approche vivement la bobine K de la bobine M, un courant de *sens contraire* à celui de la pile se produit aussitôt dans la bobine K; si l'on écarte ensuite les deux bobines, un nouveau courant se produit encore dans la bobine K, mais cette fois de *même sens* que celui de la pile. Ces deux courants sont également instantanés, ainsi que le prouve l'aiguille du galvanomètre revenant immédiatement à sa position d'équilibre, dès que les deux bobines sont laissées au repos.

3^o Enfin on peut constater encore que si l'on augmente ou si l'on diminue l'intensité du courant, en ajoutant à la pile soit

un peu d'acide, soit un peu d'eau, on obtient immédiatement dans la bobine K un courant inverse ou un courant de même sens, correspondant, le premier à l'augmentation, le second à la diminution d'intensité du courant de la pile.

Nous résumerons de la manière suivante les résultats de ces expériences, la pile P et la bobine M formant le *courant inducteur*, la bobine K et le galvanomètre G constituant le *circuit fermé* dans lequel se développe le *courant induit* :

1. Tout courant qui *commence* fait naître immédiatement dans un circuit fermé et placé près de lui un courant *inverse*, c'est-à-dire de *sens contraire* au sien ;

2. Tout courant qui *finit* fait naître dans un circuit voisin un courant *direct*, c'est-à-dire de même sens que le sien ;

3. Tout courant que l'on approche d'un circuit fermé fait naître dans ce circuit un courant *inverse* ;

4. Tout courant que l'on éloigne d'un circuit fermé fait naître dans ce circuit un courant *direct* ;

5. Tout courant qui augmente ou diminue subitement d'intensité fait naître dans un circuit voisin : dans le premier cas, un courant *inverse* ; dans le second cas, un courant *direct* ;

6. Les courants induits, inverses ou directs, sont toujours *instantanés* ; ils ne durent que l'instant très court pendant lequel on change soit les conditions du courant inducteur, soit le rapport de position entre celui-ci et le circuit fermé dans lequel ils prennent naissance. Ces courants ont encore pour caractère d'être toujours plus intenses que les courants inducteurs dont ils procèdent.

Courants magnéto-électriques.

15. Production des courants d'induction sous l'influence des aimants. — Nous avons vu (*Cours de Physique*, 321) que les courants voltaïques développent le magnétisme dans le fer et dans l'acier. Réciproquement, un aimant fait naître, dans des circuits métalliques, des courants induits. Pour le démontrer on

prend une bobine creuse en bois M (fig. 7), sur laquelle est enroulé un seul fil de 200 à 300 mètres de longueur. Les deux extré-

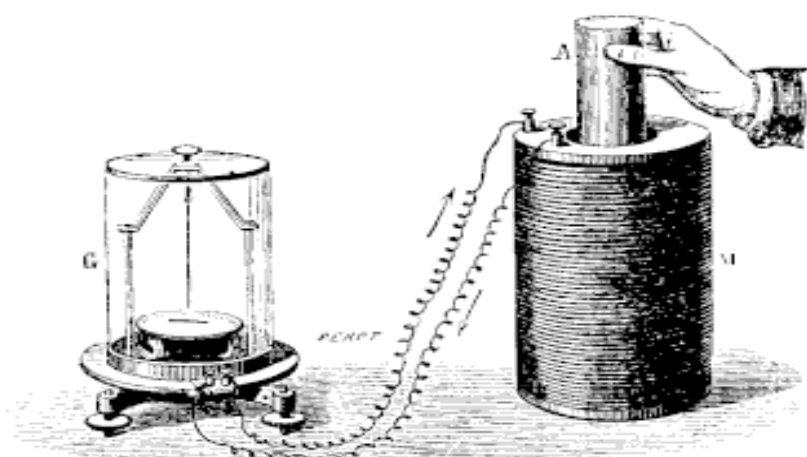


Fig. 7.

mités de ce fil étant mises en communication avec un galvanomètre G, si l'on introduit brusquement dans l'intérieur de la bobine un barreau aimanté A, voici ce que l'on observe :

1° *Au moment* où le barreau est introduit, le galvanomètre indique le passage dans le fil d'un courant instantané de *sens inverse* des courants qui, d'après la théorie d'Ampère, circuleraient autour du barreau, assimilé à un solénoïde. Ce courant ne dure qu'un temps très court : car l'aiguille du galvanomètre revient promptement à sa position d'équilibre, et s'y maintient tant que l'aimant reste dans la bobine.

2° Si l'on retire rapidement le barreau, un nouveau courant, qui cette fois est *direct*, se développe encore dans le fil.

On obtient encore les mêmes effets si, laissant le barreau aimanté dans la bobine, on approche et on éloigne alternativement de l'un de ses pôles un morceau de fer doux, ou réciproquement, si, le fer doux étant placé dans la bobine, on le soumet de la même manière à l'influence de l'aimant. Le plus léger mouvement de l'un vers l'autre, ne serait-ce qu'une simple vibration, suffit pour faire aussitôt dévier l'aiguille du galvanomètre. Nous verrons plus loin les merveilleuses applications que la science moderne a su tirer de ces phénomènes.

44. Emploi du fer doux pour augmenter l'intensité des courants induits.— Supposons que dans la bobine inductrice M (*fig. 5*) on place un barreau de fer doux : au moment où le courant passe dans cette bobine, le fer s'aimante à la manière d'un électro-aimant. Or, cette aimantation subite a pour effet de développer aussitôt dans le fil de la bobine extérieure K un courant induit magnéto-électrique de *même sens* que le courant induit volta-électrique produit dans ce même fil par le courant de la pile circulant dans la bobine inductrice M. Si l'on interrompt le circuit, le même effet se reproduit en sens inverse par la désaimantation subite du fer doux. D'où il résulte qu'un barreau de fer doux placé à l'intérieur et dans l'axe d'une bobine d'induction a pour effet d'*augmenter l'intensité des courants induits*, développés par le passage et l'interruption alternatifs du courant voltaïque dans le fil inducteur.

45. Induction par l'action de la terre. — Si, d'après la théorie d'Ampère, le globe terrestre est magnétiquement assimilable à un solénoïde dont les courants circuleraient de l'est à l'ouest, il est rationnel d'admettre que, sous la seule influence de la terre, des courants induits doivent se développer dans des circuits convenablement disposés. C'est, en effet, ce qu'il est facile de démontrer au moyen d'une spirale AB (*fig. 8*) formée d'un long fil de cuivre recouvert de soie et communiquant par ses deux bouts avec un galvanomètre très sensible.

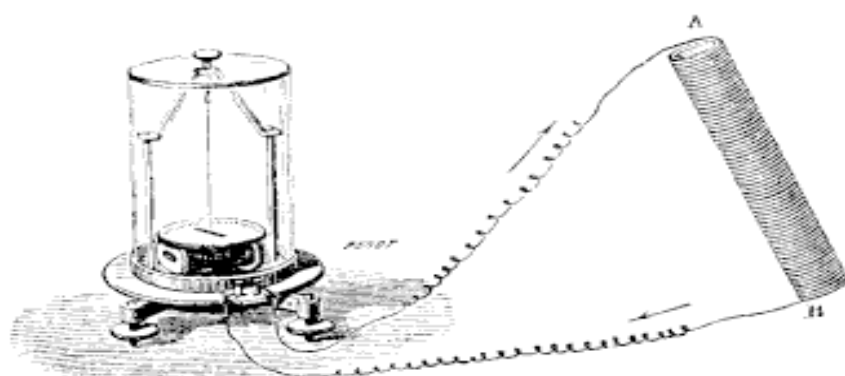


Fig. 8.

Cette spirale étant d'abord placée de manière que son *axe soit parallèle à l'aiguille de la boussole d'inclinaison*, si, par un

mouvement rapide, on change sa position. l'aiguille du galvanomètre accuse aussitôt la production instantanée d'un courant induit. Ce courant aura son maximum d'intensité si la spirale est amenée perpendiculairement à sa première direction.

Remarque. Les faits qui précèdent nous montrent une similitude complète, absolue, entre l'action inductrice des courants électriques et celle des aimants sur un circuit voisin. Les uns et les autres y font naître des courants induits, qui suivent exactement les mêmes lois. Nouvelle preuve à ajouter à celles indiquées plus haut (*Cours de Physique*, 319) de l'identité proclamée par Ampère, entre les phénomènes de l'électricité dynamique et ceux du magnétisme.

Loi générale des courants d'induction ou loi de Lenz.

16. *Loi de Lenz.* — Nous venons de voir (12) :

1^o Que si l'on *approche* parallèlement d'un circuit traversé par le courant d'une pile voltaïque un autre circuit fermé (*fig. 6*), un courant induit, de sens *inverse* de celui de la pile, se développe aussitôt dans ce dernier circuit. Or, comme deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent (*Cours de Physique*, 312), le courant induit *tend donc à s'opposer* au rapprochement des deux circuits ;

2^o Que si l'on *éloigne* parallèlement d'un circuit traversé par le courant d'une pile un autre circuit voisin et fermé, un *courant direct* ou de *même sens* que celui de la pile se développe aussitôt dans ce dernier circuit. Or, comme deux courants parallèles et de même sens s'attirent, ce courant induit *tend donc à s'opposer* à l'éloignement des deux circuits.

On tire de ces deux faits, qui, ainsi que nous l'avons vu, résultent également de l'action des aimants sur un circuit voisin, la formule générale suivante, dite *loi de Lenz*, du nom du physicien russe qui l'a le premier établie :

Le déplacement d'un courant électrique ou d'un aimant, situés dans le voisinage d'un circuit fermé, développe dans ce circuit

un courant induit de sens contraire à celui qui eût été capable de produire ce déplacement, en d'autres termes, un courant qui tend à s'opposer au mouvement produit.

L'effet est d'ailleurs le même si, le courant ou l'aimant demeurant fixes, on déplace le circuit.

Tous les phénomènes d'induction, de quelque façon qu'ils se produisent, sont soumis à cette loi, qui nous donne ainsi le moyen fort simple, connaissant la position d'un courant ou d'un aimant inducteurs, de prévoir quel sera le sens du courant induit développé dans un circuit voisin par un changement de position des inducteurs ou du circuit.

La résistance opposée par les courants induits au mouvement qui tend à les produire a été pour la première fois démontrée par L. Foucault, au moyen d'un appareil fort simple (fig. 9), composé d'un disque en cuivre C placé verticalement entre les pôles A et B d'un puissant électro-aimant, et pouvant être mis en rotation rapide au moyen d'une manivelle M et d'un système d'engrenages. Une pile P destinée à exciter à volonté l'électro-aimant complète cet appareil.

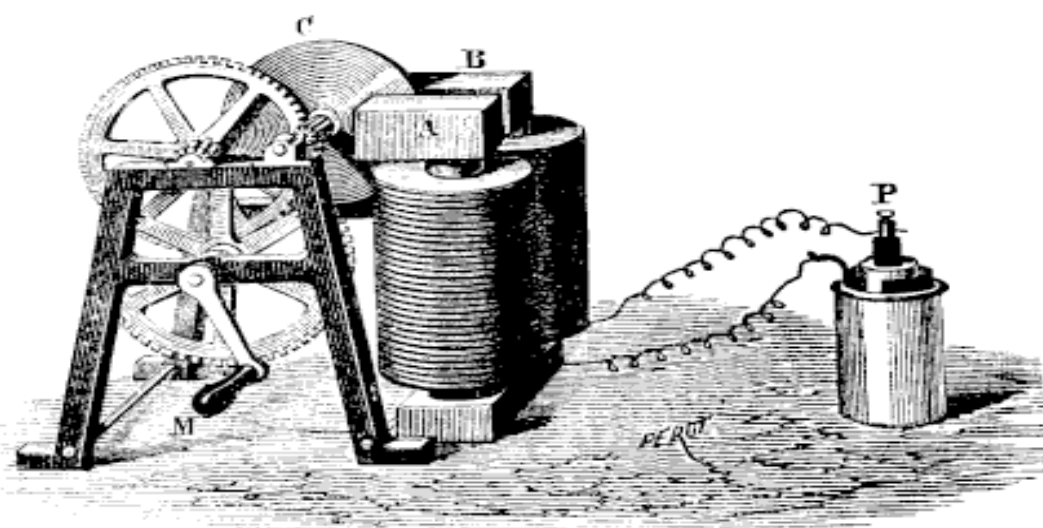


Fig. 9.

Tant que l'électro-aimant est au repos, le moindre effort suffit pour faire tourner le disque. Mais dès qu'on y lance le

courant de la pile, le disque semble aussitôt arrêté comme par un frein invisible. Ce frein, c'est la succession rapide des courants induits développés à la surface du disque, en sens contraire du courant inducteur de l'électro-aimant considéré comme un solénoïde (*Cours de Physique*, 319). L'opérateur se trouve, en quelque sorte, comme le batelier remontant le courant d'un fleuve.

Si, malgré la résistance, on continue à faire tourner le disque, on constate alors qu'il s'échauffe, au point d'acquiescer bientôt une température telle qu'on ne peut plus le toucher. Preuve nouvelle et péremptoire de l'identité entre l'énergie motrice et l'énergie calorifique, se transformant ici l'une dans l'autre par l'intermédiaire de l'électricité.

Induction des courants sur eux-mêmes. Extra-courants.

47. Induction des courants sur eux-mêmes. Extra-courants. — Un courant qui commence ou qui finit développant des courants induits dans un circuit voisin, il est naturel de penser, par analogie, qu'il doit exercer une action semblable *sur son propre circuit*, action qui sera d'autant plus marquée que ce circuit se composera d'éléments plus rapprochés, tels, par exemple, que les tours juxtaposés d'une hélice ou d'une bobine. C'est, en effet, ce qui a lieu.

Soit (*fig. 10 et 11*) une pile M, dont le pôle positif P et le pôle négatif N sont réunis par un fil PABCDN, sur le trajet duquel sont interposés une bobine BC et un fil de dérivation AD, muni d'un galvanomètre G. Le courant, partant de P, se bifurque au point A en deux parties, dont l'une traverse la bobine et l'autre le galvanomètre, comme l'indiquent les flèches. Sous l'influence de ce courant, l'aiguille du galvanomètre tend à se dévier et à prendre la position *ba*, le pôle austral *a* à gauche du courant. On peut avec cet appareil obtenir les deux effets suivants :

4° Un petit arrêt *d* (*fig. 10*) étant placé à droite du pôle austral de l'aiguille du galvanomètre, de manière à empêcher celle-ci de prendre la position *ba*, que tend à lui donner le

courant venant de la pile, si l'on interrompt subitement ce courant en détachant le fil conducteur du pôle P de la pile, le pôle austral de l'aiguille reçoit aussitôt une vive impulsion à gauche de l'arrêt *d*, ce qui montre qu'au moment de la rupture du courant de la pile, un autre courant, venant cette fois de la bobine, a traversé le fil AD de D en A. Ce courant a dû pour cela parcourir la bobine, où il a pris subitement naissance, de B en C, c'est-à-dire dans le même sens que celui de la pile. C'est ce qu'on nomme l'*extra-courant de rupture*, courant *direct*, comme le sont tous les courants induits, dus à l'interruption d'un courant inducteur.

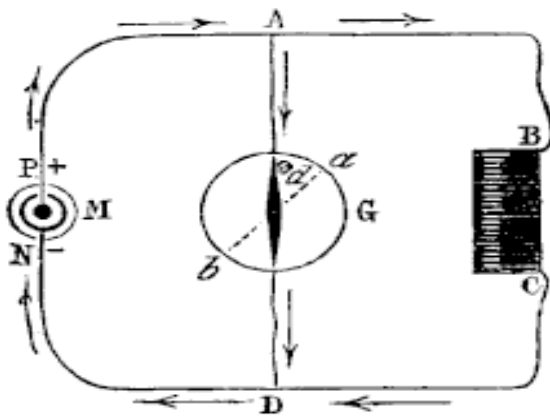


Fig. 10.

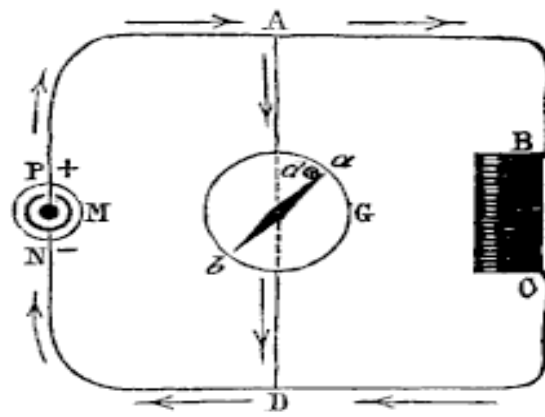


Fig. 11.

2° Après avoir ainsi reconnu l'effet produit par la rupture du courant de la pile, si l'on ramène l'aiguille du galvanomètre (*fig. 11*) dans la position *ba* qu'elle prend d'elle-même sous l'action de ce courant, et, qu'après l'avoir fixée dans cette position au moyen du petit arrêt *d*, on referme alors le circuit, en remettant le fil conducteur en contact avec le pôle P de la pile, on constate aussitôt que le pôle austral de l'aiguille reçoit une vive impulsion à droite de l'arrêt *d*, après quoi il revient à sa première position; ce qui montre, comme dans la précédente expérience, qu'au moment de la fermeture du circuit, un courant induit s'est de nouveau produit dans la bobine, mais cette fois de sens contraire à celui de la pile. C'est ce qu'on nomme l'*extra-courant de fermeture*, courant *inverse*, comme

le sont tous les courants induits dus à l'établissement du courant inducteur.

En résumé, tout circuit traversé par un courant donne lieu, au moment de sa *rupture*, à un extra-courant *direct*, et au moment de sa *fermeture* à un extra-courant *inverse*, résultat conforme aux principes généraux de la production des courants induits volta-électriques (12).

Remarque. — L'extra-courant de fermeture étant inverse du courant principal, a pour effet, au moment où ce dernier commence, d'en diminuer l'intensité; au contraire, l'extra-courant de rupture étant de même sens que le courant principal, a pour effet, au moment où ce dernier finit, d'en augmenter l'intensité. Ce double effet peut être démontré par diverses expériences. La meilleure est celle que l'on peut en faire sur soi-même de la manière suivante :

Soit (*fig. 12*) une pile P de force moyenne, contenant une bobine B dans son circuit. Cette pile étant mise en activité, si l'on prend, un de chaque main, les deux bouts du fil de la bobine,

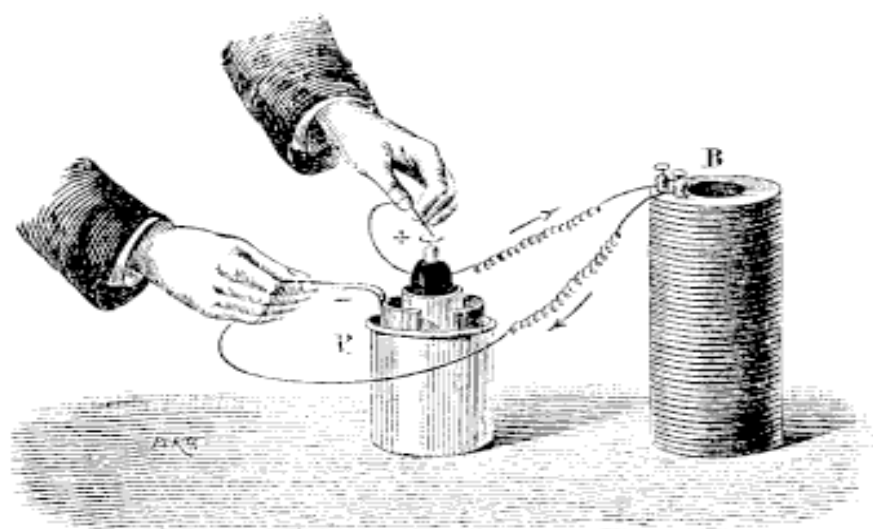


Fig. 12.

préalablement dépouillés de leur enveloppe isolante, et qu'on les détache vivement de la pile, de manière que la bobine

forme avec le corps un circuit fermé, on reçoit à l'instant même une commotion violente, évidemment produite par l'extra-courant de rupture développé dans la bobine, au moment où l'on interrompt le courant. Cela fait, si, tenant toujours les mêmes fils, on referme le circuit en les remettant simultanément en contact avec les pôles de la pile, on ressent encore une secousse, due cette fois à l'extra-courant de fermeture, mais beaucoup plus faible que la précédente, et qui cesse aussitôt, pour ne plus se reproduire, tant que le courant ne sera pas de nouveau interrompu.

Les commotions produites dans l'organisme par l'extra-courant de rupture sont fréquemment utilisées en médecine, au moyen d'appareils spéciaux, comprenant une pile, une bobine et un *interrupteur*, dont le jeu a pour effet de produire une succession rapide de fermetures et de ruptures du circuit. Ces appareils, appliqués à un membre ou à tout autre organe paralysé, y déterminent une série de secousses ou de contractions qui peuvent avoir pour effet, quand la paralysie ne tient qu'à une cause accidentelle, d'y ramener la sensibilité ou la contractilité momentanément abolies.

Premières machines d'induction. Bobine de Ruhmkorff.

18. Bobine de Ruhmkorff. — Cette bobine, ainsi appelée du nom de son inventeur, se compose (*fig. 13*) d'un cylindre en bois B, sur lequel s'enroule d'abord un *fil inducteur* d'environ 40 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, puis, par-dessus, le *fil induit*, lequel est beaucoup plus fin et a une longueur de plusieurs kilomètres. Le tout forme une bobine de 15 à 20 centimètres de diamètre, terminée par deux disques de verre qui servent à l'isoler, et dont les deux fils, l'inducteur et l'induit, sont entourés de coton imprégné lui-même d'une couche isolante de gomme-laque fondue.

Les deux extrémités du fil inducteur s'attachent l'une au bouton F, l'autre au bouton E, lesquels communiquent avec les pôles P et N d'une pile de Bunsen. Un petit appareil nommé *commutateur*, placé à droite de la bobine, permet de fermer ou

d'ouvrir à volonté le circuit, et de faire entrer le courant de la pile par l'un quelconque des deux boutons E et F. Ce commutateur n'est autre chose qu'un petit cylindre d'ivoire que l'on peut faire tourner sur son axe, et sur lequel sont fixées deux demi-viroles en cuivre laissant entre elles et de chaque côté une bande d'ivoire libre. Deux ressorts en acier communiquant avec le fil inducteur pressent sur ce cylindre, de telle sorte que le courant passe ou est interrompu selon qu'on les fait appuyer sur le cuivre ou sur l'ivoire.

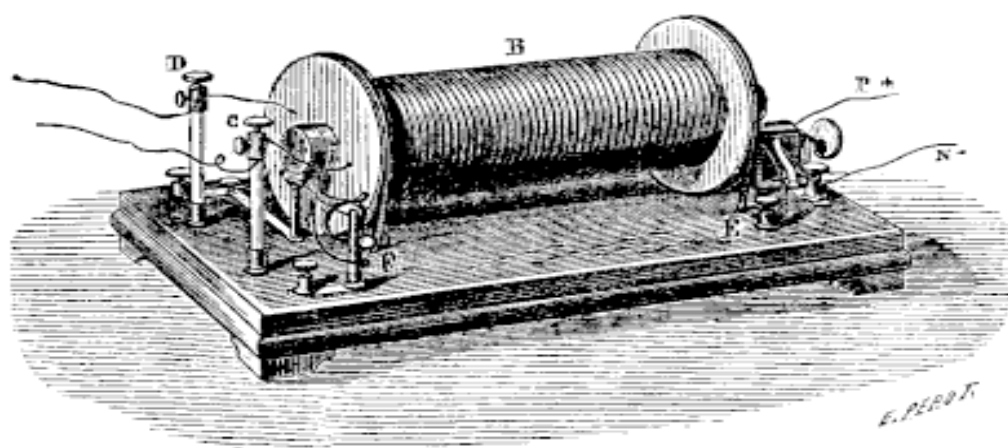


Fig. 13.

Les deux extrémités du fil induit, après avoir traversé le disque de verre représenté à gauche de la figure, s'attachent aux boutons C et D, que supportent deux colonnes de verre isolantes. Dans l'intérieur de la bobine est placé un faisceau de fils de fer qui a pour but de renforcer le courant induit (14), et dont une des extrémités (celle de gauche sur la figure) fait saillie en dehors de la bobine. Au-dessous de cette extrémité du faisceau magnétique est un petit appareil nommé *interrupteur*, destiné à produire des vibrations rapides au moyen desquelles le courant inducteur est successivement interrompu et rétabli, condition nécessaire au développement des courants induits, ceux-ci ne se produisant, ainsi que nous l'avons vu, qu'au moment où le courant inducteur commence ou finit. La *fig. 14*, qui représente en plan la disposition de ce petit appareil, nous permettra d'en faire saisir immédiatement le mécanisme.

A est le faisceau de fils de fer placé dans la bobine, B une petite colonne en cuivre isolée du sol et située directement au-dessous de A; un petit marteau M en fer doux, pouvant

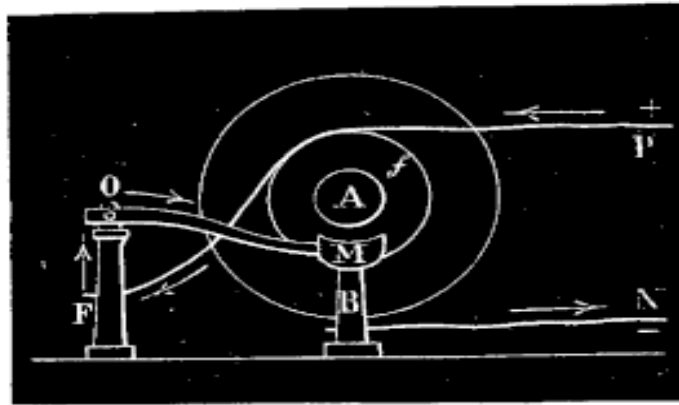


Fig. 14.

osciller librement entre A et B, est articulé en O, au sommet d'une autre colonne métallique F, également isolée (représentée par la même lettre à gauche de la *fig.* 13). Le courant, parti du pôle positif P de la pile, après avoir parcouru le fil inducteur *f* de la bobine, arrive par la colonne F au marteau M, d'où il passe par la colonne B pour aller rejoindre le pôle négatif N. Mais pendant que le courant passe dans le fil inducteur *f* qui entoure le faisceau de fils de fer A, celui-ci s'aimante et attire le marteau M, lequel se sépare alors de la colonne B; le courant se trouve donc interrompu. Cette interruption ayant aussitôt pour effet de faire cesser l'aimantation du faisceau A, le marteau retombe, et, venant de nouveau toucher la colonne B, qui lui sert d'enclume, rétablit le courant : de là nouvelle attraction, et ainsi de suite. Ce mouvement de va-et-vient du marteau étant très rapide, le circuit inducteur se trouve donc ouvert et fermé automatiquement un grand nombre de fois par seconde*.

* Cet interrupteur, dit à marteau, ne convient qu'à des bobines de force moyenne. Avec de trop fortes bobines, l'échauffement des surfaces de contact du marteau et de l'enclume ne tarderait pas à les détériorer, et à mettre l'appareil hors d'usage. On emploie alors l'*interrupteur à mercure* de Foucault, dans lequel le marteau et l'enclume sont remplacés par deux tiges de platine fixées à l'extrémité d'un levier horizontal, et plongeant ver-

A chaque ouverture, se développe dans le fil induit un *courant direct* ou de même sens que le courant inducteur, et à chaque fermeture, un *courant inverse* : courants donnés, le premier surtout, d'une puissance beaucoup plus grande que celle de l'inducteur, ce qui, en tenant compte également de l'excès de tension due à la résistance du fil induit, beaucoup plus fin et plus long que l'inducteur, explique l'intensité extraordinaire des effets produits par cet appareil.

Avec une bobine Ruhmkorff de grandeur moyenne et un seul élément de Bunsen, les commotions que l'on éprouve en prenant avec les mains humides les extrémités du fil induit fixées aux boutons C et D (*fig. 13*) sont à peine supportables : deux éléments suffisent pour tuer un lapin : avec un plus grand nombre d'éléments, un homme serait certainement foudroyé.

Un fil de fer, tendu sur le trajet du courant induit, est fondu à l'instant et brûle avec une vive lumière. Si l'on interpose dans ce même courant deux tiges minces de cuivre placées bout à bout, et qu'on les écarte l'une de l'autre, on voit aussitôt jaillir entre elles une série d'étincelles vives et bruyantes, dont la longueur peut atteindre plusieurs décimètres : ces étincelles percent des blocs de verre de cinq à six centimètres d'épaisseur.

En faisant passer le courant dans des tubes, dits *tubes de Geissler*, contenant des gaz ou des vapeurs raréfiés, on obtient des phénomènes lumineux d'une grande beauté : une traînée de lumière tantôt rouge, tantôt violette ou bleuâtre, selon la nature des gaz ou des vapeurs, parcourt le tube d'un bout à l'autre, interrompue en certains endroits par des bandes ou intervalles obscurs qui la font paraître comme stratifiée.

La bobine de Ruhmkorff a reçu diverses applications indus-

ticalement dans deux godets contenant du mercure. Un électro-aimant spécial et une pile à faible courant, distincte de celle de la bobine, font osciller ce levier, de telle façon que les tiges de platine, alternativement soulevées et abaissées, sortent du mercure et y rentrent, ce qui, au moyen de certaines dispositions très ingénieuses, a pour effet d'ouvrir et de fermer successivement le circuit inducteur de la bobine.

trielles, dont la plus importante est l'exploitation des carrières et le percement des tunnels par l'explosion des mines à fortes charges, que l'on peut aujourd'hui enflammer à l'instant et sans danger, grâce à cette bobine, qui permet de porter l'étincelle à des distances considérables.

Premières machines d'induction. Machines de Pixii et de Clarke.

19. Machine de Pixii. — La machine de Pixii a pour but de produire des courants induits magnéto-électriques, se succédant avec assez de rapidité pour devenir sensiblement continus. Elle se compose en principe (*fig. 13*) d'un électro-aimant fixe ABC au-dessous duquel est un aimant DGHE, mobile autour d'un axe vertical KL. Les extrémités opposées A et D, C et E,

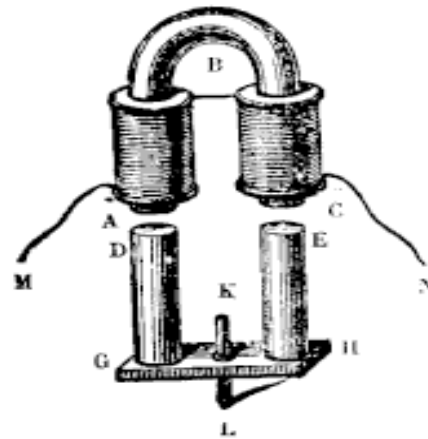


Fig. 13.

de l'électro-aimant et de l'aimant, quoique très rapprochées, ne se touchent pas. Ceci posé, si l'on fait tourner l'aimant DGHE autour de son axe KL, il est facile de voir que l'électro-aimant ABC passera successivement par des états magnétiques contraires, dont l'intensité sera maximum quand les pôles de l'aimant correspondront à ses extrémités, et qui deviendra nulle quand l'aimant sera en croix avec lui. Par conséquent, les courants induits, développés dans le fil MN, changeront de sens à chaque demi-révolution. Si la rotation de l'aimant est très rapide, on conçoit que ces courants deviendront en quelque sorte

continus, et produiront d'autant plus d'effet que la vitesse de rotation sera plus grande.

20. Machine de Clarke. — Cette machine (*fig. 16*) repose sur le même principe que la précédente, mais elle en diffère en ce sens que c'est l'électro-aimant qui est mobile et qui tourne avec son hélice devant un aimant fixe. Cette disposition inverse rend l'appareil plus portatif, et permet d'obtenir une rotation plus rapide, ce qui augmente l'énergie des courants induits.

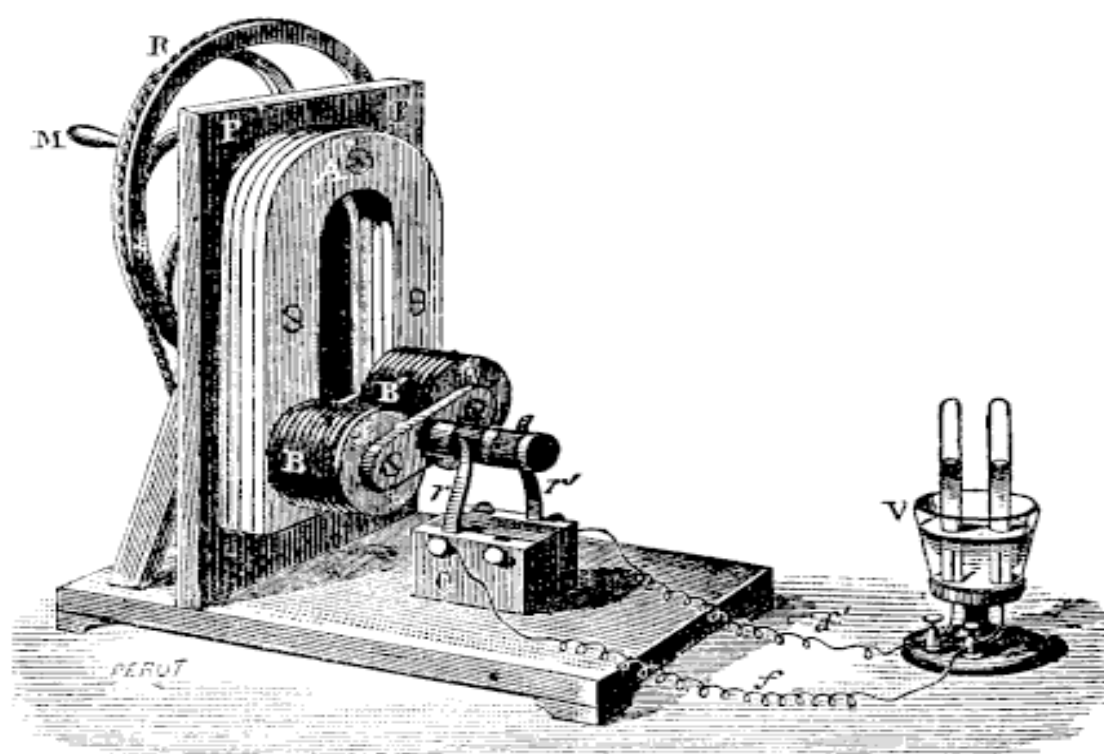


Fig. 16.

L'aimant fixe A est formé de plusieurs lames d'acier en fer à cheval, reliées et fixées ensemble à une planche verticale P. En R est une roue portant une chaîne sans fin, destinée à transmettre au moyen d'une manivelle M un mouvement de rotation rapide aux deux bobines B et B', formées chacune d'un cylindre en fer doux, autour duquel s'enroule, en sens inverse sur chacun d'eux, un long fil de cuivre entouré de soie. Ces deux bobines, dont les cylindres ou noyaux en fer doux sont reliés

3.

à leur bout antérieur par une plaque également en fer doux, forment donc ensemble un électro-aimant, mobile autour d'un axe horizontal.

Cet axe est formé d'une tige métallique, dont la partie extérieure est recouverte d'une gaine isolante en ivoire, qui porte elle-même deux anneaux en cuivre sur lesquels viennent s'appuyer deux ressorts métalliques r et r' . L'anneau sur lequel appuie le ressort r , isolé de l'axe par la gaine d'ivoire, communique directement avec les deux bouts antérieurs des fils des bobines; l'anneau sur lequel appuie le ressort r' est, au contraire, relié à l'axe par une vis qui traverse la gaine d'ivoire, ce qui met cet anneau en communication avec les deux bouts postérieurs des fils des bobines, soudés à ce même axe. Ces deux anneaux représentent donc les pôles des courants qui se développent dans les bobines.

Les deux ressorts r et r' , qui, pendant la rotation de l'axe, frottent constamment contre les anneaux pour y recueillir les courants, sont supportés par deux bandes métalliques, placées de chaque côté de la face supérieure d'un bloc en bois C, et munies de boutons pour donner attache aux deux extrémités des fils f et f' du circuit extérieur.

La machine étant mise en mouvement au moyen de la manivelle, il est facile de voir que chacune des deux bobines B et B', passant successivement devant les pôles contraires de l'aimant A, donnera naissance à deux *courants alternatifs*, changeant de sens à chaque demi-révolution. Deux courants contraires passeront donc à chaque tour complet de l'axe, dans chacun des ressorts, et de là dans le circuit extérieur. Un voltamètre V, placé dans ce circuit, donnera, en effet, dans chacune de ses éprouvettes, deux volumes égaux d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

Mais il est facile, avec cette même machine, d'obtenir des courants de sens invariable. Il suffit pour cela d'y annexer un *commutateur* analogue à celui que nous avons précédemment indiqué comme faisant partie de la bobine Ruhmkorff.

Ce commutateur (*fig.* 47) se compose de deux demi-viroles de cuivre cc' , appliquées sur la gaine d'ivoire qui recouvre la

partie antérieure de l'axe de rotation, et isolées l'une de l'autre par deux petits intervalles diamétralement opposés et situés dans le même plan que les axes des deux bobines. Comme les deux anneaux précédents, ces deux demi-viroles communiquent encore, l'une, avec les deux bouts antérieurs des fils des bobines, l'autre, avec leurs bouts postérieurs.

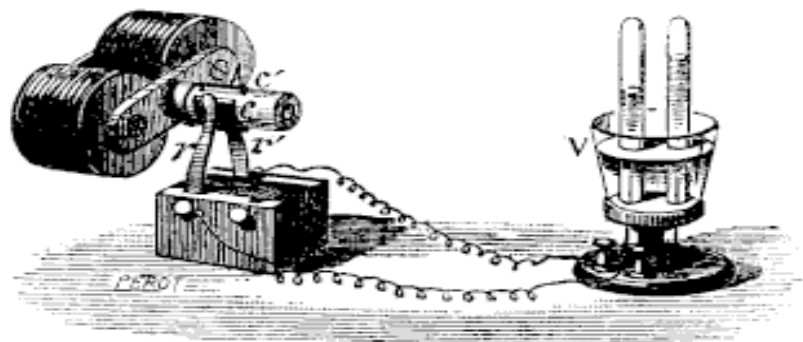


Fig. 17.

Les deux ressorts collecteurs r et r' étant mis en communication avec ce système, on voit qu'à chaque demi-tour de l'axe, chacune des deux demi-viroles passe successivement de l'un à l'autre ressort, et cela, à l'instant précis où les courants induits changent eux-mêmes de sens. Le circuit extérieur sera donc traversé par une succession de courants dirigés constamment *dans le même sens*. Un voltamètre V , placé dans ce circuit, donnera, en effet, non plus à l'état de mélange, mais *séparément*, de l'oxygène dans l'une de ses éprouvettes, et dans l'autre, un volume double d'hydrogène. La machine agit alors exactement comme le ferait une simple pile voltaïque.

21. Caractères et propriétés des courants d'induction. — Les courants d'induction, malgré leur instantanéité, possèdent grâce à leur succession rapide obtenue au moyen des machines que nous venons de décrire, toutes les propriétés des courants continus fournis par les piles voltaïques ordinaires. Ils donnent naissance à de vives étincelles ; ils peuvent rougir des fils métalliques, donnent lieu à l'incandescence des charbons, d'où procède la lumière électrique ; ils peuvent décomposer l'eau, les oxydes, les sels, aimanter l'acier, produire dans

l'organisme des commotions violentes, etc. Nous reviendrons, dans les chapitres suivants, sur ces divers effets et sur les merveilleuses applications que la science moderne a su en tirer.

Résumé.

I. On désigne sous le nom de *courants d'induction* ou *courants induits* des courants électriques instantanés se développant dans des conducteurs métalliques, sous l'influence des courants voltaïques (courants volta-électriques) ou des aimants. Ces derniers sont alors nommés *courants* ou *aimants inducteurs* (courants magnéto-électriques).

II. Tout courant voltaïque *qui commence* fait naître immédiatement dans un circuit fermé et placé près de lui un *courant inverse* ou de *sens contraire* au sien. Tout courant *qui finit* y fait naître aussitôt un *courant direct* ou de *même sens* que le sien.

III. Tout courant voltaïque que l'on *approche* d'un circuit fermé fait naître dans ce circuit un courant *inverse*. Tout courant qu'on en éloigne y produit aussitôt un courant *direct*.

IV. Les courants induits, directs ou inverses, sont toujours *instantanés*. Ils ne durent que l'instant très court pendant lequel se produisent les conditions qui les font naître. Ils ont encore pour caractère d'être toujours plus intenses que les courants inducteurs dont ils procèdent.

V. Quand on *approche* un aimant d'un circuit fermé, cet aimant, comme le courant voltaïque, y produit un courant *inverse* des courants qui, d'après la théorie d'Ampère, circuleraient autour du barreau aimanté, assimilé à un solénoïde. Si l'on *éloigne* ensuite ce même aimant, un courant *direct* se produit aussitôt dans le circuit.

VI. L'action magnétique de la terre suffit pour développer des courants induits dans un circuit fermé, dont on fait varier brusquement la position par rapport au méridien magnétique.

VII. Le déplacement d'un courant électrique ou d'un aimant, situé dans le voisinage d'un circuit fermé, fait naître dans ce circuit un courant induit de sens contraire à celui qui eût été capable de produire ce déplacement, c'est-à-dire un courant *qui tend à s'opposer au mouvement produit* (loi de Lenz).

VIII. Tout circuit traversé par un courant donne lieu, au moment de sa rupture, c'est-à-dire au moment où cesse le courant, à un *extra-courant* direct, et au moment de sa fermeture, c'est-à-dire au moment où le courant s'établit, à un *extra-courant* inverse.

IX. Les premières machines imaginées pour utiliser les courants d'induction sont celles de Pixii, de Clarke, et la bobine de Ruhmkorff. Cette dernière est surtout remarquable par la puissance de ses effets.

X. Les courants d'induction possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques proprement dits : ils donnent de vives étincelles, rougissent des fils métalliques, donnent lieu à l'incandescence des charbons, d'où procède la lumière électrique ; ils peuvent décomposer l'eau, les oxydes, les sels, aimanter l'acier, produire dans l'organisme des commotions violentes, etc.



CHAPITRE II.

Applications modernes de l'électricité. — Nouvelles machines d'induction. — Machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. — Machine de Nollet, dite de l'Alliance. — Machines Gramme.

Nouvelles machines d'induction. Machines magnéto-électriques et dynamo-électriques.

22. *Nouvelles machines d'induction. Machines magnéto-électriques et dynamo-électriques.* — Les immenses progrès réalisés depuis quelques années dans les applications de l'électricité sont principalement dus, ainsi qu'on a pu le voir à notre grande *Exposition internationale d'électricité* de 1881, aux perfectionnements apportés aux machines d'induction déjà connues, et à la création de nouvelles machines de même ordre. C'est grâce à ces puissants générateurs de la force voltaïque, que l'éclairage électrique, qui jusqu'alors n'avait été, pour ainsi dire, qu'une curiosité de laboratoire, le transport à distance des forces motrices, la galvanoplastie appliquée aux objets d'art ou autres pièces de grandes dimensions, ont pris rang, avec la télégraphie et le téléphone, parmi les grandes découvertes qui seront l'honneur et la gloire de notre siècle, le siècle de la vapeur et de l'électricité, comme le nommera l'histoire.

Les machines actuellement destinées à la production industrielle de l'électricité se divisent en deux classes :

Les machines *magnéto-électriques*, dans lesquelles on emploie des aimants ordinaires ou permanents, comme dans les machines de Pixii et de Clarke, précédemment décrites ;

Les machines *dynamo-électriques*, dans lesquelles les aimants ordinaires ou permanents sont remplacés par des électro-aimants.

Il existe aujourd'hui un grand nombre de types de ces deux classes de machines. Mais comme ces divers types reposent

tous sur les mêmes principes, et ne diffèrent entre eux que par des détails de construction, nous nous bornerons à décrire celles de ces machines dont l'emploi est le plus répandu, savoir : la machine magnéto-électrique de Nollet, dite de l'*Alliance*, du nom de la compagnie industrielle qui l'a exploitée la première, et les deux machines *Gramme*, magnéto et dynamo-électriques.

Machine magnéto-électrique de Nollet ou de l'Alliance.

25. *Description et applications de cette machine.* — La machine de Nollet ou de l'Alliance, que représente dans son ensemble la *fig.* 48, n'est autre chose qu'une machine de Clarke agrandie et multipliée de manière à fournir des courants électriques d'une grande puissance. Elle consiste en un bâti circulaire de fonte, sur le contour duquel sont des traverses de bois supportant huit rangées horizontales de faisceaux aimantés, recourbés en fer à cheval et capables de porter chacun un poids d'environ soixante kilogrammes. Ces faisceaux, au nombre de cinq par rangée, sont groupés de telle façon que leurs pôles de noms contraires soient toujours en regard l'un de l'autre.

Un axe de fer horizontal, allant d'un bout à l'autre du bâti, porte quatre disques ou rouleaux de bronze correspondant aux intervalles compris entre les séries verticales des faisceaux aimantés, et sur la circonférence desquels sont fixées seize bobines cylindriques munies chacune d'un noyau de fer doux. Les fils de ces bobines, recouverts d'une couche isolante de bitume, sont tous enroulés dans le même sens et communiquent entre eux. Comme dans la machine de Clarke, l'ensemble de ces fils vient aboutir, d'une part avec l'axe, d'autre part avec une pièce métallique fixée sur ce même axe, mais dont elle est isolée par un manchon d'ivoire qui l'en sépare complètement. Deux petites bornes fixées à la partie supérieure du bâti, et communiquant, l'une avec l'axe, l'autre avec la pièce métallique dont nous venons de parler, reçoivent les fils destinés à conduire les courants dans les appareils où ils doivent être utilisés.

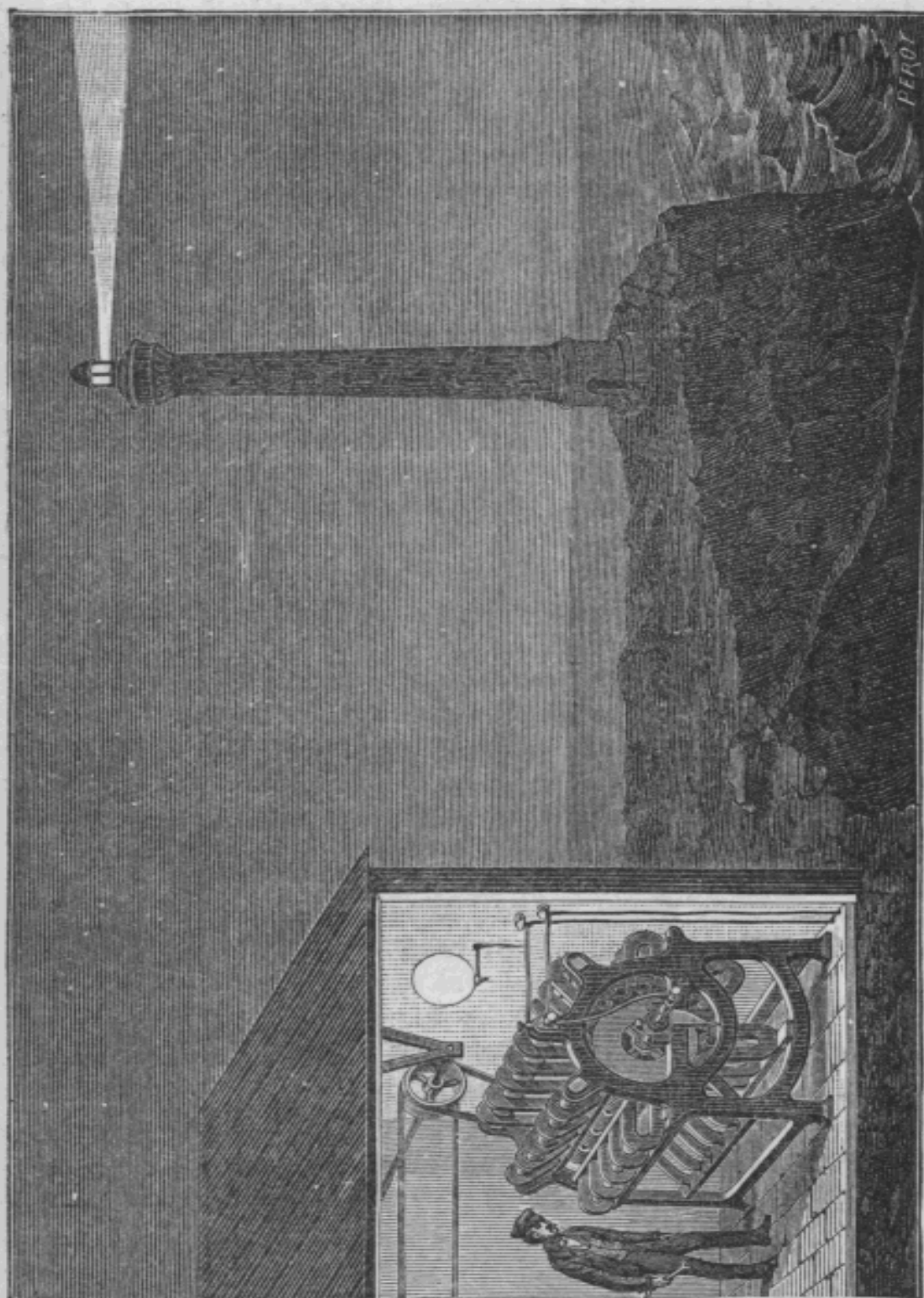


Fig. 18.

Une machine à vapeur, de la force de plusieurs chevaux, imprime à tout le système, par l'intermédiaire d'une courroie sans fin s'enroulant sur une poulie fixée à l'extrémité de l'axe, une vitesse de deux à trois cents tours par minute. Chacune des bobines, passant ainsi, à chaque révolution, devant les seize pôles alternativement contraires des faisceaux aimantés, produit donc huit courants directs et huit courants inverses, en tout seize courants, alternativement de sens contraires, ce qui donne, par minute, avec une vitesse moyenne de 250 tours, 4 000 courants alternatifs.

Le même effet se produit dans chacune des 64 bobines que portent ensemble les quatre rouleaux; mais comme les fils de ces bobines sont tous enroulés dans le même sens et communiquent entre eux, leurs effets ne font que s'ajouter, et l'on n'a toujours que le même nombre de courants, mais plus intenses. Dans le cas où l'on aurait besoin de courants de même sens, ce qui arriverait, par exemple, si l'on voulait appliquer cette machine à la galvanoplastie ou au transport de la force motrice, on obtiendrait facilement ce résultat au moyen d'un commutateur semblable à celui de la machine de Clarke, et placé comme lui sur l'axe de rotation. On peut, du reste, comme on le fait pour les éléments d'une pile ordinaire, changer les modes de communication des bobines entre elles, et les réunir ainsi, suivant les besoins, en tension ou en quantité.

La machine de Nollet ou de l'Alliance est surtout employée pour l'éclairage électrique à de grandes distances et, en particulier, pour l'éclairage des phares maritimes. Sa grande puissance, la régularité parfaite et la sûreté de son fonctionnement lui ont valu, jusqu'à présent, la préférence sur d'autres machines analogues destinées au même usage. Elle a été pour la première fois appliquée, en 1863, à l'éclairage par l'arc voltaïque des deux grands phares du cap de la Hève, près du Havre, où elle fonctionne encore aujourd'hui.

Machine Gramme magnéto-électrique.

24. *Théorie de la machine Gramme magnéto-électrique.* — Bien que présentant dans son ensemble (*fig. 21*) une certaine analogie de forme et de construction avec celle de Clarke, la machine magnéto-électrique de Gramme repose cependant, comme on va le voir, sur un mode de fonctionnement tout différent.

Supposons (*fig. 19*) un anneau circulaire de fer doux placé entre les branches d'un aimant vertical M en fer à cheval, de telle sorte que son diamètre horizontal soit sur la ligne AB qui joint les deux pôles A et B de l'aimant. Une petite spirale ou bobine s, formée par un fil de cuivre recouvert de soie, est enroulée autour de cet anneau, et peut glisser facilement sur lui de manière à en parcourir toute la circonférence dans un sens ou dans l'autre.

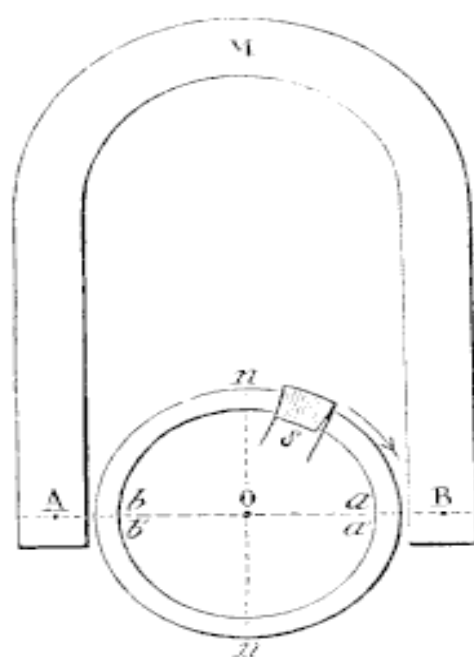


Fig. 19.

Les deux pôles A et B de l'aimant, agissant par influence sur l'anneau, déterminent l'aimantation de chacune de ses

deux moitiés $b n a$ et $b' n' a'$, situées, l'une au-dessus et l'autre au-dessous de la ligne diamétrale AB , qui joint les deux pôles de l'aimant. De là résulte la production, en face du pôle austral A , d'un double pôle boréal $b b'$, et en face du pôle boréal B , d'un double pôle austral $a a'$. En n et n' sont les lignes neutres de ces deux moitiés d'anneau ainsi aimantées, et qui, dans cet état, représentent deux aimants que l'on aurait courbés en demi-cercle et placés bout à bout, se touchant par leurs pôles de même nom.

Supposons maintenant que la bobine s étant d'abord placée en un point voisin de l'extrémité n du diamètre vertical nn' joignant les deux lignes neutres de l'anneau, on la fasse glisser, dans le sens indiqué par la flèche, de manière à lui faire parcourir, par petits déplacements successifs, la demi-circonférence $n a a' n'$: l'expérience, d'accord avec la théorie, montre que cette bobine est aussitôt traversée par une succession de courants induits dont l'intensité croît à mesure qu'elle se rapproche des pôles $a a'$ de l'anneau, et décroît à mesure qu'elle s'en éloigne, jusqu'à ce qu'elle arrive en n' . On pourrait, à première vue, supposer que ce courant doit changer de sens au moment où la bobine dépasse les pôles $a a'$: mais comme cette bobine leur présente maintenant le bout opposé à celui qu'elle leur présentait d'abord, le courant conserve *le même sens* dans toute la demi-révolution $n a a' n'$. Si l'on met les deux bouts du fil en communication avec un galvanomètre, on constate, en effet, que, pendant que la bobine accomplit cette demi-révolution, l'aiguille reste déviée du même côté du zéro, avec un angle de déviation qui va augmentant dans le quart de révolution $n a$, et en diminuant dans l'autre quart $a' n'$.

Quand la bobine s arrive en n' , à égale distance des pôles $a a'$ et $b b'$, le courant devient nul ; mais si, continuant sa marche, elle dépasse la ligne neutre n' , pour parcourir ensuite la demi-circonférence $n' b' b n$, un nouveau courant s'y produit aussitôt, avec les mêmes alternatives d'accroissement et de diminution d'intensité, mais *en sens inverse* du premier, jusqu'à l'arrivée de la bobine en n , où il devient nul à son tour, et ainsi de suite. L'aiguille du galvanomètre, que nous avons supposé placé dans le circuit de la bobine, se porte, en effet, au mo-

ment ou celle-ci dépasse n' , de l'autre côté du zéro, et s'y maintient, en présentant la même série de déviations que précédemment, jusqu'à l'arrivée de la bobine en n .

En résumé, pendant un tour complet $n n' n$ de la bobine sur l'anneau, on constate : que dans la demi-révolution $n a a' n'$, qui s'effectue à droite de la verticale ou *ligne de partage* passant par les lignes neutres n et n' de l'anneau, il se produit dans la bobine un courant dont le sens reste *constant*, et que dans la demi-révolution de gauche, il se produit un nouveau courant dont le sens est encore *constant*, mais *inverse* du premier. Quant à l'action inductrice qu'exercent également sur la bobine les deux pôles A et B de l'aimant vertical M, la théorie d'Ampère et la loi de Lens (12) s'accordent pour démontrer que cette action produit sur la bobine le même effet que les pôles inverses $a a'$ et $b b'$ de l'anneau. Ces deux effets ne font donc, en s'ajoutant, qu'augmenter l'intensité des courants.

Les phénomènes que nous venons d'étudier resteront absolument les mêmes si, la spirale étant *fixée à l'anneau*, on fait tourner celui-ci autour de son axe. Dans ce cas, les doubles pôles $b b'$ et $a a'$, bien que se déplaçant dans la masse de l'anneau, *resteront toujours fixes dans l'espace*, en regard des pôles contraires A et B de l'aimant M. La bobine s , entraînée par l'anneau, s'approchera donc ou s'éloignera de ces mêmes pôles de la même façon que si l'anneau, restant immobile, comme nous l'avons d'abord supposé, c'était elle, au contraire, qui en parcourût le contour. C'est ce mouvement de l'anneau, plus facile à réaliser, que l'inventeur Gramme a adopté pour ses diverses machines.

Ces préliminaires établis, il est facile de voir que si, au lieu d'une seule bobine, on fixe sur le contour de l'anneau (*fig. 20*) une série de bobines semblables s, s, s, s , toutes celles de ces bobines qui, pendant la rotation de l'anneau, se trouveront à droite ou à gauche de la ligne de partage $n n'$, seront traversées par des courants de même sens, tandis que celles du côté opposé seront traversées par des courants de sens inverse des premiers. En un mot, les choses se passeront dans chacune de

ces bobines, comme dans la bobine unique que nous avons prise pour exemple dans notre première démonstration.

Supposons maintenant qu'entre toutes ces bobines se trouvent placées de champ des lames de cuivre rayonnantes $c c c c$, assujetties à l'anneau de manière à tourner avec lui autour de l'axe O , et qu'à chacune de ces lames soient soudés, d'un côté le bout initial, et de l'autre le bout terminal de deux bobines consécutives $s. s.$ Devant ce système formant

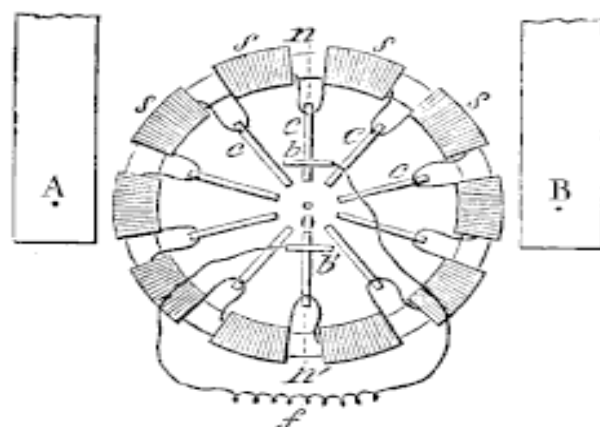


Fig. 20.

ainsi un circuit fermé, ajoutons deux pièces métalliques ou *collecteurs* $b b'$, fixées perpendiculairement à la ligne neutre ou de partage $n n'$, c'est-à-dire, dans une position telle que, pendant la rotation de l'anneau, chacune de ces deux pièces se trouve respectivement en contact avec les lames rayonnantes correspondant à cette ligne neutre. Ces deux pièces, étant réunies par un fil conducteur f , recueilleront à chaque demi-révolution de l'anneau les courants des deux systèmes de bobines situés l'un à droite et l'autre à gauche de $n n'$; elles se trouveront, par conséquent, dans les mêmes conditions que si elles étaient fixées aux deux pôles d'une pile dont les éléments, représentés par les bobines, formeraient deux séries associées en quantité, c'est-à-dire par leurs pôles de même nom. Le circuit extérieur f sera donc traversé par un courant constant en intensité et en direction, tant que l'anneau tournera avec la même vitesse et dans le même sens.

Telles sont les dispositions imaginées par M. Gramme pour la construction de ses machines magnéto-électriques (*fig. 21*).

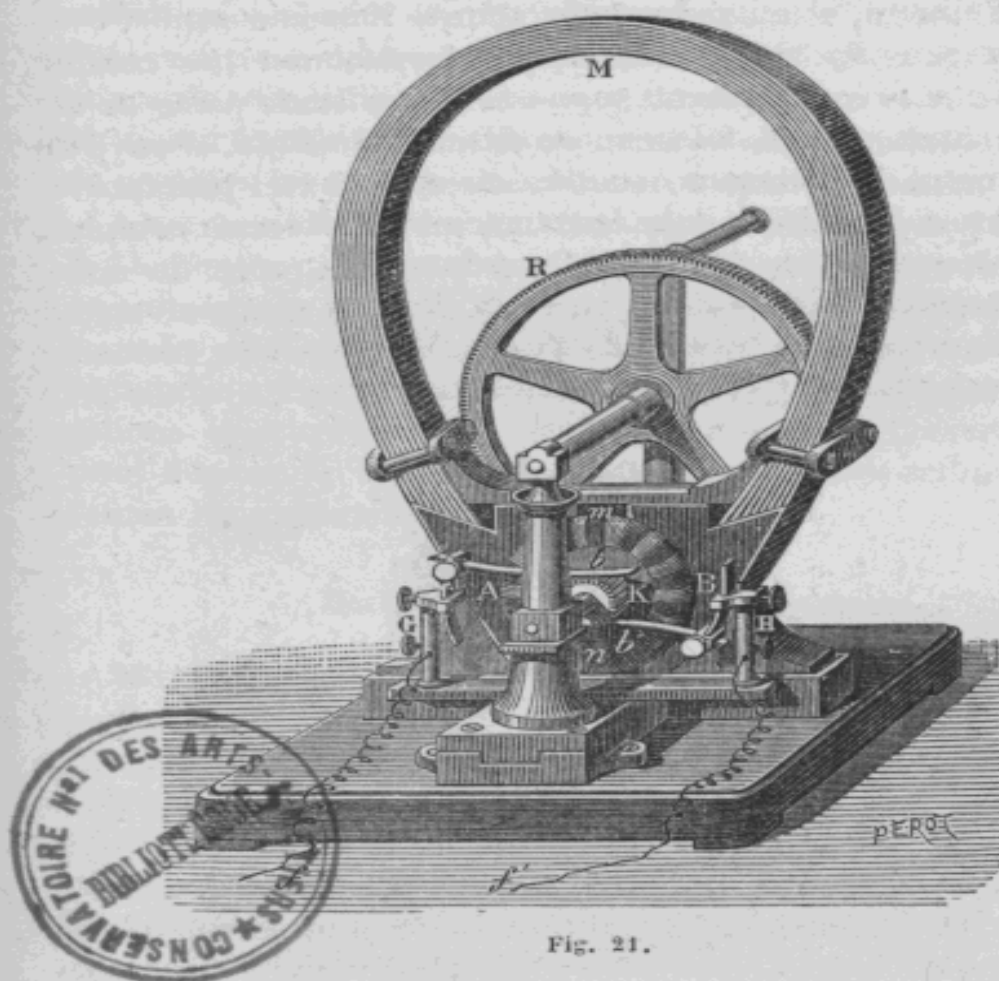


Fig. 21.

Spécialement destinées à des expériences de cours ou des opérations de laboratoire, ces machines diffèrent essentiellement de la machine de Clarke, en ce sens qu'au lieu de ne donner dans le circuit extérieur que des courants alternatifs, exigeant, pour être redressés, l'emploi d'un commutateur, elles fournissent directement des courants continus.

25. Description de la machine Gramme magnéto-électrique. — La *fig. 21* représente dans son ensemble une de ces machines. L'aimant fixe M, maintenu verticalement, se compose, d'après le système Jamin, d'un faisceau en fer à cheval de vingt-quatre lames d'acier, aimantées séparément à saturation,

puis superposées. Aux deux extrémités du faisceau sont fixées deux armures de fer doux, comprenant les pôles efficaces A et B de l'aimant, et entre lesquels tourne l'anneau *mn*.

Cet anneau (*fig. 22*) est lui-même formé, non pas comme nous l'avons précédemment supposé, d'une seule pièce de fer massive, mais par un faisceau de fils de fer doux, d'environ un millimètre d'épaisseur, soudés en anneaux et juxtaposés, de manière à constituer dans leur ensemble un circuit complet. Autour de ce noyau de fil de fer sont appliquées de nombreuses bobines de fils de cuivre *ssss*, réunies successivement l'une à l'autre, ainsi que nous l'avons dit, par des lames de cuivre rayonnantes *cccc*, auxquelles sont soudés, d'un côté

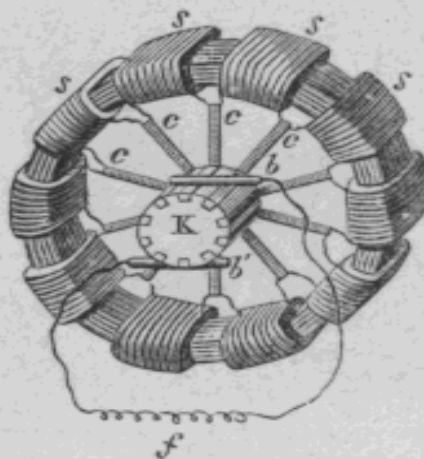


Fig. 22.

le bout initial, et de l'autre le bout terminal de deux bobines consécutives. Ces lames, au lieu d'être, comme les représente notre figure théorique 20, d'une seule pièce et rectilignes, sont en forme d'équerres, dont les branches horizontales, placées de champ et séparées les unes des autres par des rubans de soie ou de toute autre matière isolante, se prolongent en avant de l'anneau, de manière à former autour de l'axe de rotation, dont elles sont également isolées par un manchon de buis ou d'ivoire, le petit cylindre K.

Sur ce petit cylindre, auxquelles les tranches à vif des lames horizontales des équerres donnent une apparence cannelée, viennent s'appuyer, l'un au-dessus de l'autre, et parallèlement

à la ligne des pôles A B de l'aimant (*fig. 21 et 22*), deux petits pinceaux ou *balais collecteurs* en laiton *b* et *b'*, fixés aux colonnes métalliques G et H (*fig. 21*.) De ces colonnes partent les fils *f* et *f'* devant transmettre aux appareils auxquels ils sont destinés les courants recueillis par les balais, à mesure que viennent successivement frotter sur eux, au moment où elles franchissent la ligne de partage, les tranches des équerres diamétralement opposées.

Avec une vitesse de dix tours par seconde, que l'on obtient facilement au moyen d'une manivelle et d'une roue dentée R engrenant un pignon fixé à l'anneau, cette machine produit tous les effets d'une pile de huit à dix éléments de Bunsen, notamment l'incandescence des fils métalliques, les décompositions chimiques, l'aimantation de barreaux d'acier, etc. Elle peut donc remplacer avantageusement les piles ordinaires pour toutes les expériences d'électricité.

Machine Gramme dynamo-électrique.

26. *Description de la machine Gramme dynamo-électrique.* — Substituer aux aimants permanents des machines magnéto-électriques des électro-aimants auxquels on peut donner une puissance magnétique beaucoup plus grande, telle est l'idée féconde sur laquelle repose l'invention des machines dynamo-électriques. A cette idée ont successivement attaché leurs noms plusieurs savants électriciens, Wilde (de Manchester), Werner Siemens (de Berlin), Charles Wheatstone (de Londres), enfin M. Gramme, à Paris, dont la machine, construite sur ce principe, est aujourd'hui universellement employée pour la production en grand de l'électricité.

Cette machine, que l'on désigne simplement dans l'industrie sous le nom de *machine Gramme*, pour la distinguer de celle que nous venons de décrire, se compose (*fig. 23*) de deux noyaux ou cylindres pleins CC et C' C' en fer doux, placés horizontalement l'un au-dessus, l'autre au-dessous de l'anneau mobile K, et maintenus dans cette position fixe par deux montants verticaux ou flasques en fonte M M'. Sur les cylindres en fer CC et C' C' est enroulé un gros fil de cuivre recouvert d'une

couche isolante, et placé dans le circuit même des courants induits qu'engendre la rotation de l'anneau. Ce système représente ainsi deux électro-aimants inducteurs, situés, l'un A M B à gauche, l'autre A' M' B' à droite, et disposés de telle façon que lorsqu'un même courant les traverse, leurs pôles de même nom A A' et B B' soient en regard l'un de l'autre.

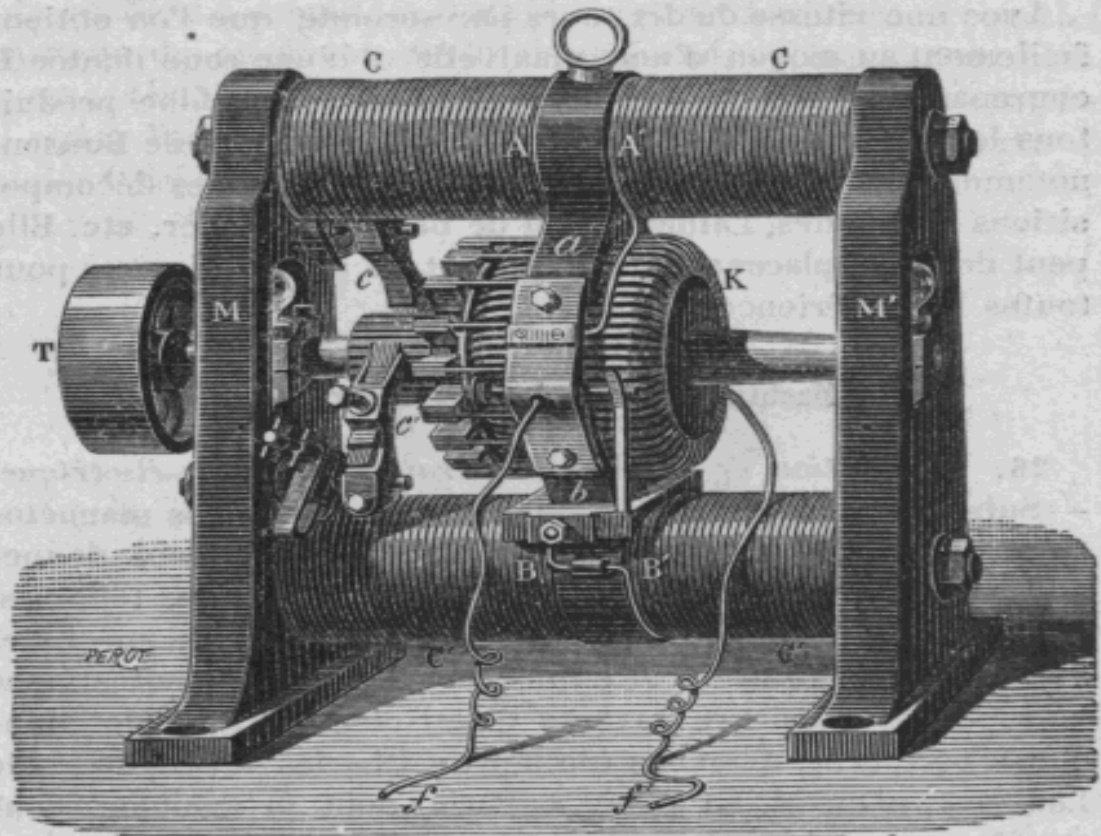


Fig. 23.

Deux armures en fer doux *a* et *b*, appliquées, l'une sur les pôles A et A', l'autre sur les pôles B et B', et réunissant ainsi chacun de ces doubles pôles en un seul pôle ou champ magnétique *a* et *b*, viennent s'épanouir, au-dessus et au-dessous de l'anneau mobile, sur un arc un peu moindre qu'une demi-circonférence, de manière à ne pas se toucher. Entre ces deux armures tourne l'anneau, exactement semblable, sauf ses dimensions plus grandes, à celui de la machine magnéto-élec-

trique précédemment décrite. Le noyau de fil de fer, les bobines, les équerres, les balais collecteurs c' c' sont disposés et fonctionnent de la même façon.

Le tout est mis en mouvement par une machine à vapeur dont l'arbre porte une courroie sans fin, qui vient passer sur le tambour T, situé à l'une des extrémités de l'axe sur lequel est fixé l'anneau.

Théorie. Nous avons dit que le fil qui entoure les électro-aimants fait partie du circuit extérieur, allant de l'un à l'autre des balais collecteurs c et c' . Il résulte de cette disposition que le courant produit par la rotation de l'anneau passe dans les bobines des électro-aimants, avant de se porter en dehors par les fils f et f' aux appareils qu'il doit faire fonctionner. Il n'y a donc, en somme, dans toute la machine qu'un seul circuit comprenant : l'anneau K producteur du courant ; les bobines des deux électro-aimants A M B, A' M' B' ; les fils conducteurs f , f' , et l'appareil récepteur (lampe, moteur électrique, bain galvanoplastique, etc.). Mais ici se présente une particularité assez curieuse, sur laquelle nous devons nous arrêter un instant.

Si l'on a bien compris les dispositions qui précèdent, on voit que le courant électrique qui se développe dans l'anneau sous l'influence magnétique des deux électro-aimants A M B, A' M' B', est en même temps l'excitateur, celui qui met en jeu ces mêmes électro-aimants, ce que nous résumerons en disant : que dans la machine Gramme dynamo-électrique, *c'est le courant qui fait l'aimant, et, réciproquement, l'aimant qui fait le courant* ; d'où le nom de machines *auto-excitatrices* (machines s'excitant d'elles-mêmes), que l'on donne encore à cette machine et à toutes les autres du même genre. Or, cette réaction de l'effet sur la cause semble être, à première vue, une idée irréalisable, un cercle vicieux. On se demande comment, au moment de la mise en train de la machine, le premier courant peut naître dans l'anneau, puisque les électro-aimants sont alors au repos.

Sans doute, si les pièces de fer et de fonte qui forment les électro-aimants et le bâti de la machine ne possédaient aucune trace de magnétisme, le mouvement de l'anneau entre ces

pièces métalliques ne donnerait lieu à la production d'aucun courant. Mais, si parfaits que soient les noyaux de fer doux d'un électro-aimant, ils conservent toujours, après avoir fonctionné pendant quelque temps, une certaine quantité de magnétisme, que l'on a, pour cette raison, désigné sous le nom de *magnétisme rémanent*. D'un autre côté, nous savons qu'une masse quelconque de fer ou de fonte prend constamment, sous l'action magnétique de la terre, une certaine aimantation.

Il résulte de ces deux faits que le bâti de la machine qui nous occupe, possède toujours, même à l'état de repos, une certaine quantité de magnétisme, soit rémanent, soit dérivant de l'action terrestre. Au moment où commence le mouvement de l'anneau, celui-ci se trouve donc, à un degré moindre, mais suffisant, dans les mêmes conditions que l'anneau des machines magnéto-électriques ou à aimant fixe. Un courant, d'abord très faible, y prend naissance; ce courant, passant aussitôt dans les fils des électro-aimants, donne à ceux-ci une nouvelle force magnétique, sous l'influence de laquelle le courant de l'anneau, devenu plus fort à son tour, produit une nouvelle augmentation de magnétisme dans les électro-aimants, et ainsi de suite. Ajoutons qu'à défaut de magnétisme rémanent, l'influence du magnétisme terrestre suffirait seule pour la mise en activité de la machine; ce qui explique comment une machine neuve, fonctionnant pour la première fois, donne immédiatement de l'électricité.

Usages. La machine Gramme, telle que nous venons de la décrire, est à courants continus ou de même sens, lesquels conviennent à diverses applications industrielles, notamment au transport à distance des forces motrices et à la galvanoplastie. M. Gramme a construit sur le même principe, mais en modifiant les dispositions de l'anneau et de ses inducteurs, une autre machine, à courants alternatifs, dite *machine à lumière*, à cause de sa destination spéciale, comme générateur d'électricité, à certains appareils employés pour l'éclairage électrique, dont nous allons nous occuper dans le chapitre suivant.

Résumé.

I. Les machines d'induction actuellement destinées à la production industrielle de l'électricité forment deux classes : les machines dites *magnéto-électriques* et les machines dites *dynamo-électriques*.

II. Les machines magnéto-électriques sont celles dans lesquelles on emploie comme inducteurs des aimants ordinaires ou permanents ; les machines dynamo-électriques sont celles dans lesquelles les aimants ordinaires ou permanents sont remplacés par des électro-aimants.

III. Les machines magnéto-électriques dont l'emploi est aujourd'hui le plus répandu sont la machine de Nollet, dite de l'*Alliance*, spécialement destinée à l'éclairage des grands phares maritimes, et la machine de laboratoire, dite machine magnéto-électrique de *Gramme*.

IV. La machine de l'*Alliance*, qui n'est autre chose qu'une machine de Clarke agrandie et multipliée, donne des courants alternatifs ou alternativement de sens contraires, qui conviennent pour l'éclairage par l'arc voltaïque. Mais on peut, comme dans la machine de Clarke, *redresser* au besoin ces courants inverses, et les obtenir de même sens au moyen d'un commutateur.

V. La machine de laboratoire, dite machine magnéto-électrique de Gramme, se compose essentiellement d'un anneau de fer doux portant de nombreuses bobines en fil de cuivre, et tournant entre les pôles d'un aimant puissant courbé en fer à cheval. Cette machine donne des courants de même sens, qui, avec une vitesse moyenne de dix tours par seconde, produisent tous les effets d'une pile de huit à dix éléments de Bunsen.

VI. La machine Gramme dynamo-électrique ou *machine Gramme* proprement dite se compose d'un anneau semblable, sauf ses dimensions plus grandes, à celui de la machine magnéto-électrique du même inventeur. Cet anneau tourne entre deux puissants électro-aimants placés dans le circuit. Cette machine, très puissante, est surtout employée pour l'éclairage électrique et, comme moteur, pour le transport à distance des forces mécaniques.

CHAPITRE III.

Éclairage électrique. — Éclairage par l'arc voltaïque ; appareils à régulateurs ; bougies électriques. — Éclairage par incandescence ; incandescence à l'air libre ; incandescence dans le vide. — Lampe-soleil.

Éclairage électrique.

27. *Éclairage électrique.* — Après la machine à vapeur, dont notre siècle a vu surgir, comme par enchantement, les prodigieuses applications ; après le télégraphe électrique, qui couvre aujourd'hui de ses réseaux et met en communication entre eux et à travers les océans tous les pays civilisés, voici, à son aurore, la lumière électrique qui, toute pleine aussi de promesses, en partie déjà réalisées, vient à son tour, et non moins justement, passionner les esprits. Car en présence des merveilleux résultats obtenus depuis quelques années seulement, et que l'on a pu admirer dans leur ensemble à l'*Exposition internationale d'électricité de 1881*, il est permis de prévoir que dans un avenir plus ou moins éloigné, mais certain, l'éclairage électrique aura presque partout remplacé la lumière du gaz, qui déjà commence et continuera à lui céder peu à peu l'espace, à mesure que se perfectionneront nos appareils générateurs de l'électricité.

La production de la lumière électrique comprend deux procédés ou systèmes différents, d'où résulte aussi une différence marquée dans les qualités et les applications possibles de la lumière émise par l'un ou l'autre de ces deux systèmes, que l'on appelle : *l'éclairage par l'arc voltaïque* et *l'éclairage par incandescence*.

Éclairage par l'arc voltaïque.

28. *Éclairage par l'arc voltaïque.* — Rappelons ici, en les complétant, les détails que nous avons donnés (*Cours de Physique*, 299) sur le mode de formation et les propriétés générales

de l'arc voltaïque, découvert en 1801 par un des plus illustres savants de l'Angleterre, sir Humphrey Davy.

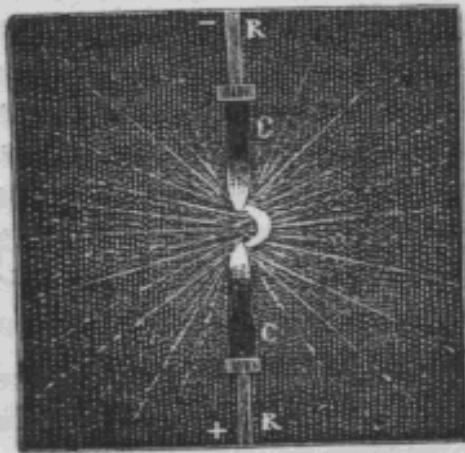


Fig. 24.

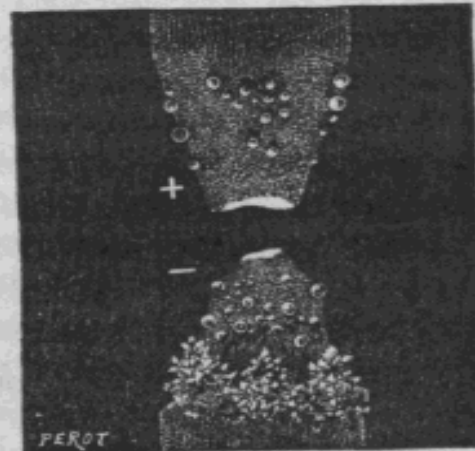


Fig. 25.

Deux petites baguettes de charbon C.C. (*fig. 24*), taillées en pointe, sont placées bout à bout, l'une à la suite de l'autre, et mises en communication avec les deux pôles d'une forte pile ou d'un générateur quelconque d'électricité. Les deux pointes étant en contact, on voit aussitôt se produire entre elles une lumière éblouissante, due à l'incandescence des charbons à leur point de jonction et à une petite distance au delà. Si la pile est suffisante, et si l'on écarte graduellement les charbons l'un de l'autre, jusqu'à une distance de quelques centimètres, la lumière, loin de s'éteindre, semble augmenter d'éclat, et l'on voit alors apparaître, entre les pointes des charbons, restées incandescentes, une lueur violacée qui généralement prend la forme d'un arc : d'où le nom d'*arc voltaïque*, qui lui a été donné.

En poursuivant l'observation du phénomène, on ne tarde pas à constater que la baguette de charbon qui communique avec le pôle positif de la pile se creuse rapidement, tandis que le charbon négatif, comme le représente la *fig. 25*, semble s'accroître, et se maintient en pointe mousse. Il y a donc transport du pôle positif au pôle négatif de particules de charbon, dont les unes se volatilisent, et les autres se déposent sur le bout incandescent de la baguette négative : ce qui prouve que l'arc voltaïque est formé de vapeur et de parti-

eules de carbone, à travers lesquelles passe le courant qui les entraîne d'un pôle à l'autre. Cet arc peut donc être considéré comme un conducteur interposé dans le circuit.

La résistance considérable qu'oppose au passage du courant l'arc voltaïque explique la haute température qui s'y développe, la plus élevée de toutes celles que nous connaissons. Tous les corps sans exception y sont fondus ou volatilisés. Ajoutons que l'arc voltaïque, comme les courants mobiles dont nous avons parlé précédemment (*Cours de Physique*, 312), peut être dévié de sa direction par le voisinage d'un courant ou d'un aimant.

Mais ce qu'il importe surtout de remarquer, au point de vue qui nous occupe, c'est que la puissante lumière à laquelle donne lieu ce phénomène vient bien moins de l'arc lui-même que de l'*incandescence des pointes de charbon* qui transmettent le courant. Pour que cette lumière conserve tout son éclat, il faut que l'écart des deux charbons soit maintenu dans une certaine limite, laquelle varie d'ailleurs avec l'intensité du courant. Si l'on dépasse cette limite, l'arc et avec lui les pointes incandescentes des charbons s'éteignent aussitôt, et il faut alors, pour les rallumer les ramener en contact, puis les écarter de nouveau. L'application de l'arc voltaïque à l'éclairage exige donc certaines dispositions particulières que nous allons rapidement examiner en les groupant sous quatre chefs : 1° les *charbons* ; 2° les *régulateurs mécaniques* ; 3° les *bougies* ; 4° les *générateurs d'électricité*.

1° *Charbons*. — Les charbons doivent être durs, compacts, assez bons conducteurs de l'électricité, et ne s'user que le plus lentement possible. Pendant longtemps on a fait usage du *charbon de cornue*, espèce de coke qui se dépose dans les cornues où l'on prépare le gaz d'éclairage par la distillation de la houille ; mais plusieurs inconvénients attachés à l'emploi de ce charbon, notamment la difficulté de le disposer en baguette minces, longues et suffisamment résistantes, faisaient grandement désirer son remplacement par un autre plus solide.

Après de nombreuses recherches, faites par divers physiciens,

un de nos électriciens les plus distingués, M. Edmond Carré, est enfin parvenu à résoudre complètement ce problème par l'invention d'un charbon artificiel, fabriqué au moyen d'un mélange de coke finement pulvérisé, de noir de fumée préalablement calciné et de sirop de sucre additionné d'un peu de gomme. Ce mélange, d'abord à l'état pâteux, est soumis à l'action d'une presse hydraulique qui le pousse dans une filière, où il se divise en baguettes de différentes grosseurs, auxquelles on donne ensuite la densité et la dureté nécessaires, en les introduisant successivement dans un four, puis dans des creusets maintenus pendant plusieurs heures au rouge vif. Nous ne ferons que rendre justice à M. Edmond Carré, en disant que l'emploi de ces baguettes, aujourd'hui très répandu en France et à l'étranger, a contribué pour une large part au succès de la lumière électrique.

2° *Régulateurs mécaniques.* — L'expérience a démontré que la longueur la plus favorable à donner à l'arc voltaïque, c'est-à-dire à l'écart entre les deux pointes opposées des charbons, est *la moitié de la distance* au delà de laquelle l'arc s'éteindrait subitement. A l'air libre et dans les conditions ordinaires, cet écart doit être d'environ un centimètre. Mais l'usure des charbons, tant par leur combustion dans l'air que par le transport de leurs molécules de l'un à l'autre, augmentant incessamment la distance qui les sépare, ne tarderait pas à amener d'abord un affaiblissement progressif de la lumière et finalement l'extinction de l'arc. Il a donc fallu, pour utiliser la lumière électrique, avoir recours à des appareils ayant pour fonction de rapprocher les deux charbons à mesure qu'ils s'usent, et de maintenir ainsi leur écart constant.

Les premiers appareils construits dans ce but, et que l'on désigne sous le nom de *régulateurs mécaniques*, sont ceux de Foucault, Dubosq et Serrin. Tous consistent en un système de roues dentées dont le mouvement, commandé par un ressort d'horlogerie ou par des poids, tend à pousser constamment les charbons l'un vers l'autre. Ce mouvement est réglé par un électro-aimant placé dans le courant même qui produit l'éclair-

rage, et devant lequel est une pièce de contact en fer doux munie d'un ressort antagoniste.

Tant que les charbons sont à la distance voulue, l'intensité du courant donne à l'électro-aimant la force nécessaire pour fixer contre lui la pièce de contact, qui, dans cette position, vient buter contre une des roues dentées de l'appareil, dont elle arrête le mouvement. Le rapprochement des charbons se trouve donc ainsi suspendu. Mais bientôt l'écart de ceux-ci augmentant par l'usure, le courant s'affaiblit et avec lui le magnétisme de l'électro-aimant. Il arrive donc un moment où la pièce de contact, obéissant à l'action de son ressort, s'éloigne de l'électro-aimant, et dégage alors le système des engrenages, lequel se remet aussitôt en mouvement, et rapproche les charbons. Mais dès que ceux-ci sont revenus à leur distance normale, le courant et le magnétisme de l'électro-aimant reprenant leur intensité première, la pièce de contact est attirée de nouveau, et arrête une seconde fois l'appareil, jusqu'à ce qu'une nouvelle usure des charbons reproduise la même série d'effets, et ainsi de suite. Ces arrêts et ces reprises successives du mouvement des engrenages ayant lieu dans des limites très étroites, les charbons sont donc maintenus à un écart sensiblement constant, et le centre lumineux reste ainsi à peu près fixe dans l'espace.

3° *Bougies électriques.* — Aussi longtemps que la lumière voltaïque dut recourir à l'emploi des régulateurs mécaniques, dont nous venons d'indiquer sommairement le principe, appareils compliqués, dispendieux, exigeant une surveillance de tous les instants, la lumière électrique n'eut, et ne pouvait avoir que des applications fort restreintes. L'éclairage de quelques phares maritimes, des effets scéniques dans les théâtres, un appoint aux lampions des fêtes publiques, certaines expériences de laboratoire, telles furent alors, et telles étaient encore dans ces derniers temps ses seules attributions, lorsqu'un officier russe, M. Jablochhoff, trouva, en 1876, le moyen de supprimer entièrement les régulateurs, et fit aussitôt entrer de plain-pied la lumière électrique dans le domaine de la pratique journalière.

L'idée de M. Jablochhoff, idée simple comme toutes celles qui procèdent d'un trait de génie, fut d'abord de placer les deux baguettes de charbon, non plus sur une même ligne et bout à bout, mais de les disposer côte à côte, parallèlement entre elles, et à une certaine distance l'une de l'autre (fig. 26). Il n'y avait plus dès lors à se préoccuper du rapprochement des charbons, dont les extrémités libres, en se consumant, laissaient toujours entre elles le même écart.

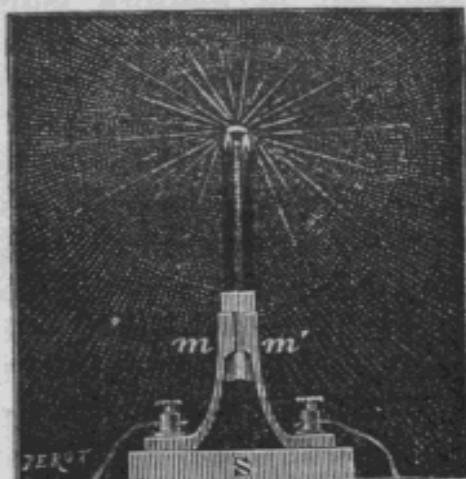


Fig. 26.

Restait à réunir les deux baguettes par une bande de substance isolante, capable de se brûler ou de se volatiliser en même temps que les charbons, afin de laisser toujours le passage libre à l'arc voltaïque. La substance choisie à l'origine fut le kaolin, espèce d'argile blanche avec laquelle on fabrique la porcelaine. Mais on dut bientôt renoncer à cette matière, qui avait l'inconvénient de se fondre à son extrémité et de créer ainsi entre les pointes des charbons un conducteur liquide qui, en livrant passage au courant, nuisait à la formation de l'arc. Après plusieurs essais, le kaolin fut enfin remplacé par un mélange de deux parties de plâtre (sulfate de chaux), et d'une partie de sulfate de baryte. Ce mélange se volatilise sans se fondre, et fournit de plus des parcelles incandescentes qui augmentent l'éclat de la lumière.

La bougie Jablochkoff, telle qu'on l'emploie aujourd'hui, se compose donc, en résumé, de deux fines baguettes de charbon

d'environ 4 millimètres de diamètre et de 25 à 30 centimètres de longueur, placées parallèlement et séparées par une bande isolante (plâtre et sulfate de baryte) de 3 millimètres de largeur sur 2 d'épaisseur. Les bouts supérieurs de ces baguettes, taillés en pointe, sont reliés par une petite amorce formée d'un mélange de coke en poudre fine et de plombagine délayés dans de l'eau gommée. Cette amorce ne sert qu'une fois, au moment de l'allumage, pour livrer passage au courant, qui sans elle serait arrêté par la matière isolante. Son unique fonction consiste donc à permettre la formation de l'arc voltaïque, qui, une fois établi, maintient la continuité du circuit entre les deux charbons jusqu'à usure totale de la bougie.

Chaque bougie, ainsi préparée, est fixée verticalement à un support métallique S portant une pince à ressort dont les deux mâchoires m et m' , complètement isolées l'une de l'autre, sont en communication avec le fil qui transmet les courants alternatifs que l'on emploie de préférence pour alimenter ces bougies. Chacun de ces courants, successivement de sens contraire, montant dans l'un des charbons, redescend par l'autre, après avoir traversé l'arc voltaïque qu'il entretient aux extrémités de leurs pointes incandescentes. On pourrait, sans doute, faire fonctionner les bougies électriques avec des courants continus, c'est-à-dire de même sens ; mais comme le charbon positif s'userait alors deux fois plus vite que le négatif, il faudrait pour maintenir les deux pointes au même niveau, donner au premier une grosseur double.

Un des principaux avantages de la bougie Jablochkoff est le moyen qu'elle nous offre d'obtenir avec elle, beaucoup plus facilement qu'avec tous les autres systèmes d'éclairage par l'arc voltaïque, la *division* sur un seul courant de la lumière électrique. Pourvu que la source d'électricité ait une tension suffisante pour permettre au courant de franchir plusieurs arcs successifs, rien n'empêche de placer, à des distances plus ou moins grandes les unes des autres, plusieurs bougies dans un même circuit, qui toutes brûleront avec un même éclat.

C'est surtout à cause de ce dernier mérite que le système Jablochkoff a pu donner à l'éclairage électrique la popularité

dont il jouit maintenant, non seulement à Paris, où depuis quelques années déjà la place de l'Opéra, de grands magasins, de grands hôtels, l'Hippodrome, etc., sont éclairés de cette façon, mais encore dans la plupart des grandes villes de l'Europe et de l'Amérique.

Un tel succès ne pouvait manquer d'exciter le zèle des inventeurs, désireux d'attacher leur nom à un perfectionnement quelconque de ces merveilleuses bougies. Nous nous bornerons à citer les efforts tentés dans cette voie par MM. Wilde, Jamin, Debrun, Gérard, etc., ne pouvant, sans sortir des limites d'un livre élémentaire, entrer ici dans les détails techniques d'une foule d'appareils plus ou moins ingénieux, mais qui, jusqu'à présent, ont dû laisser le champ libre au système Jablochhoff, au moins pour l'éclairage usuel. Il serait cependant injuste de ne pas associer à ce succès le nom de M. Edmond Carré, qui, par l'invention de ses charbons artificiels, fournissait à M. Jablochhoff, dès la création de sa bougie, la matière première qui devait en assurer la réussite.

Pour atténuer le trop vif éclat de la lumière, qui pourrait blesser la vue, on enferme les bougies dans des globes de verre opalin, qui ont pour effet, en diffusant ses rayons, de ne plus présenter à l'œil qu'une masse lumineuse inoffensive. On peut aussi, comme pour les lampes ordinaires, adapter à ces bougies des abat-jour, qui en projettent la lumière sur les surfaces où elle doit être utilisée.

4° *Générateurs d'électricité.* — La grande économie résultant de l'emploi des machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques, qui ne brûlent que du charbon au lieu de consommer du zinc, comme le font les piles ordinaires, a depuis longtemps fait abandonner celles-ci pour l'éclairage électrique, sauf dans quelques cas où le manque de place ne permettait pas l'installation d'une machine et de son moteur. On peut dire même que sans les machines, avec les piles seules pour l'alimenter, cet éclairage n'aurait jamais pu, jusqu'à présent du moins, entrer dans la pratique usuelle.

Nous avons vu que les machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques peuvent donner, soit directement, soit au

moyen de commutateurs, tantôt des courants continus, tantôt des courants alternatifs. Si l'usure des charbons, dans l'éclairage par l'arc voltaïque, se faisait, quel que fût le sens du courant, d'une manière égale pour chacun d'eux, on pourrait employer indifféremment l'un ou l'autre de ces deux systèmes. Mais comme par suite du transport de parcelles charbonneuses du charbon positif au charbon négatif, le premier s'use plus vite que le second, il convient, pour éviter cet effet nuisible, de faire usage des machines à courants alternatifs, qui, changeant de sens à chaque instant, maintiennent l'usure égale des deux baguettes. Telles sont les machines magnéto-électriques, particulièrement celle dite « *de l'Alliance* », et la machine *dynamo-électrique à lumière* de Gramme, que nous avons précédemment décrites.

Cette dernière machine, avec une vitesse de 1000 à 1200 tours par minute, peut alimenter jusqu'à soixante bougies, espacées de trente à quarante mètres, et équivalant chacune à près de 100 lampes Carcel. La machine de l'Alliance et autres du même genre, moins puissantes peut-être, mais d'un fonctionnement plus régulier, sont plus spécialement applicables au service des grands phares maritimes, pour lesquels on préfère aussi les lampes à régulateurs mécaniques, qui, mieux que tout autre système, maintiennent rigoureusement la lumière au foyer des réflecteurs ou des lentilles destinés à la projeter dans l'espace en un faisceau de rayons parallèles (voyez le *Cours de Physique*, chapitre XXXIII).

Éclairage par incandescence.

29. *Éclairage par incandescence.* — La grande puissance et la longue portée de la lumière émise par l'arc voltaïque ont permis de l'appliquer avec un plein succès à l'éclairage des places publiques, des phares maritimes, ainsi qu'aux projections lumineuses nécessaires pour guider la marche des navires, les opérations de l'artillerie, du génie militaire, pour éclairer de vastes chantiers, etc. Mais ces qualités mêmes, si précieuses quand il s'agit d'éclairer au loin, rendaient cette

lumière impropre aux usages domestiques et aux besoins de l'industrie privée. Ce rôle, plus modeste, mais non moins utile, paraît, dès aujourd'hui, devoir être dévolu à *l'éclairage par incandescence*.

On distingue deux modes d'éclairage électrique par incandescence, savoir : *l'incandescence à l'air libre* et *l'incandescence dans le vide*.

Incandescence à l'air libre.

50. Incandescence à l'air libre. — Nous avons vu que dans l'éclairage par l'arc voltaïque, c'est l'incandescence des deux pointes des charbons, placées en regard l'une de l'autre, qui produit la plus grande partie de la lumière. L'arc lui-même, bleuâtre ou violacé, ne doit son éclat qu'aux parcelles charbonneuses qu'il entraîne d'un pôle à l'autre : on peut donc le supprimer. La lumière perdra sans doute un peu de son intensité, mais elle y gagnera en blancheur par la suppression des rayons bleus en excès qui accompagnent les irradiations de l'arc. Il suffit pour cela de maintenir les charbons en contact. On obtient alors *l'éclairage par incandescence à l'air libre*, dont l'idée première appartient à notre savant et habile ingénieur M. Émile Reynier (1877).

Pour réaliser ce nouveau système d'éclairage, il devenait toutefois nécessaire, dans la pratique, d'apporter quelques modifications à la forme et à la position des charbons. Au lieu de deux baguettes placées bout à bout, M. Reynier fut conduit à n'en employer qu'une seule *c* (*fig. 27*) et à remplacer l'autre par un disque de charbon C, mobile sur un axe horizontal. La baguette *c*, maintenue verticalement, vient appuyer par son bout inférieur sur le contour de ce disque, mais un peu en avant de son axe ; de sorte qu'en descendant par son propre poids, et par le poids de la tige métallique qui la supporte, elle imprime au disque, à mesure qu'elle se consume, un mouvement lent de rotation.

La baguette *c* communique avec le pôle positif de la source électrique, tandis que le disque C communique, par son axe et par la pince métallique D qui porte cet axe, avec le pôle

négatif. Toutefois, cette communication de la baguette avec le pôle positif n'a lieu que vers sa pointe, sur une longueur de

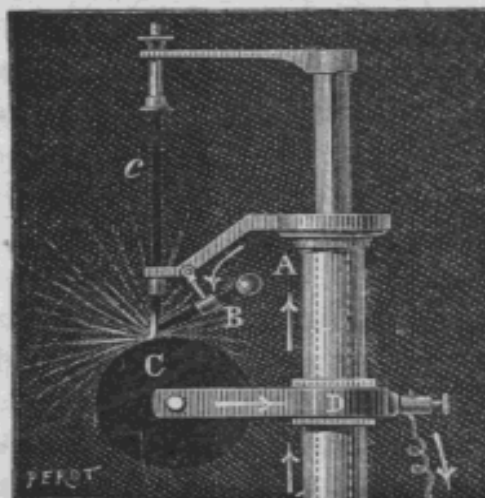


Fig. 27.

quelques millimètres seulement, au moyen de la colonne métallique A et d'un petit cylindre de charbon B, dont l'extrémité arrondie est constamment maintenue par un ressort en contact avec elle.

En résumé, le courant parti du pôle positif monte, comme l'indiquent les flèches, par la colonne A, passe de là dans le petit cylindre de charbon B, puis, *par le bout de la baguette c*, dans le disque C, pour aller rejoindre par la pince métallique D le pôle négatif du générateur. C'est donc entre ce cylindre B et le disque C que se produit la lumière, due à l'incandescence de l'extrémité de la baguette et des divers points du contour du disque sur lesquels celle-ci vient successivement s'appuyer.

Tel est, en principe, le système d'éclairage électrique par l'incandescence à l'air libre, imaginé par M. Émile Reynier. Ce système a été, dans ces derniers temps, diversement modifié. Nous citerons, parmi ces innovations, celle de M. Werdermann, laquelle consiste dans le renversement de l'appareil. Le disque de charbon placé en bas, dans la lampe Reynier, projetait dans le champ lumineux une ombre nuisible. M. Wer-

dermann a eu l'heureuse idée de le placer au-dessus de la baguette, en faisant remonter celle-ci au moyen d'un contre-poids. Si simple qu'elle paraisse, cette innovation n'a pas peu contribué au succès de ce mode d'éclairage, en permettant l'installation de lustres élégants, à foyers nombreux, dans les théâtres, dans de vastes salons, etc. Plusieurs lampes de ce genre, installées à notre Exposition d'électricité, éclairaient d'une façon splendide le grand vestibule d'entrée, le salon du Président, une salle à manger, et la charmante scène du petit théâtre agencé à cet effet.

Incandescence dans le vide.

51. *Incandescence dans le vide.* — L'incandescence à l'air libre, telle que nous venons de la décrire, n'est, en réalité, qu'une modification, ou, pour mieux dire, une variété de l'éclairage par l'arc voltaïque, dans laquelle celui-ci est simplement supprimé ou plutôt réduit à des dimensions inappréciables par le rapprochement des charbons. L'*incandescence dans le vide* forme, au contraire, un système à part et tout à fait distinct du précédent, en ce sens que le corps éclairant interposé dans le circuit, au lieu d'être divisé en deux fragments que l'on peut à volonté éloigner ou rapprocher, conserve d'un pôle à l'autre sa continuité.

Nous avons vu (*Cours de Physique*, 297) qu'en réunissant, sur une longueur de quelques centimètres, les deux conducteurs d'une forte pile par un fil mince de platine ou de tout autre métal difficilement fusible, ce fil, par suite de sa résistance au passage du courant, s'échauffe, devient rouge, puis tout à fait blanc, et ne tarde pas à se fondre, et même à se volatiliser, si le courant électrique est suffisamment intense.

Tel est le principe sur lequel repose l'éclairage par incandescence dans le vide, que l'on désigne généralement, et avec raison, sous le nom d'*éclairage par incandescence* proprement dite, pour le mieux distinguer des autres systèmes.

La première lampe à incandescence proprement dite fut imaginée et exécutée, en 1841, par un ingénieur anglais, Fré-

déric Moleyns. Elle se composait (*fig. 28*) d'une spirale en fil de platine P, enfermée dans un globe de cristal, et dont les deux extrémités communiquaient au dehors avec les deux rhéophores RR d'une pile voltaïque. Mais la difficulté de régler l'intensité du courant de manière à éviter la fusion du métal rendit infructueux ce premier essai. D'autres essais du même genre, renouvelés à diverses reprises, eurent un sort pareil, jusqu'au jour où ce système d'éclairage devait enfin recevoir sa solution pratique par la substitution d'un fil de charbon au fil de platine, le charbon étant, comme on le sait, complètement infusible.

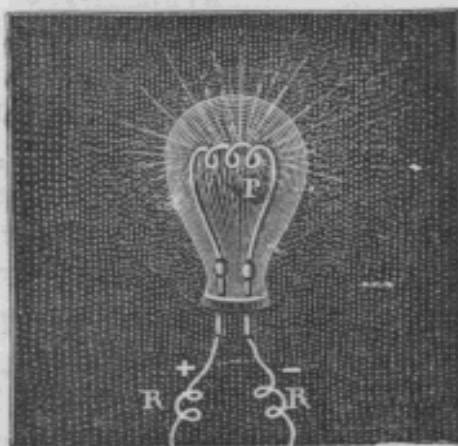


Fig. 28.

Ce nouveau procédé, dû aux recherches de trois électriciens également célèbres, Edison, Swan et Maxim, repose donc essentiellement sur l'emploi, comme corps éclairant, d'un filament de charbon remplaçant le fil de platine de la lampe Moleyns.

La préparation de ces charbons, qui devaient être minces comme un cheveu, et présenter en même temps assez de flexibilité et de fermeté pour se laisser enrouler et conserver leur forme, n'était pas, on le conçoit, chose facile à réaliser. Après de nombreux essais avec diverses substances d'origine végétale, notamment avec des fils de coton, du carton de Bristol, plusieurs espèces de papier, etc., M. Edison parvint enfin à résoudre le problème de la manière la plus satisfaisante, en fabriquant ses charbons avec les fibres d'une espèce de bam-

bou, très commune au Japon. Ces fibres, très longues et d'une grande souplesse, peuvent prendre facilement toutes les formes voulues, après quoi il ne reste plus qu'à les carboniser en vases clos. La forme adoptée par M. Edison, comme lui ayant paru la plus favorable, est celle d'un fer à cheval allongé.

Ainsi préparés, ces charbons C (*fig. 29*) sont ensuite enfermés, soit isolément, soit au nombre de deux, trois et même quatre, suivant la quantité de lumière qu'on veut obtenir, dans des ampoules de verre mince, ayant la forme d'une poire, et y sont maintenus verticalement par deux petites pinces, ter-

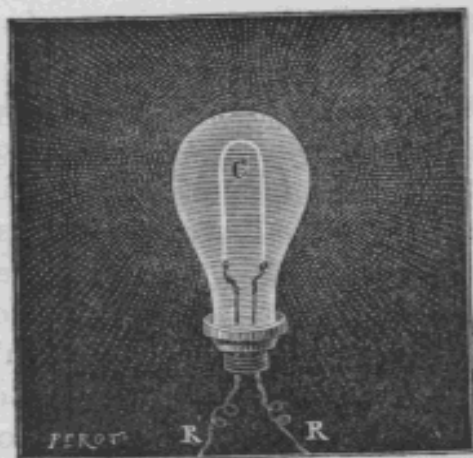


Fig. 29.

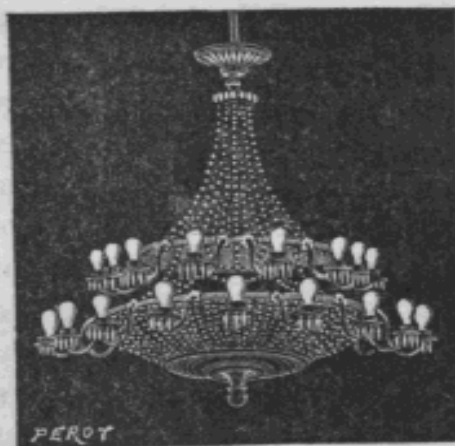


Fig. 30.

minant les fils en platine R et R qui servent en même temps à livrer passage au courant électrique. Il va sans dire que chaque ampoule doit être le mieux possible purgée d'air, ce qui a pour effet, non seulement d'empêcher les charbons de brûler et de disparaître instantanément, mais encore d'augmenter l'éclat de la lumière.

Telle est la lampe Edison, le prototype de ce genre de lampes, dont toutes les autres, celles de Swan et de Maxim, en particulier, ne diffèrent que par des détails accessoires.

Sitôt que le courant passe, l'incandescence du charbon se produit, et projette alors une lumière blanche, fixe et douce à la vue, malgré son grand pouvoir éclairant. Ajoutons que cette petite lampe, si fragile en apparence, est en réalité une des

plus solides que l'on connaisse. Le mince fil de charbon, que l'on croirait devoir se briser à la première épreuve, quand on songe à l'énorme température qu'il subit, résiste avec une merveilleuse facilité. On en a cité qui ont fourni, sans périr, jusqu'à huit cents heures d'éclairage, c'est-à-dire un service quotidien de trois à quatre mois et plus.

L'excellence de la lumière produite par ce système, son grand éclat, sa blancheur, sa fixité absolue, son innocuité pour la vue, sont autant de qualités qui, jointes à la possibilité d'alimenter un très grand nombre de foyers avec un seul générateur d'électricité, contribueront puissamment à en généraliser l'emploi dans l'éclairage privé. Ces petites lampes peuvent s'adapter à tous les usages domestiques, soit comme simples bougies, éclairant, par exemple, un cabinet de travail, soit groupées de manière à former des lustres (*fig. 30*), des guirlandes, des candélabres dont les visiteurs de notre Exposition d'électricité ont pu admirer l'élégance et le superbe effet.

Le seul reproche que l'on puisse faire encore à ce mode d'éclairage, c'est la trop grande dépense d'électricité qu'il exige, et, par suite, son prix trop élevé. Mais la voie est ouverte, et tout fait espérer qu'on ne tardera pas à trouver, soit par la pile, soit par l'électro-dynamisme, des générateurs électriques moins dispendieux que ceux dont nous disposons aujourd'hui.

Lampe-soleil.

52. Lampe-soleil. — Nous croyons devoir dire ici quelques mots de cette nouvelle lampe, qui, en raison de la place à part qu'elle occupe dans la classification des divers genres d'éclairage par l'électricité, nous offre un certain intérêt scientifique.

Le principe de cette lampe n'est autre, en effet, que celui sur lequel repose la *lumière Drummond* au gaz oxhydrique (mélange d'hydrogène et d'oxygène), dont le vif éclat résulte, comme on le sait, de l'incandescence d'un petit fragment de chaux placé dans la flamme de ce mélange gazeux, flamme peu

éclairante par elle-même, mais douée d'une très haute température (voyez notre *Cours de Chimie*, page 51). Dans la *lampe-soleil*, la lumière, contrairement à ce qui a lieu dans tous les autres systèmes d'éclairage électrique, n'émane plus directement des charbons. Elle provient presque uniquement de l'incandescence d'un petit bloc de marbre blanc (carbonate de chaux) ou de magnésie comprimée, placé sur le trajet de l'arc voltaïque, lequel joue à son égard le même rôle que celui de la flamme oxhydrique sur le fragment de chaux de la lumière Drummond.

La *fig. 31* représente cet appareil d'après le dernier type construit par son inventeur, M. L. Clerc. Le petit bloc de marbre blanc ou de magnésie B est fixé entre les extrémités de deux baguettes de charbon demi-cylindriques C C', inclinées l'une vers l'autre sur un angle d'environ 15 degrés, et soutenues en dehors par deux appuis D D', également en

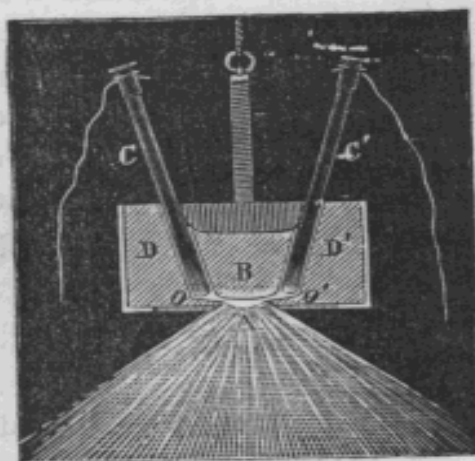


Fig. 31.

marbre ou en une pierre quelconque, le tout maintenu par une garniture en tôle. Les pointes des deux charbons viennent aboutir à deux petites ouvertures oo', ménagées entre le bloc de marbre central B et les appuis extérieurs D D', afin de livrer passage à l'arc voltaïque A, qui vient ainsi, d'un bout à l'autre des deux charbons entre lesquels il se produit, lécher la face inférieure du bloc central B. Enfin, pour que le courant, au

moment de l'allumage, puisse passer entre les deux pointes des charbons, celles-ci sont reliées entre elles par un mince filet de plombagine, préalablement appliqué sur la face inférieure du bloc central, suivant le trajet de l'arc.

La lumière de la lampe-soleil, dans la production de laquelle l'arc voltaïque n'intervient plus que par sa haute température, pour porter à l'incandescence une surface calcaire, possède, entre autres qualités, une fixité presque absolue et, chose précieuse, une teinte légèrement dorée, analogue à celle de la lumière solaire, ce qui justifie le nom donné à cette lampe, que l'on pourrait encore et tout aussi bien appeler *lampe Drummond électrique*.

L'expérience a démontré que, bien que pouvant se prêter à toutes les applications usuelles de la lumière électrique, la lampe-soleil convient plus spécialement à l'éclairage des galeries de tableaux ou autres objets d'art. Ainsi qu'on a pu le voir dans une des salles de notre Exposition d'électricité, où plusieurs de ces lampes éclairaient une riche collection de toiles de tout genre, les couleurs ne subissent aucune altération; peut-être même les reliefs et le dessin étaient-ils mieux rendus que par la lumière du jour. C'est pour cela que l'éminent architecte de notre grand Opéra, M. Garnier, a fait choix de la lampe-soleil pour l'éclairage des magnifiques peintures qui en décorent le foyer.

Résumé.

I. L'éclairage électrique comprend deux procédés ou systèmes différents : *l'éclairage par l'arc voltaïque* et *l'éclairage par incandescence*.

II. *L'éclairage par l'arc voltaïque* s'obtient au moyen de deux baguettes de charbon placées d'abord bout à bout dans le circuit d'une forte pile ou d'une machine magnéto ou dynamo-électrique, et que l'on écarte ensuite à une petite distance (un centimètre environ) l'une de l'autre.

III. La puissante lumière obtenue par ce mode d'éclairage provient de l'incandescence des deux pointes de charbon qui transmettent le courant, bien plus que de l'arc lui-même, dont la lumière a une teinte bleuâtre.

IV. Pour que la lumière voltaïque conserve tout son éclat, il faut que l'écart des deux charbons soit régulièrement maintenu, ce que l'on obtient soit avec des *régulateurs* mécaniques, soit au moyen des *bougies électriques* (bougies Jablochkoff).

V. L'*éclairage par incandescence* comprend deux modes particuliers : l'*incandescence à l'air libre* et l'*incandescence dans le vide*.

VI. L'*incandescence à l'air libre* ne diffère de l'éclairage par l'arc voltaïque que par le maintien des charbons en contact permanent. L'une des baguettes est remplacée par un disque mobile en charbon, sur le contour duquel vient s'appliquer la pointe de l'autre baguette maintenue verticalement (système Reynier).

VII. L'*incandescence dans le vide* s'obtient au moyen d'un filament de charbon, placé dans une ampoule en verre où l'on a fait le vide. Ce filament, par suite de sa résistance au passage du courant, s'échauffe au rouge blanc, et projette alors une lumière blanche, d'un grand pouvoir éclairant.

VIII. La *lampe-soleil* repose sur le même principe que l'éclairage connu sous le nom de *lumière Drummond*, en ce sens que l'arc voltaïque y remplace simplement la flamme du gaz oxhydrique, pour porter à l'incandescence une surface calcaire. Sa lumière, d'une teinte légèrement dorée, analogue à celle de la lumière solaire, convient particulièrement à l'éclairage des galeries de tableaux ou autres objets d'art.

CHAPITRE IV.

Suite des applications modernes de l'électricité. — Réversibilité des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques. — Transport de la force motrice. — Moteurs électriques. — Téléphone. — Microphone. — Photophonie; photophone musical; photophone d'articulation. — Piles secondaires ou accumulateurs électriques.

Réversibilité des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques.

55. *Réversibilité des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques.* — Nous touchons ici à un des faits les plus importants de la physique moderne, non seulement au point de vue scientifique, mais encore et surtout en raison des immenses services qu'il est appelé à rendre à l'industrie.

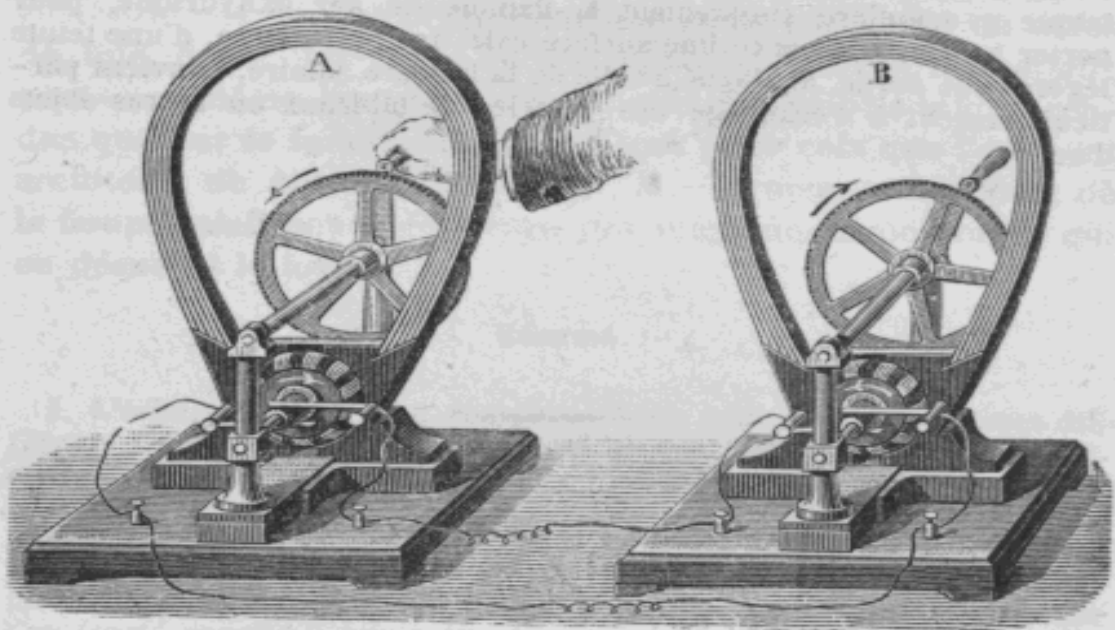


Fig. 32.

Prenons (*fig. 32*) deux machines magnéto-électriques du même modèle et à courants continus, soit deux petites machines Gramme de laboratoire A et B (25), lesquelles se pré-

lent merveilleusement à l'expérience qu'il s'agit de faire. Réunissons leurs fils conducteurs de manière à les placer l'une et l'autre dans le même circuit. Si nous faisons tourner à la main la machine A, la machine B, sous l'influence du courant qu'elle en reçoit, *se met aussitôt à tourner en sens inverse*, et, si le circuit extérieur est assez court pour ne pas présenter de résistance notable, *avec une vitesse sensiblement égale*. Si nous renversons le mouvement de la machine A, le mouvement de la machine B se renverse également. Enfin si, quittant la machine A, nous tournons la manivelle de la machine B, la machine A obéit à son tour et se met en mouvement sous l'influence du courant qu'elle reçoit alors de B.

Une expérience analogue peut être faite avec une seule machine placée dans le circuit d'une pile ordinaire, soit une pile de Bunsen, de 3 ou 4 éléments. Aussitôt que le courant passe, la machine se met à tourner, ce qui montre, plus nettement encore que l'expérience précédente, la transformation de l'électricité en mouvement. En plaçant un galvanomètre dans le circuit, on constate, conformément à la loi de Lens, que le courant qui fait tourner la machine est l'inverse du courant que produirait celle-ci tournée à la main dans le même sens.

Si, au lieu de deux machines magnéto-électriques ou à aimant permanent, on met en expérience une seule machine de ce genre M, et une machine dynamo-électrique ou à électro-aimant D, celle-ci se mettra encore à tourner dès qu'on fera tourner à la main la machine M; mais on observe alors que si l'on renverse le mouvement primitivement donné à la machine magnéto-électrique M, et par conséquent le sens du courant qu'elle engendre, la machine dynamo-électrique D continuera à tourner dans le même sens. Cette particularité s'explique aisément, si l'on considère qu'en même temps que le courant envoyé par la machine M se renverse, la polarité des électro-aimants de la machine D, dans lesquels passe ce même courant, se renverse également. Il y a donc là deux inversions dont l'une détruit l'effet de l'autre, et maintient ainsi dans la machine qui reçoit le courant le même sens de rotation.

Enfin, si l'on accouple dans le même circuit deux machines

dynamo-électriques, le mouvement donné à l'une d'elles par une force mécanique quelconque fera tourner l'autre dans les mêmes conditions, c'est-à-dire dans un sens invariable, quelle que soit la direction du mouvement imprimé à la première machine par la force mécanique.

Telles sont les expériences qui démontrent la *réversibilité* des machines magnéto-électriques et dynamo-électriques, à courants continus, ou, en d'autres termes, la *transformation par elles de la force mécanique en électricité, et réciproquement de l'électricité en force mécanique*. Ce retour de l'effet à la cause, dont nous avons vainement cherché l'interprétation théorique dans les divers traités de physique ou autres ouvrages spéciaux, peut être expliqué de la manière suivante.

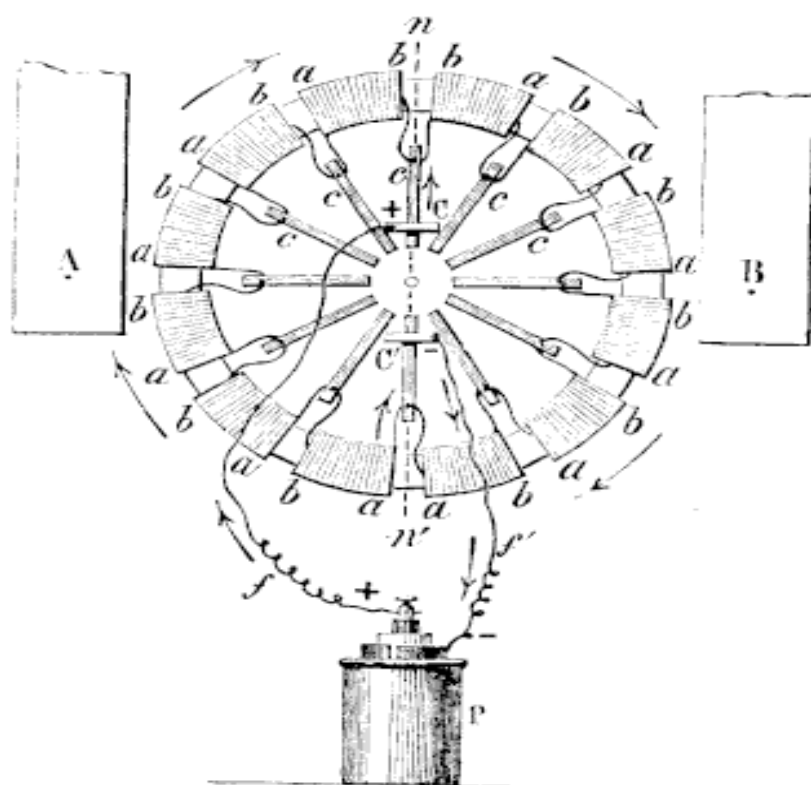


Fig. 33.

34. *Théorie de la réversibilité.* — Reprenons (fig. 33) l'anneau Gramme, tel que nous l'avons décrit plus haut, placé entre les pôles A et B d'un aimant permanent, avec ses deux

collecteurs C et C', fixés dans la ligne neutre ou de partage nn' . Mettons ces deux collecteurs en communication avec les pôles d'un générateur quelconque d'électricité, soit le collecteur C avec le pôle positif et le collecteur C' avec le pôle négatif d'une pile de Bunsen P, le tout formant ainsi un circuit fermé, comprenant la pile, les fils conducteurs ff' , les deux collecteurs C et C', les lames rayonnantes $cccc$ et les bobines communiquant avec celles-ci de la manière précédemment indiquée.

Les choses étant ainsi disposées, le courant, parti du pôle positif de la pile, passera par le collecteur C, puis par la lame rayonnante c en contact avec ce dernier, et, arrivé là, se divisera en deux courants qui, passant par les fils des bobines, l'un à droite et l'autre à gauche de la ligne de partage nn' , viendront se rejoindre au collecteur C', où ils se réuniront pour ne plus former qu'un seul courant retournant au pôle négatif de la pile.

Les fils des bobines communiquant tous entre eux par les lames rayonnantes $cccc$ auxquelles ils sont soudés, et étant tous enroulés dans le même sens autour du noyau de fer doux qui forme la partie centrale de l'anneau, représentent dans leur ensemble une hélice continue, soit *dextrorsum*, soit *sinistrorsum*, suivant le sens de l'enroulement. Supposons-la *dextrorsum*.

Nous avons vu (*Cours de Physique*, 323) que si dans une hélice *dextrorsum* traversée par un courant on place un barreau de fer ou d'acier, celui-ci s'aimantera aussitôt, et dans un sens tel que son pôle boréal correspondra à l'entrée et son pôle austral à la sortie du courant. Or, si l'on a bien compris la marche du courant dans les fils des bobines, où il arrive par intermittences à chaque contact des lames mobiles $cccc$ avec le collecteur C, il est facile de voir, d'après la loi d'Ampère, que toutes les portions du noyau circulaire de fer doux que recouvrent les bobines (l'hélice de celles-ci étant, nous l'avons dit, supposée *dextrorsum*) se polariseront de telle façon que leurs pôles boréal b et austral a seront dirigés dans chacune des moitiés latérales de l'anneau, les premiers $bbb...$ vers l'entrée et les seconds $aaa...$ vers la sortie du courant. Il résultera de cette distribution magnétique :

1^o Que dans la moitié supérieure du demi-anneau, située à droite de la ligne de partage nn' , les pôles mobiles aaa , orientés vers le pôle B de l'aimant permanent, seront attirés par celui-ci, tandis que dans la moitié inférieure de ce même demi-anneau les pôles bbb , étant également orientés vers B, seront repoussés ;

2^o Que dans la moitié inférieure du demi-anneau, située à gauche de la ligne de partage nn' , les pôles mobiles bbb , orientés vers le pôle A de l'aimant permanent, seront attirés par celui-ci, tandis que dans la moitié supérieure de ce même demi-anneau les pôles aaa seront repoussés.

Ces deux systèmes d'attractions et de répulsions diamétralement opposées formeront donc, ainsi que le montrent les flèches, autant de *couples* ayant ensemble pour effet la rotation de l'anneau dans un même sens et avec une vitesse proportionnée à l'intensité du courant.

Remarquons enfin que la réversibilité des machines magnéto-électriques à courants continus n'est qu'une application directe de la loi de Lenz (16), dont elle nous donne en même temps la plus saisissante démonstration. Nous savons, en effet, que le magnétisme développé dans l'anneau de la machine B (*fig.* 32), par le courant électrique dû au mouvement de la machine A, se trouve, en vertu de cette loi, polarisé en sens contraire de celui qui serait capable de produire ce même mouvement : cette polarité doit donc nécessairement imprimer à l'anneau de la machine B un mouvement de sens inverse.

Transport à longue distance de la force motrice.

53. *Transport à longue distance de la force motrice.* — Les expériences qui précèdent montrent la possibilité de transmettre à de longues distances la force motrice.

Deux machines Gramme, à aimant ou à électro-aimant, étant accouplées comme nous venons de le dire, la première actionnée par un moteur quelconque, la seconde recevant le courant engendré par l'autre, présentent, avec le fil conducteur qui les

unit, un système de transport de force aussi complet que celui que forment deux poulies reliées par une courroie, mais avec cette différence que la courroie est ici un fil électrique pouvant avoir plusieurs kilomètres de longueur.

Ainsi, une machine Gramme dynamo-électrique, installée, par exemple, auprès d'une chute d'eau et d'un moulin capables de la mettre en mouvement (*fig.* 34), pourra, au moyen d'un simple fil métallique, et par l'intermédiaire d'une autre machine semblable placée dans une usine ou dans un atelier distant de plusieurs kilomètres, y transporter la force motrice nécessaire au fonctionnement des outils. Ajoutons qu'avec ces mêmes machines on pourra, le soir venu, et le travail cessant dans l'atelier, en éclairer les dépendances ou des lieux voisins.

Ces merveilleuses applications de l'électricité, qui semblent tenir du rêve, sont déjà en partie réalisées. Tout le monde a pu voir, à notre Exposition d'électricité, deux machines Gramme, reliées par un fil qui traversait toute la largeur du Palais de l'Industrie, transmettre l'une à l'autre le mouvement communiqué par une machine à vapeur, et faire ainsi mouvoir une pompe aspirante, dont le débit accusait la force de plusieurs chevaux. Le tramway électrique qui, de la place de la Concorde, transportait les visiteurs à l'entrée de l'Exposition, était mis en mouvement par une machine Gramme placée sous le plancher de la voiture, et qui, par l'intermédiaire d'un fil conducteur que soutenaient des poteaux dressés sur un des côtés de la voie, recevait le courant d'une autre machine pareille située à l'intérieur du Palais. Un tramway de ce genre, récemment établi aux environs de Berlin, fonctionne, pour un service public, sur un parcours de 2500 mètres. Nous pourrions citer encore des machines à labourer, des scieries mécaniques, des ascenseurs, qui, depuis quelques années, utilisent ce même système de transport de la force.

Ce ne sont là, il est vrai, que les premiers essais, les premiers pas, timides encore, dans cette voie nouvelle ouverte au progrès. Mais leur réussite ne permet pas de douter que toute une révolution industrielle sortira, dans un avenir pro-

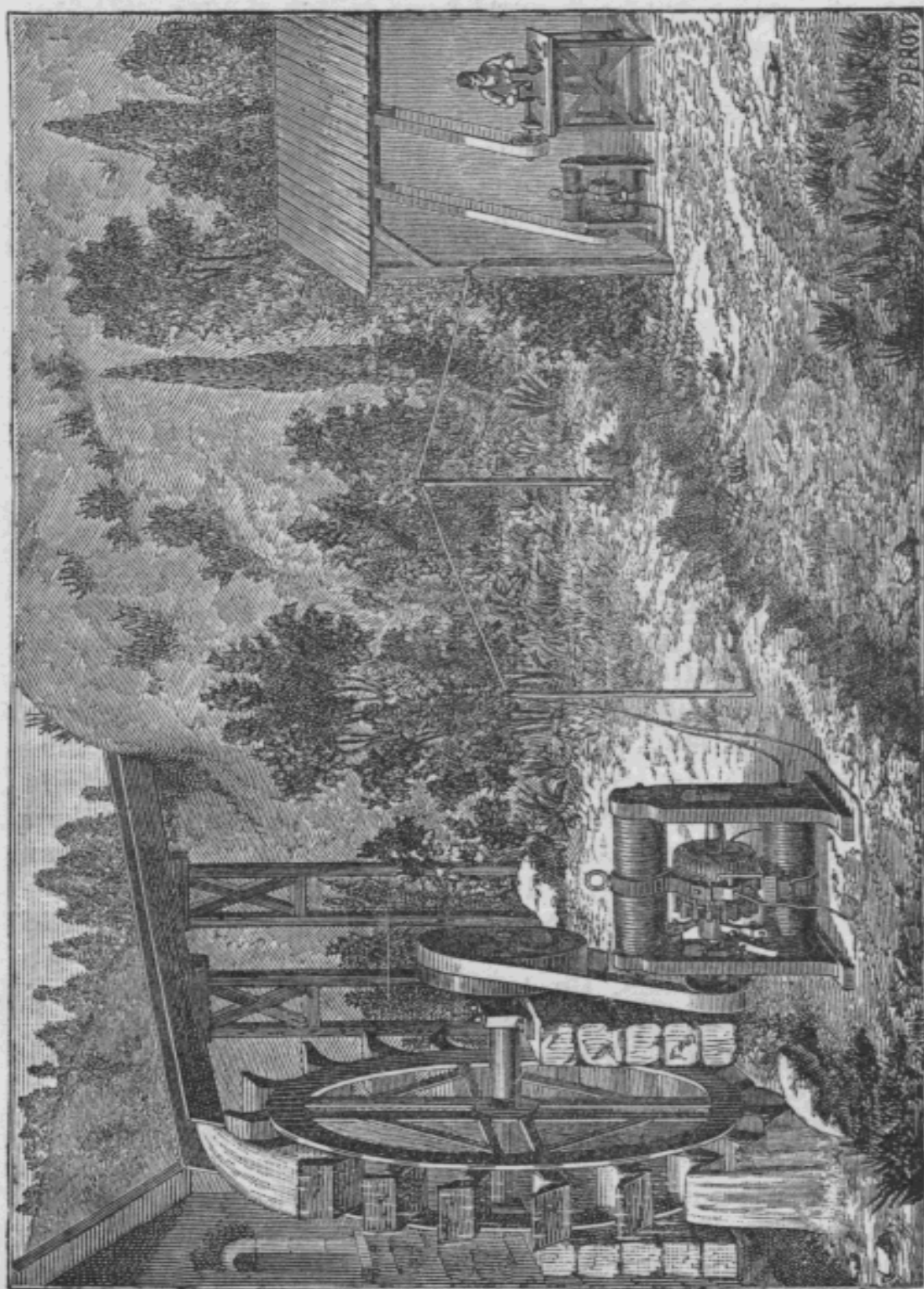


Fig. 34.

chain, de cette étonnante combinaison mécanique, nous offrant le moyen d'utiliser à distance et à peu de frais, tant de forces naturelles actuellement perdues ou d'un emploi sur place difficile et coûteux : les chutes d'eau, si abondantes dans les montagnes, les barrages des fleuves et des rivières, les marées, et jusqu'au vent lui-même, dont un simple fil pourra transporter au centre d'une ville la force prise à l'air libre sur les hauteurs environnantes*.

Moteurs électriques.

56. Moteurs électriques. — Nous nous abstenons de décrire ici les nombreux appareils qui, depuis Jacobi, l'inventeur du premier moteur électrique (1839), ont été successivement imaginés en vue d'appliquer l'électro-magnétisme à la production du mouvement. Ces appareils compliqués, avec lesquels, malgré les plus ingénieuses combinaisons, on n'avait jamais pu obtenir la force mécanique en quantité suffisante et dans les conditions d'économie nécessaires à son emploi industriel, ont perdu tout intérêt depuis l'invention des machines dynamo-électriques à courants continus, et en particulier de la machine Gramme.

Par un des plus heureux enchainements mécaniques, ces machines, imaginées d'abord dans le seul but de produire économiquement de l'électricité, se sont trouvées constituer en même temps les meilleurs moteurs électriques. Nous venons de voir, en effet, que, grâce à leur réversibilité,

* Les Américains du Nord, ces hardis pionniers de la civilisation, ont déjà, nous dit-on, conçu le gigantesque projet d'utiliser dans cette voie la chute du Niagara. Cette merveilleuse chute d'eau, la plus puissante du monde (300 000 mètres cubes par minute d'une hauteur de 60 mètres environ), représente une force mécanique évaluée à près de trois millions de chevaux-vapeur. Des ingénieurs ont donc eu la pensée de recueillir cette force au moyen de turbines qui donneraient le mouvement, dans des usines établies à proximité, à des machines dynamo-électriques. Une partie de l'électricité ainsi produite éclairerait les localités environnantes ; une autre partie irait distribuer la force motrice dans des établissements industriels situés plus loin. Enfin cette même électricité pourrait encore servir à la mise en marche des locomotives... Tous ces grands projets entreront-ils dans le domaine de l'exécution ? C'est ce que nous ne savons encore. Mais ce qui est certain, c'est que tout cela est possible.

à laquelle, sans doute, leurs inventeurs n'avaient pas primitivement songé, rien n'est plus simple, au moyen de ces machines, que de transformer en force motrice un courant électrique fourni par une machine semblable ou par toute autre source d'électricité, sans compter l'avantage immense de pouvoir transporter cette force à des distances considérables de son point d'origine.

Le grand mérite de la machine Gramme comme appareil moteur, c'est, en premier lieu, son mouvement circulaire et continu, n'exigeant pour sa transmission aucun mécanisme intermédiaire. Un seul de ses organes étant mobile, et tous les autres absolument fixes, aucune cause ne réside en elle, capable d'accélérer ou de ralentir sa vitesse pendant une révolution complète de l'arbre. En second lieu, et c'est là ce qui assure surtout à cette machine sa supériorité sur tous les autres moteurs électriques, c'est qu'elle peut, suivant ses dimensions et selon l'intensité du courant qu'on lui envoie, produire des efforts dynamiques aussi faibles ou aussi puissants qu'on le désire, depuis la force nécessaire pour faire marcher une machine à coudre, par exemple, jusqu'à des forces de vingt, trente chevaux, et plus. Les anciens moteurs magnéto-électriques, parmi lesquels on citait comme une merveille celui de Froment, n'avaient jamais pu dépasser la force d'un cheval. Aussi toutes les recherches faites dans le but de perfectionner ces derniers ont-elles été, dès l'apparition de la machine Gramme, immédiatement abandonnées. Le plus puissant, le plus parfait possible des moteurs de ce genre était trouvé.

Téléphonie.

57. Téléphone de Graham Bell. — La transmission du son et de la parole à de grandes distances est aujourd'hui un fait accompli, grâce au *téléphone*, récemment inventé par M. Graham Bell, professeur à Boston.

Ce merveilleux instrument, qui n'est en principe qu'une application fort simple de l'induction électro-magnétique, comprend (*fig. 35*) deux appareils absolument semblables pou-

vant, à tour de rôle, servir entre deux personnes de *transmetteur* et de *récepteur*, selon qu'on y applique la bouche ou l'oreille.



Fig. 35.

Chacun de ces appareils se compose essentiellement d'un barreau d'acier aimanté A, entouré vers l'un de ses pôles d'une bobine inductrice B, sur laquelle est enroulé un long fil de cuivre recouvert de soie, dont les deux bouts f et f' , après avoir traversé un étui de bois T, qui contient toutes les pièces de l'appareil, se continuent avec les fils de ligne, destinés à mettre en communication les deux appareils identiques.

Devant le bout de l'aimant A qui porte la bobine B, et perpendiculairement à son axe, est un disque en tôle mince D, de 6 à 7 centimètres de diamètre, maintenu au fond d'une embouchure en bois E, qui fait corps avec l'étui. La distance qui sépare ce disque de l'aimant doit être aussi petite que possible, mais néanmoins suffisante pour qu'ils ne puissent jamais se toucher.

Les choses étant ainsi disposées, si une personne parle à haute voix dans l'embouchure E de l'un de ces appareils, le disque de tôle D, vibrant à l'unisson de la voix, s'approche et s'écarte alternativement, suivant l'amplitude de ses vibrations, du pôle de l'aimant A devant lequel il est placé : d'où résulte, en vertu du principe que nous avons exposé précédemment (13), un changement dans l'état magnétique de cet aimant, et, par suite, la production d'une série de courants induits dans le fil de la bobine B.

Or, chaque courant induit partant de cette bobine arrive par le fil de ligne dans l'autre appareil, où il modifie, à son tour, en passant par la bobine B, l'état magnétique du second aimant A. Le disque de tôle D placé devant cet aimant se met

done aussi à vibrer, reproduisant exactement le nombre et la forme des vibrations initiales parties du premier. Ces vibrations, reçues à la station d'arrivée par l'oreille appliquée à l'embouchure E, se traduisent donc en sons identiques à ceux émis par la personne qui parle à la station de départ, et reproduisent ainsi ses paroles et jusqu'au timbre de sa voix.

La première expérience publique du téléphone a été faite avec succès en Amérique, au commencement de l'année 1877, entre Boston et North-Conway, distants de 230 kilomètres. Depuis cette époque, les applications de cet instrument n'ont fait que s'étendre de plus en plus, en Amérique d'abord, puis en France, en Angleterre, en Belgique, en Allemagne et dans tous les pays civilisés. Auxiliaire du télégraphe, ce précieux moyen de communication est entré tout à fait dans nos mœurs. Déjà de nombreux réseaux téléphoniques, installés dans la plupart des grandes villes, permettent aux habitants de leurs divers quartiers de communiquer verbalement entre eux. Des essais de correspondance téléphonique entre Manchester et Liverpool, Hambourg et Berlin, et, plus récemment, entre Paris et Bruxelles (340 kilomètres)*, ne laissent aucun doute sur la possibilité de relier instantanément par la téléphonie, comme elles le sont déjà par la télégraphie, des populations lointaines. Peut-être même viendra le jour où deux voix amies pourront se reconnaître et se répondre à travers l'Océan. L'expérience que nous venons de rapporter d'un téléphone et d'un télégraphe fonctionnant simultanément, entre Bruxelles et Paris, sur un même fil, donne, en effet, l'espoir de pouvoir utiliser pour la transmission de la parole les câbles télégraphiques sous-marins.

* Ce dernier essai, fait le 17 mai 1882, est extrêmement intéressant en ce sens que deux dépêches, l'une téléphonique et l'autre télégraphique, ont pu être transmises de Bruxelles à Paris *simultanément et sur un même fil*. Le succès complet de cette curieuse expérience, d'un genre tout nouveau, et qui fera époque dans la science, prouve donc ce fait vraiment étonnant, que l'on peut à la fois et dans le même temps se servir du même fil pour échanger des dépêches écrites et une conversation, sans que les deux genres de transmission se troublent sensiblement l'un l'autre. Il est inutile d'insister pour faire comprendre l'immense portée que ce résultat, s'il se confirme, peut avoir pour l'avenir du téléphone.

Microphonie.

58. *Microphones Hughes et Ader.* — Peu de temps après l'apparition du téléphone, M. Hughes, l'inventeur du télégraphe imprimant, imaginait un autre instrument non moins curieux, le *microphone*, ainsi nommé parce qu'il a pour effet d'amplifier les sons, rendant ainsi à l'ouïe le même service que le microscope rend à la vue. Voici quelle est la disposition de cet instrument.

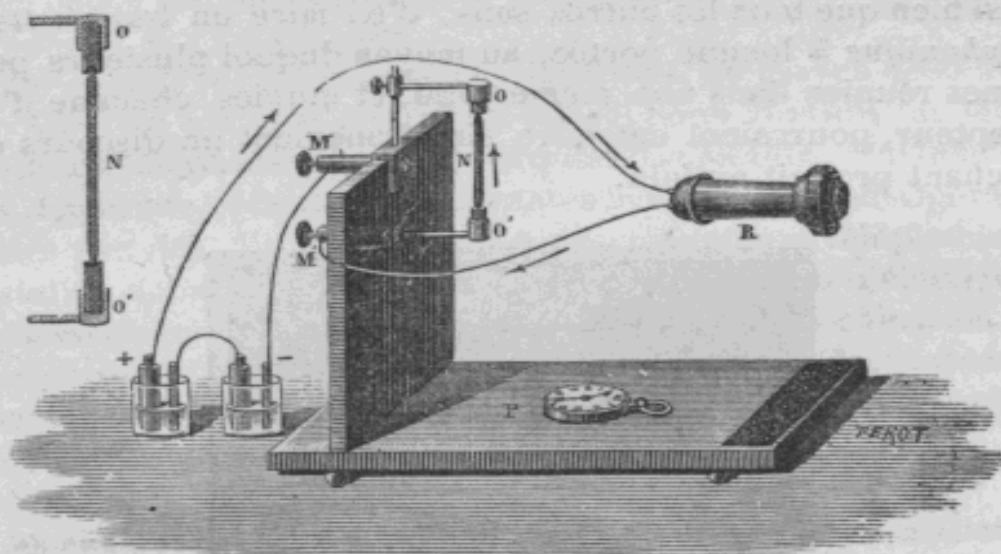


Fig. 36.

Sur un support vertical en bois (*fig. 36*), sont fixés, l'un au-dessus de l'autre, deux petits dés en charbon O et O', dans lesquels s'engagent les extrémités en pointe mousse d'un crayon de charbon N, dont le bout supérieur peut ballotter librement et à la moindre trépidation dans le dé O. Ce système est placé, au moyen de deux boutons M et M', dans un circuit voltaïque communiquant avec un récepteur R, exactement pareil à celui du téléphone (*fig. 35*). Le tout repose sur un socle horizontal P, destiné à recevoir les objets dont on veut étudier les sons, soit une montre, un insecte vivant, etc. Les trépidations de la montre ou de l'insecte, se transmettant au

charbon vertical N, déplacent les points de contact de son bout supérieur, ce qui amène dans le courant des intermittences se traduisant aussitôt en vibrations sonores dans la plaque du récepteur téléphonique. Telle est la sensibilité de cet instrument, que les pas d'une mouche y ressemblent aux battements d'une montre, et ce dernier bruit à de légers coups de marteau.

Cet instrument, qui d'abord ne semblait devoir être qu'un objet de curiosité, devait bientôt acquérir un haut intérêt pratique, par la possibilité qu'il offrait, en amplifiant la parole aussi bien que tous les autres sons, d'en faire un *transmetteur téléphonique* à longue portée, au moyen duquel plusieurs personnes réunies dans une même salle, et munies chacune d'un récepteur, pourraient entendre simultanément un discours ou un chant produit au loin.

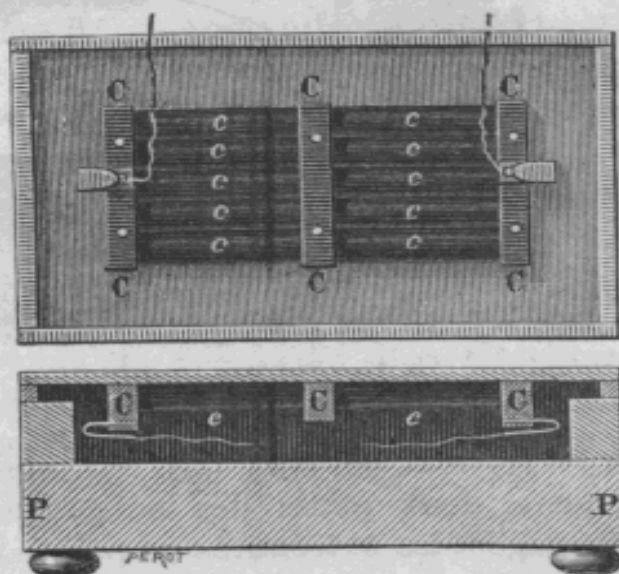


Fig. 37.

C'est à M. Ader que revient l'honneur d'avoir, le premier, atteint ce but, au moyen de son appareil à *contacts multiples*, composé (fig. 37), non plus d'une seule, mais de dix baguettes de charbon *cccc...* groupées par séries de cinq, à la façon d'un gril, entre trois montants *CCC* également en charbon, qui soutiennent librement leurs pointes. Ces trois mon-

tants sont fixés sur la face inférieure d'une planchette mince de sapin, destinée à recevoir et à communiquer, par leur intermédiaire, aux baguettes mobiles *ccc c...* les vibrations sonores qu'elle reçoit. Le tout est contenu dans une petite boîte rectangulaire, dont la planchette vibrante forme le couvercle, et que supporte un socle en plomb PP soutenu lui-même par quatre pieds en caoutchouc, afin d'empêcher les trépidations du sol d'arriver jusqu'aux charbons. Ces derniers sont mis en rapport, par deux boutons métalliques, avec une pile de trois à quatre éléments, dans le circuit de laquelle est intercalée une petite bobine d'induction d'où partent les fils qui relient l'appareil aux récepteurs.

Telles sont les ingénieuses dispositions, au moyen desquelles M. Ader est parvenu à faire du microphone Hughes un transmetteur téléphonique d'une exquisite sensibilité. Plusieurs de ces appareils, placés sur l'avant-scène du Grand-Opéra, et reliés par des fils souterrains à des récepteurs téléphoniques installés dans une des salles de notre Exposition d'électricité, transmettaient aux visiteurs, à la fois surpris et charmés, non seulement la voix des chanteurs, mais encore les accompagnements les plus déliés de l'orchestre et jusqu'aux applaudissements du public.

Photophonie. Photophone musical; photophone d'articulation.

59. Historique. — Un savant français, M. Charles Gros, dans un Mémoire écrit en 1871 et imprimé en 1879, avait, par la seule puissance de son esprit, pressenti et annoncé, comme devant se réaliser, l'étonnante découverte à laquelle M. Graham Bell, l'inventeur du téléphone, vient encore d'attacher son nom : la *photophonie*, comme on l'appelle, l'art de *faire parler la lumière*, ou, plus exactement, de transformer des vibrations lumineuses en vibrations sonores.

Voici, en effet, ce que disait, dans son Mémoire, M. Charles Gros :

« Voici les expériences que je ferais si j'en avais le loisir et les moyens : on ferait entrer, dans un tuyau renforçant une note de n vibrations, un rayon lumineux interrompu et rétabli

n fois par seconde. La raréfaction ou la condensation alternative du milieu gazeux *pourrait peut-être faire parler le tuyau...* Ou encore on essayerait de faire *vibrer une lame métallique bien polie ou une membrane argentée* par une suite de n éclairs par seconde, cette relation du nombre au temps étant donnée par un corps vibrant. Ces expériences, ajoute M. Gros, exécutées et réunies, feront très justement un nom à leur auteur. »

Ceci rappelé, dans le seul intérêt de la vérité, et sans vouloir diminuer en rien le mérite de M. Graham Bell, disons en quoi consiste sa découverte, laquelle comprend deux appareils ou instruments distincts, savoir : le *photophone musical* et le *photophone d'articulation*. Nous emprunterons en partie leur description au savant article de M. Hospitalier, publié dans le journal *la Nature* (N° du 30 octobre 1880).

40. *Photophone musical*. — Cet instrument (*fig. 38*) se compose d'un appareil transmetteur, ayant pour but de rendre un faisceau lumineux intermittent, et d'un récepteur, qui transforme ces intermittences en vibrations sonores.

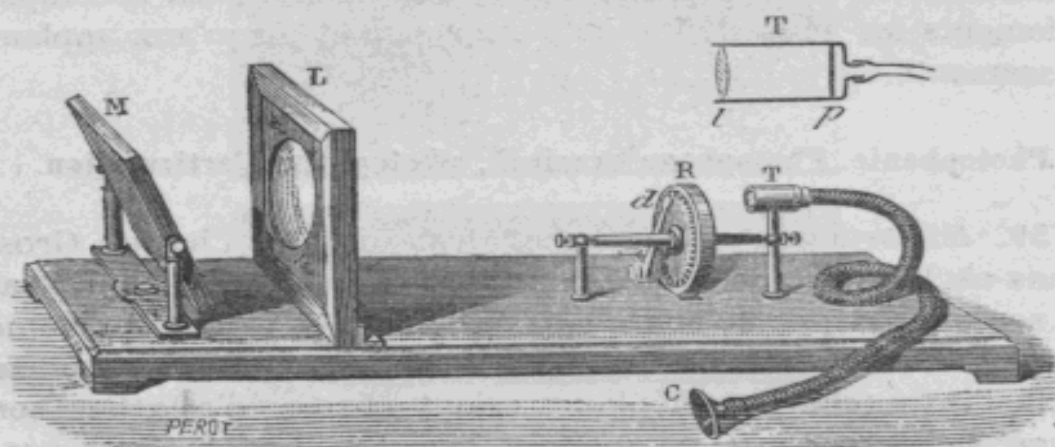


Fig. 38.

Pour arriver à ce résultat, on fait tomber sur un miroir plan M un faisceau de lumière solaire ou de lumière électrique; ce miroir réfléchit le faisceau lumineux sur une lentille L, qui le fait converger à son foyer. A ce foyer se trouve placé un disque R, percé d'une quarantaine de trous, disposés sur la cir-

conférence, et de telle sorte, qu'en imprimant à ce disque un mouvement rapide de rotation, les vides et les pleins se succèdent avec une vitesse de cent à six cents tours par seconde. Le faisceau lumineux sera ainsi interrompu de cent à six cents fois dans le même temps. Le miroir M, la lentille L et le disque R constituent le *transmetteur*.

Au delà du disque, le faisceau lumineux ainsi interrompu arrive sur une seconde lentille *l*, placée à l'entrée d'un tube T. Cette lentille rend les rayons parallèles et les fait tomber sur une plaque mince *p* de *substance quelconque*, fer, acier, cuivre, zinc, or, platine, ivoire, bois, parchemin, gutta-percha, caoutchouc durci, etc., placée à l'autre extrémité du tube T. Cette plaque, vibrant alors à l'unisson du nombre des interruptions produites par le disque tournant sur le faisceau lumineux, *produit un son*, que l'on peut entendre en appliquant l'oreille au cornet acoustique C placé à l'extrémité d'un tube en caoutchouc. Le tube T, la lentille *l*, la plaque *p* et le tuyau en caoutchouc avec son cornet acoustique C constituent le *récepteur*, lequel a pu déjà fonctionner à une distance de 2 kilomètres du transmetteur, distance qui, avec des perfectionnements, pourra certainement être doublée.

Cette expérience prouve donc que des vibrations *lumineuses* peuvent se transformer directement en vibrations *sonores*. Pour compléter la démonstration, on place contre la roue R, au niveau de ses trous, un petit disque obturateur *d*, que l'on peut faire mouvoir au moyen d'un levier coudé. En donnant à ce petit disque une position telle qu'il empêche la lumière d'aller frapper la plaque vibrante, le son s'éteint aussitôt ; en le retirant, le son se fait entendre de nouveau, ce qui démontre de la manière la plus nette, la plus certaine, la *production du son par la lumière seule*. Nous allons voir maintenant comment il est possible, non seulement d'obtenir des sons avec la lumière, mais encore de se servir des rayons lumineux pour transmettre au loin la parole.

44. *Photophone d'articulation*. — Cet instrument a été présenté à l'Académie des sciences le 13 octobre 1880. Il est fondé sur les propriétés électriques du sélénium. Ce métal-

loïde, découvert, en 1717, par Berzélius (voyez notre *Cours de Chimie*, page 174), présente, lorsqu'il a été fondu et refroidi très lentement, état dans lequel il prend l'apparence d'un métal grisâtre, la singulière propriété de changer instantanément de résistance électrique sous l'influence de la lumière. Cette résistance du sélénium au passage du courant voltaïque, très grande dans l'obscurité, diminue quand on expose ce corps à la lumière, et devient d'autant plus petite que celle-ci est plus intense. C'est à M. May, ingénieur télégraphiste à Valentia, qu'est due la découverte de ce fait.

La figure 39 représente le diagramme du photophone d'articulation, dessiné d'après un croquis donné par Graham Bell, pour en faire bien saisir le fonctionnement. Cet appareil, comme le précédent, comprend un transmetteur et un récepteur.

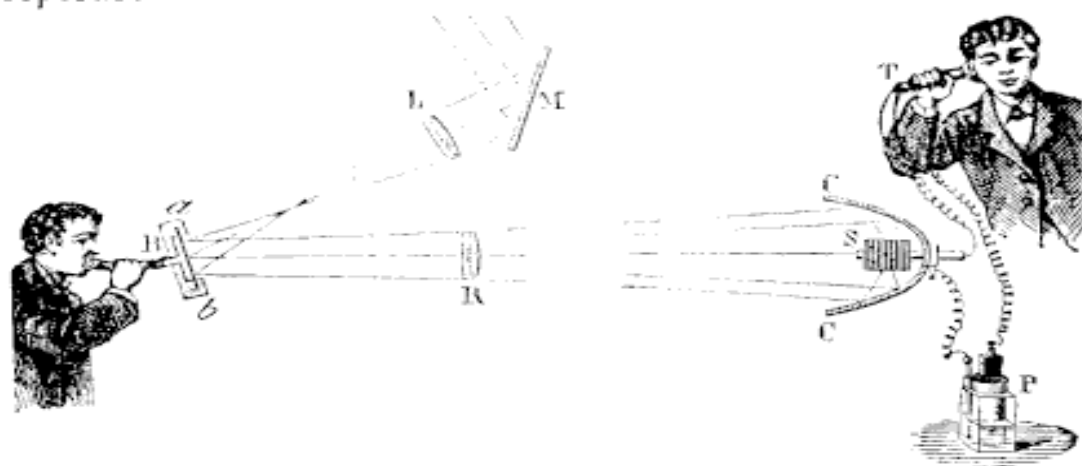


Fig. 39.

Le *transmetteur* se compose d'une petite plaque mince *ab* de verre argenté, de la grandeur d'une plaque de téléphone ordinaire, encastrée dans un support *B*, auquel est adaptée l'extrémité d'un tuyau en caoutchouc de cinquante centimètres de longueur et terminé par une embouchure. A l'aide d'un miroir plan *M* et d'une lentille convergente *L*, on fait tomber sur la plaque argentée *ab* les rayons de la lumière solaire ou d'une lumière électrique. Les rayons réfléchis par cette plaque traversent en *R* une seconde lentille, qui les envoie sur le récepteur.

Le *récepteur*, placé à distance, se compose d'un réflecteur en cuivre argenté C C, de forme parabolique et de soixante-dix centimètres de diamètre environ. Au foyer de ce miroir est le sélénium S, disposé en anneaux à la surface d'un petit cylindre formé d'une série de disques de laiton, séparés par des disques de mica d'un diamètre plus petit, de manière à laisser entre les premiers des vides annulaires que l'on remplit de sélénium fondu, et qu'on laisse ensuite se refroidir lentement; ces anneaux de sélénium sont représentés en noir sur la figure. Enfin, à ce cylindre recouvert ainsi de sélénium sont attachés les deux réophores d'une pile P, reliés à un téléphone ordinaire T.

Voici maintenant comment fonctionne l'appareil :

En parlant dans l'embouchure du transmetteur, la plaque mince de verre argenté *a b* se met à vibrer, se bombe plus ou moins, en suivant toutes les ondulations de la voix, et fait ainsi varier synchroniquement avec ses vibrations propres l'intensité des rayons lumineux qu'elle réfléchit, en les dispersant plus ou moins suivant ses divers états de courbure, dans la direction du miroir parabolique C C. Ces rayons, ainsi gouvernés par la parole et réfléchis par le miroir parabolique, tombent sur le sélénium, qui, subissant alors des changements de résistance électrique en rapport avec les variations de leur intensité lumineuse, amène des changements égaux dans l'intensité du courant qui le traverse. Ces changements d'intensité du courant électrique ont alors pour effet *de faire vibrer la plaque du téléphone T à l'unisson de la plaque de verre argenté a b*, et de lui faire ainsi reproduire la parole émise devant celle-ci. Cet appareil est d'une grande sensibilité : à la distance de 200 mètres environ, il reproduit le chant et la parole avec une netteté et une exactitude remarquables. C'est peu sans doute pour les besoins de la pratique ; mais il est probable que de nouveaux perfectionnements ne tarderont pas à étendre le champ de ses applications.

Remarque. — Si l'on a bien compris les descriptions qui précèdent, on saisira facilement la différence qui sépare le photophone musical du photophone d'articulation. Le premier

a pour effet de *produire directement le son avec la lumière seule*. Le second se sert de la lumière, non pour produire des sons, mais pour *les transmettre à distance*. Le faisceau lumineux réfléchi par la plaque argentée remplace ici le fil métallique qui unit, dans le téléphone ordinaire (*fig. 35*), le transmetteur au récepteur. Aussi pensons-nous qu'il y aurait peut-être avantage à ne pas confondre sous un même nom ces deux appareils : mieux vaudrait, à notre avis, désigner le premier sous le nom de **PHOTOPHONE** simplement, et donner au second le nom de **PHOTOTÉLÉPHONE**.

Piles secondaires ou accumulateurs électriques.

42. Piles secondaires ou accumulateurs électriques. — Prenons deux lames de plomb rectangulaires (*fig. 40*) de deux ou trois décimètres carrés ; recouvrons-les sur chaque face d'une couche de minium ou oxyde de plomb Pb^2O^3 , et, par-dessus cette couche, d'une pièce de feutre les enveloppant entièrement. Appliquons l'une sur l'autre ces deux lames ainsi cloisonnées, et, après les avoir, pour plus de commodité, roulées en spirale, introduisons le tout dans un vase en verre ou en terre cuite rempli d'eau acidulée au dixième par de l'acide sulfurique. Cela fait si nous mettons en communication ces deux lames de plomb, que sépare la pièce de feutre intermédiaire, l'une avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif d'une forte pile ou d'une machine Gramme à courants continus, voici ce qui se passera :

L'eau acidulée étant aussitôt décomposée par le courant électrique, son oxygène se portera sur la lame de plomb positive, et fera passer le minium qui la recouvre à l'état de peroxyde de plomb (PbO^2), tandis que l'hydrogène, se portant sur la lame de plomb négative, réduira le minium et l'amènera à l'état de plomb métallique. Le peroxyde de plomb et le plomb métallique formeront donc à la surface des lames, le premier, un dépôt pulvérulent de couleur rouge-brun, le second une couche noirâtre et cristalline.

Au bout d'un certain temps, les deux lames seront ainsi *polarisées*, et, si l'on supprime alors leurs communications avec la

source électrique, on aura un véritable élément de pile, avec lequel on pourra, quand on le voudra, reproduire sinon la totalité, du moins les neuf dixièmes environ de la quantité d'électricité qui a servi à le former. On peut associer ensemble, soit en tension, soit en quantité, plusieurs de ces éléments, de manière à en former une pile plus ou moins puissante.

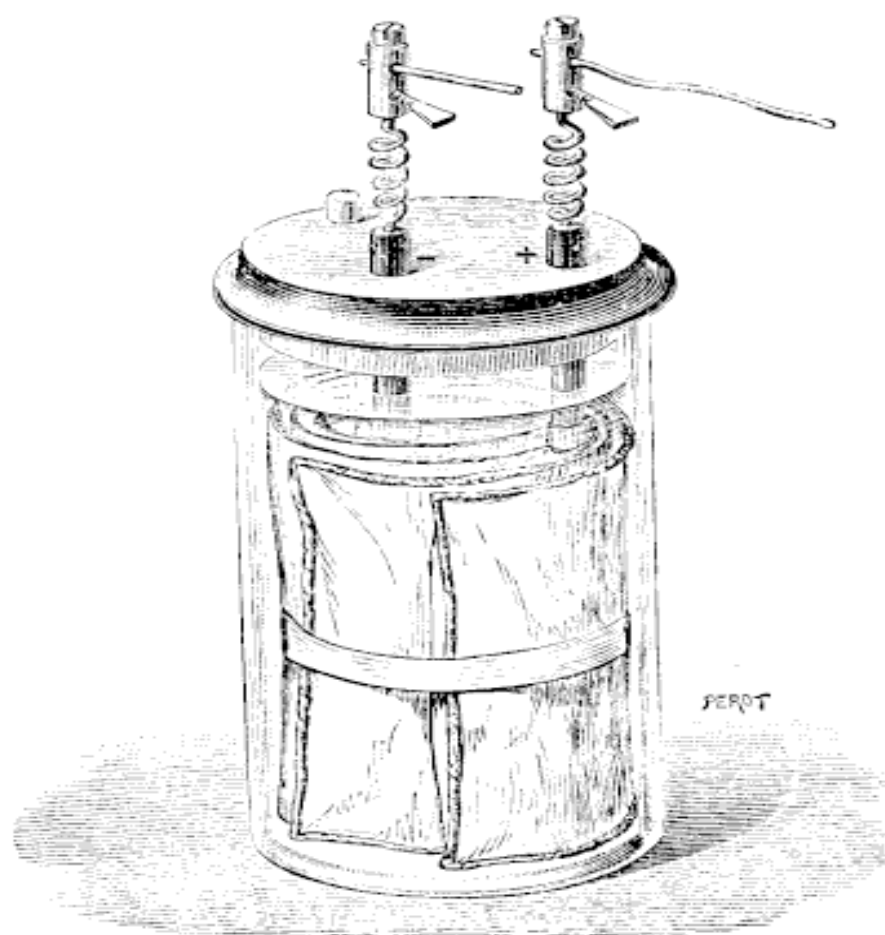


Fig. 50.

Cette pile, justement nommée *pile secondaire*, a été inventée par M. Planté et perfectionnée par M. Faure. M. Planté n'employait d'abord que des lames de plomb, sans addition d'aucune autre substance, se bornant à les séparer l'une de l'autre par des bandelettes de caoutchouc. C'est M. Faure qui, le premier, a eu l'heureuse idée de recouvrir leurs surfaces d'une

couche de minium, afin d'augmenter à la fois leur durée et leur capacité d'accumulation électrique. Une fois chargée comme nous venons de le dire, la pile de M. Faure constitue, en effet, un précieux réservoir d'électricité pouvant se conserver longtemps et susceptible d'être transporté et utilisé partout où on le désire.

Pour faire usage de cette pile, il suffit d'en fermer le circuit en unissant ses deux lames par un fil conducteur, sur le trajet duquel on place l'appareil auquel est destiné le courant. Une action chimique inverse de celle qui a déterminé la formation de la pile se produit alors : le peroxyde de plomb qui, pendant la charge, s'était formé sur la lame positive se réduit peu à peu, tandis que le plomb réduit s'oxyde sur l'autre lame. La pile renvoie donc un courant de sens contraire à celui qu'elle avait reçu.

Ces piles secondaires sont désignées communément sous le nom d'*accumulateurs* électriques. Cette désignation manque de justesse, en ce sens que leurs éléments n'emmagasinent nullement, comme le ferait par exemple une bouteille de Leyde, l'électricité qu'ils reçoivent. Ce qu'ils accumulent, c'est, en réalité, du travail de décomposition chimique entre les substances dont ils sont constitués, et dont la recombinaison restitue, sous forme de courant électrique, une partie de ce même travail.

Quoi qu'il en soit, ce genre de piles a déjà reçu de nombreuses applications, et tout fait espérer que leur emploi industriel ne fera que s'étendre de plus en plus. Plusieurs de ces appareils, sortis des ateliers de leur habile constructeur M. Émile Reynier, fonctionnaient avec un plein succès à l'Exposition d'électricité. Chargés pendant le jour au moyen de machines dynamo-électriques, les uns servaient à alimenter le soir des lampes à incandescence ; d'autres faisaient mouvoir divers outils, des machines à coudre, des tours, un petit bateau à hélice, etc. Mais ce qui donne à la pile secondaire une importance toute spéciale, c'est la perspective par elle offerte d'un transport facile de l'électricité dynamique. On conçoit, en effet, que de l'électricité produite en grand dans

une usine centrale, au moyen de machines, puisse servir à charger simultanément un grand nombre de ces piles, que l'on distribuerait ensuite à domicile, pour y être employées soit comme force motrice, soit pour l'éclairage.

Conclusion. Unité des forces physiques.

45. Unité des forces physiques. — Si l'on place dans un même circuit, en les unissant par leurs fils conducteurs, une machine Gramme à aimant et un élément de pile secondaire (fig. 41), et qu'on fasse ensuite tourner la machine à la main, le courant produit par celle-ci chargera la pile comme nous

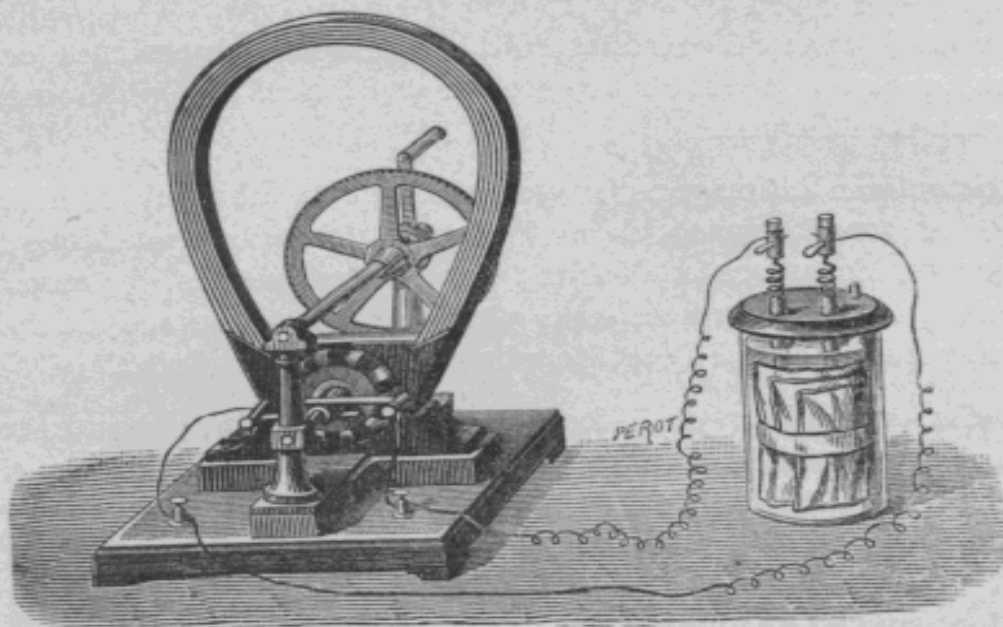


Fig. 41.

venons de le dire. Après avoir opéré ainsi pendant quelques minutes, si on lâche la manivelle, on voit la machine *continuer à tourner*. Elle tourne, en effet, sous l'influence du courant secondaire de la pile, qui maintenant se décharge, et renvoie à la machine l'électricité qu'elle en avait reçue dans la première partie de l'expérience. On constate, de plus, que la machine continue à tourner *dans le même sens*, ce qui s'explique facile-

ment si l'on considère que le courant rendu par la pile est inverse de celui qui a servi à la charger.

Cette expérience, une des plus intéressantes de la physique moderne, nous donne la démonstration complète, preuve et contre-épreuve, de *la réversibilité du mouvement en électricité, et de cette même électricité en mouvement*, et cela, sans autre organe intermédiaire que le fil de communication entre la machine et la pile.

Nous avons, dans notre Cours de Physique (194), étudié dans tous ses détails la réversibilité de la force mécanique en chaleur et réciproquement. Nous les avons vues se transformant l'une dans l'autre en quantités équivalentes.

La chaleur et l'électricité sont également réversibles entre elles, ce que prouvent en toute évidence les phénomènes thermo-électriques.

Les actions chimiques nous montrent la chaleur et l'électricité se transformant, dans la plupart des décompositions, en forces moléculaires ou d'affinité, qui elles-mêmes, le moment venu où les éléments séparés pourront se combiner de nouveau, reparaitront à l'état de chaleur ou d'électricité.

Enfin, la chaleur et l'électricité, portées à une haute tension, produisent la lumière, qui joue dans l'univers un rôle immense. C'est par elle, en effet, que les végétaux retiennent et emmagasinent dans leurs tissus, à l'état de forces latentes ou de tension (forces d'affinité, énergie potentielle), la chaleur solaire, source unique de tout mouvement, de toute vie sur la terre*.

Ainsi, le fragment de houille brûlant, par exemple, dans le foyer d'une machine à vapeur, ne fait que remettre en liberté la chaleur solaire qui a jadis servi à le former, et qui, après y avoir sommeillé pendant des milliers de siècles, reprend son premier état. Cette chaleur, par l'intermédiaire de la vapeur

* Voyez notre *Histoire Naturelle*, pages 104 et suiv.

d'eau, pousse le piston de la machine et se transforme en force motrice. Une machine dynamo-électrique, recevant directement cette force, la transforme aussitôt en électricité, qui, à son tour et à volonté, pourra être convertie en mouvement, en lumière, et même, en éclairant avec celle-ci certains végétaux, ramenée à l'état de force moléculaire capable de reconstituer le charbon, point de départ de cet enchaînement dynamique.

Admirable enchaînement ! qui nous montre, dans le cycle complet de ses métamorphoses, cette force universelle et indestructible, l'*énergie*, d'où procèdent la force motrice, la chaleur, l'électricité, la lumière, les actions chimiques, avec lesquelles la puissance divine fait mouvoir les mondes et pousser le brin d'herbe, et que l'homme aussi a su maîtriser et asservir aux besoins de son industrie.

Résumé.

I. Deux machines Gramme magnéto ou dynamo-électriques à courants continus étant placées dans le même circuit, si l'on fait tourner l'une d'elles au moyen d'un moteur quelconque, l'autre machine, sous l'influence du courant qu'elle reçoit de la première, se met à tourner également. Ce phénomène a reçu le nom de *réversibilité*.

II. La réversibilité des machines dynamo-électriques à courants continus permet de transporter la force motrice à de grandes distances, et d'utiliser ainsi, pour les besoins de l'industrie, une foule de forces naturelles dont l'emploi sur place est impossible, ou serait tout au moins difficile et trop dispendieux.

III. Le *téléphone* est un appareil au moyen duquel le son et la parole peuvent être transmis, entre deux points éloignés l'un de l'autre, par les courants induits développés dans une bobine entourant l'extrémité d'un aimant, devant lequel est une plaque mince de tôle placée de champ. Cet appareil se compose de deux instruments identiques, le *transmetteur* et le *récepteur*.

IV. Le *microphone* a pour effet d'amplifier les sons; il est pour l'ouïe ce que le microscope est pour la vue. Cet instrument est aujourd'hui généralement employé comme transmetteur téléphonique.

V. La photophonie ou l'art de *faire parler la lumière* comprend deux instruments : le *photophone musical* et le *photophone d'articulation* ou *phototéléphone*. Ce dernier est fondé sur les propriétés électriques du sélénium.

VI. Les *piles secondaires* ou *accumulateurs électriques* s'obtiennent en soumettant à l'action d'un courant électrique deux lames de plomb recouvertes de minium (Pb^2O^3), et plongeant dans un bain d'eau acidulée avec l'acide sulfurique. Les deux lames se polarisent, et forment à leur tour un élément de pile pouvant conserver et restituer au besoin l'électricité qui a servi à le constituer.



FIN.

Paris, Imprimerie Delalain frères, rue de la Sorbonne 1 et 3.

