

LIVRE VII. — ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE I

Notions préliminaires et définitions.

§ I. — DIFFÉRENTES FORMES DE L'ÉNERGIE.

On appelle Énergie la faculté que possède un corps, ou un système de corps, de produire du travail. Une pierre qui tombe, par exemple, possède de l'énergie.

L'énergie peut se trouver sous quatre formes : Énergie mécanique ; Énergie calorifique ; Énergie chimique ; Énergie électrique.

Les deux premières sont familières à chacun ; nous avons vu en Thermodynamique les relations qui existaient entre elles.

La chimie montre la présence de l'énergie dans les combinaisons des corps ; par exemple le charbon, par la combustion de son carbone, c'est-à-dire son union avec l'oxygène, produit un dégagement de chaleur que l'on peut à son tour convertir en énergie mécanique. C'est le rôle de la machine à vapeur d'effectuer cette transformation.

Enfin, nous verrons dans le courant de cette étude les manières de produire l'énergie électrique par la transformation de l'énergie prise sous une quelconque de ses trois autres formes. Inversement, il sera possible de transformer l'énergie électrique et de reproduire l'énergie sous l'une des autres formes.

§ II. — GÉNÉRATEURS D'ÉLECTRICITÉ.

Ce sont les appareils qui nous permettront de transformer l'énergie prise, sous une forme quelconque, en énergie élec-

trique; suivant la forme de l'énergie à transformer on aura :

- 1° Les piles ordinaires transformant l'énergie chimique;
- 2° Les piles thermo-électriques transformant l'énergie calorifique;
- 3° Les dynamos transformant l'énergie mécanique.

§ III. — RÉCEPTEURS.

Ce sont les appareils, produisant un effet inverse des précédents, qui nous permettront de transformer l'énergie électrique; suivant la forme de l'énergie qu'ils restituent on pourra les classer en trois groupes :

- 1° Récepteurs chimiques; on en parlera dans la question de l'électrolyse et des accumulateurs ;
- 2° Récepteurs thermiques ; lampes et appareils de chauffage ;
- 3° Récepteurs mécaniques ; ce sont les moteurs électriques.

§ IV. — RELATIONS NUMÉRIQUES DANS LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

La thermodynamique nous fait connaître les relations qui existent entre l'énergie mécanique et l'énergie calorifique; on trouvera de même des relations entre l'énergie mécanique et l'énergie électrique. Il est nécessaire, avant de commencer l'étude de ces relations, de définir les unités employées.

On a étudié, au livre I^{er}, les unités du Système CGS et les unités employées dans la pratique, ainsi que les relations qui existent entre elles.

En électricité on emploie souvent des unités particulières que nous allons définir et qui toutes dérivent du Système CGS :

1. *Travail*. — L'unité de Travail dans le système CGS est l'erg. L'unité pratique employée en mécanique est le kilogrammètre qui vaut 981×10^5 ergs.

En Électricité on fait un fréquent usage du *Joule* qui vaut 10^7 ergs.

Par suite, 1 kilogrammètre vaut 9,81 joules, autrement dit, 1 joule vaut 0 kgm. 102.

2. *Puissance*. — On n'a pas encore eu l'occasion de définir la notion de puissance; elle deviendra nécessaire en Électricité où l'on se trouvera en présence de machines et de transports d'énergie.

La puissance d'une machine est le travail qu'elle peut fournir pendant l'unité de temps.

Donc, comme tous les systèmes adoptent la seconde comme unité de temps : La puissance d'une machine est le travail qu'elle peut développer en une seconde.

En mécanique, l'unité de puissance est le *Cheval-vapeur*; c'est la puissance d'une machine capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres en 1 seconde.

En électricité, on emploie le *Watt* qui est la puissance d'une machine effectuant un travail de 1 joule par seconde; on utilise fréquemment un de ses multiples, le *Kilowatt*, qui vaut 1.000 watts.

On peut trouver la relation entre le watt et le cheval-vapeur : en effet, nous savons que le cheval-vapeur vaut 75 kilogrammètres par seconde; le kilogrammètre valant 9,81 joules, le cheval-vapeur vaut :

$$75 \times 9,81 = 736 \text{ joules par seconde, c'est-à-dire } 736 \text{ watts.}$$

Autrement dit, en employant le kilowatt, le cheval-vapeur vaut 0 kw. 736.

Une unité souvent employée est le kilowattheure, travail fourni par une machine de 1 kilowatt de puissance travaillant pendant 1 heure.

Équivalence de la chaleur et du travail. — La thermodynamique nous apprend qu'une grande Calorie équivaut à 426 kilogrammètres.

Notons d'abord qu'en Électricité on fait toujours usage

de la petite calorie, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré centigrade la température de 1 gramme d'eau.

Donc 1 (petite) calorie équivaut à 0 kgm. 426.

Cherchons la relation entre la calorie et le joule ; on sait que le kilogrammètre vaut 9,81 joules ; donc :

1 calorie équivaut à $0,426 \times 9,81$ joules, c'est-à-dire 4,18 joules.

Inversement 1 joule équivaut à : $\frac{1}{4,18} = 0,24$ calorie.

CHAPITRE II

Courant électrique. Lois d'Ohm et de Joule. Unités.

§ I. — COURANT ÉLECTRIQUE.

Quoique des hypothèses vraisemblables aient été faites sur la nature de l'électricité, on ne peut en donner une définition précise ; nous ne pourrions donc définir le courant électrique que par ses propriétés. Un conducteur parcouru par un courant électrique est le siège de phénomènes de quatre ordres différents :

1. *Phénomènes mécaniques.* — Au voisinage du courant, on constate que des aimants ont une tendance à se mettre en mouvement ; un autre courant subit également l'action de forces provenant du premier. On étudiera plus tard ces phénomènes en détail au point de vue de la direction et de l'intensité de ces forces.

2. *Phénomènes calorifiques.* — Un conducteur fin, un fil métallique par exemple, parcouru par un courant, s'échauffe ; si l'élévation de température est suffisante, le fil peut rougir et même fondre ; on en verra l'application dans les lampes à incandescence.

3. *Phénomènes chimiques.* —
Faisons passer le courant dans une solution d'un sel métallique, du sulfate de cuivre par exemple. Pour cela, la dissolution étant placée dans un vase V, on y plonge deux lames de métal ; le platine sera un métal très convenable, car il ne sera pas attaqué par les produits de décomposition.

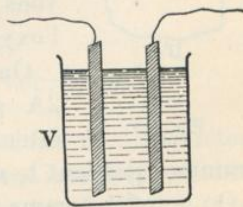


Fig. 151.

En intercalant cet ensemble sur le passage du courant, on constate une dissociation du sel, le cuivre se dépose sur une lame, l'acide sulfurique apparaît à l'autre.

4. *Phénomènes physiologiques.* — Enfin, si nous prenons comme conducteur le corps humain, ce dernier est le siège de phénomènes physiologiques qui produisent des impressions variables suivant l'intensité du courant : ces sensations, qui ne sont pour des intensités faibles qu'une gêne ou une légère souffrance, peuvent devenir intolérables et provoquer des paralysies et même la mort.

Ces divers phénomènes ont un « sens » déterminé ; quand on change le sens du courant, en particulier dans les phénomènes chimiques, on constate des effets différents aux électrodes. On devra donc attribuer un sens au courant.

§ II. — INTENSITÉ.

Les phénomènes précités se produisent avec plus ou moins d'intensité ; suivant leur importance, on dira que le courant est plus ou moins intense.

On pourra prendre, pour définir l'intensité, les phénomènes chimiques susceptibles de mesures très précises ; si nous faisons traverser de l'eau légèrement acidulée par le courant, l'eau se décompose en ses éléments, et nous pouvons recueillir séparément l'hydrogène et l'oxygène.

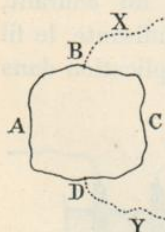


Fig. 152.

On dira qu'un courant qui a décomposé 2A grammes d'eau est deux fois plus intense que celui qui décomposerait A grammes pendant le même temps.

On prendra comme unité de courant le courant qui libérerait 0,0103 milligrammes d'hydrogène par seconde.

Cette unité se nomme l'ampère. On verra plus loin,

par les relations de l'énergie électrique avec l'énergie mécanique, la raison du choix de cette unité.

On constate qu'en tous les points d'un même circuit tel que A B C D, fermé et ne présentant pas de dérivation telle que B X, D Y, l'intensité du courant est la même.

§ III. — QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ.

La terminologie employée en Électricité emprunte beaucoup d'expressions à l'Hydraulique ; on a le courant électrique, comme on a en hydraulique un courant d'eau. Ce dernier débite une certaine quantité d'eau par seconde : par analogie on dira que le courant électrique débite une certaine quantité d'électricité par seconde. C'est une simple manière de parler, car l'électricité n'est pas une substance pondérable, quoique l'on parle parfois du « fluide électrique ». La quantité d'électricité ne correspond donc à rien de réel et n'est que le produit de notre imagination assimilant le courant d'eau au courant électrique.

Par définition, le courant électrique de 1 ampère d'intensité débite une quantité d'électricité égale à l'unité par seconde. Cette unité se nomme le Coulomb ; le courant de 1 ampère débite 1 coulomb par seconde. Le coulomb est donc l'ampère-seconde ; on emploie fréquemment comme unité son multiple, l'ampère-heure.

Il résulte de ce qui précède que la même quantité d'électricité passe en tous les points d'un même circuit fermé et sans dérivations.

§ IV. — POTENTIEL. VOLT.

Le circuit électrique peut passer dans un conducteur A C B, reliant deux points A, B, avec une intensité variable ; par analogie avec l'eau circulant dans une conduite, avec un débit plus ou moins fort suivant la pression qui la force à passer, on attribue à une caractéristique du courant la

faculté de faire passer l'électricité. Cette caractéristique s'appelle : Potentiel.

Donc plus la « différence de potentiel » entre les deux points A, B sera considérable, plus le courant sera intense ; on a choisi une unité pour la mesure des différences de potentiel : c'est le Volt. Nous verrons comment on peut faire les mesures au moyen d'appareils dit Voltmètres.

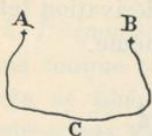


Fig. 153.

En tous cas, on constate que, si un courant de I ampères circule dans le conducteur ACB sous la différence de potentiel V volts, un courant de $2I$ ampères circulera sous la différence $2V$; *il y a donc proportionnalité entre la différence de potentiel ou voltage entre les deux points A et B et le courant circulant dans le conducteur qui relie ces deux points.*

On emploie souvent le terme tension pour désigner une différence de potentiel, on dira par exemple une tension de 200 volts ; les deux expressions sont synonymes.

§ V. — RÉSISTANCE DES CONDUCTEURS.

Supposons que les deux points A et B aient toujours entre eux une différence de potentiel constante ; si nous réunissons ces deux points par un fil gros et court (fig. 154 a) le courant circulera assez intense.

Si on remplace ce fil gros par un fil mince et long (fig. 154 b) il y circulera un courant plus faible ; c'est comme si le conducteur fin et long opposait au passage du courant une *résistance* plus grande.

Soit V la différence de potentiel entre A et B ; réunissons les deux points par un fil de longueur l et de section S ; le

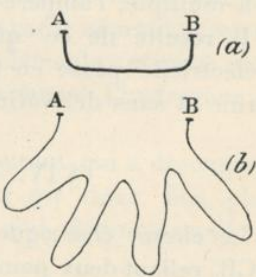


Fig. 154.

courant qui circule est mesuré et trouvé de I ampères ; maintenant mettons un fil de même métal que le premier, de même section, de longueur nl ; le courant ne sera plus que $\frac{I}{n}$.

De même, si, conservant la même longueur l , on avait pris un fil de section $\frac{S}{p}$, le courant eût été $\frac{I}{p}$.

On exprime ces faits en disant : La résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section.

$R = \frac{aL}{S}$; a est un coefficient caractéristique du métal employé, on l'appelle « coefficient de résistivité ». Très faible pour les métaux, il est considérable pour les autres substances.

On écrit parfois l'expression précédente sous la forme : $R = \frac{L}{cS}$; on voit que $a = \frac{1}{c}$; c s'appelle le coefficient de conductibilité.

Ces coefficients caractérisent la conductibilité des différents corps : les métaux (l'argent principalement, le cuivre, etc.) offrent peu de résistance au courant ; les substances isolantes qui empêchent le courant de passer offrent un coefficient a très grand : leur résistance est énorme.

Par exemple : le bois, la pierre, la porcelaine, etc.

L'unité de résistance s'appelle l'Ohm ; la définition exacte (Congrès international de Chicago) en est la suivante : c'est la résistance à 0 degré centigrade d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centim. 3 de longueur. Une colonne de sulfate de zinc dissous dans l'eau et de même dimension aurait 350.000 ohms de résistance ; on voit donc l'énorme différence de résistance entre les métaux et les liquides.

§ VI. — LOI D'OHM.

Elle résulte des définitions précédentes de l'intensité, du potentiel et de la résistance.

Si V est la différence de potentiel exprimée en volts entre deux points A et B, R la résistance (en ohms) du conducteur qui relie ces deux points, I l'intensité du courant qui y circule, chiffrée en ampères, on a entre ces trois quantités la relation :

$$V = RI.$$

On voit que, si entre les deux points on a une différence de potentiel de 1 volt et un conducteur de résistance 1 ohm, il circulera un courant de 1 ampère.

On pourra donc donner cette autre définition de l'ohm : c'est la résistance du conducteur qui, sous la tension de 1 volt appliquée à ses extrémités, donne la circulation du courant de 1 ampère.

Le volt et l'ampère étant fixés, on voit que l'unité de résistance est forcément déterminée, puisque la loi d'ohm établit entre ces trois quantités une relation.

On verra au chapitre Électricité Statique les considérations théoriques qui ont provoqué le choix du volt et de l'ampère.

§ VII. — LOI DE JOULE. PUISSANCE D'UN COURANT.

La loi d'Ohm fixe la relation entre les caractéristiques électriques du courant ; ce courant produit des effets calorifiques et chauffe le fil. La loi de Joule relie la quantité de chaleur produite aux caractéristiques électriques.

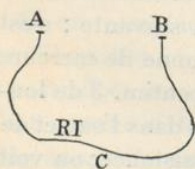


Fig. 155.

Soit un conducteur ACB de résistance R ohms, il y circule un courant de I ampères ; la loi de Joule s'énonce ainsi : La quantité de chaleur dégagée par seconde est égale à :

$$Q = 0,24 RI^2.$$

R étant exprimé en ohms, I en ampères, Q est exprimé en petites calories.

Donc Q étant la quantité de chaleur dégagée par seconde, nous pourrions l'appeler « puissance calorifique » du circuit ACB.

On peut donner son expression sous une autre forme ; en effet, entre les points A, B existe une différence de potentiel qui nous est donnée par la loi d'Ohm :

$$V = RI.$$

$$Q = 0,24 RI^2 = 0,24 I RI = 0,24 VI.$$

La « puissance calorifique » du circuit ACB est égale à $0,24 \times$ l'intensité du courant $\times$ la différence de potentiel.

La chaleur, a-t-on dit (chap. I, § IV-3), équivaut à du travail et on sait que 1 Joule vaut 0,24 calorie. Si donc nous évaluons l'équivalent en travail de cette quantité de chaleur produite par le courant, nous aurons :

Q calories équivalent à 4,18 Q joules.

Donc par seconde :

$$4,18 Q = 4,18 \times 0,24 VI.$$

Or des joules-secondes sont des unités de puissance, des watts : $W = VI = RI^2$, dans le cas d'un conducteur s'échauffant librement.

C'est ce qu'on appelle la Puissance du courant ; ici, nous avons pris pour la démonstration des effets calorifiques seuls, mais si le courant était directement transformé en effets mécaniques, on aurait la même expression.

Remarque. — La puissance du courant exprimée en watts est égale au produit de l'intensité en ampères par la chute de voltage exprimée en volts.

Donc le produit de 1 ampère par 1 volt donne 1 watt. Or 1 ampère par seconde c'est le débit de 1 coulomb ; si de la puissance nous passons au travail :

1 coulomb subissant une différence de potentiel de 1 volt effectue un travail de 1 joule. C'est une autre manière d'ex-

primer la même loi : La quantité d'électricité en coulombs multipliée par la chute de voltage en volts donne le travail effectué par le courant en joules.

§ VIII. — COURANTS DÉRIVÉS.

Au lieu d'un seul conducteur entre deux points A et B, on peut en avoir un certain nombre ; le courant passe dans chacun d'eux et constitue des « courants dérivés ».

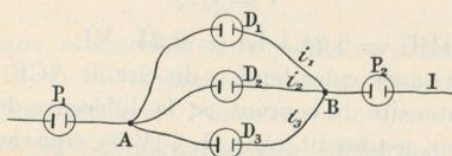


Fig. 156.

Si nous plaçons des appareils à électrolyse qui nous permettront de mesurer l'ampérage ou débit du courant : 1° P_1 et P_2 en amont et en aval des points A et B ; 2° D_1 , D_2 , D_3 sur chacun des courants dérivés, on constate les phénomènes suivants :

La quantité d'électricité passant en P_1 et P_2 est la même ; soit I l'intensité correspondante ; les intensités i_1 , i_2 , i_3 relevées sur les courants dérivés sont telles que :

$$i_1 + i_2 + i_3 = I.$$

C'est identiquement comme une rivière qui a plusieurs bras : les quantités d'eau coulant en amont et en aval des points de bifurcation et de jonction sont les mêmes ; et le débit total est égal à la somme des débits partiels.

On a vu que la résistance d'un conducteur influe sur l'intensité du courant débité (§ V). Ici entre A et B nous avons un certain nombre de conducteurs, de résistances r_1 , r_2 , r_3 . Quelle serait la résistance du conducteur unique qui interposé entre A et B à la place de ces conducteurs donnerait le même débit total I ?

Rien n'étant changé dans le reste du circuit, la différence

de potentiel entre A et B reste la même dans les deux cas. Seulement l'intensité totale I passerait dans ce conducteur.

Soit R la résistance cherchée. On a donc, en appliquant entre A et B la loi d'Ohm, au conducteur cherché :

$$(1) V = R I;$$

et aux conducteurs actuels :

$$(2) V = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3 = \dots$$

De plus nous savons que :

$$(3) I = i_1 + i_2 + i_3 + \dots$$

De (1) et (2) nous tirons :

$$I = \frac{V}{R}; i_1 = \frac{V}{r_1}; i_2 = \frac{V}{r_2}; i_3 = \frac{V}{r_3}; \text{etc.}$$

Remplaçons dans (3) $I, i_1, i_2, i_3 \dots$ par leur valeur il vient :

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{r_1} + \frac{V}{r_2} + \frac{V}{r_3} + \dots$$

Divisons les deux membres de cette égalité par V :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

Si l'on appelle « *conductance* » l'inverse de la résistance d'un conducteur, on peut énoncer la loi suivante :

La conductance du conducteur unique qui remplacerait les conducteurs dérivés est égale à la somme des conductances de ces derniers.

§ IX. — FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UN GÉNÉRATEUR ET D'UN RÉCEPTEUR.

1. *Générateur.* — Soit G un générateur d'électricité ; on sait qu'en tous les points d'un même circuit l'électricité circule avec la même intensité ; la loi est générale et s'applique même à l'intérieur du générateur. Mais ce circuit intérieur offre une résistance R et, suivant la loi de

Joule, RI^2 représente la puissance employée à l'échauffer. D'autre part, si V est la différence de potentiel aux bornes, la puissance dépensée dans le circuit extérieur est VI .

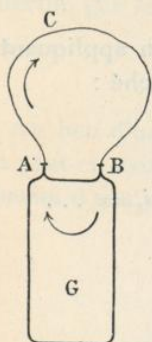


Fig. 157.

La puissance totale fournie par la pile est donc :

$$(1) \quad W = VI + RI^2.$$

Si la pile avait une résistance intérieure nulle, tout se dépenserait dans le circuit extérieur ($RI^2 = 0$), on aurait alors aux bornes une différence de potentiel E telle que :

$$(2) \quad W = EI.$$

De (1) et (2) on peut déduire :

$$EI = VI + RI^2 \text{ ou } E = V + RI.$$

E est appelé force électromotrice de la pile. Cette force électromotrice ne dépend pas des dimensions de la pile, elle n'est fonction que des substances qui la constituent.

On peut donner une autre expression de la force électromotrice d'un générateur ; soit r la résistance du circuit extérieur ; la loi de Joule nous fournit la relation :

$$V = Ir.$$

En remplaçant V par cette expression dans :

$$V + RI,$$

on obtient : $E = Ir + RI = (R + r) I.$

2. *Récepteur*. — Un récepteur est un appareil qui transforme de l'énergie électrique. Soit un appareil R recevant le courant par les bornes A, B ; il est traversé par un courant d'intensité I et entre ses bornes A, B la différence de potentiel est V .

Ce courant qui traverse R produit deux résultats : une partie échauffe le circuit ; si R est la résistance, c'est la puissance RI^2 qui produit cet effet. Une autre partie de la puissance est transformée en travail ; soit W . Comme aux

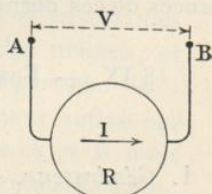


Fig. 158.

bornes A, B la différence de potentiel est V , la puissance fournie au récepteur est VI ;

On a donc :

$$VI = W + RI^2;$$

W est une puissance, nous pouvons la représenter par le produit EI d'un voltage par un ampérage.

$$VI = EI + RI^2 \text{ ou } V = E + RI.$$

On obtient une relation analogue au cas du générateur ; on appelle E force électromotrice du récepteur.

§ X. — LOIS DE KIRCHHOFF.

Soit un réseau de conducteurs ABCDE. A chaque point aboutissent plusieurs conducteurs ; en outre sur les parties AB, BC..., se trouvent des générateurs ou des récepteurs G_1, G_5 . Le sens des courants est indiqué par des flèches.

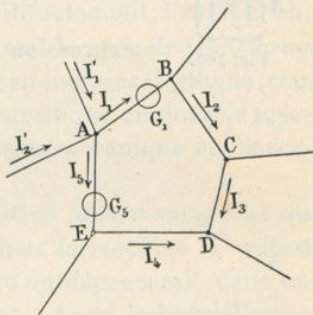


Fig. 159.

1^{re} Loi. — La somme des intensités de tous les courants qui se dirigent vers l'un des sommets du réseau est égale à la somme des intensités de tous les courants qui s'en éloignent.

Dans le cas du sommet A par exemple :

$$I'_1 + I'_2 = I_1 + I_5.$$

2^e Loi. — Si on considère un circuit fermé ABCDEA, la somme des produits de la résistance de chaque conducteur par l'intensité correspondante est égale à la somme des forces électromotrices et contre-électromotrices qui se trouvent dans le circuit, toutes ces quantités étant prises avec des signes convenables.

Si on parcourt le circuit dans le sens ABCD..., il faudra prendre, par exemple, les intensités avec le signe $+$ quand

Physique et chimie. — GILLE.

elles sont dirigées dans le sens ABC..., avec le signe — dans le cas contraire; de même les forces électromotrices ou contre-électromotrices seront prises avec les signes + ou — suivant qu'elles tendront à faire circuler le courant dans un sens ou dans l'autre.

On aura donc :

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 - I_5 R_5 = G_1 - G_5,$$

par exemple.

Prenons le cas particulier d'une pile A de résistance intérieure R, débitant un courant d'intensité I dans un circuit de résistance r; E étant la force électromotrice de la pile, d'après la loi de Kirchhoff on aura la relation :

$$E = RI + rI = (R + r) I,$$

expression déjà indiquée au § IX-2.

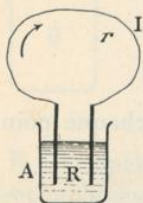


Fig. 160.

CHAPITRE III

Piles.

§ I. — DÉFINITION ET GÉNÉRALITÉS.

Une pile est un transformateur d'énergie chimique en énergie électrique; c'est le premier appareil connu qui ait permis de produire le courant électrique. Mais pour fournir les quantités actuellement employées dans les diverses installations, la pile serait un producteur trop dispendieux.

Aussi, au lieu de transformer directement l'énergie chimique en énergie électrique, on suit la série de transformations suivantes: énergie chimique en énergie calorifique (combustion du charbon). Énergie calorifique en énergie mécanique (machine à vapeur). Énergie mécanique en énergie électrique (dynamo).

Cette longue série est en définitive plus avantageuse que la pile, car le charbon brûlé dans la machine à vapeur coûte moins cher que le zinc qu'on dépenserait dans une pile pour obtenir le même courant. Aussi industriellement emploie-t-on la dynamo conduite par un moteur au lieu de piles.

La première pile fut construite par Volta (1789) en empilant successivement des rondelles de cuivre, zinc, drap mouillé, etc.

§ II. — THÉORIE DE LA PILE.

DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AU CONTACT.

1. *Loi des contacts.* — Volta énonça la loi dite des contacts qui recevait une application directe dans sa pile.

Une différence de potentiel prend naissance au contact

de deux métaux différents ; elle ne dépend que de la nature des corps en contact et de leur température.

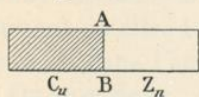


Fig. 161.

Soient (fig. 161) deux morceaux de zinc et de cuivre réunis en AB ; on peut mesurer, au moyen de l'électromètre à quadrants (cf. Électricité Statique), le potentiel absolu en tous les points de cette lame bimétallique.

On constate qu'en tous les points du cuivre le potentiel est le même, V par exemple ; en tous les points du zinc il est le même aussi, mais différent du précédent et plus élevé : $V + v$; v est la différence de potentiel au contact.

Il ne faut pas s'illusionner sur cette différence de potentiel : elle n'est susceptible de fournir aucun courant ; essayons en effet de réunir les deux lames par un fil, du cuivre par exemple (fig. 162).

Le cuivre ayant tous ses points au même potentiel, V , on obtient en (*a*) un potentiel V . En AB du cuivre au zinc, on passe de V à $V + v$; mais en

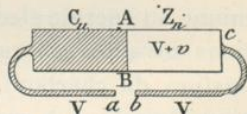


Fig. 162.

c, en repassant du zinc au cuivre on retombe de $V + v$ à V ; donc en *b* on obtient le potentiel V ; en *c* et AB on a la même différence mais en sens inverse, de sorte qu'en définitive les points *a* et *b* sont au même potentiel ; on ne peut par leur réunion obtenir le passage d'un courant.

2. *Pile*. — Tout autre eût été le résultat si, au lieu de réunir directement en *c* le cuivre (*bc*) au zinc, on avait

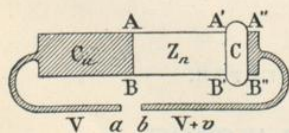


Fig. 163.

fait la réunion par interposition de liquide (fig. 163). En effet on ne constate pas, pour les liquides, de différence de potentiel à leur contact avec les métaux. Entre les deux parties

A'B', A''B'' quoiqu'appartenant à deux métaux différents, mais réunies par un liquide C, on n'aura pas de différence de potentiel.

Par suite, si V est le potentiel du cuivre ($a - AB$), on aura $V + v$ sur le zinc et $V + v$ aussi sur le cuivre ($A''B'' - b$).

Entre les deux points a, b existe donc une différence v ; mais cette différence n'est capable de faire circuler un courant que si l'eau est acidulée; de l'eau pure interposée en C empêche la circulation du courant. Si l'eau est, par exemple, acidulée avec de l'acide sulfurique, celui-ci attaque le zinc et il y a production de sulfate de zinc; c'est l'énergie chimique de cette combinaison qui se transforme en l'énergie électrique du courant produit.

La pile de Volta n'est que la superposition d'un certain nombre d'éléments analogues, au moyen desquels les potentiels successifs sont obtenus égaux à $V, V + v, V + 2v, \dots, V + nv$; n étant le nombre des contacts zinc, cuivre.

§ III. — PILES. POLARISATION.

1. *Pile.* — Au lieu de la disposition peu commode des empilages de Volta, la pile voltaïque est ordinairement constituée de la manière suivante: dans un vase contenant l'eau acidulée (9/10 d'eau et 1/10 d'acide), plongent une lame de cuivre et une lame de zinc. Un fil acb constitue le circuit extérieur où circule le courant. Il passe du potentiel le plus fort au potentiel le plus faible, a-t-on l'habitude de dire, c'est-à-dire dans le sens de la flèche f .

a est le pôle positif souvent indiqué par le signe $+$;

b est le pôle négatif indiqué par le signe $-$.

Les deux lames métalliques se nomment électrodes; a est l'électrode positive, b l'électrode négative.

Le courant va donc de l'électrode positive ($+$) à l'électrode négative ($-$) dans le circuit extérieur acb .

Mais le courant ne se borne pas à la circulation dans le fil extérieur acb ; il circule dans le liquide comme l'indique

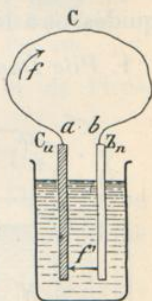


Fig. 164.

la flèche f' , en formant une série de courants dérivés, dont la somme des intensités est égale à l'intensité dans le circuit extérieur.

2. *Polarisation.* — On verra, dans les lois de l'électrolyse énoncées au chapitre suivant, que le courant passant dans un liquide produit une décomposition; le courant intérieur de notre pile, suivant la direction f' , produit cet effet. En même temps que la dissolution du zinc il se produit un dégagement d'hydrogène qui se porte sur le cuivre de la pile et forme autour de lui une sorte de gaine. Au lieu du couple zinc-cuivre, on finit par avoir le couple zinc-hydrogène qui produirait un courant inverse du précédent. Il y a donc d'abord diminution progressive du courant, puis arrêt complet.

§ IV. — PILES A DÉPOLARISANT CHIMIQUE.

On ne peut songer à gratter continuellement la lame de cuivre pour la débarrasser de l'hydrogène qui la recouvre; on a recours à des substances qui se combinent à lui ou se décomposent en donnant des produits qui ne polarisent pas la pile. On donnera deux exemples, l'un de pile à deux liquides, ou à dépolarisant liquide, l'autre à dépolarisant solide.

1. *Pile Daniell.* — Un vase extérieur V contient de l'eau acidulée où plonge le zinc B (fig. 165); le cuivre A, au lieu d'être plongé directement dans l'eau acidulée, est mis dans un vase V', en terre poreuse, qui contient une solution de sulfate de cuivre; ce vase poreux est baigné intérieurement par la dissolution de sulfate, extérieurement par l'eau acidulée; et, grâce à sa porosité qui permet la juxtaposition des liquides, il n'empêche pas le passage du courant.

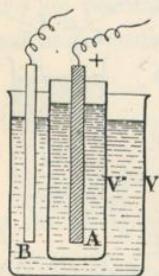
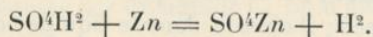
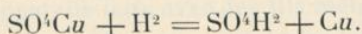


Fig. 165.

L'hydrogène libéré par l'attaque du zinc se porte sur le cuivre :



Mais il se trouve alors en présence de sulfate de cuivre qu'il décompose :



Le cuivre libéré se dépose sur l'électrode positive déjà en cuivre, par conséquent n'altère pas sa composition et n'entrave en rien le fonctionnement. Il y a seulement production de sulfate de zinc à l'extérieur du vase poreux et appauvrissement en sulfate de cuivre à l'intérieur par suite de la décomposition opérée par l'hydrogène. Il faut donc de temps en temps ajouter quelques cristaux de sulfate.

Cette pile très constante est employée fréquemment. (Télégraphes).

2. *Pile Leclanché.* — L'électrode négative A est encore formée par un morceau de zinc; l'électrode positive B est en charbon de cornue et placée au centre d'un vase poreux où sont tassés de petits morceaux de bioxyde de manganèse. Le vase extérieur V contient une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque (AzH^4Cl) où plongent l'électrode A et le vase poreux.

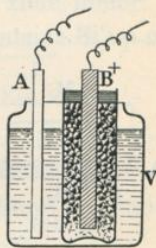
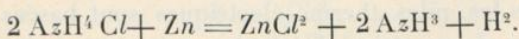
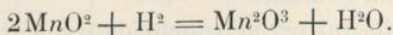


Fig. 166.

La réaction du zinc et du chlorhydrate donne de l'ammoniaque, du chlorure de zinc et de l'hydrogène :



Le chlorure et l'ammoniaque restent dissous; l'hydrogène se porte sur l'électrode positive, le charbon. Mais il attaque et réduit le bioxyde :



L'électrode positive est donc préservée du recouvrement par hydrogène.

Cette pile ne peut servir que par intermittence, car l'action du dépolarisant n'est pas instantanée; il lui faut un certain temps pour absorber l'hydrogène. Sa force baisse donc jus-

qu'à s'annuler, puis, par dépolarisation, elle revient à sa valeur primitive. Elle est employée pour les sonneries, les téléphones, etc.

3. *Zinc amalgamé.* — Le zinc du commerce toujours impur serait attaqué dans ces piles, même quand elles ne fonctionnent pas; pour éviter cette perte, on emploie le zinc dit amalgamé, c'est-à-dire dont la surface est formée par un alliage avec du mercure; on l'obtient en plongeant le zinc décapé dans du mercure. Il s'use ainsi seulement quand le courant passe et ses propriétés au point de vue électrique sont les mêmes qu'auparavant.

§ V. — PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

Soient deux morceaux de métal soudés en A et B; on a vu qu'il existait entre A et B une différence de potentiel, mais il a été démontré qu'il ne pouvait circuler aucun courant dans le circuit $M_1BM_2AM_1$.

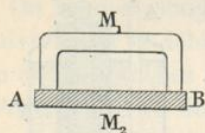


Fig. 167.

Il en est autrement si on chauffe une des soudures; en effet les différences de potentiel au contact dépendent de la température, d'après la loi de Volta. Si les deux soudures A, B sont à des températures différentes, il circulera un courant. C'est l'appareil de Seebeck.

Toutes les piles thermo-électriques sont basées sur ce principe; deux séries de soudures de deux métaux sont maintenues à des températures différentes; il en résulte des différences de potentiel inégales deux à deux, par suite production d'un courant.

Ces appareils qui permettraient de transformer l'énergie calorifique en énergie électrique sont très peu économiques; ils servent à mesurer les différences de température. La pile de Melloni (fig. 168) est formée d'une série de barreaux de bismuth et d'antimoine alternés; la série

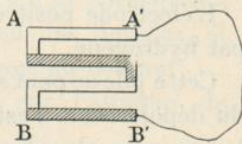


Fig. 168.

de soudures AB étant à une température différente de A'B', il y a circulation de courant.

D'autres appareils faits avec des fils métalliques (Platine et composés du platine) servent à évaluer les très hautes températures (Pyromètres).

§ VI. — COUPLAGE DES ÉLÉMENTS DE PILE.

Une seule pile ne produit pas un courant suffisant pour la plupart des applications ; il est nécessaire d'en employer plusieurs. Mais il existe plusieurs manières de les disposer.

1. *Couplage en tension ou en série.* — Mettons à la suite

les uns des autres des éléments en réunissant le pôle positif de chacun au pôle négatif du suivant. Ainsi, les forces électromotrices tendent toutes à faire passer le courant dans le même sens. Soit I l'intensité de ce courant, R la résistance intérieure de chaque élément ; r la résistance du circuit extérieur AMB.

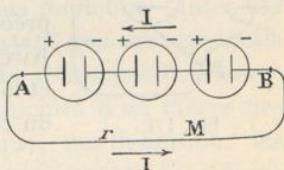


Fig. 169.

On a en vertu de la deuxième loi de Kirchhoff la relation :

$$nE = nRI + rI, \text{ d'où } I = \frac{nE}{nR + r},$$

avec une différence de potentiel entre A et B égale à

$$rI = \frac{nEr}{nR + r}.$$

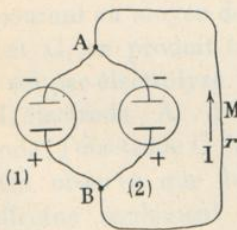


Fig. 170.

2. *Montage en quantité ou en dérivation.* — Réunissons en A les pôles négatifs, en B les pôles positifs. L'intensité dans le circuit extérieur se partage en A ; soit n le nombre des éléments supposés identiques ; l'intensité dans chacun d'eux sera $\frac{I}{n}$.

En appliquant la deuxième loi de Kirchhoff au circuit extérieur et à la pile (1), on a :

$$\frac{1}{n} R + rI = E, \text{ d'où } I = \frac{En}{nr + R}.$$

Et la différence de potentiel aux bornes :

$$rI = V = \frac{nEr}{nr + R}.$$

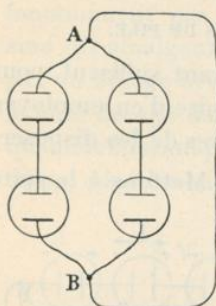


Fig. 171.

3. *Montage mixte.* — Enfin on peut faire un montage mixte ; réunir plusieurs groupes où les piles sont associées en série et monter ces groupes en quantité (fig. 171). On peut trouver comme dans les cas précédents au moyen des lois de Kirchhoff l'intensité dans les circuits et la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur A-B.



CHAPITRE IV

Électrolyse. Accumulateurs.

§ I. — ÉLECTROLYTES. ÉLECTROLYSE.

La plupart des liquides (sels fondus ou en dissolution) ne laissent passer le courant électrique qu'en subissant une décomposition.

Cette décomposition nous a permis de définir l'intensité du courant électrique ; et on a constaté que des appareils permettant de peser les produits de décomposition enregistrent les mêmes effets en tous les points d'un même circuit électrique : en outre on sait que, par définition, les quantités décomposées en un même temps sont proportionnelles aux intensités des courants.

Il reste à compléter l'étude de ces phénomènes et à étudier la manière dont se produit la décomposition, le résultat de la décomposition et les actions secondaires qui en résultent, enfin les lois de Faraday.

§ II. — DÉCOMPOSITION PAR ÉLECTROLYSE.

Si dans un vase V (fig. 172) on place une dissolution d'un sel métallique, et si l'on y fait passer le courant au moyen de deux électrodes A et C, on produit la décomposition du sel par électrolyse.

L'électrode A d'entrée s'appelle anode ; l'électrode C de sortie, cathode.

On observe que la décomposition s'effectue seulement au contact des deux électrodes A et C ; le milieu du liquide peut par suite des actions subséquentes dues à la

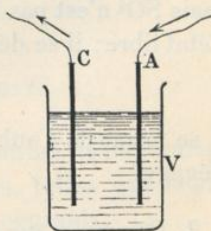


Fig. 172.

libération de certains corps subir des modifications, mais, au moins au début, il ne s'y produit aucun changement.

Le sel métallique est décomposé et le métal se dépose toujours sur la cathode C; le groupement restant se porte sur l'anode.

Par exemple le sulfate de soude SO^4Na^2 se sépare en Na^2 qui va sur C et SO^4 qui se porte sur A; la soude NaOH donne Na sur la cathode, OH sur l'anode.

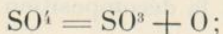
Si au lieu d'un sel métallique on électrolyse de l'eau acidulée, par l'acide sulfurique par exemple, l'acide est décomposé et l'hydrogène joue le rôle d'un métal. Dans l'acide sulfurique SO^4H^2 , H^2 se porte sur la cathode, SO^4 sur l'anode.

§ III. — ACTIONS SECONDAIRES.

L'électrolyse a séparé la molécule chimique en deux parties, mais ces deux parties peuvent soit se décomposer à leur tour, soit agir sur le dissolvant, soit attaquer les électrodes. Ces phénomènes consécutifs à l'électrolyse portent le nom d'actions secondaires.

1. *Décomposition des produits d'électrolyse.* — Soit du sulfate de potassium SO^4K^2 fondu; le courant va porter le potassium K^2 à la cathode, et SO^4 à l'anode.

K^2 se rassemble sous forme d'une gouttelette brillante; mais SO^4 n'est pas la formule d'un corps capable d'exister à l'état libre; il se décompose:



il se forme de l'anhydride sulfurique et de l'oxygène qui se dégage.

2. *Réactions sur le dissolvant.* — Soit l'électrolyse de l'acide sulfurique SO^4K^2 additionné d'eau; d'une part H^2 va à la cathode, SO^4 à l'anode.

L'hydrogène se dégage sans réagir sur l'eau; au contraire à l'anode le radical SO^4 produit une action:



L'oxygène se dégage.

Il se dégage donc en définitive : H^2 à la cathode, O à l'anode; l'acide sulfurique du mélange ne sert que d'intermédiaire et il en subsiste la même quantité. C'est l'eau qui subit une décomposition par suite des actions secondaires.

Quand nous avons dit en définissant le courant que l'eau était décomposée par l'électrolyse, nous n'avons considéré que le résultat; l'acide servant d'intermédiaire est électrolysé et l'eau n'est décomposée que par suite d'action secondaire.

3. *Réactions sur les électrodes.* — Si celles-ci sont susceptibles d'être attaquées par les produits soit de l'électrolyse, soit des actions secondaires, il se produit des réactions; des sels peuvent se former, se dissoudre et modifier la teneur du bain électrolytique.

Quand on veut observer les phénomènes indépendants de ces réactions sur les électrodes, on constitue celles-ci au moyen de substances peu attaquables telles que du platine ou du charbon.

Ces phénomènes sont utilisés par la galvanoplastie, le cuivrage, l'argenture, la dorure, etc.

§ IV. — LOIS DE FARADAY.

Nous avons déjà énoncé un certain nombre de lois concernant les décompositions électrolytiques, telles que la proportionnalité des effets à l'intensité du courant.

On constate également que le poids de sel décomposé est proportionnel au temps, si l'intensité du courant reste constante.

Il en résulte que les quantités de sel décomposées sont seulement fonction des quantités d'électricité qui ont traversé la dissolution.

Ainsi dans l'électrolyse de l'eau, un coulomb dégage 0 millig. 01036 d'hydrogène ; deux coulombs libéreraient 0 millig. 02072 d'hydrogène.

Si on place à la suite les uns des autres plusieurs volta-mètres contenant des électrolytes différents, on peut étudier les relations entre les quantités décomposées dans chacun d'eux, puisqu'ils sont traversés par le même courant.

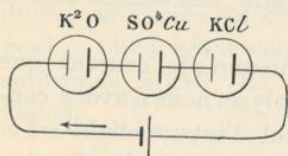


Fig. 173.

Soit par exemple, en série, de l'eau acidulée, une solution de

sulfate de cuivre, du chlorure de potassium fondu.

Les molécules H^2O , SO^4Cu , KCl correspondent à des poids respectifs :

$$H^2O : 2 \times 1 + 16 = 18 \text{ gr.}$$

$$SO^4Cu : 32 + 64 + 63 = 159 \text{ gr.}$$

$$KCl : 39 + 35,5 = 74 \text{ gr. 5.}$$

On constate que, lorsqu'il y a 74,5 grammes de KCl décomposés, il y a $\frac{159}{2} = 79,5$ grammes de SO^4Cu et $\frac{18}{2} = 9$ grammes d'eau décomposés.

Or la chimie classe le cuivre dans les corps divalents, le potassium dans les corps monovalents. H^2 dans l'eau est identique à un corps divalent.

S'il faut n coulombs pour décomposer une molécule d'un sel relatif à un métal monovalent, il en faudra $2n$ pour le sel du métal divalent ; on verrait de même qu'il faudrait $3n$ pour la molécule du métal trivalent.

En somme n coulombs est la quantité d'électricité qui libère une valence d'un métal quelconque.

On a vu que 1 coulomb libérait 0 millig. 01036 d'hydrogène ; H monovalent représentant 1 gramme sera donc

$$\text{libéré par } \frac{1.000}{0,01036} = 96.500 \text{ coulombs.}$$

Ce nombre, 96.500 coulombs, représente la quantité d'électricité nécessaire pour libérer une valence d'un métal quelconque, c'est-à-dire le poids moléculaire du métal divisé par sa valence; soit:

1 gr. d'hydrogène, 108 gr. d'argent, 31,5 gr. de cuivre, 39 de potassium, etc.

§ V. — POLARISATION D'UN VOLTMÈTRE.

FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE.

Soit un circuit PVG contenant une pile P, un ampère-mètre G, un voltmètre V. Connaissant la distance des électrodes du voltmètre, la résistivité de la dissolution saline, la surface des lames électrodes en regard, on peut calculer la résistance de la solution.

On peut savoir d'autre part les résistances respectives du galvanomètre, des fils du circuit, de la pile.

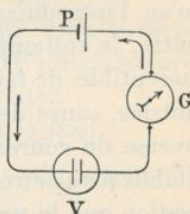


Fig. 174.

Si E est la force électromotrice de la pile, R la résistance totale du circuit, somme des résistances précédemment énumérées, on devrait avoir d'après la loi d'Ohm :

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

Or on constate que l'intensité est plus faible; comme la résistance R n'est pas susceptible d'avoir varié, c'est comme si on avait introduit dans le circuit une force électromotrice, e en sens inverse de E:

$$I' = \frac{E - e}{R}.$$

La pile n'apas varié, ce ne peut donc être que le voltmètre qui par suite du passage du courant fait l'effet d'une force contre-électromotrice.

On dit qu'il y a polarisation du voltmètre.

On observe, en modifiant les surfaces des électrodes, leur distance, que e ne varie pas. Cette force contre-électromotrice n'est fonction que de la nature chimique et physique des électrodes et de l'électrolyte. Elle est donc sous ce rapport tout à fait analogue à la force électromotrice des piles.

On constate également que, si la force électromotrice de la pile E est inférieure à e force contre-électromotrice, le courant passe pendant un temps très court, nécessaire pour produire une polarisation des électrodes et s'annule complètement ensuite.

Enfin si après avoir intercalé le voltamètre dans un circuit tel que l'indique la figure 174, on le retire, on constate qu'en l'introduisant sur un circuit contenant un ampère-mètre, le voltamètre se comporte comme une véritable pile, susceptible de faire passer un courant; et la force électromotrice, cause de ce courant, tend à la faire passer en sens inverse du courant de polarisation. Ce courant secondaire rétablit les électrodes à leur état primitif et supprime la polarisation que le premier courant avait produite.

§ VI. — ACCUMULATEURS.

Les accumulateurs sont des appareils utilisant les propriétés de polarisation des électrodes dans les voltamètres; on commence par faire passer un premier courant qui modifie les électrodes; l'accumulateur devient alors une véritable pile susceptible à son tour de produire un courant dans un circuit fermé.

1. *Accumulateur Planté.* — Deux lames de plomb A , C sont placées dans un vase contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

Lors de la charge, on fait passer un courant indiqué par les flèches (fig. 175). A forme anode, C cathode. Lors de la décharge le courant a le sens indiqué sur la figure 176.

1^{re} Charge. — L'hydrogène se dégage sur C et va dans l'atmosphère. L'oxygène sur A produit de l'oxyde :

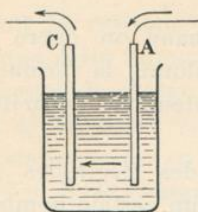
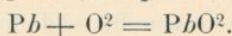


Fig. 175.

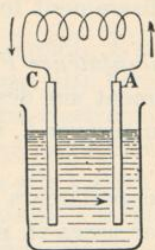
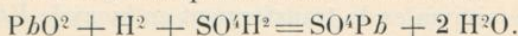
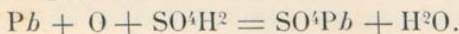


Fig. 176:

1^{re} Décharge. — Le courant passe en sens inverse, l'hydrogène va sur A et réduit l'oxyde PbO^2 ; mais en présence de l'acide sulfurique il donne du sulfate :

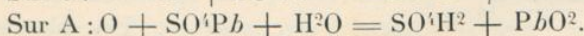
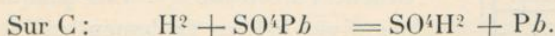


Sur C l'oxygène donne aussi du sulfate en présence de l'acide sulfurique :



Après la première décharge il y a donc du sulfate sur les plaques.

2^e Charge. — C'est le sulfate qui cette fois est décomposé :



On voit que, tant qu'il y aura du sulfate à décomposer, il n'y aura pas de dégagement gazeux.

Quand tout le sulfate sera transformé, d'une part en oxyde PbO^2 , d'autre part réduit en plomb, le plomb sera à son tour oxydé et il y aura des dégagements d'hydrogène comme à la première charge.

La deuxième décharge produit les mêmes effets que la première en formant du sulfate sur les deux électrodes.

Par des charges et décharges nombreuses, on rend le plomb poreux, on forme du sulfate susceptible de se décomposer par une charge convenable et de fournir un courant de durée suffisamment longue.

2. *Accumulateurs Faure.* — Quand on opère comme précédemment sur des lames de plomb, la formation est lente pour arriver à un accumulateur de capacité suffisante.

Les accumulateurs Faure ont des électrodes formées par des carcasses en plomb ayant un certain nombre d'alvéoles où on dépose une matière active.

Au pôle positif on met du minium (Pb^3O^4) délayé avec de l'eau et de l'acide sulfurique ; au pôle négatif, de la litharge (PbO) délayée avec de l'eau et de l'acide.

La 1^{re} charge réduit la litharge à l'état de plomb, et oxyde le minium en le transformant en bioxyde PbO^2 .

Le résultat est le même que dans le cas des plaques en plomb Planté, mais toute la masse de la pâte contribue aux réactions.

3. *Installation des accumulateurs.* — Un certain nombre

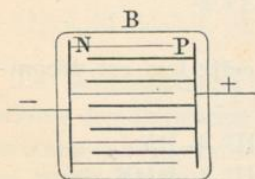


Fig. 177.

de plaques sont disposées parallèlement dans un bac ; les plaques positives sont reliées ensemble et constituent l'électrode $+$. Les plaques négatives reliées également constituent l'électrode $-$. Les plaques sont très rapprochées, mais séparées cependant par des baguettes en verre qui empêchent qu'elles ne se touchent.

Une batterie d'accumulateurs est constituée par un certain nombre de bacs qui peuvent être associés comme des éléments de pile.

4. *Charge d'une batterie.* — Si e est la force contre électromotrice de la batterie, il faut un générateur d'électricité

ayant une force électromotrice $E > e$. Le courant de charge sera :

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

R étant la résistance totale du circuit. L'expérience montre que cette intensité I ne doit pas être forte.

Au début de la charge la force contre-électromotrice d'un élément est environ 1 v. 8; elle s'élève rapidement à 2 v. 1 et reste stationnaire; en fin de charge elle s'élève brusquement à 2 v. 5; la charge est alors finie et il se produit des bouillonnements provenant des dégagements gazeux.

5. *Décharge.* — La force électromotrice de décharge est 2 v. 1 au début et tombe rapidement à 1 v. 9. A la fin elle tombe à 1 v. 85; on doit cesser alors la décharge, sous peine d'altérer les plaques.

L'intensité du courant de décharge ne doit pas être trop forte, autrement on détériorerait les plaques; cependant elle peut être plus grande que celle de la charge.

6. *Précautions à prendre avec les accumulateurs.* — Indépendamment des précautions relatives à l'intensité des courants de charge et décharge déjà indiquées, il faut prendre des précautions dans les locaux contenant les batteries, en raison des dégagements d'hydrogène et oxygène qui forment des mélanges détonants.

Il faut éviter d'y introduire des objets enflammés et d'y placer des interrupteurs ou des appareils pouvant donner des étincelles.

7. *Rendement des accumulateurs.* — Si le courant de charge est d'intensité I , la différence de voltage aux bornes de la batterie étant V , la capacité en travail électrique de la batterie est :

$$W_1 = \int_0^{t_1} IV dt;$$

t_1 étant la durée de la charge.

De même le travail fourni à la décharge sera :

$$W_2 = \int_0^{t_2} I'V' dt.$$

Le rapport $\frac{W_2}{W_1}$ est le rendement de la batterie ; il peut atteindre 90 %.

CHAPITRE V

Aimants et champs magnétiques

§ I. — AIMANTS PERMANENTS ET TEMPORAIRES.

Chacun sait qu'un aimant est un morceau de métal ou de minéral métallique qui attire la limaille de fer ; on peut classer les différents aimants en trois catégories :

1° Les aimants permanents naturels, qui sont des morceaux de minerais de fer jouissant de cette propriété d'attraction ; il en existe parfois des masses considérables dans le sol (Espagne, Suède) capables de fausser les indications de la boussole.

2° Les aimants permanents artificiels constitués par un barreau d'acier auquel on donne la propriété d'aimantation en

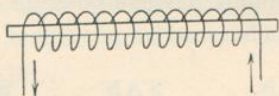


Fig. 178.

le plaçant au centre d'une série de spires où circule un courant : une telle bobine (fig. 178) constitue un *solénoïde*. Le morceau d'acier soumis à son action devient, une fois retiré du solénoïde, capable d'attirer la limaille de fer.

3° Les aimants temporaires sont constitués par un morceau de fer doux qui, placé dans certaines conditions que nous verrons plus loin, possède la faculté d'attirer la limaille ; si on le retire de ces conditions, il perd cette propriété.

§ II. — PÔLES NORD ET SUD.

Si nous suspendons au fil F, n'opposant aucune résistance à la torsion, un aimant NS, ce dernier s'oriente dans une

position bien déterminée par rapport au méridien géographique et au plan horizontal.

Une extrémité du barreau se dirige à peu près vers le nord géographique et, quelque mouvement qu'on imprime au barreau, tend toujours à revenir dans cette direction. On lui donne le nom de *pôle Nord* ; l'autre extrémité porte le nom de *pôle Sud*.

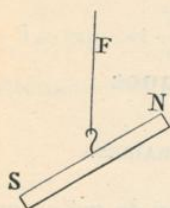


Fig. 179.

Tout barreau aimanté, d'une façon permanente ou temporaire, possède des pôles Nord et Sud.

Si, laissant notre premier barreau suspendu (fig. 179) nous en approchons un autre, on constate que les pôles de même nom se repoussent et que les pôles de nom contraire s'attirent.

Si donc de N nous approchons le pôle N du 2^e barreau, le premier s'orientera de façon que les pôles de nom contraire s'écartent. Si on approche le pôle S du 2^e barreau de N, cette extrémité N tendra à se rapprocher.

On constate que tout barreau possède deux pôles ; on ne peut pas obtenir un barreau ne possédant qu'un seul pôle.

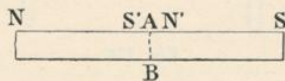


Fig. 180.

Soit en effet un barreau NS (fig. 180) ; brisons-le au milieu en AB, il se formera des deux côtés de la coupure en N' et S' deux pôles tels que les deux barreaux résultants NS', N'S possèdent chacun les deux espèces de pôles.

§ III. — LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.

Ces phénomènes ont été étudiés par Coulomb ; on constate d'abord que les forces qui s'exercent entre les pôles sont

plus ou moins fortes suivant les barreaux employés et suivant la distance.

Coulomb supposait qu'il existait à chaque extrémité des barreaux une masse magnétique qui suivant sa grandeur produisait des attractions ou répulsions plus ou moins intenses.

Les lois qu'il énonça s'appliquent au cas de masses magnétiques isolées ; on a vu qu'il était impossible de les séparer, il faut donc supposer qu'on opère sur des barreaux très longs, tels que les masses situées à l'extrémité non considérée n'aient qu'une influence négligeable.

On remarque aussi que, si on modifie la distance NS, les attractions et répulsions varient comme l'inverse du carré de la distance.

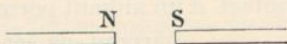


Fig. 181.

Si une masse N qu'on laissera constante provoque sur des masses S placées à une distance constante SN (fig. 181) des actions f , $2f$, $3f$..., on dira que les masses S ont des valeurs m , $2m$, $3m$...

En définitive la loi de Coulomb s'énonce ainsi :

Deux pôles magnétiques s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs masses magnétiques.

L'expression analytique de cette loi sera :

$$F = K \frac{mm'}{r^2}.$$

m , m' étant les masses magnétiques, r la distance qui les sépare, K un coefficient qui dépendra des unités choisies.

1. Il faut supposer les masses concentrées en un point, ou à distance suffisante pour que leurs dimensions deviennent négligeables par rapport à la distance. Car en fait la masse n'est pas localisée en un point mais toute l'extrémité du barreau jouit des propriétés magnétiques

On définit d'après ces actions l'Unité de masse magnétique : c'est la masse qui sur la masse égale placée à 1 centimètre produit une force de 1 dyne.

On voit que cette définition correspond au système CGS. En outre ces unités conduisent à un coefficient $K = 1$.

Par suite, la formule représentative de la loi de Coulomb, en employant les unités CGS, s'écrit :

$$F \text{ (dynes)} = \frac{m m'}{r^2},$$

$m m'$ évalués en unités de masses magnétiques, r en centimètres.

§ IV. — AIMANTATION PAR INFLUENCE. SPECTRES MAGNÉTIQUES.

Si on met au contact d'un aimant permanent NS un petit barreau de fer doux sn , celui-ci est attiré et l'on constate qu'il se forme deux pôles magnétiques, s au contact de N et n' à l'opposé (fig. 182).

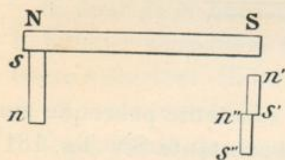


Fig. 182

L'attraction du fer doux par l'aimant n'est donc qu'un cas particulier de l'attraction des aimants ; le fer doux devient lui-même un aimant. C'est une des manières de produire l'aimantation temporaire du fer.

Si, au lieu d'être au contact, le barreau de fer est à distance, $n's'$ devant S, par exemple, le même phénomène se produit ; le pôle n' se forme au voisinage de S et le pôle s' à l'opposé. Un deuxième barreau peut s'aimanter aussi, $n'' s''$, en suivant les mêmes lois.

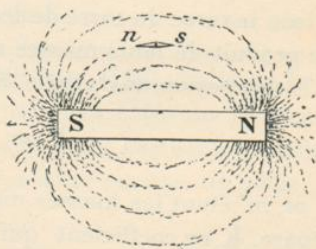


Fig. 183.

C'est grâce à ce phénomène qu'on peut produire les

Spectres magnétiques (fig. 183) : posons sur un barreau aimanté un carton mince que nous saupoudrerons de limaille de fer. Les grains de limaille se touchent et s'orientent à la suite les uns des autres pour former des lignes continues qui constituent le spectre.

Si maintenant nous plaçons une petite aiguille aimantée suspendue à un fil fin en *ns*, on constate qu'elle s'oriente tangentiellement à la ligne de limaille.

Cela n'a rien d'étonnant, puisque, par influence, les grains de limaille constituent de petits aimants : l'aiguille aimantée s'oriente comme eux.

§ V. — CHAMPS MAGNÉTIQUES.

1. *Définition.* — Tout espace où les masses magnétiques subissent l'action de forces constitue un champ magnétique. Ainsi, à la surface de la terre, les barreaux s'orientent sous l'action de ces forces ; c'est le champ dit champ magnétique terrestre. Au voisinage d'un barreau aimanté NS (fig. 183) une petite aiguille *ns* subit l'action de forces qui l'orientent, tout l'espace environnant NS constitue donc un champ magnétique.

2. *Direction du champ. Lignes de Force.* — On appelle direction d'un champ magnétique en un point, la direction que prend une petite aiguille aimantée suspendue en ce point. Ainsi dans l'exemple précédent (fig. 183) *ns* est la direction du champ en ce point.

On a vu que la ligne de limaille passant en *ns* était tangente à la direction de l'aiguille ; on généralise cette idée en définissant la *ligne de force* :

C'est une ligne (représentée réellement par la limaille ou purement géométrique) qui est en tous ses points tangente à la direction du champ.

Si donc on connaît les lignes de force d'un champ, on aura la direction du champ en un point en menant la tangente à la ligne de force qui passe par ce point.

On définit le sens d'une ligne de force ; c'est le sens qui va du pôle sud au pôle nord de la petite aiguille ns ; c'est le sens indiqué par la flèche (fig. 184) et celui que suivrait la masse magnétique nord supposée isolée et placée en ns , sous l'action de la force créée par le champ.

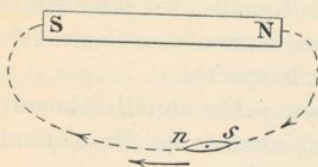


Fig. 184.

3. *Intensité du champ.* — Un champ magnétique est plus ou moins intense ; on dit qu'un champ magnétique a, en un point, une intensité égale à l'unité quand la masse magnétique unité placée en ce point subit une action égale à une dyne. Cette unité se nomme le Gauss.

La force subie par une masse m évaluée en unités de masses magnétiques, dans un champ d'intensité h évaluée en Gauss, est donc :

$$f \text{ (dynes)} = m \times h.$$

4. *Champ magnétique uniforme.* — Quand dans un certain espace toutes les lignes de force sont parallèles, l'intensité du champ étant constante, le champ est dit uniforme. Ainsi dans un espace assez considérable on peut considérer le champ magnétique terrestre comme uniforme. Si on envisageait l'ensemble de la surface du globe, il ne serait évidemment pas uniforme, mais dans un espace de plusieurs kilomètres carrés, s'il n'y a pas de masses magnétiques troublant le champ, les directions prises par l'aiguille aimantée sont parallèles et les actions égales. On peut y considérer le champ comme uniforme.

§ VI. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME SUR UN BARREAU AIMANTÉ.

Soit un barreau NS placé dans un champ magnétique uniforme de direction D et d'intensité h ; le barreau est sus-

pendu par son centre de gravité A et on sait qu'on ne peut séparer les masses magnétiques N et S qui constituent ses pôles. On constate en outre que ces masses sont égales.

Par suite les masses N et S subissent des actions f et f' égales en intensité : mh et contraires en direction.

Le barreau se trouve ainsi soumis à l'action d'un couple f, f' qui tend à le faire tourner autour de A et non à le déplacer.

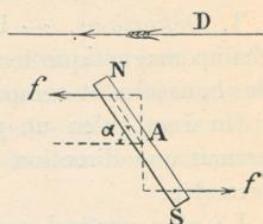


Fig. 185.

L'action d'un champ uniforme se réduit donc à un couple.

Ce couple tend à orienter le barreau dans la direction du champ ; si l est la longueur NS, ce couple, pour une direction α du barreau, a pour valeur :

$$fl \times \sin \alpha ; \text{ or } f = m h ;$$

donc le couple est :

$$hml \sin \alpha.$$

Il s'annule quand le barreau est dirigé suivant D ; ml est une constante du barreau qu'on désigne souvent par la lettre M et qu'on appelle *moment magnétique* du barreau.

§ VII. — AIMANTATION PAR INFLUENCE DANS UN CHAMP.

Si dans un champ de direction D on place un barreau de fer doux F, ce barreau s'aimante par influence, le pôle Nord se formant à l'extrémité N, le pôle Sud en S, tels que la direction SN soit celle du champ.

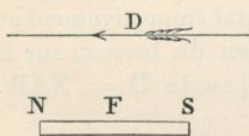


Fig. 186.

Cela explique l'aimantation par influence au voisinage ou au contact des barreaux aimantés ; d'ailleurs tous les phénomènes particuliers précédemment exposés sont explicables par la notion du champ : attractions, orientations, etc.

§ VIII. — CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE.

1. *Définitions.* — Le plus important des champs est le champ magnétique terrestre, puisqu'il produit l'orientation des boussoles et compas.

On a vu qu'en un point déterminé un barreau aimanté prenait une direction sous l'action du champ magnétique terrestre.

Le plan vertical passant par l'axe du barreau constitue le *Méridien magnétique*; il ne coïncide pas exactement avec le méridien géographique et l'angle que font ces deux plans se nomme *Déclinaison*. La Déclinaison est orientale ou occidentale suivant que le pôle Nord de l'aiguille se place à l'Est ou à l'Ouest du méridien géographique.

Mais, d'autre part, le barreau aimanté ne se place pas dans un plan horizontal; on appelle *Inclinaison* l'angle qu'il fait avec le plan horizontal.

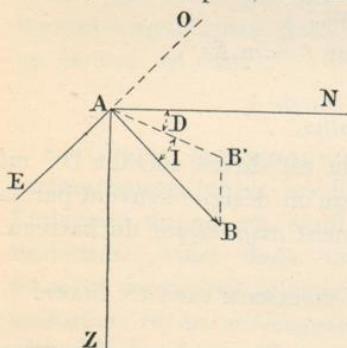


Fig. 187.

Si, par exemple, nous représentons la direction de l'aiguille aimantée AB par rapport au système de coordonnées rectangulaires : AZ dirigée vers le nadir; AN et AE dirigées dans le plan horizontal respectivement au

Nord et à l'Est; AB' étant la projection du barreau sur le plan horizontal, la déclinaison sera l'angle $D = NAB'$, orientale, et l'inclinaison $I = BAB'$.

2. *Variations de la déclinaison.* — On la connaît à Paris depuis 1580; elle était alors orientale et égale à $11^{\circ} 30'$. Elle a diminué et s'est annulée en 1666; puis elle a passé à l'ouest et a atteint le maximum $20^{\circ} 34'$ occidentale en 1814; depuis elle revient vers l'est.

Elle n'est pas la même en tous les points du globe et change même de sens ; les cartes marines et instructions portent les valeurs de la Déclinaison pour les différents points du globe.

En outre, la déclinaison subit des variations annuelles, diurnes, et des perturbations au maximum de $20'$, qui ne sont constatées qu'avec des appareils très précis. Les aurores boréales en particulier produisent des perturbations.

3. *Variations de l'Inclinaison.* — Elle varie aux différents points du globe ; dans certains points le pôle S est au-dessous de l'horizon ; à d'autres, il est au-dessus. Vers le pôle nord il existe des régions où l'aiguille est verticale, l'inclinaison atteint 90° .

A Paris en 1671 elle était de 75° . Depuis elle a diminué. Au 1^{er} janvier 1893, elle était de $65^\circ 8' 5''$; elle était alors en diminution constante de $3' 3''$ par année.

C'est le pôle S de l'aiguille qui, dans notre hémisphère, plonge au-dessous du plan horizontal.

4. *Valeur de l'Intensité du champ magnétique terrestre.*

— On peut rechercher directement la valeur h du champ terrestre, ou bien mesurer séparément H et V , ses composantes horizontales et verticales. C'est cette dernière méthode qui est généralement employée.

Au 1^{er} janvier 1893, les valeurs étaient :

$$H = 0 \text{ gauss } 196 ;$$

$$V = 0 \text{ gauss } 423 ;$$

$$h = 0 \text{ gauss } 466.$$

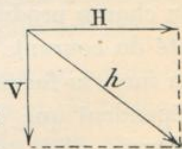


Fig. 188.

CHAPITRE VI

Électrodynamique. Action des courants et des champs.

§ I. — CHAMPS CRÉÉS PAR LES COURANTS.

Si nous suspendons une aiguille aimantée par son centre de gravité, elle va s'orienter suivant la direction du champ terrestre ; un fil de cuivre placé au voisinage n'étant pas susceptible de s'aimanter ne troublera pas l'aiguille : mais, si on fait passer un courant électrique dans ce fil, l'aiguille sera déviée, ce qui montre que le passage de ce courant a créé un champ (Expérience d'Ørsted).

En examinant les spectres qu'on peut produire au moyen de la limaille, ou d'une manière plus rigoureuse, au moyen de petites aiguilles aimantées, on constate que la direction du champ produit par le courant ne varie pas avec l'intensité du courant, si le circuit électrique reste invariable. En un mot, la forme et la disposition des lignes de force ne dépendent que de la forme géométrique du circuit électrique.

Si on fait varier l'intensité du courant, si on le renverse, on constate que l'intensité du champ varie elle aussi, que le sens des lignes de force change. En effectuant des mesures, on trouve que l'intensité du champ en un point quelconque varie proportionnellement à l'intensité du courant.

On voit donc que le courant électrique est susceptible de produire des actions mécaniques sur les aimants, tout comme les aimants.

§ II. — CHAMP D'UNE BOBINE ANNULAIRE.

1. *Forme de champ.* — Soit un fil enroulé en anneau A ; on le fait parcourir par un courant de sens indiqué par les flèches f, f' ; on peut, au moyen d'une petite aiguille aimantée, étudier la forme des lignes de force ; on voit qu'elles forment des courbes fermées telles que l'indique la figure 189.

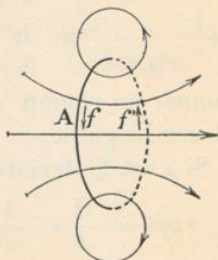


Fig. 189.

L'aiguille aimantée placée au centre de l'anneau tendra à se mettre perpendiculaire à cet anneau.

Quant au sens des lignes de force, on peut le trouver facilement par la Règle d'Ampère : un observateur couché sur le courant de façon que celui-ci le parcoure des pieds à la tête, voit les lignes de force aller de sa droite vers sa gauche ¹.

Si on change l'intensité du courant, la forme des lignes de force ne change pas, comme on l'a dit au § I ; si, au lieu d'une seule spire de fil, on en met plusieurs, on ne change pas sensiblement non plus leur forme : n spires donnent un champ d'intensité n fois plus grande ; c'est comme si on avait envoyé dans le fil unique un courant n fois plus intense.

2. *Galvanomètre.* — On base sur ce principe un appareil destiné à la mesure des courants et dit *Galvanomètre* ; au centre d'une bobine assez grande et très plate G (fig. 190), on place une petite aiguille AB aimantée.

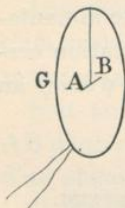


Fig. 190.

En orientant le cadre G dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille AB se mettant dans ce plan sous l'action du champ terrestre vient dans le plan du cadre. Si on lance un courant dans l'appareil, il produit un champ qui dévie l'aiguille et tend à la mettre perpendiculaire au cadre.

1. Il ne faut pas considérer la règle d'Ampère comme autre chose qu'une règle mnémotechnique très commode.

De l'angle que fait l'aiguille avec le plan du cadre, on déduit la valeur de l'intensité du courant. On constate en effet que le champ terrestre h , représenté par le vecteur oh , et le champ de la bobine, OH , se composent suivant la règle du parallélogramme (fig. 191) pour donner un champ résultant OH' suivant lequel vient se placer l'aiguille.

Si α est la déviation de l'aiguille :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{h} = \frac{kI}{h} ; \text{ on peut calculer les déviations ou}$$

graduer l'appareil en y faisant passer des courants d'intensité connue.

3. *Champ d'un solénoïde.* — Nous avons déjà eu l'occasion de parler des solénoïdes ; dans cette bobine longue (fig. 192) il se forme un champ analogue à celui de l'anneau (fig. 189).

On voit donc la raison pour laquelle un morceau de fer doux placé dedans prend une aimantation ; c'est qu'il est situé dans un champ ; tant que le courant passera, il y aura champ, par suite aimantation. Quand le courant cessera de passer, l'aimantation cessera ; elle subsisterait si on employait un barreau d'acier au lieu de fer doux.

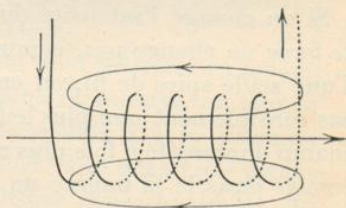


Fig. 192.

§ III. — CHAMP D'UN COURANT RECTILIGNE INDÉFINI.

On constate que les lignes de force sont des cercles de plan perpendiculaire au courant.

On trouve le sens de ces lignes par la règle déjà indiquée du bonhomme d'Ampère ; dans le cas de la figure 193 le sens

est de droite à gauche en arrière de la figure, de gauche à droite en avant.

On voit qu'une masse magnétique nord placée en M

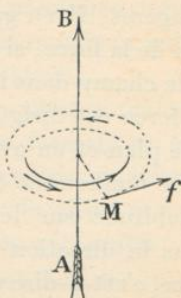


Fig. 193.

subit une force f perpendiculaire au plan MAB (en supposant évidemment la masse isolée).

§ IV. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT.

Nous avons vu jusqu'ici la production de champs, soit par les aimants, soit par les courants électriques, mais nous n'avons parlé que de leurs actions sur les masses magnétiques.

Les champs ont également de l'action sur les courants ; c'est cette action que nous allons étudier maintenant.

Soit un élément d'un courant rectiligne AB d'intensité I ; il est soumis à l'action d'un champ H .

Il résulte une force qui tend à déplacer le courant perpendiculairement au plan ABH et qui est proportionnelle à l'intensité I du courant, à l'intensité H du champ, à la longueur $l = AB$ de l'élément de courant, au sinus de l'angle α des directions du courant et du champ.

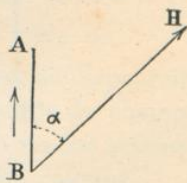


Fig. 194.

En mesurant cette force, on trouverait :

$$f \text{ (dynes)} = \frac{1}{10} I l H \sin \alpha,$$

I étant exprimé en ampères, H en gauss, l en centimètres.

Quant à la direction de la force, si on suppose le courant et le champ dans le plan de la figure 195, la force est dirigée perpendiculairement à ce plan et en avant.

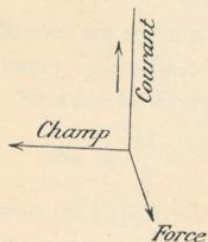


Fig. 195.

Le bonhomme d'Ampère placé comme d'habitude sur le courant et regardant dans la direction où vont les lignes de force, c'est-à-dire vers la gauche (fig. 195), voit la force aller vers sa gauche.

Cette règle permet de retrouver facilement le sens de la force.

On en déduit l'action réciproque de deux courants rectilignes :

Soient (fig. 196) deux courants AB , $A'B'$ rectilignes et de même sens ; le courant AB donne en un point M du

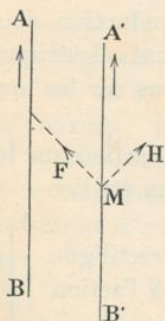


Fig. 196.

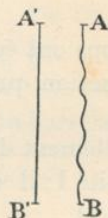


Fig. 196 bis.

courant $A'B'$ un champ H . Sous l'action de ce champ H le courant $A'B'$ subit une action dirigée perpendiculairement au plan $H-AB$, par suite action située dans le plan $AB-A'B'$.

La règle du bonhomme d'Ampère, placé suivant $B'A'$ regardant vers H et ayant F dirigé à gauche, montre que F tend à rapprocher les deux courants AB , $A'B'$.

Donc deux courants parallèles et de même sens s'attirent. On trouverait de même que deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.

On trouverait d'une manière analogue les lois relatives à des courants rectilignes formant un certain angle.

Enfin, on montre expérimentalement que l'action d'un courant sinueux AB est la même que celle du courant rectiligne $A'B'$ ayant mêmes extrémités.

§ V. — APPLICATION AUX AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES.

Si entre les branches d'un aimant NS en fer à cheval on place un cadre C , suspendu entre deux points A , B , sous l'action du courant qui y circulera, le cadre subira des déplacements, des rotations autour de AB ; on pourra graduer cet appareil et faire des lectures.

En général, le cadre est tenu par un fil métallique entre A et B qui s'oppose à la rotation; c'est par la composition de cette torsion et de l'action électrodynamique que le cadre atteint une position d'équilibre.

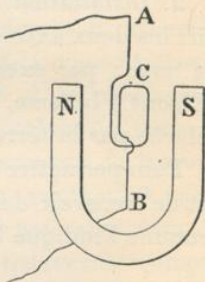


Fig. 197.

On ne se préoccupe pas en général d'orienter l'appareil dans le plan du méridien magnétique, car l'action du champ terrestre sur le courant est négligeable vis-à-vis des actions réciproques du champ créé par l'aimant et du courant.

D'autres appareils peuvent servir de voltmètres et d'ampèremètres; ils sont toujours basés sur les actions produites par des champs sur des aimants permanents ou temporaires ou sur des courants.

§ VI. — APPLICATION A LA TÉLÉGRAPHIE.

1. *Principe.* — La télégraphie est basée sur l'emploi des électro-aimants.

Un électro-aimant est constitué par une ou plusieurs, généralement deux, bobines de fer doux B et B' entourant les branches d'une armature A en forme d'U. Devant l'armature un morceau de fer C maintenu par un ressort R peut être attiré par elle quand le courant, circulant dans les bobines, produit l'aimantation.

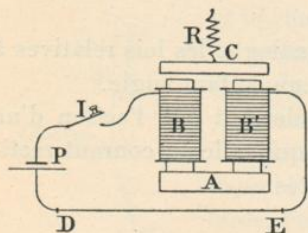


Fig. 198.

Un interrupteur I permet de lancer le courant d'une pile P dans le circuit.

2. *Installation.* — Dans le télégraphe on n'emploie qu'un fil; les deux extrémités sont mises en communication avec la terre; par exemple, dans la figure 198, les points D et E sont à la terre, la partie du fil DE est supprimée et remplacée par la terre.

Pour permettre à deux stations de s'envoyer mutuellement et de recevoir des dépêches, les appareils sont installés comme l'indique la figure 199.

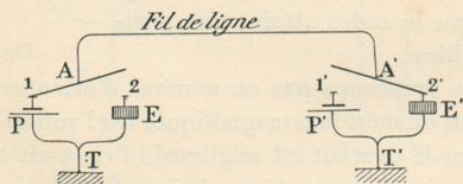


Fig. 199.

De A à A' est le fil de ligne qui peut être branché à chaque poste soit en 1 sur la pile, soit en 2 sur l'électro-aimant récepteur.

Dans le cas de la figure, le courant de la pile P passe dans le récepteur E', au moyen du circuit P, A, ligne, A',

P' , T' , terre, T , P . Donc par des interruptions produites en 1, on fait battre le fer C de l'électro E' et on transmet du poste de gauche au poste de droite.

L'appareil récepteur est constitué comme l'indique la figure 200 ; l'électro E attire le morceau de fer C et fait basculer le levier Cr maintenu par le ressort R ; dans ce mouvement une roulette r , garnie d'encre, vient appuyer sur une bande de papier qui se déroule sur une roulette r' vis-à-vis de r .

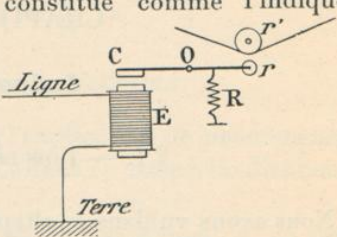


Fig. 200.

Suivant qu'on lance le courant plus ou moins longtemps, on produit des traits ou des points dont les combinaisons servent à constituer un alphabet spécial.

Ce système est le système Morse.

Sonnerie à trembleur. — L'électro-aimant E attire le fer C tenu sur une lame flexible L . Quand le courant passe,

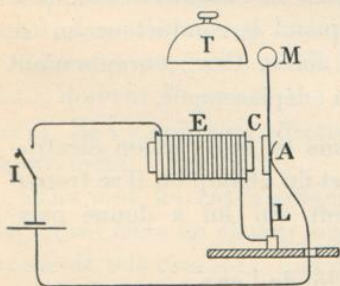


Fig. 201.

C est attiré et le marteau M frappe le timbre T ; mais le courant passe par la lame L et par un contact A qui, lorsque C est allé vers la gauche, se trouve interrompu. Plus de courant, donc plus d'attraction et C retombe après avoir frappé une fois le timbre : le courant repasse par le contact A rétabli à nouveau : nouvelle attraction, nouveau coup mais nouvelle interruption, etc.

Donc tant que l'interrupteur I sera fermé, on aura une sonnerie continue du timbre T , au lieu d'un seul coup qu'on aurait sans le dispositif A .

Cette sonnerie est généralement employée pour les appels de télégraphe et de téléphone, les sonneries de signaux de bord, les sonneries d'appartement, etc.

CHAPITRE VII

Induction.

§ I. — LOIS DE L'INDUCTION.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que deux courants placés au voisinage l'un de l'autre subissaient des efforts tendant à les mettre en mouvement ; réciproquement, si dans un champ magnétique on déplace un conducteur, il s'y produit des forces électromotrices tendant à y faire circuler un courant. Ce phénomène porte le nom d'induction et les courants sont appelés courants induits. On peut énoncer relativement à ces phénomènes les lois suivantes :

1. Quand dans un champ magnétique on déplace un conducteur il s'y produit des forces électromotrices tendant à y faire circuler un courant quand le conducteur en se déplaçant coupe des lignes de force. Ces courants n'ont qu'une durée égale à celle du déplacement.

2. Le courant produit a un sens tel que l'action électromagnétique qu'il reçoit de la part du champ où il se trouve tend à s'opposer au déplacement qui lui a donné naissance.

Cette dernière loi est appelée loi de Lenz.

On constate que la force électromotrice d'induction est proportionnelle à la vitesse de déplacement.

Si, par exemple, dans un certain déplacement d'un circuit de résistance R , effectué en un temps t , on observe une intensité I , c'est que la force électromotrice E d'induction est :

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

Si le déplacement est effectué dans le temps $\frac{t}{2}$ on observe $2I$, d'où :

$$E' = 2E = \frac{2I}{R}.$$

§ II. — COURANTS DE FOUCAULT.

Il en résulte immédiatement l'explication de phénomènes dus à des courants qu'on appelle dans ce cas particulier courants de Foucault.

Si entre les branches N, S d'un électro-aimant A on fait tourner autour d'un fil F une masse de cuivre C, on constate que, sitôt que le courant passe dans les bobines de l'électro, la masse de cuivre cesse de tourner.

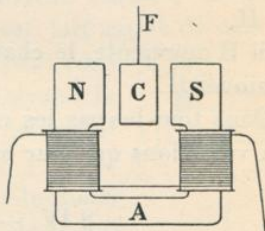


Fig. 202.

Il s'est produit dans la masse de cuivre C des courants induits, puisqu'elle subissait un mouvement dans le champ produit entre N et S.

Ces courants, qu'il est difficile d'évaluer quant à leur grandeur, doivent d'après la Loi de Lenz s'opposer au mouvement. Ils s'y opposent effectivement et suffisent à arrêter le mouvement.

Dans tous les cas analogues de masses métalliques se déplaçant dans un champ magnétique, il se produit dans la masse de tels courants, dits courants de Foucault, qui font un freinage énergétique. Dans certains cas on est obligé pour réaliser des déplacements dans un champ intense d'employer des artifices; on en voit un exemple dans la construction des dynamos.

§ III. — COURANTS INDUITS DUS AUX VARIATIONS DU CHAMP SANS DÉPLACEMENTS.

Soit un circuit ABC comprenant un ampèremètre A et placé dans un champ uniforme de grandeur et de direction H.

On peut produire des courants induits autrement que par les déplacements du circuit.

En effet, en modifiant la valeur du champ ou sa direction, on produit dans le circuit des courants induits.

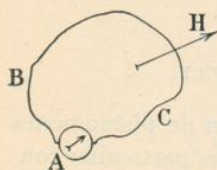


Fig. 203.

Ces courants ont un sens qu'on peut fixer par une loi analogue à la loi de Lenz; en effet ces courants induits circulant dans un circuit ABC créent un champ h , qui se compose avec le champ H .

Si H diminue, le champ h qui en résulte tend à augmenter H .

Si H augmente, le champ h est en sens inverse et tend à diminuer H .

Dans tous les cas les champs induits tendent à s'opposer aux variations qui leur ont donné naissance.

§ IV. — SELF INDUCTION.

Soit un circuit PAI contenant une pile et un interrupteur I; quand le courant y circule, il crée un champ.

Donc quand, l'interrupteur I étant ouvert, on veut le fermer on produit l'établissement de ce champ; ce champ ayant un accroissement (de 0 à sa valeur normale), produit un courant d'induction qui, d'après ce qu'on a vu, tend à s'opposer à son établissement; il est opposé au courant normal.

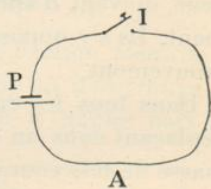


Fig. 204.

A la fermeture d'un circuit il se produit donc un courant d'induction dit de self induction de fermeture qui retarde l'établissement du courant.

Si au contraire on ouvre l'interrupteur I, la diminution du champ (de sa valeur normale à 0) produit un courant induit qui tend à rétablir le champ, donc il est de même sens que le courant normal. C'est le courant de self induction d'ouverture.

Ce dernier est le plus fort des deux et, dans le cas de circuits qui produisent un champ magnétique considérable, il peut être beaucoup plus fort que le courant normal. Cela a pour effet de donner une étincelle de rupture plus forte que l'étincelle de fermeture ; c'est ainsi que les roues des tramways par lesquelles passe le courant ont des étincelles derrière elles, à la rupture, et non devant, à la fermeture.

§ V. — APPLICATION DES PHÉNOMÈNES D'INDUCTION
AU TÉLÉPHONE.

1. *Téléphone de Bell.* — Un barreau aimanté A porte une bobine B dont l'enroulement est fait en fil de cuivre ; les deux extrémités de ce fil (1)-(2) sont reliées à un appareil identique. Devant la bobine se trouve une plaque de métal mince P.

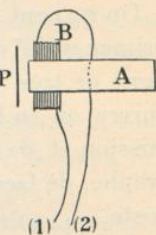


Fig. 205.

Si l'on parle devant P, les vibrations sonores produisent des vibrations de P qui modifient le champ magnétique du barreau A ; il en résulte des courants induits qui sont transmis à un appareil identique par les fils (1) et (2). Ces courants produisent dans le second appareil des variations d'aimantation du barreau A, et par suite des attractions et des répulsions de la plaque semblable à P. Ces mouvements vibratoires qui se produisent au second appareil reproduisent, en faisant vibrer l'air, les vibrations sonores émises devant P. Il y a donc transmission de la parole à distance.

2. *Microphone.* — Cet appareil donne de faibles courants d'induction et ne peut servir aux transmissions à longue distance. Tous les appareils téléphoniques actuels emploient des transmetteurs microphoniques.

Sous une planchette légère Q sont fixés deux blocs de charbon B, B' entre lesquels est tenue une série de crayons de charbon C.

Le courant d'une pile R traverse le microphone et le circuit se ferme sur un récepteur de Bell, tel qu'il a été décrit précédemment, ou sur un appareil analogue constitué par un aimant en fer à cheval.

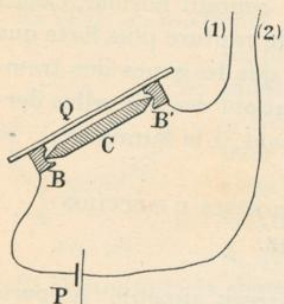


Fig. 206.

Les vibrations produites par la voix modifient les contacts sur B et B', font varier la résistance et par suite l'intensité du courant.

Il en résulte des mouvements de la plaque P qui reproduisent les sons émis devant Q.

On ne peut pas, comme dans le cas des télégraphes, supprimer un fil de ligne; il faut deux fils et encore avoir une ligne de très faible résistance; aussi ces fils sont faits en cuivre ou en bronze. On combine les appareils de transmission et de réception comme on a indiqué pour le télégraphe, de façon à pouvoir envoyer et recevoir de chaque poste.

§ VI. — BOBINE DE RUHKORFF.

Un premier circuit appelé *primaire* est composé par un

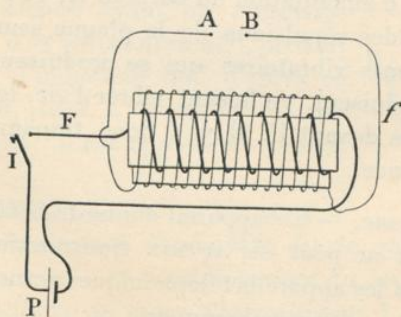


Fig. 207.

nombre peu élevé de spires F d'un fil de cuivre assez gros, où circule le courant d'une pile P.

Autour de ce primaire est enroulé un grand nombre de fois un fil fin f ; sur certaines grosses bobines, ce fil fin a plusieurs kilomètres de longueur. Le fil fin aboutit aux deux bornes A et B.

Si au moyen d'un interrupteur I on produit successivement l'établissement et la rupture d'un courant dans le primaire, ces variations du champ produisent dans le fil fin, ou *secondaire*, des courants induits. Grâce à ces dispositions : gros fil et faible nombre de tours, fil fin et grand nombre de spires, les forces électromotrices induites dans f produisent entre A et B des différences de potentiel très fortes.

Elles sont alternativement d'un sens et du sens contraire, puisqu'elles correspondent alternativement à l'augmentation et à la diminution d'un champ, qui, d'après ce qu'on a vu, induisent des courants inverses.

Pour renforcer le champ, la bobine F, f présente en son centre un noyau de fer doux constitué par un faisceau de fils de fer.

L'interrupteur I est constitué dans les petits appareils comme on l'a vu dans la sonnerie à trembleur, de manière à produire très rapidement un grand nombre d'interruptions. Dans les grosses bobines, on emploie des systèmes plus compliqués mus parfois par des électro-aimants, afin d'obtenir des ruptures fréquentes et surtout très brusques.

§ VII. — APPLICATION DES PHÉNOMÈNES D'INDUCTION

A LA PRODUCTION DE COURANTS.

DYNAMOS¹.

1. *Inducteurs ; circuit magnétique.* — On utilise les phénomènes d'induction pour produire des courants que l'on peut obtenir ainsi plus économiquement qu'avec les piles.

1. L'étude des dynamos et moteurs étant comprise dans le Cours de Machines nous ne donnerons ici que des indications très générales et peu détaillées sur le fonctionnement de ces appareils.

Il faut donc déplacer des conducteurs dans un champ. Ce champ est obtenu au moyen d'un système d'aimants ou d'électro-aimants.

Dans les petites machines (magnétos) on emploie souvent des aimants permanents ; mais, dès que les machines ont une certaine importance, on utilise des électros qui permettent d'obtenir des champs plus intenses et plus constants.

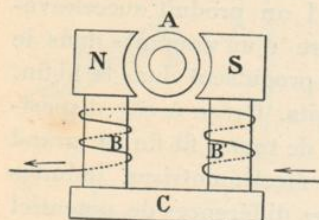


Fig. 208.

Ils sont constitués par deux noyaux en fer doux BB' reliés par une pièce C appelée culasse ;

ils se terminent par deux morceaux de fer NS appelés pièces polaires.

L'enroulement du fil destiné à constituer les bobines se fait sur les noyaux B, B' . Entre les pièces polaires se trouve un anneau de fer A (armature) qui complète l'ensemble, ainsi constitué par B, N, A, S, B', C formant le circuit magnétique.

On lui donne ce nom à cause des lignes de force qui passent dans ce circuit comme un courant dans un conducteur.

La figure 209 montre la manière dont sont disposées les lignes de force dans les inducteurs. Elles se ferment par la culasse comme on l'a indiqué schématiquement ; et passant des pièces polaires dans l'armature, elles sont concentrées dans cette armature ; elles passent toutes dans cette armature, une moitié dans la section pq , l'autre moitié dans la section rs .

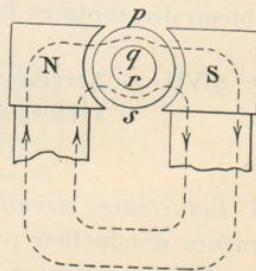


Fig. 209.

2. *Induit.* — Le champ magnétique étant ainsi constitué, il faut déplacer un circuit qui puisse recueillir le courant

induit. Pour cela un fil de cuivre sans fin est enroulé sur l'armature A (fig. 209); c'est l'enroulement Gramme, que nous décrirons seul pour expliquer sommairement le fonctionnement de ces appareils.

L'anneau, couvert par cet enroulement, tourne dans le champ; l'armature A du circuit magnétique n'est donc pas fixe, mais elle joue quand même le rôle de concentration des lignes de force, à condition qu'elle soit en fer aussi doux que possible.

On voit (fig. 210) que les lignes de force pénètrent dans l'armature entre les spires de l'enroulement sur sa face extérieure; donc, quand l'induit tournera (sens de la flèche f) il se produira des courants d'induction, puisque le fil coupe des lignes de force.

Nous connaissons le sens H du champ, celui f du déplacement; la combinaison de la loi de Lenz et de la règle du bonhomme d'Ampère nous fixe le sens f' de circulation des courants dans le côté gauche de l'enroulement induit (fig. 211).

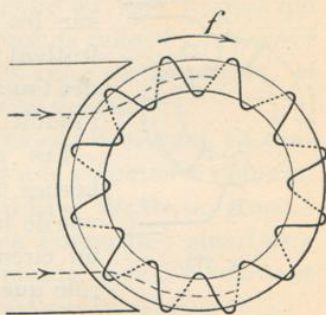


Fig. 210.

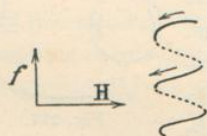


Fig. 211.

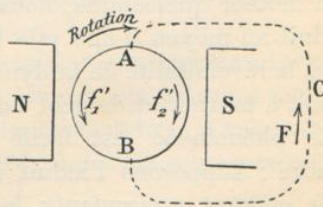


Fig. 212.

On verrait facilement que, sur le côté droit de l'enroulement, la circulation se fait en sens inverse. En figurant schématiquement l'induit (fig. 212), entre les points A et B

on a des courants circulant des deux côtés suivant les sens f'_1 et f'_2 .

Si on laisse l'appareil ainsi constitué, les deux courants opposés s'annulent; mais si on les réunit par un circuit extérieur ACB, on a dans ce circuit extérieur circulation d'un courant continu entre A et B suivant le sens F.

Les deux courants f'_1, f'_2 ne sont que les courants dus au circuit général bifurqué entre A et B.

La liaison des points A et B (fig. 213) est obtenue au moyen de deux contacts A et B frottant sur les fils de l'induit (en fait ils ne frottent pas directement; ils frottent sur des touches de cuivre en relation avec l'induit).

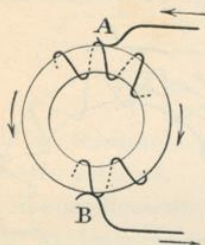


Fig. 213.

Les points A et B constituent les bornes de la dynamo qui, au point de vue de la circulation d'un courant dans un circuit extérieur, jouent le même rôle que les pôles d'une pile.

§ VIII. — RÉVERSIBILITÉ DES DYNAMOS. MOTEURS.

Si, au lieu de produire la rotation de la dynamo au moyen d'un moteur quelconque, nous produisons le courant dans l'induit au moyen d'une pile P, on observe la réversibilité de la dynamo: elle se met à tourner et devient un moteur.

Ce phénomène est facile à comprendre: supposons l'induit immobile et le courant y circulant; les fils de

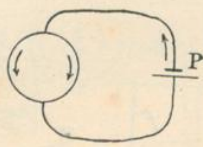


Fig. 214.

l'induit constituent des courants placés dans le champ produit par les inducteurs. Il en résulte des actions mécaniques qui tendent à faire tourner l'induit et on obtient un moteur.

Les moteurs électriques ne sont donc pas d'une construc-

tion différente des dynamos ; seulement, au lieu de recueillir le courant de celle-ci, on y envoie un courant, elle tourne et est susceptible d'effectuer un certain travail.

§ IX. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE A DISTANCE.

L'invention des dynamos et moteurs a permis de réaliser des transports d'énergie à distance qui permettent d'utiliser des forces naturelles difficilement utilisables autrement.

Par exemple une chute d'eau dans une montagne servira à faire tourner une roue hydraulique ou une turbine qui fera tourner une dynamo. Le courant de celle-ci sera envoyé à une certaine distance dans les villes ou des usines, et employé à alimenter des moteurs ou des lampes.

On a donc des lignes électriques portant le courant. Ce courant est caractérisé par une différence de potentiel E et un ampérage I ; la puissance transmise est $EI = W$. Or, on proportionne la section des fils de ligne à l'intensité : plus I sera grand, plus la section sera forte, plus la ligne sera lourde et coûteuse.

Donc pour transmettre la même puissance W , si on diminue I il faut augmenter E ; par suite les transmissions à grande distance se font à très haut voltage.

Il en résulte bien des inconvénients : dangers d'électrocuter les gens sur le passage de la ligne, difficulté d'utiliser le courant à haut voltage.

La première considération n'a évidemment pas tenu devant l'intérêt pécuniaire : on a élevé les poteaux pour les rendre inaccessibles et mis des écriteaux avertisseurs ; d'autres fois on a enterré les lignes constituées par des fils soigneusement isolés.

Le second inconvénient a été résolu par l'emploi de courants alternatifs et polyphasés.

§ X. — COURANTS ALTERNATIFS.

Jusqu'ici nous avons vu que dans un circuit ACB, nous avons une différence de potentiel constante V entre A et B,

et une intensité I constante donnée par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{V}{R}, \text{ } R \text{ étant la résistance ohmique du circuit ACB.}$$

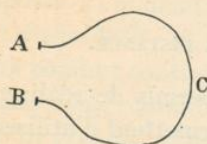


Fig. 215.

C'est le courant dit continu.

Le courant alternatif est caractérisé par une différence de potentiel entre A et B qui varie avec une très grande rapidité et une intensité variant avec la même rapidité.

Dans la plupart des installations, ces variations sont sinusoïdales et la différence de potentiel entre A et B peut se représenter par :

$$v = V \sin \omega t.$$

Dans l'intervalle d'une période, la différence v prendra les valeurs $0, +V, 0, -V, 0$. Elle change donc périodiquement de sens. Mais cette période est courte ; dans les installations électriques destinées à l'éclairage, il y a ordinairement 42 périodes à la seconde.

D'autre part, l'intensité dans la ligne se représente par : $i = I \sin (\omega t + \varphi)$. La période est la même, mais le voltage entre A et B et l'intensité ne s'annulent pas en même temps.

Sans entrer dans de plus longs détails au sujet de ces courants dont l'emploi se répand universellement à terre, on dira qu'ils sont produits par des appareils analogues aux dynamos et appelés *Alternateurs*. Le courant transporté sur la ligne à très haut voltage (plusieurs milliers de volts) est réduit à quelques centaines de volts par des *Transformateurs* et ainsi utilisé dans les lampes ou dans des moteurs spéciaux.

§ XI. — COURANTS POLYPHASÉS.

Figurons (fig. 216) une série de circuits électriques identiques $A_1 B_1, A_2 B_2, \dots A_n, B_n$; soit $i_1, i_2, \dots i_n$ les intensités dans les circuits au même instant t . Supposons que

ces intensités soient représentées par des fonctions sinusoïdales de la forme :

$$i_1 = I \sin \omega t.$$

$$i_2 = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{n}\right).$$

$$i_n = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi(n-1)}{n}\right).$$

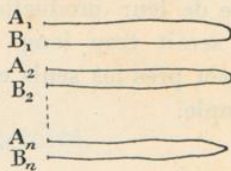


Fig. 216.

On dit que ces courants $i_1, i_2, \dots i_n$ sont *polyphasés*.

Un des plus employés est le courant triphasé dans lequel $n = 3$; on a alors 3 circuits et :

$$\begin{cases} i_1 = I \sin \omega t. \\ i_2 = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \\ i_3 = I \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Une propriété très importante de ces courants est qu'on peut supprimer le fil de retour et par suite n'avoir qu'un système de trois fils pour l'ensemble des 3 circuits.

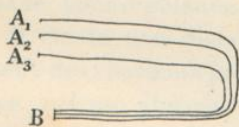


Fig. 217.

En effet supposons que les 3 fils de retour soient liés en un seul fil B; dans ce fil circulera une intensité

égale à la somme des 3 : $i_1 + i_2 + i_3 =$

$$I \left[\sin \omega t + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 0.$$

Car on sait que la somme des sinus en progression arithmétique est nulle.

Donc le fil B n'est parcouru par aucun courant; on peut le supprimer, on réunit donc les 3 fils à leur extrémité B (fig. 218), sans que l'intensité dans les fils A_1B, A_2B, A_3B ait été changée.

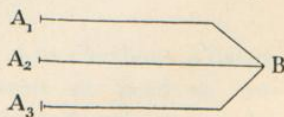


Fig. 218.

Ces courants polyphasés ont des avantages au point de vue de leur production et de leur utilisation sur lesquels il serait trop long de s'étendre; ils sont actuellement à peu près les seuls employés au lieu du courant alternatif simple.

CHAPITRE VIII

Applications de l'électricité.

§ I. — LAMPES A ARC.

1. *Arc électrique.* — L'arc électrique est obtenu en plaçant vis-à-vis l'un de l'autre deux conducteurs entre lesquels existe une différence de potentiel suffisante.

Généralement on emploie des crayons de charbon très compact taillés en pointe ; si on met les crayons au contact, le courant passe, mais les pointes, offrant une grande résistance, s'échauffent et rougissent immédiatement ; en les écartant, on voit jaillir un arc lumineux d'un blanc bleuté éblouissant.

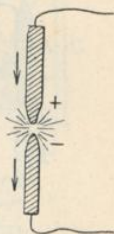


Fig. 219.

Il existe une distance convenable d'écartement des charbons pour laquelle la lumière est brillante et fixe ; cet arc absorbe une intensité considérable, de 4 à 10 ampères pour les lampes à arc d'éclairage, jusqu'à 50 à 100 ampères pour les projecteurs (sous une cinquantaine de volts).

Le charbon positif placé généralement dans les lampes à arc au-dessus du charbon négatif s'use plus que celui-ci ; les gaz chauds qui montent facilitent sa combustion ; en outre il se creuse un cratère au centre de sa pointe. Aussi lui donne-t-on une section plus grande que celle du charbon négatif.

2. *Régulateur. Lampes à arc.* — Les charbons s'usent, par suite leur écartement s'accroît et perd sa valeur optima ; il faut donc un appareil qui ramène les charbons à une distance convenable. En outre, ce régulateur doit produire l'allumage, c'est-à-dire mettre les charbons au

contact quand le courant est envoyé dans la lampe à l'allumage, et les écarter pour produire l'arc. Il faut, en effet, pour qu'une lampe soit commode que ces opérations se fassent automatiquement par simple fermeture du courant, sans qu'on soit obligé de manipuler les lampes.

A titre d'exemple, nous décrirons un des systèmes de régulateurs qui sont fort nombreux.

Le charbon négatif B est fixe; le charbon positif A est

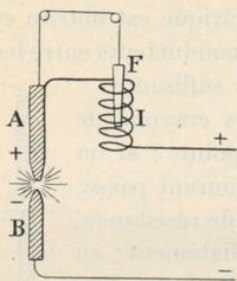


Fig. 220.

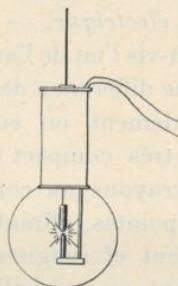


Fig. 221.

suspendu par un fil auquel est attaché un contrepoids F en fer qui peut se déplacer dans un solénoïde I; ce contrepoids est un peu plus léger que le charbon A, de sorte qu'au repos, le courant ne passant pas, A vient appuyer sur B.

Si on lance le courant, il passe par les deux crayons au contact et dans la bobine I; celle-ci produit une attraction sur F qui descend; le charbon positif A monte, s'écarte de B et par cette séparation allume l'arc. La lampe est donc allumée par le seul établissement du courant.

Supposons maintenant que le charbon A monte trop haut ou, s'usant, augmente trop l'écartement des deux charbons: l'arc plus long présente une résistance plus grande, et comme l'indique la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$, l'intensité diminue, l'attraction de F par I diminue, F remonte un peu, A retombe et la distance diminue entre A et B.

Il y a donc réglage de l'arc. Toutes les conditions sont remplies.

Toute lampe à arc comprend un appareil analogue placé au-dessus de l'arc qui est mis dans un globe en verre ; l'ensemble est généralement suspendu en l'air, de façon à éclairer un espace assez considérable.

3. *Projecteurs.* — L'arc électrique est placé au foyer d'un miroir (cf. Optique), le charbon positif regardant le miroir (fig. 222) ; en effet, le charbon positif donne beaucoup plus de lumière que le négatif et les rayons sont ainsi envoyés sur le miroir et réfléchis convenablement.

Le projecteur se compose d'une enveloppe cylindrique dont le fond est formé par le miroir, la face avant par une glace G. Cette glace est souvent faite de petites bandes de verre juxtaposées pour éviter les dilatations dues à la chaleur intense de l'arc qui pourrait faire fendre le verre. Un régulateur est placé dans l'appareil.

Le projecteur est soutenu par deux tourillons portés par une fourche reposant sur un pied ; on le commande souvent à main au moyen de poignées, parfois à distance en envoyant le courant dans des moteurs placés dans le socle.

La partie délicate des projecteurs est le miroir ; celui-ci, fait en verre le plus souvent, est assez lourd et épais ; il subit des dilatations à l'allumage et des contractions à l'extinction ; d'où des ruptures fréquentes. Aussi quand on éteint un projecteur doit-on prendre la précaution de le couvrir pour qu'il ne se refroidisse pas trop rapidement.

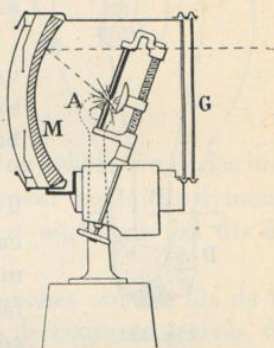


Fig. 222.

§ II. — LAMPES A INCANDESCENCE.

Pour l'éclairage des appartements et des parties intérieures des bâtiments, on emploie surtout les lampes à incandescence ; dans une ampoule vide d'air A (fig. 223), un filament de charbon artificiel F est parcouru par un courant. Il émet une lumière jaunâtre assez vive.

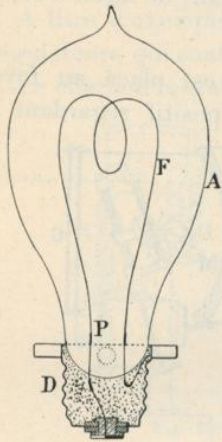


Fig. 223.

L'ampoule de verre A est sertie dans une douille D, qui sert à fixer la lampe ; souvent cet emmanchement est à baïonnette.

Le filament de charbon F vient se fixer à deux fils P qui traversent le culot de la lampe ; ces fils, anciennement en platine, sont actuellement faits en un alliage qui présente le même coefficient de dilatation que le verre.

On caractérise une lampe par le voltage qu'il faut établir entre les extrémités des fils P et l'intensité lumineuse qu'elle doit donner. Par exemple, une lampe de 110 volts et 10 bougies est une lampe qui travaillera sous une différence de potentiel de 110 volts et donnera une intensité lumineuse de 10 bougies.

Si on met la lampe sur une différence de potentiel plus grande, on brûlera le filament de charbon ; sur une différence plus faible le filament deviendra rouge, mais sans éclairer. Une lampe travaillant dans de bonnes conditions doit donner de 800 à 1.000 heures d'éclairage normal.

Au lieu d'un filament de charbon F on a imaginé récemment des fils de métaux spéciaux (Lampes au tantale, à l'osmium, etc.) ; ces lampes sont plus coûteuses, mais elles donnent un éclairage plus brillant et souvent plus économique ; elles commencent à se répandre dans les installations à terre.

§ III. — INSTALLATIONS A BORD DES BATIMENTS.

L'électricité s'est considérablement développée dans ses applications à bord des bâtiments, en raison des commodités qu'on trouve à son emploi.

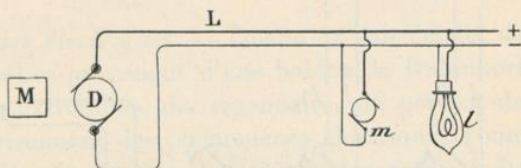


Fig. 224.

La figure 224 indique la disposition schématique des installations à bord. Un moteur M à vapeur conduit la dynamo D ; les deux bornes de celle-ci sont mises sur les fils de ligne L.

Les appareils récepteurs sont branchés sur les fils de la ligne et constituent ainsi une série de courants dérivés. Si $i_1, i_2, \dots$ sont les intensités des courants circulant dans les appareils récepteurs, l'intensité totale circulant dans la ligne au départ de la dynamo est :

$$I = i_1 + i_2 + \dots$$

Au lieu d'une seule ligne, ou un seul circuit L, on peut en avoir plusieurs ; par exemple circuit bâbord, circuit tribord ou circuit AV, circuit AR.

On met toujours deux fils pour ces lignes et on ne fait jamais, comme dans le télégraphe, un retour par la terre, qui serait ici un retour par la coque du bâtiment.

En général, la jonction des lignes à la dynamo se fait sur un *Tableau de distribution* : c'est une plaque isolante (marbre, ardoise ou bois) sur laquelle (fig. 225) sont fixées des barres en cuivre qui font les jonctions.

En D il y a liaison avec les bornes de la dynamo ; on peut couper cette liaison avec un interrupteur I.

On a figuré deux lignes (1), (2) ; chacune possède un

interrupteur I_1 et I_2 et un ampèremètre A_1 , A_2 ; on peut ainsi isoler les lignes avec I_1 et I_2 et au moyen de A_1 , A_2 constater le débit d'électricité. Un voltmètre V permet de voir le voltage aux bornes de la dynamo.

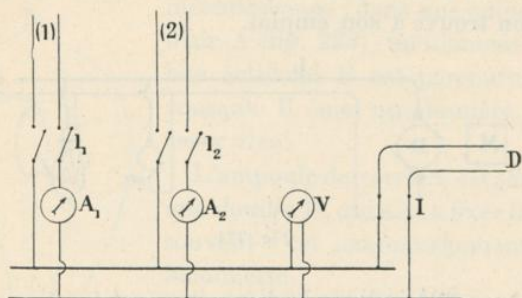


Fig. 225.

Un circuit important est celui qui alimente les feux de navigation; ceux-ci sont allumés par des commutateurs placés dans l'abri de navigation et on peut se rendre compte s'ils fonctionnent convenablement.

Pour avoir la sécurité nécessaire, on emploie souvent deux dynamos qui se servent mutuellement de rechange en cas d'accident à l'une d'elles.

Les circuits électriques alimentent aussi les sonneries et transmetteurs; les sonneries sont toujours employées, mais on préfère les transmetteurs mécaniques (Chadburns et autres), d'un emploi plus sûr, aux transmetteurs électriques.

Les transmetteurs électriques sont soit à lampes, soit à galvanomètres. Le système à lampes consiste en un certain nombre de lampes à incandescence placées derrière des numéros transparents; par leur allumage on fait apparaître des chiffres lumineux qui, par leur combinaison, permettent d'envoyer des ordres.

Les transmetteurs à galvanomètres sont des appareils analogues aux ampèremètres; mais l'aiguille au lieu de désigner des chiffres d'intensité s'arrête devant des indica-

tions inscrites sur le cadran ; suivant l'intensité du courant on fait varier les indications. Tous ces appareils, très employés en marine militaire, le sont peu au commerce.

§ IV. — TÉLÉGRAPHIE SANS FIL.

1. *Ondes électriques.* — Quand on fait éclater dans l'air des étincelles provenant d'une bobine de Ruhmkorff, entre les deux extrémités du secondaire, on produit dans l'espace environnant des phénomènes électriques connus sous le nom d'ondes hertziennes. Ces ondes peuvent être décelées par un de leurs effets, découvert par M. Branly : soit un circuit composé d'une pile P, d'une sonnette S et d'un appareil spécial TL dit cohéreur. Il consiste en un tube de verre T où est placée de la limaille métallique fine serrée entre deux plaques de métal.

La limaille de corps même très bons conducteurs tels que l'argent est à peine conductrice ; dans le circuit fermé sur la limaille, il ne passe qu'un faible courant. Si l'appareil est placé dans le champ des ondes hertziennes, la limaille devient brusquement conductrice ; si les ondes cessent de se produire et si la limaille est métallique, le courant continue à passer : pour ramener le système au premier état, il faut donner un choc léger au cohéreur.

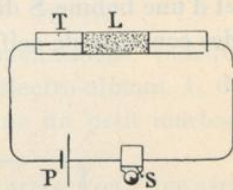


Fig. 226.

On pourra, au moyen de la sonnerie, constater la conductibilité du circuit. C'est le principe de la Télégraphie sans fil.

2. *Installation de la télégraphie sans fil.* — Au lieu d'un appareil à interruptions par trembleur, comme on l'a décrit dans le paragraphe relatif à la Bobine Ruhmkorff, on emploie souvent un alternateur qui envoie des courants périodiques dans le primaire de la bobine. Cela produit les mêmes effets

que les interruptions : le courant changeant de sens produit des variations de champ et par suite des courants induits.

Une installation de Télégraphie sans fil comporte un poste transmetteur et un poste récepteur.

a) *Poste transmetteur.* — Un alternateur S (fig. 227) envoie un courant alternatif (50 périodes à la seconde) dans le primaire B_1 d'une bobine d'induction ; le secondaire B_2 est le siège de courants induits qui produisent des étincelles en E, appareil composé de deux boules métalliques placées en regard et appelé éclateur.

En dérivation sur l'éclateur est placé un système composé d'un condensateur C (cf. chapitre suivant : Électr. statique) et d'une bobine S dite de self, car elle est destinée à donner des courants de self induction.

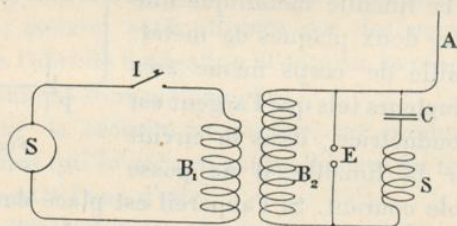


Fig. 227.

Par A l'appareil est lié à un système de fils tenus en l'air par des isolateurs et appelés antennes ; ce sont deux ou trois fils parallèles tenus, horizontalement le plus souvent, entre les mâts du bâtiment.

b) *Poste récepteur.* — L'antenne A est liée à une bobine B'_1 et en communication, par cet intermédiaire, avec la Terre (Poste à terre) ou la coque d'un bâtiment (fig. 228).

Les ondes hertziennes produisent des courants dans l'antenne et dans B'_1 ; en face de B'_1 est une autre bobine B'_2 où se produisent par induction des courants ondulatoires.

Cette bobine B'_2 est sur un circuit P'_1 , B'_2 , R , Co , comprenant en P'_1 une pile, Co le cohéreur à limaille, R un électro-aimant-relais. Un condensateur C' est en dérivation sur B'_2 .

Quand les ondes viennent frapper l'appareil, le cohéreur Co devient conducteur, le courant de la pile P'_1 passe dans le circuit. Le relais R agit alors : l'électro R ferme le circuit voisin TMP'_2 : le courant de la pile P'_2 circule dans ce deuxième circuit en actionnant un appareil télé-

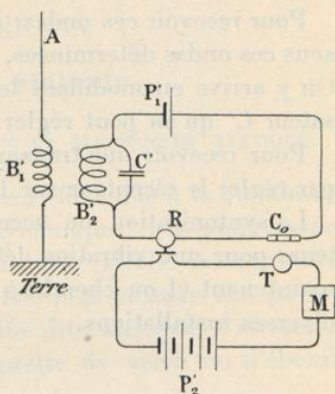


Fig. 228.

graphique M ; le courant circulerait indéfiniment, puisque le cohéreur a été actionné; mais un électro-aimant T , dit tapeur, placé sur le 2^e circuit, actionne un petit marteau qui frappe le cohéreur.

Si les ondes hertziennes continuent à arriver on a une série de coups de marteau sur Co qui ainsi, sitôt ramené à son état naturel, est réimpressionné à nouveau. Le courant circule d'une façon à peu près continue dans M .

On envoie les ondes au moyen de l'interrupteur I (fig. 227). Donc, tant que I sera fermé, le récepteur M agira et marquera un trait sur la bande de papier de l'appareil M . Si I est fermé et ouvert rapidement on enregistre un trait court ou un point. On peut donc se servir de cet appareil comme d'un télégraphe ordinaire.

3. *Syntonisation.* — Les ondes hertziennes se répandent dans toutes les directions; on a essayé d'assurer le secret par la syntonisation qui permet également de communiquer à de plus grandes distances.

On a étudié en Acoustique les phénomènes de résonance; il se produit ici un phénomène analogue; une certaine disposition des bobines B_1 , B_2 , S , du condensateur C ,

de l'antenne, correspond à des vibrations déterminées d'ondes hertziennes.

Pour recevoir ces ondes, il faut que le récepteur résonne sous ces ondes déterminées, qu'il soit « accordé » avec elles. On y arrive en modifiant les bobines B'_1 , B'_2 et le condensateur C' qu'on peut régler.

Pour recevoir une transmission, il faut donc commencer par régler le récepteur sur l'onde qu'on veut recevoir.

La syntonisation ou accord des récepteurs et transmetteurs pour une vibration déterminée est à peu près réalisée maintenant et on cherche à la rendre plus parfaite dans les diverses installations.

CHAPITRE IX

Électricité statique.

§ I. — ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE ET ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Nous avons étudié jusqu'ici les effets dus à la circulation de courants, ou électricité dynamique; ces phénomènes n'ont été connus qu'à la fin du XVIII^e siècle. Au contraire, on connaît depuis les temps les plus reculés des phénomènes produits par l'électricité dite statique : attraction des corps légers par une baguette de verre ou d'ébonite frottée par exemple.

Au point de vue historique l'électricité statique devrait être étudiée avant l'électricité dynamique; mais celle-ci est employée dans toutes les installations appelées communément installations électriques. Au contraire, l'électricité statique n'est plus, à proprement parler, étudiée que dans les laboratoires.

Nous en ferons donc seulement une étude rapide destinée surtout à relier les phénomènes d'électricité statique à ceux, plus connus maintenant, d'électricité dynamique.

§ II. — ÉLECTRISATION PAR FROTTEMENT.

Prenons une baguette de verre et frottons-la avec un morceau de drap; si on l'approche d'un corps léger A, suspendu par un fil de soie très fin (fil de cocon), la balle A est attirée par la baguette de verre B. On dit communément que la baguette B est électrisée. On constate ce phénomène avec le verre, l'ébonite, le soufre, la résine.

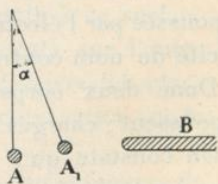


Fig. 229.

Si on tient à la main un morceau de métal, on ne peut

l'électriser ; si on le saisit par l'intermédiaire d'une poignée de verre, on peut l'électriser : on explique ce fait en disant que le métal est bon conducteur ; l'électricité développée par frottement s'en va par le métal, puis par la main de l'opérateur dans le sol.

Au contraire, dans les corps mauvais conducteurs ou isolants, tels que le verre, le soufre, la résine, on développe l'électricité aux points frottés, mais elle demeure à ces points et ne peut s'en aller puisque le corps est mauvais conducteur.

L'air est évidemment un isolant, sans quoi l'électricité développée à la surface des corps se disperserait immédiatement.

§ III. — IL EXISTE DEUX SORTES D'ÉLECTRICITÉ.

Frottons une tige de verre B avec du drap : on constate qu'elle attire la boule A (fig. 229) ; si on laisse la tige B et la boule A se toucher et qu'on les sépare, on constate qu'ensuite la boule A est repoussée par B.

Si on frotte une tige d'ébonite avec une peau de chat, elle attirera maintenant la boule A : ainsi la boule est repoussée par le verre et attirée par l'ébonite ; on explique ce fait en disant qu'il y a deux sortes d'électricité : l'électricité positive (verre frotté) et l'électricité négative (ébonite frottée avec la peau de chat).

En touchant la boule avec la tige de verre on a fait passer sur la boule de l'électricité positive ; celle-ci est donc repoussée par l'électricité de même nom et attirée par l'électricité de nom contraire.

Donc deux corps chargés de la même électricité se repoussent ; chargés d'électricités différentes, ils s'attirent.

On constate qu'il n'y a que deux sortes d'électricité ; tous les corps frottés se rangent soit dans la catégorie du verre, soit dans celle de l'ébonite.

§ IV. — LOI DE COULOMB.

1. *Quantités d'électricité.* — Si on mesure les actions produites par les corps électrisés, on constate qu'elles sont inégales; on explique ce fait en disant que les corps sont inégalement chargés; quand deux corps donnent, placés à la même distance du pendule, le même angle α , on dira qu'ils possèdent des quantités d'électricité égales. Si l'angle α est 2, 3 ... fois plus grand qu'avec le 1^{er} corps, on dira que les quantités d'électricité sont 2, 3 ... fois plus grandes.

2. *Loi des distances.* — On remarque que deux corps électrisés placés à des distances variables agissent différemment suivant la distance; les actions varient comme l'inverse du carré de la distance. On peut écrire analytiquement la loi de Coulomb :

$$f = K \frac{qq'}{r^2},$$

f étant la force qui s'exerce entre les masses d'électricité, q, q' les masses d'électricité, r leur distance, K un coefficient dépendant des unités choisies.

§ V. — LE FROTTEMENT DÉVELOPPE DES QUANTITÉS ÉGALES D'ÉLECTRICITÉS DE NOMS CONTRAIRES.

Prenons deux disques tenus par des manches isolants, l'un en verre par exemple, l'autre couvert de drap. Frottons-les l'un contre l'autre.

Par définition, le disque de verre présente à sa surface des masses d'électricité positive; on constate sur l'autre plateau la *présence d'une quantité égale d'électricité négative*; car avant de les séparer, ils n'ont aucune action sur le pendule non électrisé.

Dans toutes les expériences analogues, on découvre le même phénomène : production en quantités égales de deux électricités de noms contraires.

§ VI. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES CONDUCTEURS. ADDITION DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ.

1. *Distribution.* — Soit une sphère S métallique soutenue sur un pied isolant P ; une ouverture O à la partie supérieure permet d'y introduire un corps conducteur tenu dans un isolant, une petite sphère métallique par exemple, à l'extrémité d'une tige de verre.

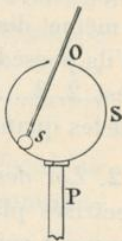


Fig. 230.

Électrisons la sphère S ; une fois électrisée, si nous la touchons à l'extérieur avec notre petite boule, nous enlevons une petite quantité d'électricité, ce que nous pouvons vérifier avec le pendule.

Si nous touchons l'intérieur de la sphère, nous n'enlevons aucune masse d'électricité : ce qui prouve que l'électricité n'existe que sur la surface extérieure du conducteur.

2. — Soient deux sphères identiques M et M' , l'une électrisée M , l'autre non électrisée.

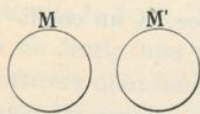


Fig. 231.

On peut par l'action de la sphère sur un pendule déterminer la quantité d'électricité Q qu'elle contient. Mettons en contact les deux sphères, l'électricité se répand dans les deux et on constate que chacune contient la masse $\frac{Q}{2}$ d'électricité.

Une autre expérience montre bien l'addition des masses électriques : chargeons d'une masse q la petite sphère isolée (fig. 230) et mettons-la à toucher la surface intérieure de S : l'électricité va à la surface extérieure et quitte s : on constate en la retirant qu'elle n'est plus électrisée. On peut opérer à nouveau le même manège et ajouter encore une masse q ; en le faisant n fois, on constate que la sphère S contient une masse nq d'électricité : les masses d'électricité s'ajoutent donc arithmétiquement.

Si on avait ajouté n' masses d'électricité de nom contraire, la charge définitive serait : $nq - n'q'$.

§ VII. — INFLUENCE.

Soit une sphère A chargée d'électricité positive, comme l'indique la figure 232; approchons une sphère B isolée et non électrisée; il se développe de l'électricité sur B; on dit qu'il y a électrisation par influence.

Il se forme de l'électricité négative vers A et positive à l'opposé; si on reliait un point quelconque de B au sol, l'électricité positive s'en irait dans le sol, il ne resterait dans B que l'électricité négative.

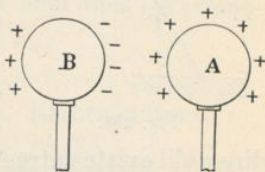


Fig. 232.

Cela explique l'attraction d'un corps non électrisé par un corps électrisé: il se forme, du côté qui est vis-à-vis du corps électrisé, de l'électricité de nom contraire qui est attirée; il y a attraction.

§ VIII. — IDENTITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

Il s'agit maintenant de relier ces phénomènes aux phénomènes déjà connus et de montrer qu'il n'y a qu'une seule série de faits.

1. *Nature du courant électrique.* — Prenons un disque isolant à la périphérie duquel nous enchâsserons de petites lames de métal; chargeons ces lames d'électricité statique.

Si on met le disque en rotation, on constate qu'une aiguille aimantée placée au voisinage subit les mêmes actions que si un courant électrique (dynamique) suivait le contour du disque; on voit que l'action est la même qu'un courant allant dans le sens de la rotation (cas de masses électriques positives) ou en sens inverse (masses électriques négatives).

Physique et chimie. — GILLE.

Il y a donc analogie entre le déplacement de masses électriques et la circulation d'un courant.

D'autre part, si nous réunissons un corps isolé et électrisé

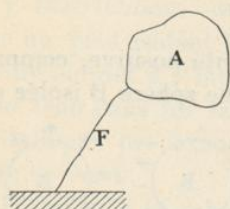


Fig. 233.

A par un fil F à la Terre, ce fil F est parcouru par un courant, de très courte durée, il est vrai, mais reconnaissable à tous ses effets chimiques, calorifiques, électro-dynamiques.

On peut donc considérer le corps électrisé comme possesseur d'une certaine force électromotrice ; on peut dire qu'il existe entre A et la terre une différence de potentiel (Cf. Définition du courant) puisqu'entre les deux il peut y avoir circulation d'un courant.

2. *Production de phénomènes d'électricité statique avec des piles.* — Inversement, en créant des différences de potentiel, on doit pouvoir charger d'électricité statique des corps.

Signalons d'abord que tout conducteur chargé statiquement a le même potentiel en tous ses points : en effet, s'il en était autrement, entre deux points ayant des potentiels inégaux, on aurait une différence de potentiel et par suite circulation de courant, ce que l'on ne constate pas.

En particulier, la Terre qui est conductrice a le même potentiel en tous ses points ; comme on prend souvent la différence de potentiel entre le corps et la terre, on admet que le potentiel de celle-ci est 0 ; si donc on trouve entre un corps conducteur et la terre une différence de potentiel V , on dira que le potentiel du corps est V .

Ceci posé, prenons une grande quantité d'éléments de pile mis en série (fig. 234)

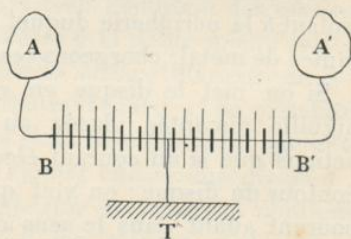


Fig. 234.

et mettons en communication le milieu de cette chaîne et

le sol en T ; la différence de potentiel entre T et B est V, par exemple, et entre T et B' : $-V$, puisqu'on a le même nombre d'éléments, mais pris en sens inverse :

Les deux corps A et A' isolés, mis en communication avec B et B' doivent équivaloir à des corps chargés d'électricité statique en quantités égales, mais l'un positivement, l'autre négativement. On constate en effet tous les phénomènes qui peuvent le prouver.

§ IX. — MESURE DES POTENTIELS. ÉLECTROMÈTRES.

On emploie en électricité statique des appareils destinés à la mesure des potentiels; à titre d'exemple nous citerons l'Électromètre à quadrants (Lord Kelvin), dont nous n'exposerons que le principe.

Soient 4 « quadrants » en métal AA', BB'; ce sont des quarts de cercle disposés de façon à ne pas se toucher et réunis deux à deux (A et A', B et B'). Au-dessus d'eux peut se déplacer, par rotation autour du centre de l'appareil, une « aiguille » indiquée en pointillé (fig. 235). Cette aiguille est suspendue à un fil métallique qui s'oppose à la rotation par sa torsion.

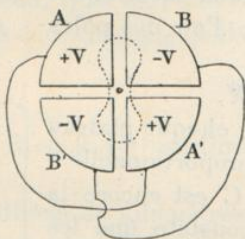


Fig. 235.

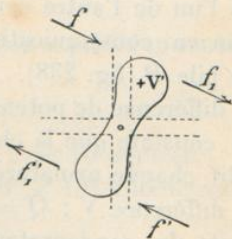


Fig. 236.

Supposons les quadrants AA' au potentiel $+V$, BB' à $-V$. Et supposons l'aiguille à $+V$.

Il en résulte des répulsions f et f' , des attractions f_1 et f'_1 (fig. 236) qui font tourner l'aiguille; ces forces cons-

tituent un couple qui s'équilibre avec le couple de torsion du fil auquel est suspendue l'aiguille : de la déviation angulaire, on déduit la valeur du potentiel V .

§ X. — CAPACITÉ D'UN CONDUCTEUR.

1. *Corps isolé et éloigné de tout autre.* — Soit un corps A électrisé ; on le suspend éloigné de tout autre corps pour éviter les phénomènes d'influence ; on constate que sa charge est une quantité d'électricité Q , et son potentiel V .

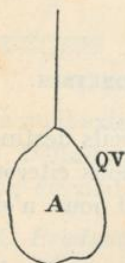


Fig. 237.

En faisant varier Q on voit que V varie proportionnellement ; donc le potentiel du corps isolé est proportionnel à sa charge :

$$Q = CV.$$

Cette constante C s'appelle *Capacité* du corps A .

On démontre et on peut vérifier que la capacité d'une sphère métallique est proportionnelle à son rayon :

$$C = KR.$$

2. *Condensateurs.* — Mettons en regard et à petite distance l'un de l'autre deux plateaux métalliques ; mettons chacun en communication avec l'un des pôles d'une pile P (fig. 238).

La différence de potentiel est V .

On constate que la charge de chaque plateau (on dit chaque armature) est proportionnelle à cette différence V : $Q = CV$; C est encore la capacité du condensateur ; on constate que les charges des deux plateaux sont égales (plateaux identiques), de signes contraires et beaucoup plus considérables que si les plateaux étaient seuls ; les deux électricités contraires situées en face sur les plateaux s'attirent mutuellement et augmentent la capacité.

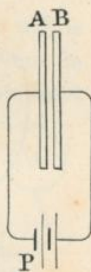


Fig. 238.

Celle-ci devient plus grande encore si on interpose, au lieu d'air, une lame de mica, de verre ou de paraffine entre les armatures.

Bouteille de Leyde. — C'est le premier condensateur connu : une bouteille B (fig. 239) contient des feuilles de clinquant ou d'étain ; à l'extérieur une feuille mince d'étain f est collée sur la bouteille. On a donc, à l'intérieur et à l'extérieur, des armatures métalliques séparées par le verre de la bouteille B.

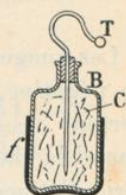


Fig. 239.

Une tige T aboutissant à l'extérieur établit la communication avec les feuilles situées à l'intérieur.

3. *Unité de capacité.* — L'unité de capacité est la capacité du corps ou du condensateur qui sous un potentiel de 1 volt contient une charge égale à 1 coulomb. C'est le Farad.

$$Q \text{ (coul.)} = C \times V.$$

Si donc dans cette formule V est exprimé en volts, C en farads, Q sera exprimé en coulombs.

Cette unité est très grande ; supposons en effet que ce soit la capacité d'une sphère isolée et éloignée de tout conducteur ; quel sera son rayon ?

On démontre que, si R est le rayon exprimé en centimètres,

$$C = \frac{R}{9 \cdot 10^{11}} ;$$

$$\begin{aligned} R &= 9 \cdot 10^{11} \text{ centimètres} = 9 \times 10^9 \text{ mètres.} \\ &= 9 \times 10^6 \text{ kilomètres.} \end{aligned}$$

9 millions de kilomètres.

C'est une capacité énorme ; on emploie le microfarad qui est la millième partie du farad. On ne peut réaliser ces capacités qu'au moyen de condensateurs qui, sous un faible volume, ont des capacités très grandes.

On voit donc quelles capacités il faut avoir pour obtenir des masses très faibles d'électricité ; en fait les machines

électrostatiques permettant de charger statiquement les corps produisent des différences de potentiel énormes, de plusieurs milliers de volts.

§ XI. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Les nuages orageux contiennent de l'électricité positive ou négative, mais le plus souvent négative ; ils se comportent vis-à-vis de la terre comme des condensateurs ; quand la charge est trop forte, il passe une étincelle ou une série d'étincelles entre les particules chargées par influence qui se trouvent en l'air et on a l'Eclair.

Si deux nuages chargés, l'un positivement, l'autre négativement, sont voisins, l'éclair éclate entre ces deux nuages.

Pour éviter les accidents dus à la foudre, on emploie le paratonnerre ; il est basé sur le pouvoir qu'ont les pointes d'écouler l'électricité.

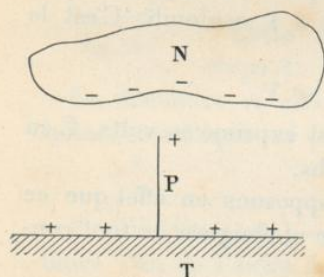


Fig. 240.

Soit (fig. 240) un nuage N chargé négativement : la terre T s'électrise positivement par influence et, si on dresse une pointe P, cette pointe chargée positivement laisse écouler de l'électricité positive qui va neu-

traliser l'électricité négative du nuage.

Lorsque la tension devient trop grande et qu'il passe un éclair, on peut espérer son écoulement par P ; on voit que le paratonnerre doit être en contact intime avec le sol ; on le met en communication par un endroit humide au moyen de larges plaques. On doit le relier également aux corps métalliques voisins qui, s'électrisant par influence, pourraient provoquer entre eux des étincelles.