LIVRE IX

ÉLECTRICITÉ A L'ÉTAT STATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES FONDAMENTAUX.

880. **Définition. Historique.** — L'*électricité* est un agent physique puissant, qui se manifeste par des phénomènes singuliers et variés, appelés *phénomènes* électriques. Parmi ces divers effets, les uns sont attribués à un état particulier d'équilibre de l'électricité, et les autres à un état particulier de mouvement, appelé *courant électrique*. L'ensemble des lois relatives à la première catégorie de ces phénomènes électriques constitue l'*électricité à l'état statique* (ou en repos), qu'on appelle simplement *électricité statique ;* l'ensemble des autres phénomènes constitue l'*électricité à l'état dynamique* (ou en mouvement), qu'on appelle simplement *électricité dynamique*. Nous étudierons d'abord les premiers.

Les principales causes qui développent l'électricité sont le frottement, la pression, les actions chimiques, la chaleur, le magnétisme et l'électricité elle-même. Ses effets principaux sont des attractions et des répulsions, des phénomènes lumineux ou calorifiques, des commotions plus ou moins violentes, des réactions chimiques.

Thalès de Milet, 600 ans avant J.-C., avait déjà remarqué la propriété que prend l'ambre jaune frotté d'attirer les corps légers. En parlant de cette substance, Pline dit : « Quand le frottement lui a donné la chaleur et la vie, elle attire les brins de paille, comme l'aimant attire le fer. » Mais là se bornèrent les connaissances des anciens sur l'électricité. Ce n'est qu'à la fin du XVIe siècle que Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, appela de nouveau l'attention des physiciens sur les propriétés de l'ambre jaune, en faisant voir que beaucoup d'autres substances peuvent aussi acquérir la propriété attractive par le frottement. L'impulsion une fois donnée, les découvertes se succédèrent aussi nombreuses que rapides. Nous les exposerons dans leur ordre chronologique, qui est parfaitement concordant avec l'ordre logique des principes fondamentaux de toute l'électricité[1].

1. On consultera avec fruit, pour ces principes fondamentaux, deux leçons du cours de M. Mascart, rédigées par M. Berson, et publiées par la *Revue scientifique* (4 février et 13 mai 1882).

881. **Premier fait général : Développement de l'électricité par le frottement.** — Un grand nombre de substances, quand on les frotte avec un morceau de drap ou avec une peau de chat, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plume, des brins de paille, etc. Cette propriété, découverte d'abord pour l'ambre jaune, fut étendue plus tard à la cire à cacheter, aux résines, à la gutta-percha, au soufre, au verre, à la soie, à l'ébonite (ou caoutchouc durci).

Elle peut servir à définir l'électricité. Les corps qui ont acquis cette propriété sont dits *électrisés*, et la cause inconnue du phénomène électrique est appelée *électricité*.

Remarque. — Un corps solide peut aussi s'électriser quand il est frotté avec un liquide ou un gaz. Ainsi, dans le vide barométrique, le mouvement du mercure électrise le verre ; un tube vide d'air, dans lequel on a renfermé quelques globules de mercure, devient lumineux dans l'obscurité lorsqu'on agite le mercure Quant aux gaz, Wilson avait trouvé qu'un courant d'air dirigé sur une tourmaline, sur du verre ou de la résine électrisait ces substances ; mais Faraday a reconnu depuis qu'il n'y a d'effet électrique qu'autant que l'air est humide ou tient en suspension des poudres sèches.

882. **Pendule électrique.** — On reconnaît qu'un corps est électrisé au moyen de petits instruments appelés *électroscopes*, et dont le plus simple est le *pendule électrique* (fig. 845). Il consiste

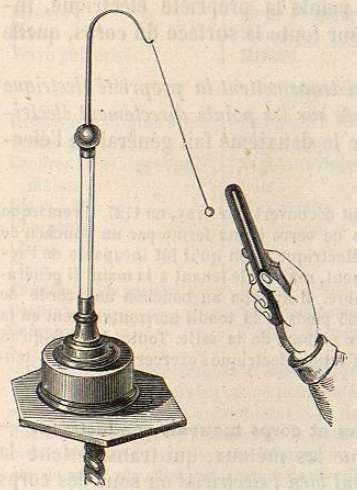

Fig. 845.

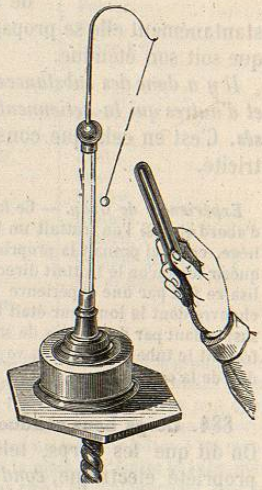

Fig. 846.

en une petite balle de moelle de sureau, suspendue, par un fil de soie, à un support à pied de verre. Le caractère de l'*électrisation* est que, lorsqu'on approche un corps électrisé, la petite balle est d'abord *attirée* (fig. 845), puis *repoussée* aussitôt qu'il y a eu contact (fig. 846).

On se sert aussi du *double pendule électrique*, formé de deux balles distinctes suspendues, par deux fils de soie, à un même support (fig. 847).

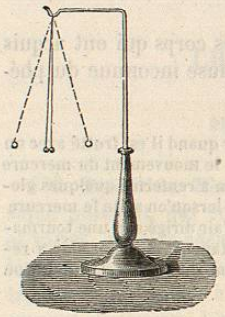

Fig. 847.

883. **Deuxième fait général : Conductibilité électrique.** — Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de cire à cacheter frotté par un bout, on remarque qu'il n'attire que par ce bout ; l'autre bout, qui n'a pas été frotté, ne donne aucun signe d'électrisation. Il en est de même avec un tube de verre, un bâton de soufre, tant qu'ils n'ont pas été frottés dans toute leur longueur. Au contraire, l'expérience montre qu'aussitôt qu'un corps métallique a, dans certaines conditions, acquis sur un de ses points la propriété électrique, instantanément elle se propage sur toute la surface du corps, quelle que soit son étendue.

Il y a donc des substances qui transmettent la propriété électrique et d'autres qui la retiennent fixée sur les points directement électrisés. C'est en cela que consiste le deuxième fait général de l'électricité.

Expériences de Gray. — Ce fait fut découvert par Gray, en 1727. Il remarqua d'abord que, si l'on frottait un tube de verre creux fermé par un bouchon de liège, celui-ci prenait la propriété électrique, bien qu'il fût incapable de l'acquérir lorsqu'on le frottait directement, mais en le tenant à la main. Il généralisa ce fait par une expérience célèbre. Il attacha au bouchon une corde de chanvre dont la longueur était de 765 pieds, il la tendit horizontalement en la suspendant par des rubans de soie au plafond de la salle. Toutes les fois qu'on frottait le tube de verre, on voyait l'action électrique s'exercer sur toute l'étendue de la corde.

884. **Corps bons conducteurs et corps mauvais conducteurs.** — On dit que les corps, tels que les métaux, qui transmettent la propriété électrique, *conduisent bien l'électricité* ou sont des corps *bons conducteurs*, et que les autres *conduisent mal l'électricité*, ou sont des corps *mauvais conducteurs* ou *isolants*.

Cette classification des corps ne doit pas être regardée comme absolue. Il n'y a pas de corps *parfaitement conducteurs*, c'est-à-dire transportant l'électricité à toute distance, dans un temps nul, ni de corps *absolument isolants*, c'est-à-dire opposant une résistance complète à la propagation de l'électricité. En réalité, les corps sont *plus ou moins* conducteurs et *plus ou moins* isolants. De plus, le degré de conductibilité, pour une même substance, dépend de sa température et de son état physique. Le verre, qui est très mauvais conducteur à la température ordinaire, conduit assez bien lorsqu'il est chauffé au rouge. De même la gomme laque et le soufre deviennent conducteurs lorsqu'on les chauffe. L'eau, qui conduit très bien à l'état liquide, conduit mal à l'état de glace sèche. Le verre pulvérisé et la fleur de soufre conduisent assez bien.

Dans la table ci-dessous un certain nombre de corps sont rangés par ordre de conductibilité décroissante [1].

Corps conducteurs.		
Métaux usuels.	Dissolutions salines.	Végétaux vivants.
Charbon calciné.	Eau de mer.	Organes des animaux
Graphite.	Eaux de source.	Sels solubles.
Acides concentrés.	Eau de pluie.	Toile.
Acides étendus.	Neige.	Coton.
Corps semi-conducteurs.		
Alcool.	Fleur de soufre.	Papier.
Éther.	Bois sec.	Paille.
Verre pulvérisé.	Marbre.	Glace à 0°.
Isolants.		
Oxydes métalliques secs.	Essences.	Mica.
Huiles grasses.	Porcelaines.	Verre.
Cendres végétales et animales.	Végétaux desséchés.	Agate.
	Cuir.	Cire.
Glace à 20°.	Parchemin.	Soufre.
Phosphore.	Papier sec.	Résines.
Chaux.	Poils.	Ambre.
Craie.	Plumes.	Gomme laque
Poudre de lycopode.	Laine.	Air et gaz secs.
Caoutchouc.	Soie teinte ou écrue.	
Camphre.	Pierres précieuses.	

885. *Corps idioélectriques et anélectriques.* — C'est à cause de la grande conductibilité des métaux qu'on ne peut les électriser directement, à moins qu'on n'ait soin de les isoler préalablement et de les frotter avec un corps non conducteur. Dans ces conditions, les métaux s'électrisent aussi bien que les corps mauvais conducteurs. Pour le démontrer, on fixe un tube de laiton à un manche de verre (fig. 848), et, tenant ce dernier à la main, on frotte le tube métallique avec un morceau de soie ou de taffetas ciré ; en l'approchant ensuite du pendule électrique, on observe une attraction qui est la preuve de son élec-

1. Mascart, *Traité d'électricité statique.*

trisation. Si l'on tenait directement le métal à la main, on ne verrait pas le moindre signe d'électrisation; cependant il y aurait bien encore production d'électricité par le frottement, mais elle se perdrait immédiatement dans le sol.

Fig. 848.

Ce fait général explique l'ancienne classification des corps faite par Gilbert en *idioélectriques*, c'est-à-dire pouvant s'électriser (c'étaient les corps isolants) et en *anélectriques*, c'est-à-dire incapables de s'électriser (c'étaient les corps conducteurs).

886. **Isoloirs, réservoir commun.** — Les corps mauvais conducteurs servent d'*isoloirs*, c'est-à-dire de supports destinés à conserver aux corps conducteurs leur électricité en les *isolant* du sol. La terre étant formée de substances plus ou moins bonnes conductrices, aussitôt qu'un corps conducteur électrisé communique avec elle par un autre conducteur, l'électricité s'y écoule immédiatement : c'est pourquoi l'on appelle quelquefois le sol le *réservoir commun*. On isolera donc un corps soit en le soutenant sur des pieds de verre, soit en le suspendant à des cordons de soie, ou bien en le posant sur un gâteau de résine. Toutefois il n'existe pas d'*isoloirs parfaits;* les corps les plus mauvais conducteurs n'isolent jamais complètement et tout corps électrisé perd toujours plus ou moins lentement son électricité par les supports. Il se fait, en outre, une déperdition continue par la vapeur d'eau qui est dans l'air, et c'est ordinairement la plus abondante.

887. **Troisième fait général : Distinction de deux électricités.** — Il existe *deux modes différents d'électrisation*, et par conséquent *deux électricités :* les corps *se repoussent* ou *s'attirent*, suivant qu'ils sont chargés de la *même électricité*, ou d'*électricités différentes*.

Ce fait important fut découvert et interprété théoriquement en 1734 par le physicien français Dufay[1]. On le démontre aisément de la manière suivante.

On a vu (882) que, lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de verre frotté avec un morceau de drap, il y a *attraction* d'abord, puis *répulsion* après le contact. Les mêmes effets se produisent avec un bâton de cire à cacheter, frotté de la même manière, et il semble au premier abord que l'électricité développée sur le verre soit identique avec celle de la résine. Mais si, pendant que le pendule électrique est repoussé par le verre électrisé, on en approche la résine frottée, celle-ci attire vivement la balle de sureau; de même, si au pendule repoussé par la résine électrisée on présente le verre frotté, on observe une forte attraction : donc *un corps repoussé par l'électricité du verre est attiré par l'électricité de la résine;* et réciproquement, *un corps repoussé par l'électricité de la résine est attiré par celle du verre.*

1. Membre de l'Académie des sciences.

On doit donc admettre, comme fit Dufay, que ces deux corps sont dans *deux états électriques différents*, c'est-à-dire qu'il y a *deux modes d'électrisation distincts*, ou, autrement dit, qu'il existe *deux espèces d'électricités :* l'une qui se développe sur le verre quand on le frotte avec de la laine, l'autre qui se développe sur la résine ou sur la cire d'Espagne quand on les frotte avec un morceau de drap ou une peau de chat. La première fut appelée par Dufay *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

888. **Quatrième fait général : Production simultanée des deux électricités.** — Lorsqu'on cherche à produire de l'électricité en frottant deux corps l'un contre l'autre, rien ne distingue à priori le corps frottant du corps frotté; aussi est-il logique d'admettre à priori que si l'un s'électrise, l'autre s'électrisera en même temps. C'est ce que l'expérience a vérifié.

Le frottement développe toujours simultanément les deux électricités, l'une sur le corps frotteur et l'autre sur le corps frotté.

Ce fait général se démontre par l'*expérience de Wilcke*. On communique d'abord au pendule électrique, par contact, une électricité connue, et on lui présente séparément les deux corps frottés. On se sert de deux disques, l'un de verre poli, l'autre de métal ou de bois, recouvert d'une rondelle de drap (fig. 849), munis de deux manches de verre isolants par où on les tient pour les frotter vivement l'un contre l'autre, puis les séparer brusquement. Or on constate que l'un des deux attire la balle de sureau, tandis que l'autre la repousse : ce qui prouve qu'ils sont chargés d'électricités contraires.

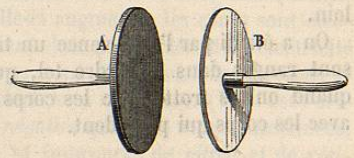

Fig. 849.

889. **Électrisation par frottement.** — Le précédent fait élucide le phénomène de l'électrisation par frottement. L'électricité développée sur les corps frottés dépend de la nature de chacun d'eux. Ainsi, le verre poli, frotté avec de la laine, se charge d'électricité *vitrée*, et la résine frottée de la même manière se charge d'*électricité résineuse*. Inversement, la laine frottée prend, dans le premier cas, l'*électricité résineuse*, et dans le deuxième l'*électricité vitrée*.

La loi qui règle la répartition des deux électricités sur les deux corps en contact est extrêmement complexe. L'expérience prouve que ce phénomène dépend d'une foule de circonstances qui semblent insignifiantes, telles que le degré de poli, le sens des frictions et la température. Par exemple, si l'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux de verre *inégalement polis*, c'est celui dont la surface est la plus polie qui prend l'électricité vitrée, l'autre prend l'électricité résineuse. Si l'on frotte en croix, l'un sur l'autre, deux rubans de soie blanche pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement s'électrise vitreusement, l'autre résineusement. Quand on frotte l'un contre l'autre deux fragments d'un même corps ayant leur surface également polie, mais dont la température est différente, c'est la substance la plus chaude qui prend l'électricité résineuse.

Il résulte de tous ces faits que les dénominations d'électricité vitrée et d'électricité résineuse ne correspondent à rien de réel, puisque le verre peut se charger d'électricité résineuse, et la résine d'électricité vitrée. Nous pouvons les remplacer dès à présent par les noms d'électricité *positive*, correspondant à la première, et d'électricité *négative*, correspondant à la seconde : ces expressions n'impliquent pas d'erreur et ont leur raison d'être dans l'une des théories de l'électricité que nous exposerons plus loin.

On a établi par l'expérience un tableau où les différents corps sont rangés dans un ordre tel, qu'ils se chargent *positivement* quand on les frotte avec les corps qui suivent, et *négativement* avec les corps qui précèdent.

Poil de chat vivant.	Bois.	Résine.
Verre poli.	Papier.	Verre dépoli.
Étoffes de laine.	Soie.	Soufre.
Plumes.	Gomme laque.	Sulfure de cuivre.

890. **Cinquième fait général : Équivalence des électricités contraires.** — La proportion des deux électricités que développe le frottement est déterminée par le fait général suivant :

Lorsqu'on réunit, par un contact intime, deux corps qui s'étaient chargés, par leur frottement réciproque, d'électricités contraires, on constate que leur ensemble ne produit ni attraction ni répulsion. Par conséquent, *les deux électricités développées sur deux corps frottés sont en proportion telle, que, lorsqu'on les réunit, leurs effets s'annulent réciproquement.*

Si, par exemple, on prend les deux plateaux de Wilcke, et qu'après les avoir frottés l'un contre l'autre, on les approche, sans

les séparer, soit d'un double pendule électrisé, soit d'un électroscope plus sensible, on ne constate aucun signe d'électrisation ; si l'on éloignait l'un des plateaux, il y aurait immédiatement attraction ou répulsion, suivant la nature de son électricité.

Ainsi, le frottement développe sur les corps frottés deux charges électriques, dont la somme a *une action nulle* sur un corps électrisé quelconque. On peut donc en conclure que les charges développées par le frottement *sont égales*, ou du moins *équivalentes*, puisqu'elles ne sont pas de même nature. En tout cas, cette expérience suffit, indépendamment de toute théorie, pour justifier les noms de *positive* et de *négative* adoptés pour désigner deux charges électriques, dont l'ensemble ou la *somme* paraît égale à *zéro*.

891. **Théorie de l'électricité statique.** — Tous les faits précédents, qui définissent et caractérisent l'électricité *à l'état statique*, sont purement expérimentaux, et indépendants de toute espèce de théorie. De nombreuses hypothèses ont été proposées pour les expliquer : deux seulement sont restées dans la science, celle de Franklin et celle de Symmer.

1° *Hypothèse de Franklin.* — Franklin admit pour cause de l'électricité un fluide unique, impondérable, agissant par répulsion sur ses propres molécules et par attraction sur celles de la matière. Tous les corps contiennent, *à l'état neutre*, une quantité déterminée de ce fluide : si celle-ci augmente, les corps sont électrisés *positivement*, et possèdent les propriétés de l'électricité vitrée; si elle diminue, les corps sont électrisés *négativement*, et présentent les propriétés de l'électricité résineuse. (Telle est l'origine des expressions *positive* et *négative* que nous avons substituées, plus haut, aux noms vagues et impropres de *vitrée* et de *résineuse*.) L'électricité positive se représente par le signe +, et l'électricité négative par le signe —. De même qu'en algèbre en ajoutant $+ a$ à $- a$ on a zéro, de même, en donnant à un corps qui possède déjà une certaine quantité d'électricité positive, une quantité égale d'électricité négative, on le ramène à l'état neutre.

2° *Hypothèse de Symmer.* — Franklin ayant le premier donné une théorie complète de la bouteille de Leyde (965), fondée sur l'hypothèse d'un seul fluide, celle-ci fut d'abord généralement admise par les physiciens et par Dufay lui-même. Cependant des objections sérieuses y ayant été faites, surtout par Æpinus, le physicien anglais Symmer proposa l'hypothèse de deux fluides électriques agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre. Ces fluides existeraient dans tous les corps à l'état de combinaison, formant ce qu'on nomme le *fluide neutre*

ou *naturel*. Différentes causes, surtout le frottement et les actions chimiques, peuvent les séparer, et c'est alors qu'apparaissent les phénomènes électriques; mais ces fluides ont une grande tendance à se réunir pour former de nouveau du fluide neutre. Symmer donna aux deux fluides électriques les noms de *fluide vitré* et de *fluide résineux*, correspondants aux deux modes d'électrisation découverts par Dufay.

Remarque. — Ni l'une ni l'autre de ces hypothèses n'est suffisante pour relier et coordonner entièrement les innombrables découvertes de l'électricité moderne. D'ailleurs les fluides électriques, comme tous les autres fluides des anciens physiciens, disparaissent devant l'hypothèse moderne de l'unité des agents physiques, et devant la théorie mécanique des phénomènes naturels. Cependant l'hypothèse de Symmer, malgré son insuffisance, est commode pour l'interprétation élémentaire des phénomènes et même pour leur explication mathématique. Nous conserverons donc, dans l'exposition des phénomènes électriques, les expressions d'électricité positive et d'électricité négative, à la condition de n'y pas attacher l'idée primitive de *fluides*, mais le sens expérimental d'états particuliers de la matière qui sont sensibles et mesurables par leurs effets.

892. **Diverses sources d'électricité. — Première idée du potentiel électrique.** — Le frottement est la source principale d'électricité statique. C'est par le frottement de deux surfaces convenablement choisies que l'électricité est produite dans les machines électrostatiques, que nous étudierons plus loin sous le nom de *machines à frottement*.

D'autres phénomènes mécaniques, tels que la *pression*, le *clivage*, constatés depuis longtemps par Æpinus, par Haüy, par Becquerel, sont aussi des sources d'électricité à l'état statique.

On peut dire que tous les phénomènes naturels sont accompagnés d'un dégagement d'électricité plus ou moins abondant. Mais ceux qui sont capables d'en fournir des quantités considérables et utilisables dans la pratique, sont :

1° Les réactions chimiques;

2° Les actions calorifiques;

3° Les phénomènes d'induction.

Ces trois dernières catégories de sources fournissent plutôt de l'électricité à l'état dynamique. Les machines qui servent à les utiliser sont désignées sous le nom de *piles électriques* ou de machines *d'induction*.

Comme les effets et les appareils correspondants à ces deux états de l'électricité étaient très différents, on a cru longtemps

que les électricités elles-mêmes étaient de natures différentes. De là les dénominations d'*électricité statique* et d'*électricité dynamique* données à ces deux états de l'électricité et celles d'*appareils d'électricité statique* et d'*appareils d'électricité dynamique* donnés respectivement aux machines à frottement et aux piles.

Mais il est bien reconnu aujourd'hui qu'il n'y a qu'une seule espèce d'électricité. Et si les effets en sont si variés, cela tient uniquement à l'état de repos ou de mouvement dans lequel elle est produite, et aussi au degré de *potentiel* où elle se trouve. On appelle *potentiel* de l'électricité une qualité caractéristique — que nous définirons plus loin — et dont nous pouvons donner une première idée en disant qu'elle est, pour la propagation de l'électricité, l'analogue de la *température* pour la propagation de la chaleur ou de la *différence de niveaux hydrostatiques* pour l'écoulement des liquides pesants.

CHAPITRE II

MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES. LOIS DE COULOMB.

893. **Lois des attractions et des répulsions électriques.** — Les actions mutuelles entre les corps électrisés dont nous avons constaté l'existence, sont soumises aux deux lois suivantes, connues sous le nom de *lois de Coulomb*.

1° Loi des distances. — *Les répulsions et les attractions qui s'exercent entre deux corps électrisés varient en raison inverse du carré de leur distance.*

2° Loi des masses. — *A distance égale, ces mêmes forces sont proportionnelles au produit des masses électriques, c'est-à-dire des quantités d'électricité répandues sur les deux corps.*

894. **Vérification expérimentale des lois de Coulomb.** — Ces deux lois ont été découvertes par Coulomb, qui les démontra par deux méthodes : 1° la méthode de la balance de torsion; 2° la méthode des oscillations. Comme ces lois sont fondamentales en électricité, nous allons en indiquer la vérification par la balance de torsion[1].

1° *Description de la balance.* — L'appareil est contenu dans une cage cylindrique de verre de 35 centimètres de diamètre (fig. 850), sur le contour de laquelle est collée une bande de papier qui porte une graduation en 360 degrés. La cage est fermée par un plateau de verre A, au centre duquel s'élève un tube

1. Voir la méthode des oscillations dans Mascart, *Électricité statique*.