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*.

d de même matière. Ce tube n'est point fixé invariablement au plateau, mais peut tourner librement sur lui-même. A sa partie supérieure est une garniture de laiton formée de deux pièces (fig. 851), l'une *b* fixée au tube, l'autre *k* s'engageant dans la première au moyen d'une douille, afin que par le bouton *t* on puisse la tourner à volonté. La pièce *k* est une espèce de petit *tambour* dont la base supérieure porte un cadran *e* divisé en 360 degrés qu'on appelle le *micro-*

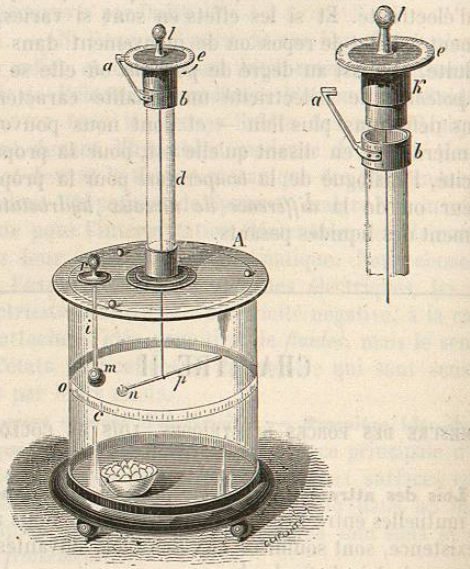

Fig. 850 et 851.

mètre. A la pièce *b* est adapté un indicateur *a*, qui sert de point de repère pour mesurer la rotation du cadran et par suite celle du tambour. Au centre de celui-ci et au-dessous du bouton *t* est fixé un fil d'argent très fin qui porte une aiguille de gomme laque *p*, terminée à un bout par un disque de clinquant *n*. Enfin le plateau de verre est percé d'un trou *r* par où l'on peut introduire dans la cage une tige de verre *i*, servant d'isoloir à une boule de laiton *m*.

Avant d'opérer, il faut avoir soin de bien dessécher l'air de l'appareil, afin de diminuer la déperdition de l'électricité : on y parvient en plaçant sous la cage pendant plusieurs jours, une capsule remplie de chaux vive.

2° *Principe de la méthode.* — La construction de cet appareil et la méthode de mesure sont fondées sur les lois de la torsion, préalablement déterminées par Coulomb. Celle de ces lois qui intervient ici est la suivante : *Les réactions mécaniques produites par la torsion dans un fil métallique se réduisent à un couple, dit couple de torsion, dont le moment est proportionnel à l'angle de torsion du fil.*

On appelle *coefficient de torsion* d'un fil métallique la valeur du moment de torsion pour un angle d'écart à l'unité.

Le fil d'argent dont se servait Coulomb avait $0^{mm},035$ de diamètre. Son coefficient de torsion était égal à 0,269 (l'unité de force étant le milligramme et l'unité de longueur étant le centimètre) : $0^{mmgr},269$ était donc la force qui, appliquée à un bras de levier égal à 1 centimètre, tordait le fil d'un angle égal à l'unité trigonométrique. Or, l'aiguille de Coulomb ayant $10^{cm},8$ de longueur, pour tordre de 1° le fil de la balance, il suffisait d'appliquer à l'extrémité une force égale à $0^{mmgr},000438$. Ces nombres donnent une idée de la sensibilité de l'appareil de mesure et, par suite, de la précision de la méthode.

3° *Réglage de l'instrument.* — On enlève la boule fixe, après l'avoir placée en face du zéro (en faisant tourner le couvercle supérieur).

On amène le trait de repère du tambour en face du 0° de la graduation de la cage après avoir amené le 0° du tambour au-dessus du repère. On amène l'aiguille devant le 0° de la cage. On tourne la pince, de manière que la balle de sureau se fixe en face du 0° *sans torsion*.

Lorsqu'on replace la boule fixe, elle déplace un peu la balle de sureau.

Quand la balance est réglée, tous les zéros se trouvent dans un même plan vertical qui contient l'aiguille de gomme laque et le fil (sans torsion) (fig. 850).

4° *Vérification de la loi des répulsions.* — On introduit la boule fixe, *électrisée*. Elle électrise d'abord, puis repousse la boule mobile jusqu'en A_1, à une distance angulaire α. Le fil subit alors une torsion égale à α, d'où résulte une force antagoniste qui fait équilibre à la force répulsive (fig. 852). C'est la première expérience. — On tourne alors le tambour supérieur, *en sens inverse de la déviation*, de manière à diminuer l'angle d'écart et à le réduire à la valeur α'. Supposons qu'il ait fallu, pour cela, tourner le micromètre d'un angle N'. En ce moment l'angle de torsion n'est plus α, mais $N' + \alpha'$, et par suite le moment de torsion est $c\,(N' + \alpha')$. Cela constitue une deuxième expérience. — On en fera une troisième en réduisant l'écart, de la même manière, jusqu'à la valeur α''. Il faudra, pour cela, tourner le micromètre d'un angle N'' ; a nouvelle torsion sera $(N'' + \alpha'')$ et son moment sera $c\,(N'' + \alpha'')$.

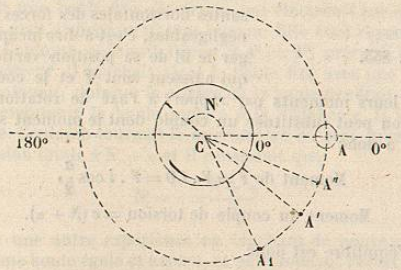

Fig. 852.

5° *Résultats numériques de Coulomb.* — L'angle de répulsion initial des deux boules fut 36° : l'angle de torsion était également 36°. Puis il amena l'angle d'écart à être $\frac{1}{2}$ 36° : il lui fallut tourner le tambour de 126°. L'angle de torsion était donc $126 + 18 = 144°$. Puis il réduisit l'écart à 9° en tournant le tambour de 567°, à partir du 0°. (En réalité c'était 8° 30' au lieu de 9°.) Donc l'angle de torsion était $(567 + 9°) = 567°$. Ce sont là les seuls nombres publiés par Coulomb.

576

Voici comment il les appliquait à la vérification de ses lois. Il comptait d'abord les distances, non pas sur les cordes des arcs, mais sur les arcs eux-mêmes. Par conséquent, ces distances étaient représentées par les nombres 36, 18 et 9.

Quant aux forces répulsives, il prenait pour les représenter les nombres mêmes qui représentent les torsions successives. On voit que dans ces conditions les nombres ci-dessus vérifient la loi, puisque, lorsque les distances sont

$$36 \ldots 18 = \frac{1}{2} 36 \quad \text{et} \quad 9 = \frac{1}{4} 36,$$

les forces répulsives deviennent

$$36 \ldots 144 = 2^2 \times 36 \ldots 576 = 4^2 \times 36$$

6° *Discussion des expériences de Coulomb.* — Pour nous rendre compte de la légitimité des approximations de Coulomb, nous allons appliquer à ses nombres une vérification rigoureuse.

Soient B la boule fixe, A la boule mobile. Nous ne considérons que les centres des deux boules, ce qui revient à supposer que les masses électriques de ces boules sont condensées en leurs centres. Nous verrons plus loin que cette hypothèse est légitime C'est ce que faisait Coulomb. Il plaçait l'œil dans le plan vertical défini par l'aiguille et par le centre de chaque boule, et il notait l'azimut de ce plan (fig. 853).

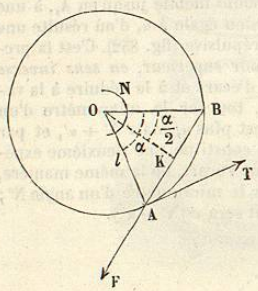

Fig. 853.

Soient α l'angle d'écart et $(N + \alpha)$ la torsion totale.

L'équilibre de l'aiguille peut être assimilé à celui d'un corps solide mobile autour d'un axe fixe vertical (on admet que les composantes horizontales des forces électriques sont négligeables, c'est-à-dire incapables de déranger le fil de sa position verticale). Les forces qui agissent sont F et le couple de torsion. La somme de leurs moments par rapport à l'axe de rotation O est nulle.

A la force F on peut substituer un couple dont le moment soit égal à celui de la force. On a donc

$$\text{Moment de } F = F \,.\, CD = F \,.\, l \cos \frac{a}{2},$$

$$\text{Moment du couple de torsion} = c\,(N + \alpha).$$

L'équation d'équilibre est donc

$$F \,.\, l \cos \frac{\alpha}{2} = c\,(N + \alpha).$$

Si nous admettons que la loi de Coulomb soit vraie, nous avons

$$F = \frac{f}{d^2} = \frac{f}{4\, l^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \text{d'où} \quad \frac{f}{4\, lc} = (N + \alpha) \sin \frac{\alpha}{2} \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}.$$

7° *Critique des expériences de Coulomb.* — Appliquons à cette équation les résultats numériques de Coulomb. Comme f est invariable pour une même

charge initiale des deux boules, le second membre de l'équation doit être constant et nous devons avoir, en égalant entre eux les premiers membres,

$$36 \sin 18^0 \operatorname{tang} 18^0 = (126 + 18) \sin 9^0 \operatorname{tang} 9^0 = (567 + 9) \sin 45^0 \operatorname{tang} 45^0.$$

Les nombres qu'on obtient en faisant le calcul sont

$$3{,}614, \quad 3{,}568, \quad 3{,}169.$$

On voit qu'ils sont *sensiblement* constants.

On peut attribuer les petites divergences aux causes d'erreur suivantes :

La déperdition de l'électricité des boules par l'air et par les supports. — Cette cause d'erreur était peu importante, car, par des essais préliminaires, Coulomb s'était assuré que, dans les conditions où il opérait, les boules, repoussées d'abord à une distance de 36° l'une de l'autre, se rapprochaient seulement de 1° en 3 minutes. Or les trois expériences de Coulomb n'ont duré en tout que 2 minutes.

L'influence réciproque des masses électriques répandues sur les deux boules. — Cette action, dont nous étudierons plus loin les effets, parait être la véritable cause d'erreur. Elle est d'autant plus efficace que les boules sont plus rapprochées.

Les erreurs de lecture. — Il est très difficile d'apprécier à 1/2 degré près la position du centre de la boule lorsque le fil est en équilibre. Or une erreur de 1/2 degré a une grande influence sur la valeur de la torsion du micromètre. Cette erreur est d'autant plus grave que l'écart des deux boules est plus petit.

Remarque. — Beaucoup d'expériences de vérification ont été faites depuis celles de Coulomb. Mais aucune série ne présente des nombres plus approchés que ceux de Coulomb, malgré les précautions qu'ont prises les divers expérimentateurs pour éviter les causes d'erreur signalées plus haut [1].

895. **Vérification de la loi des masses.** — Coulomb *admettait à priori* que deux sphères égales, dont l'une est électrisée et l'autre à l'état neutre, prennent des charges égales lorsqu'on les met en contact.

Il introduisait une boule fixe, électrisée, qui électrisait par contact la boule mobile. Celle-ci était d'abord au 0° sans torsion. Elle était repoussée à une certaine distance. Coulomb réduisait l'écart à α^0 $(= 2^0)$ grâce à une torsion du micromètre supérieur. Il touchait alors la boule fixe avec une boule égale. — La répulsion diminuait, puisque la charge de la boule fixe était devenue moitié moindre. Pour maintenir la boule mobile à la distance α, il fallait donc une torsion moindre. Coulomb tournait le micromètre en sens inverse de manière à réduire la torsion totale à $N' + \alpha$ et il constatait que

$$N' + \alpha = \frac{N + \alpha}{2}.$$

On peut faire une autre expérience en touchant de nouveau la boule fixe électrisée avec une boule égale et neutre, et en ramenant l'écart à la même valeur α : on constate que la nouvelle torsion

$$N'' + \alpha = \frac{N + \alpha}{4},$$

en même temps que la charge, est devenue *le quart* de la charge initiale.

896. **Loi élémentaire des actions électriques.** — Il résulte des

1. Voir la vérification de la loi (cas des attractions) dans Mascart, *Électricité statique.*

expériences de Coulomb que deux petites sphères électrisées A et A′ s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs charges.

La vérification de la loi des distances exige que la distance des centres de A et de A′ reste toujours très grande par rapport à leurs rayons. Si l'on suppose que, les charges des deux sphères restant constantes, leurs rayons diminuent de plus en plus, la loi s'applique toujours à des distances de plus en plus faibles. On peut en induire que la loi serait encore vraie *à la limite*, c'est-à-dire pour des *points électrisés* situés à une distance r infiniment petite. C'est ce qu'on exprime en disant que *la loi de Coulomb* est la *loi élémentaire* des actions électriques.

897. **Expression mathématique de la loi de Coulomb. — Unité de quantité d'électricité** ou **Unité de charge électrique** (*coulomb*). — Si l'on appelle φ l'action qu'exerce une masse électrique égale à l'unité sur une masse électrique égale placée à l'unité de distance, l'action f, exercée à la distance d par une masse q sur une masse q', sera évidemment donnée par la formule

$$[1] \qquad f = \pm \varphi \cdot \frac{qq'}{d^2}.$$

Si les deux masses sont de même signe, la force est positive, et c'est une répulsion; elle est *négative* dans le cas contraire.

De cette formule on peut déduire par l'expérience la valeur d'une masse quelconque d'électricité. Il suffira de mesurer l'action qu'elle exerce à une distance d soit sur une autre masse quelconque q', soit sur une masse égale. Dans ce dernier cas la formule devient

$$f = \varphi \frac{q^2}{d^2}, \qquad \text{d'où l'on déduit} \qquad q = \frac{f}{\varphi}\sqrt{d}.$$

Le nombre qui exprimera q dépendra des unités adoptées pour évaluer les longueurs et les forces.

On conçoit donc que l'on puisse rapporter les masses électriques aux unités de masse, de longueur et de temps adoptées dans le système C. G. S. (121). Cette évaluation a été faite au moyen d'une équation de définition empruntée aux lois de l'électromagnétisme que nous exposerons plus loin. L'unité de quantité d'électricité, ainsi définie, s'appelle *unité absolue*. Dans la pratique, on lui substitue une autre unité de quantité, *dix fois plus petite*, à laquelle on a donné le nom de *coulomb*[1].

1. Pour rappeler la mémoire du physicien français Coulomb.

On évalue donc les masses électriques ou quantités d'électricité en *coulombs*, de même qu'on évalue les longueurs en mètres, ou les poids en kilogrammes.

Remarque. — On peut simplifier cette équation par un choix convenable de l'unité d'électricité. Si l'on définit l'unité d'électricité *la quantité d'électricité qui exerce, à l'unité de distance, sur une quantité égale, une force égale à l'unité de force*, on aura évidemment

$$\varphi = 1 \qquad \text{et} \qquad f = \pm \frac{qq'}{d^2}. \qquad [2]$$

898. **Force électrique. — Champ électrique.** — Lorsqu'une masse électrique q concentrée en un point A se trouve dans le voisinage d'un système de points électrisés, soit isolés comme le point A, soit réunis de manière à constituer un corps conducteur unique, elle subit une attraction ou une répulsion de la part de chacun des points du système. Toutes ces actions sont des forces concourantes qui ont une résultante unique. C'est cette résultante, attractive ou répulsive, qu'on appelle *force électrique au point* A considéré.

La force électrique en un point varie évidemment, en grandeur et en direction, avec la position du point par rapport au système électrisé. La portion de l'espace où la force électrique, provenant de ce système, a une valeur finie et déterminée, s'appelle *champ électrique* du système.

On appelle *intensité du champ électrique* en un point la valeur de la force attractive ou répulsive qui s'exercerait en ce point sur l'*unité d'électricité positive*.

Lorsque la force électrique a la même direction en tous les points du champ, on dit que le champ est *uniforme*. On démontre que, dans ce cas, la grandeur de la force y est aussi constante.

Un champ électrique est limité par le lieu des points de l'espace où la force électrique est nulle. Il y a des champs électriques illimités, comme l'est le champ magnétique terrestre, c'est-à-dire qu'ils n'ont d'autre limite que la sensibilité des appareils. Il en est d'autres qui sont rigoureusement limités par une enceinte matérielle. Nous en verrons des exemples dans l'induction électrostatique.

899. **Composantes de la force en un point du champ électrique.** — On peut déterminer par le calcul l'intensité du champ en un point quelconque, c'est-à-dire la grandeur et la direction de la force électrique qui s'y exerce. Soient M le point et q sa charge, et soient q_1, q_2..., les masses électriques

disséminées aux points A_1, A_2... dont les actions constituent le champ, et $r_1, r_2 \ldots$, leurs distances respectives au point M. Les forces qui y concourent sont respectivement

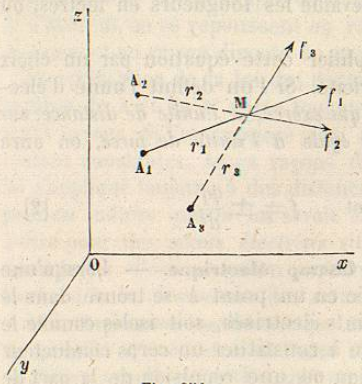

Fig. 854.

$$\pm \varphi \frac{qq_1}{r_1^2} = f_1, \qquad \pm \varphi \frac{qq_2}{r_2^2} = f_2 \ldots,$$

le signe $\pm$ désignant une force répulsive ou attractive et dépendant des signes de q_1 et de q_2....

Soient trois axes de coordonnées rectangulaires. Décomposons chaque force f suivant ces axes (fig. 854).

Les composantes sont $f_1 \cos \alpha_1$, $f_1 \cos \beta_1$, $f_1 \cos \gamma_1$, en appelant α_1, β_1, γ_1 les angles de la force f_1 avec les axes. En appelant x, y, z les coordonnées du point M, et x_1, y_1, z_1 celles du point A, on a

$$\cos \alpha_1 = \frac{x - x_1}{r_1}, \qquad \cos \beta_1 = \frac{y - y_1}{r_1}, \qquad \cos \gamma_1 = \frac{z - z_1}{r_1}.$$

Les composantes sont donc

$$\pm \frac{qq_1(x - x_1)}{r_1^3}, \qquad \pm \frac{qq_1(y - y_1)}{r_1^3}, \qquad \pm \frac{qq_1(z - z_1)}{r_1^3},$$

r_1 étant défini par l'équation

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2.$$

En effectuant la même décomposition pour chaque force, on aura :

pour la somme des composantes suivant l'axe des x $\quad X = \pm \sum \frac{qq_1(x - x_1)}{r_1^2}$,

— — — y $\quad Y = \pm \sum \frac{qq_1(y - y_1)}{r_1^2}$,

— — — z $\quad Z = \pm \sum \frac{qq_1(z - z_1)}{r_1^2}$.

Enfin, la force électrique résultante sera donnée par la diagonale du parallélépipède construit sur X, Y, Z ; elle a pour valeur $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$.

On calculera de même l'action exercée sur le point M par un corps ou par une série de corps électrisés, conducteurs ou non conducteurs. Il suffira de décomposer chacun de ces corps en éléments de volume *infiniment petits*, au moyen de trois systèmes de plans parallèles aux plans des coordonnées, et l'on considérera X, Y, Z comme les sommes des composantes provenant de chacun de ces éléments de volume électrisés.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION ET DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ.

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

900. **Accumulation de l'électricité à la surface des corps.** — L'étude de la distribution de l'électricité sur des corps conducteurs a été faite par Coulomb expérimentalement, et par Poisson mathématiquement. L'un et l'autre ont été conduits au fait fondamental suivant :

Lorsqu'un corps, conducteur et isolé, est électrisé positivement ou négativement, l'électricité libre se porte exclusivement à sa surface extérieure.

1° *Vérification expérimentale directe.* — On peut le démontrer directement au moyen de plusieurs expériences. Nous nous contenterons de citer la suivante.

Fig. 855.

On prend une sphère de cuivre creuse, isolée sur un pied de verre, et ouverte à sa partie supérieure (fig. 855). Après l'avoir électrisée en la mettant en contact avec une source électrique, on la touche successivement à l'intérieur et à l'extérieur avec un *plan d'épreuve*. On nomme ainsi un petit disque de clinquant, isolé à l'extrémité d'un bâton de gomme laque, et dont Coulomb s'est servi pour étudier la distribution de l'électricité. Il appliquait ce disque à plat sur le corps électrisé et il admettait qu'en le substituant ainsi à une portion de la surface électrisée on enlevait une quantité d'électricité égale à la charge de celle-ci. Or, en touchant extérieurement la sphère avec le plan d'épreuve, on recueille de l'électri-