ANNALES SCIENTIFIQUES DE L'É.N.S.

ÉDOUARD BRANLY

Étude des phénomènes électrostatiques dans les piles

Annales scientifiques de l'É.N.S. 2e série, tome 2 (1873), p. 201-252
<http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1873_2_2__201_0>

© Gauthier-Villars (Éditions scientifiques et médicales Elsevier), 1873, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales scientifiques de l'É.N.S. » (http://www.elsevier.com/locate/ansens) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM
Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

ÉTUDE

DES

PHÉNOMÈNES ÉLECTROSTATIQUES

DANS LES PILES,

PAR M. ÉDOUARD BRANLY,

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE, AGRÉGÉ DES SCIENCES PHYSIQUES,
RÉPÉTITEUR DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES.

INTRODUCTION.

Ce travail a pour objet une étude des phénomènes électrostatiques qui se présentent en Électricité dynamique, soit aux deux pôles des appareils électromoteurs ouverts, soit sur les conducteurs traversés par les courants.

Je me suis d'abord proposé de construire un instrument permettant de répéter simplement les mesures déjà faites et rendant, par la facilité et la sûreté de son emploi, les recherches plus rapides. Après avoir vérifié avec cet appareil la plupart des résultats relatifs à ces phénomènes, j'ai abordé l'étude de plusieurs questions jusqu'ici obscures. Le temps ne m'a pas encore permis de les examiner complétement; je ne présente ici que les premiers résultats.

Au début de ces recherches, je crois utile de rappeler quelques définitions, le même terme ayant souvent été employé par divers auteurs dans des acceptions différentes.

Quantité d'électricité. — Si deux sphères égales sont mises en contact, elles contiennent, quand on les électrise, des quantités égales

d'électricité. Si une sphère électrisée est mise en contact avec une sphère égale et à l'état neutre, chacune, après le contact, renferme la moitié de l'électricité que la première possédait précédemment.

Unité d'électricité. — L'unité d'électricité sera la quantité qui, étant concentrée en un point, exercera sur une quantité égale, concentrée à une distance égale à l'unité de longueur, la même action que l'unité de force accélératrice sur l'unité de masse. Cela revient à faire $K = 1$ dans la formule qui résume les lois de Coulomb, $F = K\frac{ee'}{d^2}$. Nous prendrons pour unité de longueur le millimètre, pour unité de masse la masse d'un milligramme, et pour unité de temps la seconde. Le poids d'un milligramme à Paris vaut 9808 unités de force.

Densité ou charge électrique. — La densité électrique d'une surface chargée uniformément est la quantité d'électricité distribuée sur l'unité de surface. Supposons une sphère électrisée, ayant un rayon égal à l'unité et possédant l'unité d'électricité : la surface est 4π; $\frac{1}{4\pi}$ représente la quantité d'électricité répartie sur l'unité de surface de la sphère : c'est la densité électrique sur la sphère. Si le rayon est R et si elle renferme Q unités d'électricité, $\frac{Q}{4\pi R^2}$ sera la densité.

Sur un conducteur quelconque, la densité est, en général, variable en chaque point; y étant la densité en un point, $y\,ds$ sera la quantité d'électricité sur l'élément infiniment petit ds. La quantité d'électricité, divisée par la surface de l'élément, mesure la densité. La quantité totale d'électricité qui se trouve sur le conducteur est $\int y\,ds$. L'expression *charge électrique* en un point a la même signification que le mot *densité*.

Épaisseur électrique. — Pour figurer l'électricité répandue à la surface des corps conducteurs, on a souvent attribué à la couche une épaisseur; l'épaisseur est en chaque point proportionnelle à la densité.

Potentiel. — Représentons par r la distance d'une masse électrique dq à un point P déterminé ayant pour charge l'unité d'électri-

cité, l'expression $V = \sum \frac{dq}{r}$ s'appelle le *potentiel* par rapport au point P de toutes les masses électriques agissantes. La projection sur une direction donnée Px de la résultante des forces qui agissent sur le point P a pour valeur la dérivée du potentiel par rapport à cette direction, ou $\frac{dV}{dx}$.

Quand l'équilibre est établi, la résultante des actions sur un point quelconque intérieur d'un conducteur doit être nulle; $\frac{dV}{dx}$ est nul pour toute direction Px : il s'ensuit que le potentiel par rapport à tout point intérieur d'un conducteur doit être constant dans l'état d'équilibre. Le potentiel intérieur est variable d'un conducteur à l'autre.

L'équilibre ayant lieu, si l'on multiplie dans un certain rapport la quantité d'électricité répandue sur chaque élément, l'équilibre subsiste encore, et $\sum \frac{dq}{r}$ augmente dans le même rapport. Le potentiel est donc proportionnel à la charge totale Q; $V = \lambda Q$, λ étant une constante qui dépend de la forme et des dimensions du conducteur.

Unité de potentiel. — Une sphère de rayon R étant chargée d'une quantité d'électricité Q, son potentiel intérieur est $\frac{Q}{R}$; il est égal à 1 si le rayon est égal à l'unité de longueur et si la quantité totale d'électricité répandue sur la sphère est l'unité. Nous prendrons ce potentiel pour unité de potentiel.

Le potentiel d'un corps conducteur communiquant avec le sol est nul.

Tension. — Les molécules du fluide électrique qui se trouve sur la surface d'un corps électrisé tendent à s'écarter les unes des autres. L'électricité exerce normalement sur l'air un effort : c'est à cette pression contre l'air que l'on a donné primitivement le nom de *tension électrique*. La tension en un point est proportionnelle au carré de la densité électrique. On a quelquefois aussi confondu les expressions *densité* et *tension*. Enfin une autre signification a été également donnée au mot *tension* en Électricité dynamique; il est alors synonyme du mot *potentiel*. Quand nous l'emploierons, ce sera dans ce dernier sens.

I. — *Appareils de mesure pour les déterminations électrométriques.*

Balance de Coulomb. — Les appareils employés pour les déterminations électrométriques dérivent, en général, de la balance de Coulomb. Dans cet appareil, la torsion d'un fil élastique de métal ou de verre fait équilibre à l'action électrique qui s'exerce entre deux boules conductrices.

La balance de Coulomb est trop connue pour qu'il soit utile de la décrire en détail. La forme que lui a donnée l'auteur était la plus convenable pour le but qu'il se proposait : la recherche des lois élémentaires en Électricité et l'étude de la distribution à l'aide du plan d'épreuve.

Pour mesurer avec la balance de Coulomb les densités électriques, on touche le point à étudier avec le plan d'épreuve, et l'on porte ce dernier dans la balance où il remplace la boule fixe. On obtient ainsi les rapports des densités électriques aux différents points.

Détermination avec la balance de Coulomb du potentiel intérieur d'un conducteur électrisé. — S'il s'agit de mesurer le potentiel intérieur d'un conducteur électrisé, on relie par un fil long et fin la balle fixe de la balance avec le conducteur étudié; le conducteur, le fil et la sphère forment alors un système unique en équilibre; le potentiel du système par rapport à un point intérieur du conducteur n'a pas changé d'une façon appréciable, et il est le même que celui de la sphère supposée isolée, si le fil est assez long et assez fin. La mesure obtenue avec la balance fournit la quantité d'électricité Q de la sphère, proportionnelle à son potentiel $\frac{Q}{R}$, qui est aussi celui du conducteur.

Tandis que la densité électrique sur un conducteur varie en général avec la position de l'élément touché par le plan d'épreuve, on obtient toujours la même déviation de la boule mobile en mettant la boule fixe en communication avec le conducteur par un fil long et fin, quel que soit le point du conducteur auquel le fil est relié.

L'expérience a été faite avec la balance ordinaire de Coulomb et un

ellipsoïde de révolution dont le grand axe avait 60 centimètres et le petit axe 20 centimètres. Cet ellipsoïde était placé à 4 mètres de la balance. Aux extrémités de chacun des deux axes était soudé un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, terminé à l'autre bout par une sphère de 5 millimètres de diamètre. Cette sphère pouvait être posée sur un petit disque extérieur à la cage de la balance et communiquant avec la boule fixe par un fil de cuivre.

L'ellipsoïde est d'abord électrisé avec un bâton de résine frotté. On applique sur le disque relié à la boule fixe la sphère qui termine le fil soudé à l'extrémité du petit axe. Les deux boules de la balance se chargent, et l'on attend que la boule mobile qui a été repoussée ait pris une position fixe d'équilibre. On écarte alors la sphère qui est appliquée sur le disque, et l'on place sur le disque la sphère qui termine le fil soudé à l'extrémité du grand axe. La boule mobile ne bouge pas.

L'ellipsoïde est déchargé ainsi que la boule fixe de la balance. La boule mobile revient au contact de la boule fixe.

On ne peut éviter une déperdition continue et assez rapide de l'électricité, puisque le disque circulaire et les sphères que l'on met successivement en contact avec lui se trouvent nécessairement dans l'air de la chambre. Un miroir fixé sur le fil de torsion a permis de constater avec une lunette que le déplacement lent de l'aiguille mobile restait le même quand on remplaçait sur le disque l'une des sphères par l'autre. Il est bon d'électriser fortement l'ellipsoïde; la charge de la boule mobile est alors plus grande, et comme elle se perd très-lentement dans la balance, l'écart des deux boules est plus considérable. Plusieurs observations ont été faites avec des écarts d'environ 15 degrés.

Les modifications apportées à la balance de Coulomb ont été motivées par la nécessité d'accroître la sensibilité de l'appareil sans rien enlever à la sûreté de ses indications. La balance possède sur les autres instruments l'avantage de donner des mesures susceptibles d'être évaluées immédiatement au moyen de l'unité de force.

La première idée qui vint à l'esprit pour augmenter la sensibilité fut d'adjoindre à la balance un condensateur, comme Volta l'avait fait pour son électroscope à lames d'or. C'est ainsi que Biot a opéré pour mesurer les tensions électriques aux pôles d'une pile.

Électromètre de Dellmann et Kohlrausch. — Dellmann remplaça la boule fixe par une bande métallique, et la boule mobile par une aiguille de métal suspendue à un fil de verre. On peut, au moyen d'un levier, amener la bande de métal au contact avec l'aiguille, puis, le partage électrique ayant eu lieu, la bande est abaissée. Comme la bande et l'aiguille se repoussent suivant toute leur longueur, la surface des conducteurs qui agissent l'un sur l'autre est plus grande que dans la balance de Coulomb.

Dans la balance de Coulomb on peut, sans erreur sensible, en se plaçant dans des conditions convenables, considérer chaque boule comme réduite à son centre, ce qui permet d'évaluer aisément la force de répulsion quand on connaît la distance des centres. Dans l'appareil de Dellmann, la distribution de l'électricité sur l'aiguille et sur la bande devant varier quand l'angle d'écart change, il est nécessaire de ramener toujours par une torsion convenable l'aiguille à faire le même angle avec la plaque fixe. Dans ce cas seulement, les racines carrées des torsions sont proportionnelles aux quantités d'électricité. Il est plus commode d'observer les déviations telles qu'elles se présentent, sans ramener chaque fois, par une torsion convenable, à une même distance angulaire; mais il faut alors établir une table de graduation, indiquant, pour une déviation observée, la torsion qui peut maintenir l'aiguille à une distance angulaire déterminée, 30 degrés, par exemple.

Kohlrausch fit usage de l'électromètre de Dellmann, et en même temps d'un condensateur à lame d'air.

Électroscope de Bohnenberger. — Bohnenberger donna, en 1816, la description d'un électroscope très-sensible : une lame d'or battu, longue de 6 centimètres et large de 7 millimètres, se trouvait exactement placée au milieu de l'intervalle compris entre deux boules formant les pôles d'une pile sèche. La lame est également attirée de part et d'autre; mais si, par la tige de métal à laquelle elle est suspendue, on lui communique une très-petite quantité d'électricité, l'extrémité inférieure de la lame d'or est attirée par la boule de métal qui possède l'électricité opposée, et repoussée par la boule qui possède la même électricité.

Électromètre de Fechner et Hankel. — Fechner remplaça les boules

polaires de la pile sèche par des disques métalliques agissant sur une plus grande étendue de la lame d'or. C'est sous cette forme que l'appareil a été employé par Hankel dans ses recherches sur l'électricité atmosphérique. Un microscope lui permettait d'estimer exactement les petits déplacements de la lame. Enfin, comme la pile sèche a l'inconvénient de donner aux plateaux une charge qui varie avec la température, Hankel lui substitua une pile formée d'un grand nombre d'éléments : zinc, cuivre et eau ordinaire.

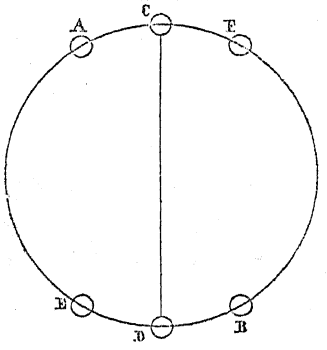
Les nombres suivants permettront d'apprécier le degré de sensibilité auquel Hankel est arrivé. Dans une de ses expériences, les deux plateaux sont reliés aux pôles d'une pile de 24 éléments; la lame d'or est à 5 millimètres de chacun des plateaux et communique avec l'un des pôles d'une pile de 15 éléments dont l'autre pôle est en communication avec le sol. Le microscope viseur est muni d'un micromètre oculaire dont les divisions valent $\frac{1}{5}$ de millimètre. Les déviations sont évaluées en divisions du micromètre. Ici la déviation est 4,12; avec une pile de 30 éléments, la déviation est 8,36. Lorsque la déviation devient supérieure à 8, elle cesse d'être proportionnelle à la charge de la feuille d'or. Si la distance de la lame aux disques est plus grande que dans l'expérience précédente, la déviation peut augmenter sans que la proportionnalité cesse d'exister, mais la sensibilité diminue. Ainsi, la distance de la lame à chacun des plateaux étant de 10 millimètres et la pile dont le pôle est mis en communication avec la lame d'or étant formée de 10 éléments, la déviation obtenue était 1,5. Pour avoir une déviation 10, — et l'on ne pourrait demander moins pour les mesures électrostatiques dans le circuit d'un élément Daniell, — il faudrait une charge d'environ 3000 éléments : zinc, cuivre et eau; mais, avec une pareille charge, la proportionnalité cesserait pour des déviations bien inférieures à 10.

Balance à miroir de Hankel. — Afin d'évaluer en unités électrostatiques les petites quantités d'électricité, Hankel adopta pour la balance de torsion une disposition qui la rapproche des appareils dont il nous reste à parler.

Quatre boules fixes A, F, E, B (*fig.* 1), soutenues par des tiges de laiton, sont placées aux sommets d'un rectangle; deux boules situées

sur une même diagonale sont reliées à l'un des pôles d'une pile de Volta, les deux autres à l'autre pôle de la même pile. Une aiguille métallique soutenue par un fil d'acier porte deux autres boules C et D à

Fig. 1.



ses extrémités. On comprend que, si l'on charge l'aiguille mobile, elle se comportera comme la lame d'or de l'électroscope de Bohnenberger. Un miroir solidaire du fil de torsion permet d'évaluer la déviation et la torsion. Hankel obtint une déviation d'environ 1 degré en employant une pile de 406 éléments : zinc, cuivre et eau. Le pôle positif communiquait avec A, B, C, D, le pôle négatif avec F et E. Si l'on remplace les quatre boules fixes par des plateaux, on augmente la sensibilité, comme Dellmann l'avait fait, en substituant aux deux boules de la balance de Coulomb deux bandes métalliques.

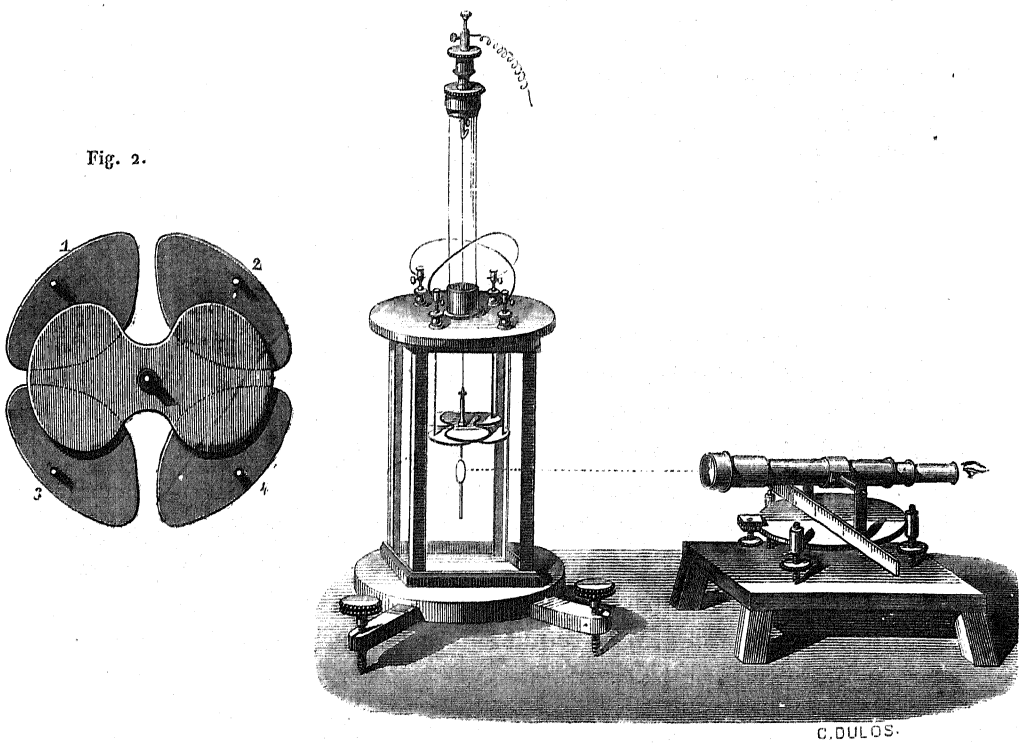
Électromètre de Thomson. — Cette disposition a été suivie par M. W. Thomson. Dans l'intérieur d'une boîte cylindrique en laiton, fendue suivant deux diamètres rectangulaires, se meut une lame d'aluminium ayant la forme d'un 8; elle est soutenue par un fil de torsion, et porte à sa partie inférieure une tige de platine qui plonge dans l'acide sulfurique. Sur le fil de torsion est fixé un miroir. M. Thomson a remplacé la pile qui sert à charger les plateaux de l'électromètre de Fechner par une bouteille de Leyde dont l'acide sulfurique forme l'armature interne, et une feuille d'étain l'armature externe. L'emploi de la bouteille de Leyde présente des inconvénients, car il est très-difficile de maintenir sa charge constante. M. Thomson a cherché à

lever cette difficulté par un choix convenable du verre et une dessiccation complète. L'acide sulfurique qu'il emploie à cet effet, et qui constitue l'armature interne, communique sa charge à l'aiguille d'aluminium. L'électromètre renferme un indicateur de la charge et un petit appareil destiné à régler la charge du condensateur. Ces différents accessoires compliquent beaucoup l'instrument.

Description d'un nouvel électromètre. — Pour les mesures que je me proposais d'effectuer, j'ai construit un électromètre dans lequel j'ai emprunté à l'appareil de M. Thomson la disposition en secteurs. Ce nouvel instrument (*fig.* 2 et *fig.* 3), composé d'un petit nombre de pièces, est d'une construction facile et d'un usage très-simple.

Fig. 3.

Fig. 2.



Une aiguille métallique de large surface se meut horizontalement au-dessus de quatre secteurs formant les quadrants d'un même cercle,

et reliés deux à deux en diagonale. Le centre de l'aiguille et celui du cercle sont sur une même verticale. L'aiguille est soutenue par un fil métallique qui communique avec le pôle positif d'une pile et en reçoit une charge permanente d'électricité.

Pour mesurer la différence de potentiel entre A et B, on relie A aux secteurs 1 et 4, qui prennent le potentiel de A et B aux secteurs 2 et 3, qui prennent le même potentiel que B. La différence entre les quantités d'électricité des deux couples de secteurs est proportionnelle à la différence des potentiels de A et de B. L'aiguille est attirée par l'un des couples de secteurs et repoussée par l'autre. Pour un certain angle d'écart, il y a équilibre entre la force de torsion du fil et l'action électrique.

L'axe de suspension se prolonge au-dessous de l'aiguille par un fil métallique auquel est fixé un miroir. On peut mesurer les déviations en lisant, à l'aide d'une lunette, les divisions d'une règle graduée réfléchies par le miroir. En ayant soin d'opérer avec de faibles déviations, la distance des divers points de l'aiguille aux secteurs varie très-peu. L'action exercée sur l'aiguille par les deux couples de secteurs est alors proportionnelle au produit de la charge de l'aiguille par la différence de leurs charges ou de leurs potentiels. Quand les quatre secteurs ont des charges égales, la déviation est nulle.

En changeant le fil de torsion, en élevant ou en abaissant l'aiguille, en variant sa charge, on modifie à volonté la sensibilité de l'appareil. Si le nombre des éléments employés pour la charge ne varie pas, la sensibilité est à peu près constante dans un intervalle de plusieurs jours, la distance de l'aiguille aux secteurs restant la même.

Il est important de remarquer que, pour effectuer les mesures les plus délicates, il n'est pas nécessaire d'employer de fortes charges : 50 ou même 20 éléments, zinc, cuivre et eau peuvent suffire pour étudier un seul élément Daniell. Comme la grandeur des éléments de charge est indifférente, on a réduit suffisamment leurs dimensions pour en rendre le transport très-commode.

II. — *Phénomènes électrostatiques aux deux pôles d'une pile dont le circuit est ouvert.*

Quand le circuit d'une pile est ouvert, on observe des différences dans l'état électrique des deux pôles. Dans le premier élément de pile, Volta reconnut avec son électroscope que l'un des métaux présente de l'électricité résineuse et l'autre de l'électricité vitrée. Une étude plus approfondie le conduisit à deux principes qui servent de base à la construction des piles :

1° La différence des tensions aux deux pôles est constante, que l'élément soit isolé ou qu'il communique par l'un de ses pôles avec le sol; de plus elle ne varie pas avec les dimensions de l'élément.

2° Lorsque plusieurs éléments sont réunis de façon que le zinc du premier soit en contact avec le cuivre de l'élément suivant, la différence des tensions aux deux pôles de chaque élément est constante et indépendante de l'état électrique de l'élément, aux deux pôles extrêmes; elle est égale à la somme des différences partielles.

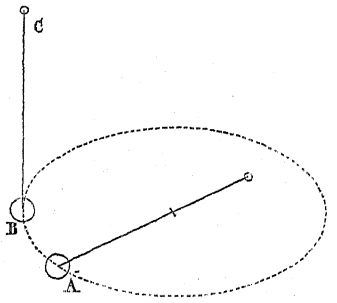
MESURES EFFECTUÉES AVEC LA BALANCE DE COULOMB.

Si nous supposons une pile construite et l'un de ses pôles mis en communication avec le sol, la densité électrique est variable aux différents points de la surface de l'autre pôle et la tension ou le potentiel est constant.

Densité aux différents points du pôle de la pile. — La confirmation expérimentale de la distinction entre la densité et la tension au pôle d'une pile s'effectue avec une balance de Coulomb (*fig.* 4). Une balle mobile A de 8 millimètres de rayon a été fixée à l'extrémité d'une tige de verre horizontale soutenue par un fil de torsion en cuivre recuit ayant $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre; ce fil était mis en communication métallique avec la balle. Une boule fixe B de 1 centimètre de rayon était portée par une tige mince en laiton terminée à l'extérieur de la cage par une petite boule C de $\frac{1}{4}$ de centimètre de rayon. On chargeait la balle mobile négativement et d'une façon permanente par le pôle positif d'une pile de 100 éléments à eau dont le

pôle négatif était relié au sol. On mettait d'abord les centres des deux boules à une certaine distance sans torsion. Un miroir dans le prolongement du fil de torsion réfléchissait les divisions d'une règle graduée en millimètres, placée à 3 mètres, et permettait, à l'aide d'une lunette, de mesurer les déplacements de la balle mobile et la torsion du fil.

Fig. 4.



Après avoir assemblé 700 éléments zinc, cuivre et eau, et relié au sol le pôle négatif, on a fixé au pôle positif le centre d'un disque métallique de 50 centimètres de diamètre. Avec un plan d'épreuve ayant 1 centimètre de diamètre, on touchait alternativement le centre et le bord du disque. Le plan d'épreuve était mis ensuite un instant en contact avec la petite boule C. Celle-ci prenait alors ainsi que B une partie de la charge du plan d'épreuve.

En opérant ainsi, on observe pour la boule mobile des déviations notablement différentes dans les deux cas. Ainsi, dans une des expériences, on a trouvé $4^{mm},5$ pour le centre et $10^{mm},5$ pour le bord. Les surfaces des deux boules ayant été amenées à une distance de $\frac{1}{2}$ centimètre seulement afin de rendre l'expérience possible, il n'est pas possible de déduire de ces nombres le rapport exact des densités; on ne peut que constater une différence très-marquée.

Potentiel au pôle de la pile. — Par l'emploi du plan d'épreuve, on ne peut donc pas définir aisément l'état électrique de l'élément, puisque les nombres obtenus dépendent de la forme des pôles et du point touché; mais si la boule fixe est mise en communication avec le pôle par un long fil conducteur, la déviation observée est toujours la même, quel que soit le point touché. On constate également que la forme du

pôle et les dimensions des conducteurs qui le terminent n'ont pas d'influence. Lorsque l'équilibre est établi, le potentiel est devenu le même sur la boule et sur la lame métallique qui forme le pôle : ce potentiel est $\frac{E}{R}$ sur la sphère, E représentant la quantité d'électricité qui la recouvre et R le rayon. La balance de torsion mesure E, c'est-à-dire, à une constante près, le potentiel par rapport à un point quelconque du pôle.

Expériences de Biot. — Des deux principes énoncés plus haut, Biot a déduit la distribution des tensions électriques dans une pile isolée ou dans une pile communiquant par l'un de ses pôles avec le sol. Pour ce dernier cas au moins [1], il a exécuté des vérifications expérimentales à l'aide d'une balance de Coulomb et d'un condensateur. Le plateau collecteur relié à l'un des pôles de la pile prend le même potentiel V que ce pôle. Le potentiel du pôle ou celui du collecteur est proportionnel à la charge Q du collecteur; $V = \lambda Q$, la constante λ dépendant de la forme et des dimensions du condensateur. On supprime les communications et l'on sépare les plateaux; Q se mesure à l'aide de la balance et les nombres obtenus sont proportionnels à V.

Biot trouva sur la boule fixe de sa balance des quantités d'électricité proportionnelles au nombre des éléments de la pile. La mesure est difficile à répéter, car d'autres observateurs obtinrent après lui des résultats différents. D'après des expériences faites en 1837 par Peltier à l'aide de son électromètre, la tension statique augmenterait comme le carré du nombre des couples.

Plus récemment, Kohlrausch et Hankel ont supposé démontrée la loi de Biot et l'ont prise comme point de départ des expériences par lesquelles ils se sont assurés de la marche régulière de leurs instruments de mesure.

Vérification de la loi de Biot. — En employant une balance de torsion à miroir, on vérifie aisément et sans condensateur que la tension croît proportionnellement au nombre des couples.

---

[1] Biot n'a pas laissé de mesures dans le cas de la pile isolée; dans ce cas il avait trouvé que la charge transmise à la boule fixe était incomparablement plus faible qu'elle ne devrait être si la tension était moitié de ce qu'elle est dans le cas où l'un des pôles communique avec le sol.

Dans les expériences que je vais décrire, le fil de torsion était en cuivre rouge recuit et avait $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre. La boule fixe et la boule mobile étaient en liége doré et avaient un rayon sensiblement égal; elles se trouvaient en communication métallique entre elles. Les deux boules étaient d'abord écartées l'une de l'autre d'un certain angle sans qu'il y eût torsion du fil; la distance de leurs centres était alors de $28^{mm},8$. Un miroir de verre argenté était fixé sur le prolongement du fil de torsion.

On a observé les positions d'équilibre suivantes pour la boule mobile :

	mm
Les deux boules étant reliées entre elles et avec le sol.....	220,6
Les deux boules communiquant avec le pôle positif d'une pile de 250 éléments zinc, cuivre et eau, dont le pôle négatif touchait au sol.....	130,0
Les deux boules communiquant de même avec le pôle positif d'une pile de 200 éléments.....	160,0
Les deux boules communiquant de même avec le pôle positif d'une pile de 100 éléments.....	204,7
Position d'équilibre après la décharge.....	220,7

ÉQUILIBRE des boules.	LECTURES avec la lunette.	TORSIONS EN DIVISIONS de la règle.	TORSIONS EN ANGLES (la règle était à $3^m,09$ du miroir).	DISTANCES angulaires des deux boules (1).
A l'état neutre.	220,6			$\frac{\alpha}{2} = 7°31'20''$
Communiquant avec 250 élém.	130,0	$\frac{220,6 - 130}{2} = 45,3^{mm}$	$t' = \frac{45,3}{3090} \times \frac{360}{2\pi} = 2988''$	$\frac{\alpha'}{2} = 7.56.14$
Avec 200.....	160,0	$\frac{220,65 - 160}{2} = 30,32$	$t'' = 2016''$	$\frac{\alpha''}{2} = 7.48.\ 8$
Avec 100.....	204,7	$\frac{220,7 - 204,7}{2} = 8,00$	$t''' = 533''$	$\frac{\alpha'''}{2} = 7.35.46$
A l'état neutre.	220,7			

(1) La longueur du bras de levier de la boule mobile était de 110 millimètres ; $d = 28^{mm},8$, pour la première position.

Appelons q', q'', q''' la charge de l'une des boules quand elles communiquent avec 250 éléments, 200 éléments, 100 éléments, nous aurons

$$q'^2 = \mu \frac{t' \sin^2 \frac{\alpha'}{2}}{\cos \frac{\alpha'}{2}} = \mu 57,53,$$

$$q''^2 = \mu \frac{t'' \sin^2 \frac{\alpha''}{2}}{\cos \frac{\alpha''}{2}} = \mu 37,5,$$

$$q'''^2 = \mu \frac{t''' \sin^2 \frac{\alpha'''}{2}}{\cos \frac{\alpha'''}{2}} = \mu 9,354.$$

Si la loi énoncée est vraie, on doit trouver

$$q''^2 = 4q'''^2, \quad q'^2 = \frac{25}{4} q'''^2, \quad q'^2 = \frac{25}{16} q''^2.$$

Or on a

$9,354 \times 4 = 37,42$	au lieu de	$37,5$
$9,354 \times \frac{25}{4} = 58,4$	»	$57,53$
$37,500 \times \frac{25}{16} = 57,65$	»	$57,53$

On voit que l'accord est satisfaisant.

Les mêmes nombres peuvent servir à mesurer en unités électrostatiques la différence de potentiel aux deux pôles d'un élément. Cette détermination permettra d'employer les piles comme sources d'électricité statique ayant une valeur connue.

Calcul de la différence de potentiel aux deux pôles de l'élément zinc, cuivre et eau. — Nous prendrons les notations suivantes :

q quantité d'électricité répartie sur la boule mobile dont le rayon est $8^{mm},12$;

q_1 quantité d'électricité de la boule fixe dont le rayon est $8^{mm},4$;

$q_1 = q\left(\frac{8,4}{8,12}\right) = 1,03q$;

α distance angulaire des deux boules pour une charge donnée;
r rayon de cercle décrit par le centre de la boule mobile $r = 110^{mm}$;
t torsion produite par la répulsion des deux boules, exprimée en secondes;
n_1 moment du couple nécessaire pour tordre le fil d'un arc égal au rayon;
n pour le tordre de 1 seconde.

Nous avons

$$\frac{qq_1 \cos\frac{\alpha}{2}}{4r^2 \sin^2\frac{\alpha}{2}} = nt.$$

Dans le cas de la seconde observation, celle qui a été faite avec 200 éléments, l'équation devient

$$\frac{1,03\,q^2 \cos 7^\circ 48' 8''}{4 \times (110)^2 \sin^2 7^\circ 48' 8''} = nt.$$

n_1 a été obtenu en faisant osciller le fil après l'avoir tendu par un fil cylindrique de cuivre de longueur l et de poids p déterminés.

En représentant par θ la durée d'une oscillation simple, on a

$$\theta = \pi \sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{n_1}},$$

$$\Sigma mr^2 = \frac{pl^2}{12} \text{ (1)}$$

et, par suite,

$$n_1 = \pi^2 \frac{pl^2}{12\,t^2},$$

$$n_1 = 3282905,36.$$

Pour tordre le fil d'un arc égal au rayon, c'est-à-dire d'un arc de $57^\circ 17' 44'',8$, il fallait donc appliquer à 1 millimètre du centre de mou-

(1) L'unité de force est la force qui communique à la masse de 1 milligramme une accélération égale à 1 millimètre

vement une force représentée par $\frac{3282905}{9808,8}$ ou 334 milligrammes, puisque le poids de 1 milligramme vaut 9808,8 unités de force.

S'il s'agit de tordre le fil de 1 seconde,

$$n = 15,9.$$

Ici

$$nt = 15,9 \times 2016 = 32054,4.$$

On obtient

$$q = 5293 \quad \text{et} \quad \frac{q}{200} = 26,46.$$

Le potentiel, pour un seul élément zinc, cuivre et eau, sera

$$\frac{\frac{q}{200}}{8,12} \quad \text{ou} \quad \frac{26,46}{8,12} = 3,26;$$

$\frac{\frac{q}{200}}{4\pi(8,12)^2}$ sera la densité électrique sur la sphère mobile, $\frac{\frac{q}{200}}{4\pi(8,4)^2}$ la densité sur la sphère fixe.

Calcul de la différence de potentiel aux deux pôles de l'élément zinc, platine et eau. — Ces éléments étaient formés de fils de zinc et de fils de platine plongés dans l'eau ordinaire filtrée.

Dans la balance employée pour les mesures, deux boules fixes agissaient sur deux boules mobiles soutenues par une aiguille de verre. Le fil de torsion était un fil de cuivre recuit de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre. Le pôle positif d'une pile de 200 éléments était relié par un long fil aux deux boules fixes et aux deux boules mobiles; le pôle négatif communiquait avec la terre.

La position de l'aiguille a d'abord été observée quand les quatre boules étaient réunies entre elles et avec le sol, l'aiguille mobile se trouvant, sans qu'il y eût torsion du fil, écartée d'un certain angle du diamètre passant par les deux boules fixes. La position d'équilibre de l'aiguille a ensuite été observée après sa déviation.

Appelons :

q la charge de chacune des boules mobiles;
q' la charge de chacune des boules fixes;

d la distance d'une boule fixe à la boule mobile voisine;
α leur écart angulaire;
t la torsion.

On a

$$\frac{2qq'}{d^2}\cos\frac{\alpha}{2} = n_1 t.$$

Le rayon des boules fixes était de $9^{mm},75$.
Celui des boules mobiles était de $7^{mm},75$.

$$q' = q\,\frac{9,75}{7,75} = q\,1,26,$$
$$d = 48^{mm};$$
$$\cos\frac{\alpha}{2} = 0,96.$$
$$\frac{2q^2\,1,26 \times 0,96}{2304} = n_1 t.$$

On a fixé la valeur de n_1 en comptant d'abord les oscillations de l'aiguille oscillant seule, puis en comptant les oscillations de l'aiguille supportant deux poids égaux placés à des distances égales du centre de mouvement.

Le moment n_1 du couple nécessaire pour tordre le fil d'un arc égal au rayon était

$$n_1 = 3313273.$$

La déviation de l'aiguille qui soutenait les deux boules mobiles était exprimée par 60 millimètres de la règle divisée. Celle-ci se trouvait à 3 mètres du miroir :

$$t = \frac{\frac{60}{2}}{3000} = \frac{1}{100},$$
$$nt = 33132,73.$$

En faisant le calcul de q, on trouve

$$q = 5616,5, \quad \frac{q}{200} = 28,08.$$

Le potentiel est

$$\frac{28,08}{7,75} = 3,62.$$

Si le pôle négatif de la pile précédente est relié au sol, la quantité d'électricité qui se trouvera sur une sphère de rayon R mise en communication avec le pôle positif sera $R \times 3{,}62$; cette quantité est exprimée en unités d'électricité. On peut, en employant une disposition simple, charger ainsi la sphère et la décharger plusieurs fois de suite, en faisant en même temps passer dans le fil d'un galvanomètre le courant produit par la décharge. En désignant par n le nombre de décharges opérées dans l'unité du temps, la quantité d'électricité qui traversera le fil du galvanomètre sera $nR \times 3{,}62$. On passe facilement de là à la mesure de la quantité d'électricité transportée dans l'unité de temps dans le circuit d'une pile produisant un courant d'intensité connue ou dissolvant un poids de zinc déterminé.

MESURES FAITES AVEC L'ÉLECTROMÈTRE A MIROIR.

1° *Son mode d'emploi.* — Pour faire usage de l'électromètre, on peut opérer de la façon suivante : les quatre secteurs sont réunis, et l'aiguille occupe une position d'équilibre dont nous n'aurons pas, du reste, à tenir compte.

Supposons maintenant qu'il s'agisse de mesurer la différence des états électriques aux deux pôles d'un élément de pile. Mettons le pôle positif en communication, par un long fil métallique, avec deux secteurs en diagonale. Soit S leur ensemble; le pôle négatif est relié au système des deux autres secteurs S'; l'aiguille est déviée et oscille autour d'une nouvelle position d'équilibre que fixent trois mesures convenablement associées.

Ainsi, avec un élément Daniell, on a lu :

Écart maximum à droite....	$\alpha = 278{,}0^{mm}$	$539{,}2^{mm}$	$\frac{\alpha + 2\beta + \gamma}{4} = 268^{mm},85 = A.$
Écart à gauche au retour de l'aiguille.....	$\beta = 261{,}2$		
	$\beta = 261{,}2$	$536{,}2$	
Deuxième écart à droite...	$\gamma = 275{,}0$		
	$275{,}0$	$53{,}83$	
Deuxième écart à gauche.....	$263{,}3$		
	$263{,}3$	$365{,}8$	
Troisième écart à droite.....	$273{,}5$		

Les deux sommes 539,2 et 536,2 donnent pour moyenne 537,7. La position d'équilibre est $\frac{537,7}{2}$ ou 268,85. Des deux sommes 536,2 et 538,3 on déduit de même 268,62 et enfin 538,3 et 536,8 conduisent à 268,77. Les trois nombres 268,85, 268,62 et 268,77 sont très-voisins : c'est une preuve de la régularité des oscillations autour de la position d'équilibre.

Renversons les communications de manière à relier le pôle positif au système S′ et le pôle négatif au système S. L'aiguille est déviée de l'autre côté de la position d'équilibre qu'elle occupait quand les quatre secteurs étaient réunis entre eux.

$$\text{Nouvelles lectures....} \left\{ \begin{array}{l} \left.\begin{array}{l} \alpha' = 285 \\ \beta' = 310 \end{array}\right\} 595 \\ \left.\begin{array}{l} \beta' = 310 \\ \gamma' = 299 \end{array}\right\} 599 \end{array} \right\} \frac{\alpha' + 2\beta' + \gamma'}{4} = 298,5 = A';$$

298,5 est la position d'équilibre que l'aiguille occuperait dans le second cas.

Il est bon de faire une troisième observation en rétablissant les communications comme dans le premier cas. On corrige ainsi l'influence de la variation de la position d'équilibre initiale :

$$\text{Lectures.....} \left\{ \begin{array}{l} \left.\begin{array}{l} \alpha'' = 259 \\ \beta'' = 278 \end{array}\right\} 587 \\ \left.\begin{array}{l} \beta'' = 278 \\ \gamma'' = 261 \end{array}\right\} 539 \end{array} \right\} \frac{\alpha'' + 2\beta'' + \gamma''}{4} = 269 = A''.$$

On prendra pour résultat

$$A' - \frac{A + A''}{2} = 298,5 - \frac{268,85 + 269}{2}.$$

Lorsque l'aiguille d'aluminium est faiblement chargée, la position d'équilibre, correspondant au cas où les quatre secteurs sont réunis, éprouve peu de changement. Si la charge est considérable, les variations peuvent être plus fortes, mais elles n'influent pas sur la différence observée. Un jour où ces déplacements ont été notables, la différence aux deux pôles d'un élément constant a été représentée d'abord par

$$287,42 - 258,78 = 28,64,$$

et, une heure après, par

$$294,75 - 265,99 = 28,76.$$

En soutenant la plaque mobile par un fil de torsion assez fin, et cette plaque se trouvant à une distance des secteurs égale à 1 millimètre, la charge de 20 éléments zinc, cuivre et eau suffisait pour que la différence entre les états électriques des deux pôles d'un couple de Daniell fût accusée par 25 divisions.

2° *Les indications de l'électromètre sont proportionnelles à celles de la balance de Coulomb.* — Pour établir cette concordance, il a été nécessaire d'augmenter la sensibilité de la balance et de diminuer beaucoup celle de l'électromètre. A cet effet, la disposition adoptée déjà par Hankel pour la balance a été choisie (*fig.* 5). Quatre boules fixes agissaient sur deux boules mobiles fixées à l'extrémité d'une aiguille que soutenait un fil de cuivre recuit de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre. Les boules étaient supportées par des tiges de verre, et des fils fins de cuivre permettaient de les mettre en relation avec l'extérieur.

Quant à l'électromètre (*fig.* 6), la distance de la plaque aux secteurs était de 6 millimètres, et le fil de torsion était un fil de cuivre recuit de $\frac{1}{5}$ de millimètre de diamètre.

Fig. 5.

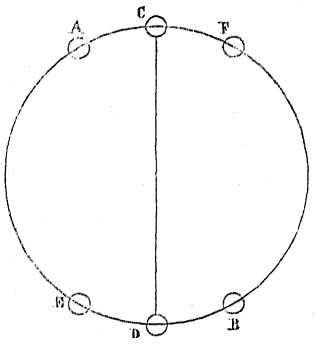
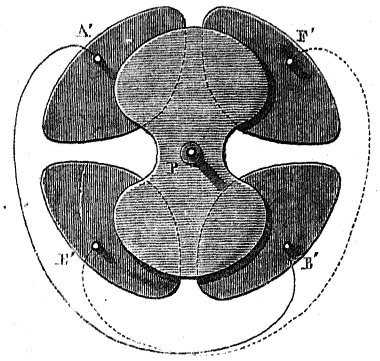


Fig. 6.



	c
Diamètre des boules fixes A, E, B, F.	2,0
Diamètre des boules mobiles C et D.	1,5
Corde EB.....	10,0
Corde FB.....	15,0

A et B, A' et B' sont reliés à la terre.
E et F, C et D, ainsi que E' et F' et la plaque P, communiquent avec le pôle positif d'un groupe d'éléments.

Trois groupes d'éléments zinc, cuivre et eau ont été formés, le premier de 100 éléments, le deuxième de 80 et le troisième de 60. Le pôle négatif communiquait avec la terre, et le pôle positif avec quatre des boules dans la balance, et avec deux des secteurs et la plaque dans l'électromètre. La légende placée au-dessous de la figure achèvera de faire comprendre comment étaient disposées les communications.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE.

Balance.		*Électromètre.*	
Équilibre (1)	201,8	Équilibre (2)	257,0
1er groupe (100 éléments)	184,5	1er groupe (100 éléments)	268,0
Équilibre	202,2	Équilibre	257,2
3e groupe (60 éléments)	195,9	3e groupe (60 éléments)	261,0
Équilibre	202,2	Équilibre	256,9
202,0 — 184,5 = 17,50		268 — 257,10 = 10,90	
202,2 — 195,9 = 6,30		261 — 257,05 = 3,95	

Les quotients $\frac{17,5}{10,9} = 1,60$ et $\frac{6,30}{3,95} = 1,59$ sont suffisamment d'accord.

DEUXIÈME EXPÉRIENCE.

(La sensibilité de l'électromètre a été augmentée en prenant pour fil de torsion un fil de cuivre de $\frac{1}{10}$ de millimètre.)

Balance.		*Électromètre.*	
Équilibre	201,8	Équilibre	423,5
3e groupe (60 éléments)	195,6	3e groupe (60 éléments)	429,0
Équilibre	201,7	Équilibre	423,7
1er groupe (100 éléments)	184,3	1er groupe (100 éléments)	439,6
Équilibre	202,2	Équilibre	424,0
201,75 — 195,6 = 6,15		429,0 — 423,60 = 5,40	
201,95 — 184,3 = 17,65		439,6 — 423,85 = 15,75	

$$\frac{17,65}{15,75} = 1,12.$$

$$\frac{6,15}{5,4} = 1,138.$$

(1) Toutes les boules communiquent ensemble et avec la terre.
(2) Les quatre secteurs communiquent ensemble.

TROISIÈME EXPÉRIENCE.

(Le fil de torsion restant le même, la distance de la plaque mobile aux secteurs est portée de 6 à 3 millimètres.)

Balance.		*Électromètre.*	
Équilibre	195,90	Équilibre	390,00
2e groupe (80 éléments)	182,80	2e groupe (80 éléments)	412,25
Équilibre	195,30	Équilibre	390,05
1er groupe (100 éléments)	175,15	1er groupe (100 éléments)	425,00
195,6 — 182,80 = 12,80		412,25 — 390,02 = 22,22	
195,3 — 175,15 = 20,15		425,00 — 390,05 = 34,95	

$$\frac{12,8}{22,22} = 0,574.$$

$$\frac{20,15}{34,95} = 0,576.$$

Si l'on emploie un plus grand nombre d'éléments, 200 par exemple, il faut tenir compte, avec la balance, du changement de distance des boules mobiles aux boules fixes; avec l'électromètre, au contraire, la déviation peut varier beaucoup plus sans que la position de la plaque relativement aux secteurs change sensiblement.

On voit, d'après les expériences qui précèdent, que les indications de l'électromètre sont, comme celles de la balance, proportionnelles aux différences de potentiel.

3° *La déviation est proportionnelle à la charge de la plaque et au nombre des éléments mis en relation avec les secteurs.* — Prenons 4 éléments de Daniell disposés en série.

La charge de l'aiguille étant produite par 100 éléments,

La différence aux deux pôles du premier Daniell a été	146,50
» aux deux pôles du second	142,75
» aux deux pôles de l'ensemble des 2 éléments	291,00

au lieu de 289,25, qui représente la somme.

La charge de l'aiguille étant celle de 60 éléments,

Le premier Daniell a donné.....	87,75	
Le deuxième et le troisième réunis.....	180,50	
Les trois.....	269,00	
au lieu de 268,85, qui fait la somme.		
Le premier et le deuxième.....	179,50	
Le troisième et le quatrième.....	189,50	
Les quatre réunis.....	370,75	au lieu de 369,00.

Si deux éléments se suivent et que leurs pôles de même nom soient en communication, les potentiels se retranchent :

Élément Daniell....	109,75	
Élément Grove.....	202,50	
Élément Grove suivi du Daniell.....	92,25	au lieu de 92,75.

L'examen des nombres précédents fait voir que la déviation produite par un même élément est très-sensiblement proportionnelle à la charge de l'aiguille, car le même élément a donné 146,5 quand la charge était produite par 100 éléments, et 87,75 quand elle provenait de 60 éléments. La proportionnalité rigoureuse exigerait 87,90.

DÉTERMINATION DES FORCES ÉLECTROMOTRICES.

La différence de potentiel aux deux pôles d'un élément de pile est en relation avec la grandeur des effets que peut exercer le courant produit quand le circuit est fermé. Cette dépendance fut signalée dès l'invention de la pile, mais sans être soumise à une loi précise. On sait maintenant que, si l'on prend deux éléments auxquels on offre la même résistance à vaincre, les quantités d'eau décomposées ou les actions exercées sur l'aiguille aimantée sont exactement proportionnelles aux différences de potentiel des deux pôles quand le circuit est ouvert.

Kohlrausch a démontré ce fait avec plusieurs éléments constants pour lesquels il a déterminé la différence de potentiel aux deux pôles et les forces électromotrices, c'est-à-dire les intensités correspondant à une même résistance. Il a trouvé que les charges données à son électromètre condensateur étaient proportionnelles aux forces électromotrices.

Mesures de la force électromotrice de plusieurs éléments constants. — Les mesures se font plus simplement avec l'électromètre à miroir. Cet instrument a servi à déterminer les nombres suivants, relatifs à quelques éléments à deux liquides. Plusieurs mesures ont été effectuées à deux époques différentes :

Première série de mesures.

Élément Daniell (zinc amalgamé, cuivre, sulfates)	1,00
Élément Grove (acide sulfurique $\frac{1}{10}$, acide azotique pur)	1,77
Élément Bunsen (charbon, zinc amalgamé)	1,73
Élément Marié-Davy	1,47
Élément cadmium et zinc amalgamé (sulfates)	0,33
Élément cadmium et zinc amalgamé (chlorures)	0,25
Amalgame de sodium, charbon, sulfate de mercure et charbon	2,23

Deuxième série de mesures.

Daniell à sulfates	1,00
Daniell (acide sulfurique $\frac{1}{10}$ et sulfate de cuivre)	1,06
Grove (acide sulfurique $\frac{1}{10}$, acide nitrique pur)	1,80
Grove (acide nitrique fumant)	1,97

Les lois relatives aux forces électromotrices trouvées par les différents expérimentateurs se vérifient sans difficulté.

Influence des dimensions de l'élément. — La force électromotrice est indépendante des dimensions de l'élément.

Deux éléments Daniell ont été préparés : pour l'un, le diamètre était de 10 centimètres et la hauteur des liquides de 13 centimètres; la différence des potentiels aux deux pôles a été 105,4; on a trouvé 105,75 avec un second élément dont le diamètre était de 5 centimètres et la hauteur 4 centimètres.

En général, un pareil accord ne peut exister entre les forces électromotrices de deux éléments Daniell que s'ils ont été montés tous deux depuis peu de temps. Il est indifférent de faire la mesure avant d'avoir fermé le circuit ou après avoir fait fonctionner l'élément pendant quelques instants et ensuite séparé les pôles; mais il arrive bientôt que le sulfate de cuivre traverse le vase poreux, et, le zinc se recouvrant peu

à peu d'un dépôt de cuivre, la force électromotrice de l'élément décroît sans que le circuit soit fermé.

Relation entre les forces électromotrices. Il y a une relation entre les forces électromotrices qui donne un moyen de s'assurer, dans le cours des déterminations, de la marche régulière de l'instrument de mesure.

Si nous prenons 3 éléments à eau acidulée formés avec du zinc et du cuivre, du zinc et du fer, du fer et du cuivre, nous trouvons que l'une des forces électromotrices est égale à la somme des deux autres :

Cuivre-fer, eau acidulée par $\frac{1}{25}$ d'acide sulfurique.....	29,5
Fer-cuivre.....	36,12
Zinc-cuivre.....	65,4

La somme calculée est 65,62.

Cette relation se conserve lorsque les liquides ont attaqué les surfaces ; la force électromotrice de chaque élément se modifie, mais les variations dans chacun d'eux sont pour ainsi dire complémentaires. En voici un exemple :

Élément Daniell, force électromotrice.....	99,47	
Élément fer-cuivre, eau acidulée, acide sulfurique $\frac{4}{5}$.....	35	
» fer-zinc.....	55	
» zinc-cuivre.....	92	au lieu de 35 + 55 = 90.

Les éléments sont laissés dans le même état pendant un quart d'heure. On trouve alors :

Élément fer-cuivre.....	25	
» fer-zinc.....	70	
» zinc-cuivre.....	94	au lieu de 25 + 70 = 95.
Élément Daniell.....	100,12	

La relation dont nous parlons ne peut donc pas garantir la valeur de chaque force électromotrice : elle ne fait que prouver la rigueur des mesures.

On sait que les éléments à deux liquides présentent une loi analogue.

Nous avons choisi les trois éléments suivants :

Cadmium-sulfate de cadmium; cuivre-sulfate de cuivre.....	138,37
Zinc amalgamé-sulfate de zinc; cadmium-sulfate de cadmium...	67,5
Zinc amalgamé-sulfate de zinc; cuivre-sulfate de cuivre.....	204,4

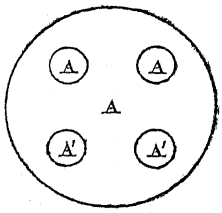
La somme calculée était 205,42.

Loi de Péclet relative aux liquides. — D'après Volta, les charges respectives de deux plaques de zinc et de cuivre, par exemple, sont les mêmes lorsque ces deux métaux sont en contact immédiat ou lorsqu'ils sont séparés par un ou plusieurs métaux. Péclet a indiqué pour les liquides une loi analogue. Mettons une lame de platine dans un vase poreux contenant de l'acide sulfurique étendu, une lame de zinc dans un second vase poreux renfermant le même mélange d'acide sulfurique et d'eau; plaçons les deux vases poreux dans un autre liquide; on observe que la nature du liquide extérieur est indifférente. Ainsi, ce liquide étant de l'acide sulfurique, la différence entre le zinc et le platine a été trouvée égale à 215 et l'on a eu 212 en remplaçant l'acide sulfurique par l'acide nitrique.

La loi de Péclet se vérifie dans des cas plus compliqués. Je citerai à ce sujet une expérience qui montre en même temps comment se distribuent les différences de potentiel lorsque plusieurs métaux et plusieurs liquides se trouvent en présence.

Dans un vase de verre (*fig.* 7) contenant de l'acide sulfurique étendu d'eau, on place quatre vases poreux dont deux renferment le même

Fig. 7.



mélange et les deux autres de l'acide nitrique étendu. Deux lames de zinc amalgamé se trouvent, l'une dans l'acide sulfurique, l'autre dans l'acide

nitrique; deux fils de platine sont également plongés l'un dans l'acide sulfurique, l'autre dans l'acide nitrique.

Différence entre le zinc et le platine plongés tous deux dans l'acide sulfurique A.....	$Z \mid A - P \mid A = 218,75$
Entre le zinc plongé dans l'acide azotique A' et le platine dans l'acide sulfurique A....	$Z \mid A' + A \mid A' - P \mid A = 208,25$
Entre le zinc dans A et le platine dans A'....	$Z \mid A - A \mid A' - P \mid A' = 269,5$
Entre le zinc et le platine, tous les deux dans A'.....	$Z \mid A' - P \mid A' = 257,5$
Entre le platine dans A et le platine dans A'...	$P \mid A - A \mid A' - P \mid A' = 50,6$

Le nombre 50,6 est susceptible de vérification. En effet, on obtient par soustraction :

$$P \mid A - A \mid A' - P \mid A' = 49,25 \quad \text{et} \quad P \mid A - AA' - P \mid A' = 50,75.$$

Éléments à un seul liquide. Influence de la nature du liquide. — La détermination des forces électromotrices par l'évaluation de la différence du potentiel est avantageuse dans le cas des éléments à un seul liquide, car la polarisation n'est plus à craindre puisque l'élément reste ouvert.

La facilité des mesures permet de plus de suivre les variations de la force électromotrice quand on modifie la nature de l'élément.

L'influence de la nature du liquide et celle de la nature des électrodes ont été examinées dans des cas particuliers.

La nature du liquide modifie la force électromotrice, qui peut d'ailleurs être considérable sans que le métal paraisse attaqué. C'est ainsi que la différence de potentiel pour l'élément zinc et cuivre est un peu plus forte avec l'eau distillée ou avec la glycérine qu'avec l'eau acidulée.

Dans le cas où le liquide est de l'acide sulfurique étendu, la concentration a peu d'influence sur la force électromotrice. Le tableau suivant résume des expériences faites à ce sujet. La proportion d'acide était comprise entre $\frac{1}{50}$ et $\frac{1}{5}$ du volume total. Les essais tentés pour concentrer davantage la solution n'ont pas conduit à des résultats constants.

Le nombre 100 représente la force électromotrice d'un élément Daniell.

	Acide $\frac{1}{60}$.	Acide $\frac{1}{33,3}$.	Acide $\frac{1}{25}$.	Acide $\frac{1}{10}$.	Acide $\frac{1}{5}$.
Zinc-platine.....	137,9	133,9	133,8	131	131,4
Zinc-argent.....	110,8	112,3	111,7	108,8	107
Argent-platine.....	27,5	26,4	23,3	25,5	24,8
Zinc-cuivre.....	91,1		87	87,2	
Aluminium-platine....	104,3	105,9	103,7	102,8	95,8
Fer-platine.....	91,1	89,1	88,3	83,3	79

Avec les solutions de potasse, le degré de concentration modifie plus profondément la force électromotrice.

On a étudié trois solutions contenant, avec 450 centimètres cubes d'eau distillée, la première 2 grammes de potasse, la seconde $11^{gr},77$ et la troisième 329 grammes.

Un élément zinc amalgamé-cuivre, eau acidulée $\frac{1}{25}$, a servi de terme de comparaison.

Zinc amalgamé cuivre et eau acidulée.	Solutions employées.	Zinc-cuivre.	Zinc-fer.	Fer-cuivre.
76,25	Première solution....	21,25	30	8,2
75,53	Deuxième solution...	78	77,75	négligeable
75	Troisième solution...	78,25	84,85	7,5
75,5	Troisième solution...	77	77	0,55

On voit que la troisième solution a donné des nombres variables. Davy avait trouvé que le fer est plus attaqué que le cuivre par la solution de potasse et Faraday a annoncé le contraire.

Les contradictions de ce genre ne sont pas rares dans les mesures de forces électromotrices publiées par divers expérimentateurs. J'ai rencontré souvent des résultats très-différents en opérant dans des conditions en apparence identiques. Ces irrégularités peuvent tenir, dans certains cas, à des modifications dans l'état de la surface des métaux. Ainsi, en laissant pendant plusieurs heures deux lames isolées l'une de l'autre, l'une de fer, l'autre de cuivre, dans un vase contenant du bisulfate de potasse, la lame de fer se recouvre d'une couche très-mince de cuivre, le circuit étant ouvert. On s'explique alors pourquoi les résultats sont plus constants, quand le mélange des sels qui se forment autour des deux métaux est rendu moins facile par l'interposition d'une cloison poreuse.

Influence de la nature des électrodes. — Des changements peu considérables dans la nature des électrodes peuvent quelquefois amener de grandes variations dans la force électromotrice. Ceci a lieu, en particulier, en substituant, dans un élément contenant de l'eau acidulée au $\frac{1}{15}$ par l'acide sulfurique, à du charbon de cornue ordinaire le même charbon purifié. Il avait été traité par le chlore au rouge, lavé et enfin chauffé de nouveau au rouge dans un creuset.

Charbon non purifié-cuivre.....	27,05
Charbon non purifié-fer.....	56,03
Fer-cuivre.....	28,7
Charbon purifié-cuivre.....	35,8
Charbon purifié-fer.....	66
Fer-cuivre.....	29,1

Toutefois ces modifications ne se présentent pas avec tous les liquides; la force électromotrice d'un Bunsen reste la même, que le charbon employé soit ou ne soit pas purifié.

Divers alliages de zinc et de cuivre ont été choisis et les forces électromotrices ont été mesurées pour des éléments formés en les associant successivement à du zinc et à du cuivre; l'eau acidulée renfermait $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique.

PREMIER ALLIAGE. — *Laiton.*

Laiton et cuivre.....	Force électromotrice inappréciable.
Laiton et zinc Cuivre et zinc }	Même force électromotrice.

DEUXIÈME ALLIAGE. — 50 *de zinc en poids et* 50 *de cuivre.*

Alliage et cuivre.....	5,1
Zinc et cuivre.....	98

TROISIÈME ALLIAGE. — 80 *de zinc,* 20 *de cuivre.*

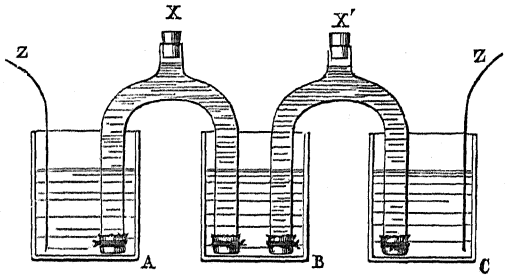
Alliage et cuivre.....	60,84
Zinc et cuivre.....	97,7

L'influence du zinc est insignifiante quand sa proportion n'atteint pas 50 pour 100. Si elle dépasse 70 pour 100, les nombres diffèrent avec les échantillons, et il n'a pas été possible de déterminer exactement la loi à laquelle est soumise la variation de la force électromotrice.

Forces électromotrices au contact de deux liquides. — On n'est arrivé jusqu'ici par aucune méthode à déterminer la force électromotrice développée au contact de deux liquides. Les mesures faites par M. Becquerel en séparant les deux liquides par un vase poreux et en plongeant une lame de platine dans chacun des liquides ne donnent que la somme algébrique de trois forces électromotrices.

Les nombreuses déterminations de du Bois-Reymond et de Worm-Muller, effectuées à l'aide d'un élément complexe constitué comme celui que représente la *fig.* 8, ne conduisent également qu'à la somme de

Fig. 8.



trois forces électromotrices. Cette somme elle-même ne me semble pas avoir été déterminée avec certitude.

En répétant avec l'électromètre plusieurs de leurs observations, j'ai obtenu des nombres qui diffèrent notablement de ceux qui sont inscrits dans leurs Mémoires.

D représente la force électromotrice de l'élément Daniell.

PARTIES EXTRÊMES DE L'ÉLÉMENT.	LIQUIDES INTERMÉDIAIRES.	RÉSULTAT.	
Zinc amalgamé-eau distillée (dans le vase A et dans le vase C).....	Acide sulf. concentré (dans le tube X et le vase B). Pot. conc. (dans le tube X')...	0,1 D.	0,48 D. D'après Worm-Muller.
Zinc amalgamé-eau distillée.....	Acide nitrique fumant.... Potasse concentrée.....	0,11 D.	0,31 D. D'après du Bois-Reymond.
Zinc amalgamé-sulfate de zinc.....	Acide nitrique pur..... Eau distillée.....	0,026 D.	0,167 D. D'après du Bois-Reymond.
Zinc amalgamé-sulfate de zinc.....	Acide sulfurique pur..... Eau distillée.....	0,022 D.	0,175 D. D'après du Bois-Reymond.
Zinc amalgamé-sulfate de zinc.....	Acide sulfurique pur..... Chlorhydrate d'ammon....	0,042 D.	0,22 à 0,21 D'après du Bois-Reymond.

Avant de quitter l'étude des différences de potentiel aux deux pôles d'un circuit ouvert, je ferai remarquer que l'électromètre permet d'évaluer les forces électromotrices des machines magnéto-électriques ou celles qui se développent aux extrémités d'une bobine induite, soit par l'ouverture, soit par la fermeture du circuit inducteur.

III. — *Phénomènes électrostatiques dans un circuit fermé.*

Expérience de Volta. — Nous allons nous occuper des phénomènes électrostatiques qui s'observent dans un circuit fermé. La première expérience faite sur ce sujet est due à Volta : « Il joignit les pôles de la pile (Biot, *Physique,* 1816) par un conducteur assez imparfait pour qu'il pût s'établir des différences de charges observables entre ses diverses parties. Par exemple, on atteint parfaitement ce but en se servant d'une longue bande de papier imbibée d'eau pure. Après que la communication a été ainsi établie pendant quelques instants entre les deux pôles, si l'on touche successivement différentes parties de la bandelette avec un électroscope à condensateur, afin d'éprouver son état électrique, on trouve que, lorsque la pile est isolée, chaque moitié est

chargée de l'espèce d'électricité qui est propre au pôle auquel elle adhère; l'une est vitrée, l'autre résineuse, et l'intensité de ces charges va en diminuant depuis chaque pôle jusqu'au milieu de la bandelette qui se trouve dans l'état neutre, du moins en supposant la conductibilité constante sur toute sa longueur; car si l'on rend l'écoulement de l'électricité plus facile sur l'une des deux moitiés que sur l'autre, comme on peut le faire en y versant quelques gouttes d'une dissolution saline plus conductrice que l'eau pure, les charges électriques de cette moitié deviennent plus fortes à égale distance et le point neutre se rapproche du pôle opposé. Lorsque la pile, au lieu d'être isolée, communique au sol par un de ses pôles, le point neutre passe à ce pôle même et tout le reste de la bandelette offre, avec une intensité de charge progressivement croissante, la seule espèce d'électricité qui appartient au pôle opposé. »

Haüy fait remarquer, dans sa *Physique*, que cet effet peut encore avoir lieu, proportion gardée, par rapport à des substances beaucoup plus susceptibles que le papier et l'eau de transmettre les deux fluides.

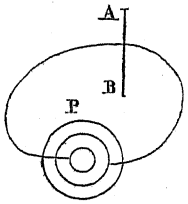
Ohm répéta les mêmes expériences avec des fils métalliques très-longs, mais c'est à Kohlrausch que l'on doit les premières mesures précises. Il employa, comme on sait, l'électromètre de Dellmann et un condensateur à lame d'air.

Variations du potentiel dans le circuit interpolaire. — Si nous considérons deux conducteurs isolés, chargés d'électricité statique et ayant un potentiel différent, un courant électrique s'établit dans le fil qui sert à les mettre en communication. C'est ainsi qu'un courant se produit quand on réunit le collecteur et le condensateur d'une bouteille de Leyde. On a été amené par analogie à regarder le courant dans le circuit d'une pile comme résultant de la différence de potentiel qui existe entre les deux pôles, et l'on assimile chacune des parties du circuit interpolaire à un conducteur chargé d'électricité statique et ayant un potentiel déterminé et différent de celui de la partie voisine. Cette différence se maintient constante quand le courant lui-même est constant.

Si l'on pouvait construire une balance de torsion assez sensible pour étudier à l'aide du plan d'épreuve la densité électrique aux différents points d'un disque métallique AB faisant partie d'un circuit (*fig.* 9), on

trouverait probablement une densité plus forte au bord qu'au centre. Au contraire, en réunissant à l'électromètre, par un long fil, soit le bord, soit le centre du disque, le résultat obtenu est toujours le même.

Fig. 9.



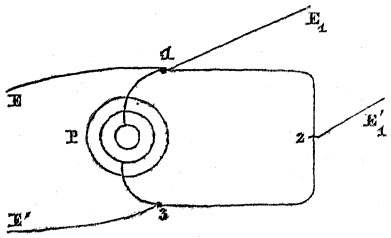
Étant donné un fil métallique homogène faisant partie du circuit d'une pile, si l'on met un des points, par exemple l'extrémité qui touche le pôle négatif, en communication avec le sol, les potentiels à partir de ce point croissent proportionnellement à la distance à l'extrémité.

Dans un conducteur liquide de petites dimensions transversales, les différences de potentiel entre deux tranches sont également proportionnelles à leur intervalle.

Plus généralement, dans un même circuit, la différence de potentiel entre deux points est proportionnelle à la résistance intermédiaire.

Vérification des lois de Ohm. — Avant de vérifier les lois de Ohm au moyen de l'électromètre, il est utile de montrer que l'emploi de cet instrument ne modifie en rien l'état électrique du circuit. Une pile P ayant été disposée (*fig.* 10), les deux pôles furent réunis par un fil

Fig. 10.



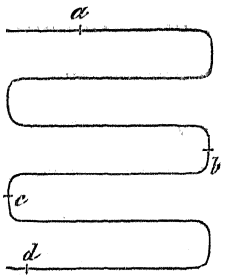
métallique ; les points 1 et 3 pouvaient communiquer avec les deux couples de secteurs d'un premier électromètre, les points 1 et 2 avec les deux couples de secteurs d'un second électromètre.

La déviation obtenue avec l'appareil EE′ était sensiblement la même quand on faisait fonctionner en même temps $E_1 E'_1$ ou quand on laissait les points 1 et 2 libres de toute communication étrangère. On avait 47,1 dans le premier cas et 47,4 dans le second. En observant la déviation de la plaque de l'un des électromètres, celui qui communiquait avec 1 et 2, on trouvait le même nombre pour la position d'équilibre, quand cette plaque oscillait seule ou quand elle marchait en même temps que celle de l'autre instrument.

Ces expériences ont été répétées en augmentant la sensibilité des deux électromètres, et les très-petites différences de sens variables qu'on a remarquées devaient être attribuées aux erreurs d'observations.

Ceci établi, un fil de cuivre traversé par un courant ayant été tendu sur un cadre (*fig.* 11), on a mis un point *a* de ce fil en communication

Fig. 11.



avec l'un des systèmes de secteurs de l'électromètre. Les points *b*, *c*, *d* furent successivement reliés à l'autre système de secteurs.

Différence observée de *a* à *d*,	$a \mid d$ ...	261,68,	longueur	$ad = 369,7$
» de *a* à *c*,	$a \mid c$....	154,20,	»	$ac = 132,7$
» de *a* à *b*,	$a \mid b$....	94	»	$ab = 218,9$
» de *a* à *d*,	$a \mid d$....	259,45,		

$$\frac{a \mid d}{a \mid c} = \frac{260,94}{154,20} = 1,694, \quad \text{Rapport des longueurs } \frac{ad}{ac} = 1,689,$$

$$\frac{a \mid d}{a \mid b} = \frac{260,19}{94} = 2,768, \quad \text{Rapport des longueurs } \frac{ad}{ab} = 2,786.$$

Si un corps conducteur isolé est mis en communication avec le

point a, il prend le même état électrique que le point a, et le résultat obtenu pour la différence $a|d$ ne change pas quand on met en communication avec l'un des systèmes de secteurs de l'électromètre, soit le point a lui-même, soit une partie quelconque du conducteur adjoint.

On a pris ensuite trois fils de laiton de même longueur (320 centimètres), et on les a placés dans le circuit, le premier seul et suivi des deux autres fixés l'un à côté de l'autre, le second conducteur offrant par conséquent une section double de celle du premier.

Différence observée aux deux extrémités	du premier fil.....	80,9
	du second conducteur.	40,61

Enfin un fil de cuivre et un fil de fer ont été intercalés dans un même circuit.

Nombres trouvés aux deux extrémités	du fil de cuivre...	113,65
	du fil de fer.....	255,73

Le rapport $\frac{255,73}{113,65}$ est 2,24; or le rapport des résistances déterminé par la méthode du pont de Wheatstone a été trouvé égal à 2,22.

Mesure des résistances. — La détermination des différences de potentiel permet donc d'étudier le rapport des résistances de deux fils et des diverses parties d'un même fil. Il est également facile d'obtenir le rapport de résistances considérables ou de résistances faibles. Pour avoir une sensibilité suffisante dans le cas de faibles résistances, on augmentera les dimensions et la conductibilité de la pile produisant le courant. Nous en verrons plus loin la raison.

S'il s'agit de solutions métalliques, comme le sulfate de zinc ou le sulfate de cuivre, on les verse dans des auges prismatiques, et l'on prend, pour amener le courant, des plaques de même métal que celui du sel.

Deux auges de même longueur (38c,5) et de même largeur (4 centimètres) se suivaient dans le même circuit; l'une des auges renfermait 500 centimètres cubes d'une solution saturée de sulfate de cuivre, et l'autre 1000 centimètres cubes de la même solution.

On a trouvé aux deux extrémités	de la première auge...	90,94
	de la seconde.....	45,38

Les électrodes étaient des plaques de cuivre de même section que les auges. Des bobines, placées en même temps dans le circuit, permettaient d'obtenir dans chaque cas la résistance de la colonne de sulfate de cuivre en mètres du fil pris pour terme de comparaison.

Si l'on plonge dans une même auge contenant une dissolution de sulfate de cuivre des plaques du même métal, les différences obtenues entre deux plaques sont proportionnelles à la distance qui les sépare, et il est indifférent que les plaques plongent peu ou beaucoup. Les plaques peuvent également être remplacées par des fils.

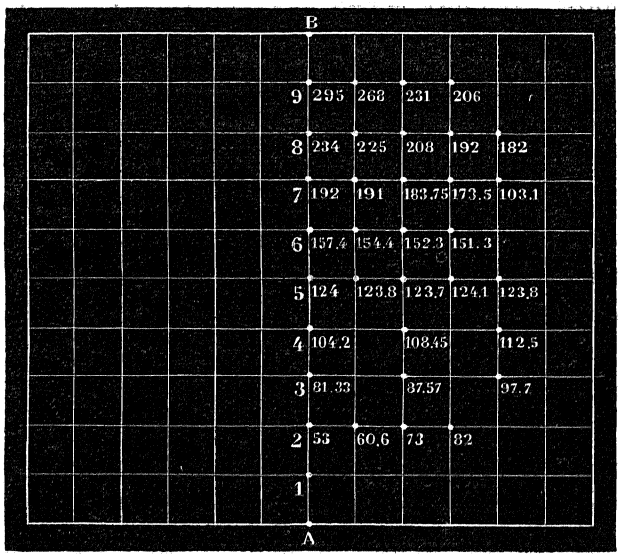
En donnant aux auges les dimensions que nous avons indiquées, la résistance d'une solution métallique même étendue s'obtient sans qu'on ait à s'occuper de la polarisation, celle-ci pouvant être rendue négligeable par rapport à la résistance propre du liquide. C'est ainsi qu'avec une solution étendue de sulfate de cuivre (28 grammes de sulfate pur et sec dans 2 litres d'eau), le rapport des différences de potentiel était égal au rapport des longueurs, quand le courant employé était faible, et les deux rapports devenaient notablement différents, quand on augmentait le nombre des éléments qui produisaient le courant. Les solutions étendues de sulfate de zinc se comportent d'une façon analogue quand on fait varier l'intensité du courant qui les traverse. Avec un fort courant, l'influence de la polarisation apparaît, même quand les électrodes sont des plaques de zinc amalgamé.

Dans la recherche des résistances relatives aux liquides peu conducteurs il faut prendre pour électrodes des plaques ayant la largeur de l'auge et non des fils. En effet, si le courant est amené par des fils, les lignes d'égal potentiel, au lieu d'être des droites perpendiculaires à la grande dimension de l'auge, deviennent des courbes qui s'infléchissent de plus en plus vers les pôles.

Une auge en verre de forme carrée (*fig.* 12), ayant 40 centimètres de côté, renfermait de l'eau distillée jusqu'à une hauteur de 1 centimètre environ; le courant, de trois éléments Daniell, traversait le liquide. Les électrodes étaient deux fils de cuivre A et B; deux autres fils plongeaient dans le liquide et communiquaient avec les deux systèmes de secteurs de l'électromètre; l'un de ces fils occupait une position voisine de A, marquée 1 sur la figure; l'autre pouvait se déplacer, et sa position se repérait au moyen d'un papier quadrillé collé sur le fond de l'auge. Les

nombres inscrits sur la figure représentent les différences de potentiel entre le fil voisin de A et le fil mobile. On peut tracer ainsi les lignes

Fig. 12.



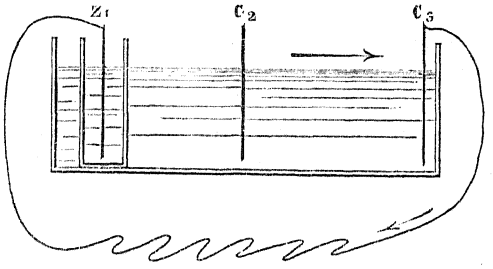
d'égal potentiel. La ligne du milieu est une ligne droite. La chute entre deux points distants de 1 centimètre, par exemple, et situés sur une parallèle à AB est d'autant plus forte que l'on se rapproche davantage de l'une des électrodes.

Distribution dans le circuit des différences de potentiel. — Kohlrausch a montré que, dans le circuit complexe formé par l'élément et les fils métalliques qui relient les deux pôles, les différences de potentiel mesurées entre deux points sont proportionnelles à la résistance intermédiaire, et que, de plus, la somme des différences est égale à la différence obtenue aux deux pôles de l'élément ouvert.

Pour répéter l'expérience sous cette forme, j'ai pris une auge prismatique (*fig.* 13), contenant une solution saturée de sulfate de cuivre et un vase poreux où une lame de zinc plongeait dans du sulfate de zinc. L'élément ainsi constitué avait son circuit fermé par un fil de cuivre fin tendu sur un cadre.

La résistance de la colonne de sulfate de cuivre a été comparée à celle du fil métallique, en employant un élément constant auxiliaire et une

Fig. 13.



boussole des tangentes. Enfin la résistance de l'élément de pile entier a été comparée à celle du fil métallique.

1° *Mesures avec la boussole.*

Résistance intérieure 1 à 3..... 10,62 fois la résistance du fil.
Résistance intérieure 2 à 3..... 4,70 fois la résistance du fil.

Par suite, la résistance 1 à 2 = 10,62 — 4,70 = 5,92 fois celle du fil.

2° *Mesures avec l'électromètre.*

1 | 2.....	111,82	$\frac{1\|2}{3\|1} = \frac{111,82}{19,43} = 5,76$, au lieu de 5,92,
2 | 3.....	92,57	$\frac{2\|3}{3\|1} = \frac{92,57}{19,43} = 4,76$, au lieu de 4,70.
3 | 1.....	19,43	

Différence aux deux pôles de l'élément ouvert 156,47, nombre très-voisin de la somme

$$111,82 + 92,57 + 19,43 = 156,65.$$

Pour que l'expérience réussisse, il faut avoir soin de prendre un vase poreux qui est resté longtemps imbibé d'eau et de monter l'élément plusieurs heures avant de commencer les mesures. Sans ces précautions, comme la résistance du vase poreux ne devient pas de suite ce qu'elle doit être quand il s'est laissé pénétrer par les liquides, le résultat obtenu dans la mesure avec la boussole diffère de celui que fournit l'électromètre. Voici, à ce sujet, des nombres provenant d'essais faits avec l'élé-

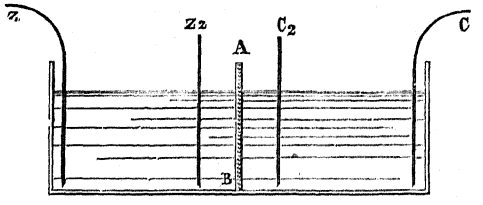
ment précédent quelque temps avant les déterminations définitives. Ils font voir comment, la résistance relative des différentes parties du circuit venant à varier, la distribution des différences de potentiel change dans le même sens. L'élément est resté monté de 11 heures du matin à 9 heures du soir.

11 heures du matin.		3 heures du soir.		9 heures du soir.	
Circuit fermé.	1|2... 100,95	Circuit fermé.	1|2... 114,05	Circuit fermé.	1|2... 113,15
	2|3... 93,7		2|3... 103,18		2|3... 102,03
	3|1... 8,45		3|1... 9,15		3|1... 11,00
Circuit ouvert.	1|3... 138,5	Circuit ouvert.	1|3... 139,7	Circuit ouvert.	1|3... 138,1
	138,5—100,95= 37,55		139,7—114,05= 25,65		138,1—113,15= 25,95
	37,55+8,45+ 93,7 =139,65		25,65+103,18+9,15 =137,98		25,95+102,03+11=138,98

D'après ce tableau, la résistance complexe 1 | 2 formée par le vase poreux, le sulfate de zinc et une certaine partie du sulfate de cuivre, a varié de 37,55 à 25,65, pour rester ensuite à peu près constante.

Résistance de la cloison poreuse. — Afin d'avoir une idée de la résistance que peut offrir une cloison poreuse seule, nous prenons une auge prismatique en verre, divisée en deux compartiments par la cloison AB (*fig.* 14). L'un des compartiments contient du sulfate de zinc

Fig. 14.



et une lame de zinc amalgamé Z ; l'autre contient du sulfate de cuivre et une lame de cuivre C. En Z_2 plonge une seconde lame de zinc amalgamé et en C_2 une seconde plaque de cuivre.

Les deux pôles Z et C sont réunis par un gros fil.

Appelons

α la résistance de la colonne ZZ_2 de sulfate de zinc;
β la résistance de la colonne CC_2 de sulfate de cuivre ;
γ la résistance de la portion intermédiaire Z_2C_2.

Ces trois quantités se déduisent des déterminations suivantes :

$D = Z \mid C$ (circuit ouvert).....	104,25
$D = Z_2 \mid C_2$ (circuit ouvert).....	104
$\alpha = Z \mid Z_2$ (circuit fermé).....	29,25
$\beta = C \mid C_2$ (circuit fermé).....	35
$Z_2 \mid C_2$ (circuit fermé).....	64,75

Ce dernier nombre offre une vérification. En effet, comme $\alpha + \beta + \gamma = D$ et que $Z_2 \mid C_2$ doit être égal à $D - \gamma$, on aura

$$Z_2 \mid C_2 = \alpha + \beta.$$

Or

$$29,25 + 35 = 64,25,$$

résultat voisin de 64,75.

Calculons maintenant la résistance du sulfate de zinc compris entre Z_2 et AB, puis celle du sulfate de cuivre compris entre C_2 et AB; en retranchant de γ la somme de ces deux nombres, on aura la résistance de la cloison poreuse.

Comme ZZ_2 a une longueur de 24 centimètres,

$$\frac{29,25}{24} = 1,22$$

exprime la résistance d'une colonne de 1 centimètre de sulfate de zinc, et la distance de Z_2 à AB est de 5 centimètres :

$$1,22 \times 5 = 6,10.$$

De même CC_2 a une longueur de $26^c,7$, et, de C_2 à AB, on a $2^c,7$:

$$\frac{35}{26,7} \times 2,7 = 3,54.$$

6,10 + 3,54 représentent la résistance du sulfate de zinc et du sulfate de cuivre réunis.

$$\gamma = 104 - 64,50 = 38,5,$$

$$38,5 - (6,10 + 3,54) = 28,86 :$$

c'est la résistance de la cloison exprimée au moyen des mêmes unités que les résistances du sulfate de zinc et du sulfate de cuivre.

Résistance d'une pile. — D'après ce que nous avons vu, pour mesurer

la résistance d'une pile de trois éléments, par exemple, on cherchera la différence de potentiel aux deux pôles, le circuit étant ouvert; soit 300 le nombre obtenu. La même détermination aux deux pôles est répétée; quand le circuit est fermé, on a 247.

$$300 - 247 = 53$$

exprime la résistance des trois éléments. Pour l'évaluer en longueur de fil normal, il suffit de mesurer la différence aux deux extrémités d'une bobine connue, intercalée précédemment dans le circuit, et de comparer à 53 le nombre trouvé.

Mesure de la force électromotrice de polarisation. — Dans les expériences qui précèdent, la polarisation n'avait qu'une influence insensible. Lorsque la polarisation a un effet comparable à celui de la résistance du liquide, il y a lieu de déterminer simultanément la force électromotrice de polarisation et la résistance du liquide.

Dans une auge prismatique contenant 500 centimètres cubes d'eau acidulée, on faisait passer le courant de huit éléments Daniell. Quatre plaques de cuivre, dont deux servaient d'électrodes, partageaient la colonne en trois parties dont l'étude était faite séparément. Le circuit était complété au sortir de l'auge par des bobines comparées à l'unité de Pouillet (une colonne de mercure de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre de section), ce qui permettait d'évaluer, au moyen de cette unité, la résistance du liquide.

La force électromotrice de polarisation décroît en même temps que l'intensité du courant elle-même diminue. Je décrirai deux expériences.

1° *Cas d'un courant énergique.* — L'auge et une bobine de 100 mètres forment le circuit. Une boussole de résistance négligeable donne la valeur de l'intensité; elle est, dans ce cas, représentée par le nombre 169.

	Différences observées.		Longueurs des colonnes.
$C_1 \mid C_4$	418,48	C_1 à C_4	38°,3
$C_1 \mid C_2$	120,384	C_1 à C_2	11,6
$C_3 \mid C_4$	162,8	C_3 à C_4	9,9
Bobine.....	235,6		
$C_2 \mid C_3$	134,6	C_2 à C_3	16,6

Aux deux pôles d'un Daniell isolé

$$D = 138,67.$$

La régularité des mesures est prouvée par une vérification :

$$C_1 | C_4 = C_1 | C_2 + C_2 | C_3 + C_3 | C_4 = 417,78,$$

au lieu de 418,48 observé.

Les nombres précédents permettent d'évaluer la force électromotrice de polarisation de chacune des plaques de cuivre et de l'exprimer en fonction de la force électromotrice de l'élément Daniell. On aura, en même temps, la résistance du liquide contenu dans l'auge.

La résistance d'une colonne d'eau acidulée de 1 centimètre de longueur est

$$\frac{134,6}{16,6} = 8,11 ;$$

la résistance de la colonne $C_1 C_2$,

$$r = 8,11 \times 11,6 = 94,076;$$

la résistance de la colonne $C_3 C_4$,

$$r' = 8,11 \times 9,9 = 80,3;$$

la résistance de la colonne entière $C_1 C_4$,

$$R = 8,11 \times 38,3 = 310,6.$$

La colonne entière offre la résistance de 132 unités Pouillet. En effet,

$$\frac{310,6}{235,6} = 1,32.$$

Nous déduisons des nombres précédents

$$C_1 | C_2 - r = 120,38 - 94,08 = 26,3;$$

26,3 est la force électromotrice de la plaque C_1 (plaque attaquée par l'acide), ou encore 18,9 si $D = 100$:

$$C_3 | C_4 - r' = 162,8 - 30,3 = 82,5;$$

82,5 est la force électromotrice de la plaque C_4 (plaque qui se recouvre d'hydrogène), ou 59,5 si $D = 100$.

La force électromotrice totale de polarisation a pour valeur

$$18,9 + 59,5 = 78,4.$$

2° *Cas d'un courant faible.* — L'auge et 20000 mètres forment le circuit. L'intensité du courant est 3,96. Les bulles de gaz sur la plaque de cuivre négative sont encore visibles :

	Différences observées.		Longueurs des colonnes.
$C_1 \mid C_4$	73,95	de C_1 à C_4	38,3
$C_2 \mid C_3$	5,20	de C_2 à C_3	31,9
$C_1 \mid C_2$	4,90	de C_1 à C_2	3,2
$C_3 \mid C_4$	64,60	de C_3 à C_4	3,0
1000 mètres	49,50		
Daniell ouvert D.	124,88		

Vérification.

$C_1 \mid C_2 + C_2 \mid C_3 + C_3 \mid C_4 = 74,7$, au lieu de 73,95 observé.

La résistance d'une colonne d'eau acidulée de 1 centimètre de longueur est

$$\frac{5,2}{31,9} = 0,163;$$

la résistance de la colonne $C_1 C_2$,

$$r = 3,2 \times 0,163 = 0,522;$$

celle de la colonne $C_3 C_4$,

$$r' = 3 \times 0,163 = 0,489;$$

celle de la colonne entière,

$$R = 38,3 \times 0,163 = 6,24.$$

La résistance de la colonne entière vaut celle de 128 unités Pouillet. En effet,

$$\frac{6,24}{4,95} = 1,28.$$

Dans ce cas particulier, la résistance du liquide est évaluée d'une ma-

nière peu certaine, car une petite erreur dans la mesure de $C_2 | C_3$ amène une grande différence dans le résultat.

La force électromotrice de C_1 est

$$C_1 | C_2 - r = 4,9 - 0,522 = 4,380 \quad \text{ou} \quad 3,5 \text{ si } D = 100.$$

La force électromotrice de C_4 est

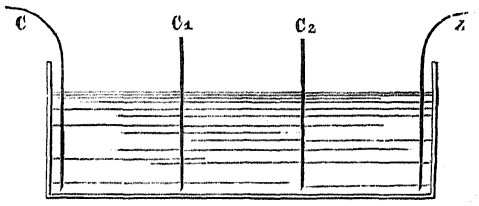
$$C_3 | C_4 - r' = 64,6 - 0,489 = 64,111 \quad \text{ou} \quad 51 \text{ si } D = 100.$$

La diminution est donc beaucoup plus forte pour la plaque positive que pour la plaque négative.

Mesure de la polarisation dans l'élément voltaïque. — Les mesures précédentes sont relatives à la détermination de la force électromotrice de polarisation pour un voltamètre intercalé dans le circuit; il est également intéressant d'évaluer la polarisation qui se produit dans l'élément lui-même.

Dans ce but, nous avons employé un élément de Volta à un seul liquide. Une auge prismatique (*fig.* 15), ayant environ 40 centimètres

Fig. 15.



de longueur et 4 de largeur, contenait de l'eau acidulée avec $\frac{1}{60}$ d'acide sulfurique : on y versait 750 centimètres cubes du mélange. Aux extrémités de l'auge se trouvaient des plaques polaires de la même largeur que l'auge, l'une en zinc amalgamé et l'autre en cuivre.

Supposons dans l'auge une lame de cuivre C_1 placée entre le cuivre C et le zinc amalgamé Z; en corrigeant les différences de potentiel observées de l'effet dû à la résistance du liquide interposé, la différence entre C et C_1 représentera la polarisation de la plaque de cuivre (l'expérience électrométrique montre que C, pendant le passage du courant, se comporte comme un métal oxydable par rapport à C_1); la différence

entre Z et C_1, également corrigée, donne la force électromotrice de l'élément pendant le passage du courant.

Pour la commodité des mesures, nous prendrons deux plaques de cuivre intermédiaires C_1 et C_2.

Voici les détails d'une expérience où la résistance extérieure était négligeable, le circuit interpolaire étant formé par un fil gros et court :

	Différences observées.	Distances.
$Z \mid C_2$	60,25	10°,3
$C \mid C_2$	60,38	27,2
$C \mid C_1$	50,50	9,3
$Z \mid C_1$	50,75	28,2

$$\left.\begin{array}{l} C \mid C_2 - C \mid C_1 = 9,88 \\ Z \mid C_2 - Z \mid C_1 = 9,50 \end{array}\right\} \text{moyenne pour } C_1 \mid C_2 \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9,69.$$

La résistance de 1 centimètre de liquide est

$$\frac{9,69}{17,9} = 0,54.$$

$$r = 0,54 \times 9.3 = 5,02,$$
$$r' = 0,54 \times 10,3 = 5,56.$$

La force électromotrice de polarisation du cuivre est

$$C \mid C_1 - r = 50,5 - 5,02 = 45,48.$$

La force électromotrice de l'élément ouvert a été mesurée et trouvée égale à $69,2 = E$.

La force électromotrice, quand le circuit est fermé, est égale à la somme des différences

$$9,69 + 5,02 + 5,56 = 20,27 = A.$$

Intensités.	E.	A.
1000,0	1	0,290
203,0	1	0,407
36,5	1	0,640
17,0	1	0,970

Ce tableau montre comment la polarisation diminue quand l'intensité du courant décroît.

Ici, comme pour les déterminations relatives à la polarisation dans un voltamètre, les mesures présentent des difficultés dans le cas des faibles intensités. Alors, en effet, quand on ferme le circuit, la polarisation est inférieure à la polarisation limite, qui n'est à peu près atteinte qu'après un temps très-long. D'un autre côté, si l'on observe une faible intensité en passant d'abord par une intensité beaucoup plus forte, la polarisation est beaucoup plus grande que la polarisation limite. Il a été alors nécessaire de déterminer deux nombres, l'un supérieur, l'autre inférieur à la polarisation limite, et de prendre la moyenne.

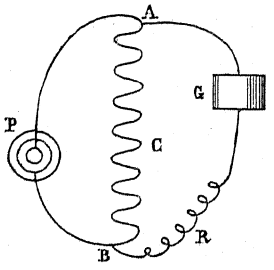
IV. — *Relations entre les mesures électrométriques et les indications du galvanomètre.*

Nous examinerons le cas où le galvanomètre forme une dérivation entre deux points A et B du circuit et celui où il est placé dans le circuit lui-même entre A et B.

Premier cas. — *Le galvanomètre forme une dérivation.* — L'intensité donnée par le galvanomètre est proportionnelle à la différence de potentiel observée entre les deux points de jonction.

Pour constater cette proportionnalité, un fil de fer (*fig.* 16) a été tendu entre les deux pôles d'une pile P. Une boussole à miroir G était

Fig. 16.



reliée d'abord aux deux points A et B, et ceux-ci mis en communication avec l'électromètre, puis aux deux points A et C. En intercalant

des bobines, on a fait varier la résistance R du circuit dérivé comprenant la boussole :

Résistance R.		Électromètre.	Boussole (déviations).
1000 mètres..	A|C.....	82,83	17,20 (un seul tour de fil)
	A|B.....	213,30	44,50
		$\frac{213,3}{82,83} = 2,577$,	$\frac{44,5}{17,2} = 2,58$,
500 mètres...	A|C.....	72,68	30,35 (un seul tour de fil)
	A|B.....	202,43	84,50
		$\frac{202,43}{72,68} = 2,785$,	$\frac{84,5}{30,35} = 3,786$,
15000 mètres.	A|C.....	90,75	12,75 (dix tours de fil)
	A|B.....	216,65	30,20
		$\frac{216,65}{90,75} = 2,38$,	$\frac{30,2}{12,75} = 2,37$.

Il est naturel que la chute entre deux points soit modifiée quand on fait varier la longueur du circuit dérivé qui comprend la boussole, puisqu'il se produit alors un changement dans la longueur réduite de la partie du circuit comprise entre les deux points.

Quand la résistance du circuit examiné est faible, le galvanomètre peut remplacer l'électromètre et donner des indications sensiblement proportionnelles à la chute entre les différents points, mais il faut avoir soin de lui adjoindre une bobine de fil très-fin et très-long : on rend ainsi négligeable la diminution de résistance de la partie du circuit comprise entre les deux points de jonction. L'électromètre seul convient s'il s'agit de faire l'étude de conducteurs très-résistants et, en particulier, de colonnes liquides.

Deuxième cas. — *Le galvanomètre fait partie du circuit principal.* — Soient

A et B deux points d'un conducteur;
a le potentiel de A;
b le potentiel de B;

la différence $a - b$ est proportionnelle à l'intensité du courant évaluée

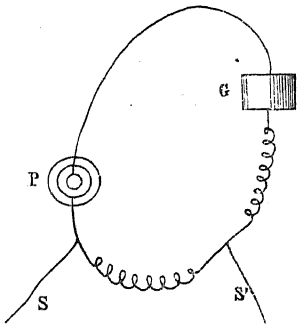
par un galvanomètre placé dans le circuit. Ceci s'exprime par la formule connue

$$i = C\frac{a-b}{r};$$

C est une constante et r représente la résistance de la partie AB.

Les observations ont été conduites de la manière suivante : entre les deux pôles de la pile P (*fig.* 17), étaient intercalées des résistances mé-

Fig. 17.



talliques ou liquides et en particulier des bobines sur lesquelles avaient été enroulées des longueurs connues de fil. La boussole des tangentes de Pouillet donnait les intensités pour les courants forts et une boussole à miroir pour les courants faibles. On mesurait avec l'électromètre les différences de potentiel correspondant aux extrémités de l'une des bobines. On choisissait dans chaque expérience pour la mettre en rapport avec l'électromètre celle des bobines du circuit pour laquelle la différence de potentiel aux deux extrémités avait une valeur telle, que la déviation de la plaque mobile fût comprise entre des limites convenables. Les résultats qui suivent sont rapportés à 100 unités de Pouillet.

La différence entre les deux pôles d'un élément Daniell ouvert est représentée par 100.

ÉLECTROMÈTRE.		BOUSSOLE.			
DÉVIATIONS.	RAPPORT d'une déviation à la suivante.	BOUSSOLE de Pouillet.	BOUSSOLE A MIROIR. 1 tour de fil.	BOUSSOLE A MIROIR. 10 tours.	RAPPORT d'une tangente à la suivante.
146,0		43° 42′ (tang = 0,956).			
	2,18				2,18
67,6		23° 15′ (tang = 0,429).			
	1,680				1,677
40,34		14° 18′ (tang = 0,255).			
	1,44				1,50
28,00		9° 39′ (tang = 0,17).	63,67		
	2,99				3,00
9,37			21,22		
	2,366				2,358
3,96			9,00	86,4	
	2,414				2,383
1,64				36,25	

Le courant étant produit par 8 éléments Daniell, le nombre fourni par l'électromètre fait connaître dans chaque cas la résistance totale du circuit. Soient, en effet, A, B, C trois points du circuit; on a vu que la somme des différences de potentiel entre A et B, entre B et C et entre C et A est égale à la différence totale observée aux deux pôles de la pile dans le cas où le circuit est ouvert. De plus le potentiel se distribue proportionnellement à la résistance. Ici la différence 800 se partage de façon à donner 146 pour 100 unités de Pouillet dans la première mesure, 67,6 dans la seconde, 40,34 dans la troisième, etc.; les résistances totales exprimées en centaines d'unités seront donc

$$\frac{800}{146}, \quad \frac{800}{67,6}, \quad \frac{800}{40,34}, \ldots$$

Une mesure comparative, faite dans les conditions précédentes avec un électromètre et une boussole des tangentes, permet d'obtenir le coefficient par lequel il suffit de multiplier les indications de la boussole

pour obtenir avec la boussole seule la différence de potentiel correspondant aux extrémités de 100 unités et en même temps la valeur exacte de la résistance totale du circuit.

Ainsi, dans les expériences précédentes, 146 ayant été donné par l'électromètre et 0,956 par la boussole, on multipliera les tangentes ournies par la boussole par le rapport $\frac{146}{0,956}$ et l'on aura les différences de potentiel successives aux extrémités de 100 mètres. La résistance totale sera le quotient de 800 par la différence obtenue et elle sera exprimée en centaines d'unités.

Détermination de l'intensité des courants au moyen de l'électromètre. — Si dans la formule

$$i = C\frac{a-b}{r}$$

nous faisons $C = 1$, nous pourrons dire que le courant ayant l'unité d'intensité est celui pour lequel la différence de potentiel aux deux extrémités de l'unité de résistance est égale à l'unité de potentiel électrique. L'unité de potentiel électrique est le potentiel d'une sphère chargée de l'unité d'électricité et dont le rayon est égal à l'unité de longueur.

Si l'on a exprimé en unités de potentiel la différence aux deux pôles d'un élément Daniell, on peut aussi prendre pour unité d'intensité l'intensité du courant produisant, aux deux extrémités de 1 kilomètre de fil télégraphique ou de 100 unités, une différence égale au centième de celle qui existe entre les deux pôles d'un Daniell. Le courant ayant l'unité d'intensité sera celui que produit un élément Daniell dans un circuit total présentant la même résistance que 100 kilomètres de fil télégraphique. D'après cela, dans les expériences citées plus haut, les intensités sont 146, 67,6, 40,34,....

On comprend alors l'usage de l'électromètre pour la détermination de l'intensité; les résultats obtenus à des époques différentes sont comparables, si l'on a soin de mesurer en même temps la différence de potentiel, aux deux pôles d'un Daniell. Il est bien entendu que l'élément Daniell doit toujours être construit de la même façon et formé de deux

vases séparés pour éviter le filtrage du sulfate de cuivre à travers le vase poreux.

Une mesure comparative, faite avec l'électromètre et une boussole, déterminera le coefficient par lequel les indications de cette dernière doivent être multipliées pour représenter les intensités avec l'unité adoptée.