Sur les mesures récentes du courant vertical de conductibilité entre l'atmosphère et le sol

A.-B. Chauveau

► To cite this version:

A.-B. Chauveau. Sur les mesures récentes du courant vertical de conductibilité entre l'atmosphère et le sol. Radium (Paris), 1911, 8 (5), pp.187-196. 10.1051/radium:0191100805018700 . jpa-00242471

HAL Id: jpa-00242471

<https://hal.science/jpa-00242471>

Submitted on 1 Jan 1911

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sur les mesures récentes du courant vertical de conductibilité entre l'atmosphère et le sol

Par A.-B. CHAUVÉAU

I. — Il existe, au-dessus de la surface de la Terre, un champ électrique dont les lignes de force, par temps normal, clair ou couvert, et en dehors des accidents météorologiques, sont dirigées vers cette surface. C'est là un fait d'expérience que l'on peut exprimer encore en disant que la surface de la Terre, assimilée à celle d'un conducteur, porte une charge négative.

La grandeur de cette charge se déduit immédiatement de la connaissance du champ au voisinage de la surface. En prenant comme valeur moyenne de la variation du potentiel suivant la verticale le nombre (plutôt un peu faible) de 100 volts par mètre, soit 1/500 d'unité électrostatique par cm., on a, pour la densité superficielle donnée par l'expression $\frac{dV}{dh} = -4\pi\mu$, $\mu = -2,7 \cdot 10^{-4}$, qui représente, en unités électrostatiques, la charge portée par une surface de 1 cm².

Si l'on pouvait étendre ce résultat à la surface entière du globe, on trouverait pour la charge terrestre totale un nombre voisin de 460.000 coulombs. C'est moins de cinq fois la charge portée par 1 gr. d'hydrogène dans l'électrolyse.

Quelle que soit la valeur de cette extension un peu hasardeuse de résultats locaux, il est peut être intéressant de rappeler, à son sujet, une hypothèse faite, il y a quelques années, par M. Rey, comme conséquence de mesures du champ dans l'Antarctique, au cours de la première expédition Charcot. D'après ces mesures, confirmées depuis par la belle et longue série d'observations exécutées dans les mêmes régions par M. Rouch¹ pendant la dernière expédition, le maximum et le minimum annuels du champ qui, dans notre hémisphère, ont lieu respectivement pendant l'hiver et pendant l'été, se produiraient en même temps dans l'hémisphère sud, où ils correspondraient par suite à l'été et à l'hiver.

En d'autres termes, les variations annuelles du champ, que l'on pouvait croire en rapport avec les conditions météorologiques, seraient liées à la position de la Terre sur l'écliptique. Le champ, et par suite la charge terrestre, varieraient suivant la position de la Terre par rapport au Soleil. Il ne s'agit là encore que d'une hypothèse, mais elle est séduisante.

La charge de la terre se dissipe sans cesse dans

1. La variation est dans le rapport de 1 à 2 ou 3 environ

l'atmosphère conductrice et sans cesse est renouvelée. Les mesures les plus récentes ont montré qu'en moins d'une demi-heure la surface du sol perd une quantité d'électricité égale à sa charge aussitôt reproduite. Un double problème se trouve ainsi posé : Quel est le mécanisme de cette dissipation constante de l'électricité du sol ? Quelles sont les causes de cette régénération constante de l'électricité disparue ? La solution du second est encore fort incertaine ; celle du premier paraît, au contraire, à peu près acquise, et le but de cet article est d'indiquer, dans son ensemble et d'après les données les plus récentes, l'état actuel de la question.

II. — L'air est conducteur par les centres électrisés des deux signes qu'il renferme sous forme d'ions de diverses espèces. Dans le champ terrestre, ces ions se déplacent constamment, les positifs allant vers la surface du sol dont ils neutralisent partiellement la charge, les négatifs cheminant en sens contraire. L'ensemble de cette double circulation constitue ce que l'on appelle le *courant vertical de conductibilité entre l'atmosphère et le sol*.

En un point quelconque du champ, l'intensité de ce courant peut être exprimée par la somme des intensités composantes, i_p et i_n , représentant respectivement les quantités d'électricité positive et négative qui traversent, en sens contraire, l'unité de surface dans l'unité de temps. Chacune d'elles est proportionnelle à la valeur du champ, ainsi qu'à la mobilité des ions du même signe et à leur nombre par unité de volume au point considéré. En désignant par e la charge élémentaire d'électricité, et en employant les notations habituelles, on aura en unités absolues :

$$i_p = ek_p n_p \frac{dV}{dh}, \quad i_n = ek_n n_n \frac{dV}{dh},$$

et par suite :

$$i = e(k_p n_p + k_n n_n) \frac{dV}{dh}.$$

Les quantités

$$\lambda_p = ek_p n_p, \quad \lambda_n = ek_n n_n, \quad \lambda = e(k_p n_p + k_n n_n)$$

sont les conductibilités positive, négative et totale au point considéré, et l'on a : $i = \lambda \frac{dV}{dh}$.

Si le point est à la surface même du sol conducteur,

cette surface étant négative, les ions positifs interviennent seuls, et l'on a $i = i_p$. L'intensité du courant vertical est alors mesurée évidemment par la perte de charge de l'unité de surface du sol dans l'unité de temps.

Rappelons, avant d'aller plus loin, que les ions ordinaires, les petits ions, analogues aux ions produits par les rayons de Röntgen ou de Becquerel et dont la mobilité est de l'ordre de grandeur du centimètre, ont de beaucoup la plus grande part dans la conductibilité de l'atmosphère. Les gros ions signalés par Langevin sont, d'après ce physicien, 50 fois plus nombreux, mais leur mobilité est environ 2000 fois plus faible. Le produit $k.n$ de la mobilité par le nombre spécifique est donc à peu près 40 fois plus petit pour les gros ions que pour les ions ordinaires. Il est presque négligeable dans l'état actuel de la précision des mesures.

Il résulte de ce que nous avons dit précédemment que l'intensité du courant vertical peut être déterminée par deux méthodes différentes : soit directement, en mesurant la déperdition d'une surface rigoureusement assimilable à un élément du sol lui-même, soit indirectement par des mesures simultanées du champ et de la conductibilité. Nous examinerons d'abord les résultats donnés par cette dernière méthode.

III. Les mesures du champ sont faciles et sûres. Il n'en est pas de même des mesures de conductibilité.

Tout d'abord, on doit écarter, au moins pour des déterminations courantes, le procédé qui consisterait à déduire la conductibilité de la connaissance du nombre des ions et de leur mobilité. Il paraît inutile d'insister sur ce point. En dehors de l'appareil de Langevin et Moulin, qui n'a encore été employé que par ces physiciens et seulement dans une série d'expériences faites à la Tour Eiffel en 1905 et 1906¹, on peut dire qu'il n'existe aucun compteur d'ions séparant avec certitude les ions ordinaires des gros ions, et dont les mesures aient, par conséquent, une signification précise.

Il faut donc chercher à obtenir directement la conductibilité elle-même. Tel est le but de l'ingénieuse modification apportée par Gerdien² au compteur d'ions d'Ebert. L'appareil est bien connu et a été beaucoup employé; mais, quoique théoriquement irréprochable, il ne paraît pas susceptible, sous sa forme habituelle, avant tout portative et de manipulation facile, de donner des résultats d'une très grande précision. On a parfois critiqué à ce point de vue, et non sans raison, l'emploi de ces électroscopes à feuille d'or, de sensibilité médiocre, qui constituent l'instrument de mesures dans les appareils portatifs

d'Ebert et de Gerdien. D'autre part, on a cru remarquer que l'aspirateur de Gerdien donne des valeurs un peu fortes pour la conductibilité : il paraît cependant difficile d'apprécier jusqu'à quel point cette critique est fondée.

Quoi qu'il en soit, en raison de sa simplicité et de la commodité de son usage, l'instrument a été utilisé par un grand nombre d'observateurs, et les données ainsi recueillies ont au moins une valeur relative incontestable. Gerdien lui-même a exécuté avec son appareil, soit au voisinage de la surface du sol, soit en ballon¹, d'importantes séries de mesures de conductibilité, faites simultanément avec des mesures du champ; elles ont fourni, pour l'intensité du courant vertical, des résultats qui s'accordent très bien avec les recherches ultérieures par des procédés différents. C'est donc à ce savant qu'il convient de rapporter l'honneur des premières déterminations précises sur le sujet qui nous occupe ici.

Les principaux résultats des mesures de Gerdien peuvent se résumer ainsi :

1° Au voisinage du sol, les moyennes d'environ 50 observations faites à Göttingue, du 1^{er} au 17 avril 1906, ont donné, en unités électrostatiques absolues : pour les conductibilités positive et négative, et pour la conductibilité totale représentée par leur somme,

$$\gamma_p^{(2)} = 1,40.10^{-4} \quad \gamma_n = 1,12.10^{-4} \quad \gamma = 2,22.10^{-4};$$

pour l'intensité du courant vertical par cm²,

$$i = 8,00.10^{-7} \text{ U.E.S. ou } 2,67.10^{-16} \text{ ampère.}$$

Le champ moyen correspondant à ces observations était de 120 volts par mètre;

2° Deux séries de mesures en ballon, jusques à des altitudes d'environ 6000 mètres, ont montré nettement que, tandis que le champ diminue à mesure qu'on s'élève, la conductibilité moyenne augmente, de telle sorte que l'intensité du courant vertical, représentée par leur produit, n'éprouve que des variations relativement faibles par rapport à celles de ses deux composantes. Il est inutile de citer des nombres qui ne sont pas suffisamment d'accord dans les deux ascensions, en raison, sans doute, des conditions météorologiques différentes; mais le fait paraît bien établi. Mentionnons seulement que Gerdien a observé pour la conductibilité totale, à des altitudes voisines de 6000 mètres, des valeurs allant jusqu'à 13.10^{-4} environ dans l'un de ses voyages, et jusqu'à 20.10^{-4} dans l'autre. Les valeurs correspondantes du champ étaient respectivement de 5 volts et de 8 volts par mètre.

1. *Götting. Nachr.* (1905) 258 et 447; (1907) 77.

2. Ce nombre est corrigé d'une erreur de calcul qui affecte la valeur donnée dans le mémoire de Gerdien, 1,155; le nombre exact déduit des observations est 1,104. On remarquera que les deux conductibilités sont sensiblement égales.

1. *C. R.*, **140** (1905) 505. *Le Radium*, **4** (1907) 218.
2. *Götting. Nachr.*, (1905) 582; (1904) 277; (1905) 240.

Les variations accidentelles très rapides du champ rendent indispensable, pour son étude, l'emploi des méthodes d'enregistrement continu. Il paraît en être de même pour la conductibilité, et les mesures isolées sont alors insuffisantes.

Divers observateurs¹, dans ces dernières années, ont cherché à réaliser, pour la conductibilité, comme pour le champ, un procédé d'enregistrement continu. Une des méthodes les plus intéressantes paraît être celle que Schering a employée à Göttingue en 1908 et qui, appliquée l'année suivante à Potsdam par K. Kähler, a déjà donné pour une année complète, de mai 1909 à avril 1910, des résultats de grand intérêt signalés ici même, il y a quelques mois².

Par suite d'une installation encore incomplète, la conductibilité totale est déduite de la seule détermination de la conductibilité négative dont on se borne à doubler la valeur. La faible différence qui existe, en général, entre les deux conductibilités autorise suffisamment ce procédé de calcul, comme première approximation.

Les valeurs moyennes, résultant de 68 journées d'observations par temps « normal », sont les suivantes :

Pour la conductibilité, $\lambda = 0,84 \cdot 10^{-4}$ U.E.S.

Pour le courant vertical, $i = 6,8 \cdot 10^{-7}$ U.E.S., ou $2,2 \cdot 10^{-16}$ ampère cm².

Le champ moyen correspondant était de 260 volts par mètre.

On peut remarquer que la conductibilité est ici notablement plus faible que dans les mesures de Gerdien. En réalité, les résultats moyens obtenus de part et d'autre correspondent à des nombres d'observations trop différents et ne peuvent être comparés. Leur écart ne saurait avoir de signification nette en ce qui concerne la valeur des procédés de mesures.

D'ailleurs, si la conductibilité est plus faible dans la série de Potsdam, ce fait paraît en relation avec la valeur plus grande du champ correspondant, et l'intensité calculée du courant vertical, $2,2 \cdot 10^{-16}$, s'accorde remarquablement avec la valeur de Gerdien, $2,7 \cdot 10^{-16}$ ampère cm².

Kähler signale que les valeurs les plus fortes de la conductibilité s'obtiennent par temps clair, quand l'air est très transparent. Ce fait se retrouve également dans les observations de Gerdien qui ne donnent, cependant, qu'une augmentation assez faible (de 2,0 à 2,6 environ) de la conductibilité avec la transparence de l'air. Au contraire, la diminution du champ est très accusée. Il en résulte que l'influence de ce dernier élément est prépondérante dans la variation de l'intensité du courant vertical et que celle-ci a lieu

en sens contraire de la variation de la conductibilité. Le courant vertical augmente ainsi dans le rapport de 1 à 2 quand on passe d'un air très transparent à une atmosphère chargée de brumes.

IV. — Au lieu du procédé indirect qui donne le courant vertical par la détermination du champ et de la conductibilité, on peut chercher à mesurer directement la quantité d'électricité négative perdue dans un temps donné par une portion déterminée de la surface du sol. C'est même ainsi que la question fut posée à l'origine par H. Ebert¹, alors que les mesures de la conductibilité n'étaient pas encore dans la pratique courante des observations.

En principe, il faut pouvoir isoler une surface déterminée du sol, et mesurer la charge négative perdue (ou la charge positive reçue) pendant un certain temps, *tout en maintenant cette surface au potentiel du sol (potentiel zéro)*. Cette condition est indispensable, si l'on veut que la portion isolée du sol soit, à chaque instant, identique électriquement au sol lui-même. A son défaut, la surface isolée prendra un potentiel croissant sous l'action du champ extérieur, à mesure que se dissipera sa charge originelle négative.

Cette constance du potentiel de la surface isolée n'est pas réalisée dans le dispositif d'Ebert, dont les résultats semblent se trouver ainsi entachés d'une erreur systématique tendant à donner des valeurs trop faibles.

Un grand plateau métallique de 2 m² de surface, tantôt nu, tantôt recouvert de végétation, était soutenu horizontalement à 4 mètres de hauteur par des supports isolants. Après l'avoir relié un instant à la terre pour lui donner le potentiel du sol, on le maintenait isolé pendant quelques minutes durant lesquelles s'effectuait la déperdition de sa charge. Au bout de ce temps soigneusement mesuré, on rétablissait la communication à la terre, mais cette fois par l'intermédiaire d'un galvanomètre balistique dont l'écart mesurait la charge négative perdue (ou la charge positive reçue). En divisant cette quantité par le temps d'exposition en secondes et par la surface du plateau en cm², on avait l'intensité moyenne du courant de dissipation au-dessus de cette surface.

L'effet se trouvait beaucoup augmenté quand le plateau était recouvert de végétation, sous forme de gazon, branches de sapins, etc. En raison des aspérités multiples, la charge est alors, en effet, plus grande à surface *apparente* égale. Les expériences de C. T. R. Wilson, sur lesquelles nous reviendrons plus loin, ont montré que le coefficient de dissipation, c'est-à-dire la perte pour 100 par unité de temps, reste le même : l'intensité du courant au-dessus du plateau gazonné est donc accrue dans le même rapport

1. H. EBERT et K. KURZ : *Abhand. Bayer. Akad.*, **25** (1909) 2 et *Phys. Zeitschr.*, **41** (1910) 389. — H. SCHERING : *Götting. Nachr.*, (1908) 201. — K. KÄHLER : *Veröffent. Preuss. Met. Inst.*, n° 225 (1910) 13.

2. *Le Radium*, **7** (1910) 575.

1. *Phys. Zeitschr.*, **3** (1902) 338.

que la charge. Il est bien entendu que ce que nous devons chercher à déterminer, pour avoir des résultats comparables, c'est le courant au-dessus d'une surface nue.

Ainsi que nous l'avons dit précédemment, le dispositif d'Ebert ne répond que très imparfaitement au but proposé. Le potentiel du plateau augmente peu à peu pendant l'exposition et se rapproche du potentiel des couches d'air avoisinantes. Au bout d'un certain temps, l'équilibre est atteint et le plateau ne perd plus aucune charge. La durée d'exposition doit rester notablement au-dessous de cette limite pour donner une intensité moyenne de courant qui ne soit pas trop éloignée de la valeur exacte, et, dans tous les cas, les résultats sont trop faibles. D'autre part, l'élévation du plateau au-dessus du sol (4 m.) augmente sa charge superficielle qui est notablement supérieure à celle du sol lui-même : pour cette cause, au contraire, les résultats doivent être trop forts. Peut-être faut-il attribuer à une sorte de compensation entre deux causes d'erreurs agissant en sens contraire ce fait que la valeur moyenne trouvée par Ebert, $1.7 \cdot 10^{-16}$ amp. cm², s'accorde, en somme, fort bien avec tous les résultats obtenus depuis.

V. — Le problème qui consiste à maintenir au potentiel du sol (potentiel zéro) la surface dont on veut mesurer la perte de charge a reçu, dans ces dernières années, deux solutions très élégantes, l'une de G. T. R. Wilson, avec un instrument que l'on peut considérer, à juste titre, comme une merveille d'ingéniosité expérimentale, l'autre de G. C. Simpson, qui offre le très grand avantage de se prêter à l'enregistrement continu.

Nous exposerons d'abord cette dernière, bien qu'elle soit la plus récente, parce que l'ensemble de l'appareil représente un perfectionnement immédiat du dispositif même d'Ebert.

Appareil de G. C. Simpson¹.

Le principe est le suivant : la surface isolée — un grand plateau de 17m², analogue à celui d'Ebert, mais placé aussi près que possible du sol (à 15 cm.) — est reliée à un réservoir d'eau également isolé, dont le liquide s'échappe en un jet fin qui s'éparpille en gouttelettes à l'intérieur d'un manchon métallique en communication avec la terre.

L'effet bien connu de ce collecteur est de maintenir le plateau au potentiel du point d'éparpillement du jet, qui est celui du sol, et la charge positive entraînée par les gouttes d'eau pendant un temps donné représente précisément la quantité d'électricité reçue pendant ce temps de l'atmosphère par le plateau, et que nous voulons mesurer. Il suffira de recueillir

l'eau dans un vase métallique isolé, en communication avec un électromètre, pour effectuer cette mesure.

L'enregistrement s'obtiendra sans difficulté en employant, par exemple, un électromètre à inscription automatique du genre Benndorf. On sait que, dans cet instrument, un circuit, comprenant une pile et un électro-aimant, est fermé à des intervalles de temps réguliers, et qu'un style léger, attaché à l'aiguille de l'électromètre, arrive en contact avec le papier sur lequel se fait l'enregistrement. Une modification facile à apporter à l'appareil permet de mettre automatiquement à la terre le vase récepteur aussitôt que son potentiel a été enregistré, c'est-à-dire toutes les deux minutes dans le dispositif de Simpson. Chaque déviation de l'électromètre est ainsi proportionnelle à la charge reçue par le vase pendant les deux minutes précédentes.

Un second électromètre enregistreur, destiné à la mesure du champ, était actionné par le même courant, de telle sorte que les enregistrements fussent simultanés dans les deux appareils.

Pour interpréter convenablement les résultats, une remarque est nécessaire. La charge négative induite sur le plateau isolé par le champ terrestre varie sous l'influence de deux causes : d'abord, par la déperdition résultant de la conductibilité de l'air — c'est l'effet que nous voulons mesurer ; — ensuite, par le fait même des variations du champ, nécessairement accompagnées de variations correspondantes de la charge induite.

En désignant par S la surface du plateau en centimètres carrés, par t le temps d'exposition en secondes, et par i la charge positive moyenne reçue en une seconde par chaque centimètre carré de la surface, la charge totale reçue par le plateau dans le temps t est Sit . D'autre part, si, dans cet intervalle, le champ au-dessus du plateau a varié de V_1 à V_2 (volts-mètre), une certaine quantité d'électricité a été rendue libre sur le plateau ; elle sera donnée par la formule $\frac{dV}{dh} = -4\pi\mu$, et, en unités électrostatiques,

son expression sera : $-\frac{S(V_1 - V_2)}{4\pi \cdot 300 \cdot 100}$.

Le récepteur a reçu ces deux charges et l'électromètre a mesuré leur somme. Par suite, q étant la charge moyenne par seconde donnée par l'instrument, on aura :

$$qt = Sit - \frac{S(V_1 - V_2)}{4\pi \cdot 300 \cdot 100}$$

d'où

$$i = \frac{q}{S} + \frac{V_1 - V_2}{5,77 \cdot 10^3 \cdot t} \text{ U.E.S.}$$

Telle sera l'expression de l'intensité par centimètre carré de la surface.

1. *Phil. Mag.*, 49 (1910) 715.

On en déduira la conductibilité λ par la formule $i = \lambda \frac{dV}{dh}$ qui donne ici, en unités électrostatiques :

$$\lambda = \frac{i \cdot 500 \cdot 100}{V}$$

V étant, en volts par mètre, la valeur moyenne du champ pendant le temps t . Cette valeur sera, en général, différente de la moyenne des valeurs extrêmes V_1 et V_2 ; mais, dans la pratique, on prendra cette moyenne comme une approximation suffisante en régime normal.

Dans le dépouillement des observations enregistrées, on calcule *pour chaque heure* les valeurs moyennes du courant et de la conductibilité.

Pour la clarté de la méthode, il est intéressant de reproduire ici un exemple numérique donné dans le mémoire de Simpson.

La valeur moyenne de la quantité d'électricité recueillie pendant une heure est déduite de la moyenne de 5 ordonnées équidistantes de la courbe « régularisée » de l'enregistreur. Soit 50,8 mm. cette ordonnée moyenne dans le cas examiné. La sensibilité de l'électromètre étant de 5,9 volts par millimètre d'ordonnée, le voltage moyen pour l'heure est 181,7 volts, ou 0,606 U.E.S.

L'ensemble des capacités du vase récepteur et de l'électromètre est 55 cm. Il en résulte que, dans l'heure considérée, la quantité moyenne d'électricité enlevée au plateau, pendant chaque intervalle de deux minutes, était : $0,606 \times 55 = 21,21$ U.E.S., et, pendant une seconde,

$$q = \frac{21,21}{120} = 0,177 \text{ U.E.S.}$$

La surface du plateau étant égale à $17,16^4 \text{ cm}^2$, il s'en suit :

$$\frac{q}{S} = 104 \cdot 10^{-8} \text{ U.E.S.}$$

Les valeurs du champ au commencement et à la fin de l'heure étaient respectivement 20,8 et 49,5 volts-mètre, par suite :

$$\frac{V_1 - V_2}{5,77 \cdot 10^5 \cdot t} = \frac{-28,5}{5,77 \cdot 10^5 \cdot 3600} = -2 \cdot 10^{-8} \text{ U.E.S.}$$

On a donc finalement, pour l'intensité du courant :

$$i = (104 - 2) \cdot 10^{-8} = 102 \cdot 10^{-8} \text{ U.E.S.}$$

et pour la conductibilité :

$$\lambda = \frac{102 \cdot 10^{-8}}{34,8} \cdot 5 \cdot 10^4 = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}$$

L'emplacement qu'avait dû adopter Simpson pour l'installation de son plateau à l'observatoire météorologique de Simla était peu favorable, en raison de la proximité trop grande d'arbres élevés. Le champ s'y est montré, en effet, remarquablement faible. Aussi, dans cette première série de mesures, les observations continues utilisables n'ont porté que sur une dizaine de jours de beau temps, à la fin de novembre

1909. Elles ont donné les valeurs moyennes suivantes :

Pour le courant vertical par centimètre carré, $i = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ U.E.S.} = 1,8 \cdot 10^{-16} \text{ amp.}$

Pour la conductibilité, $\lambda = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}$

Pour le champ, $V = 29$ volts-mètre.

A ce champ très faible, correspond une conductibilité sensiblement plus forte que les valeurs moyennes citées précédemment, et l'intensité du courant vertical conserve une valeur suffisamment voisine de celles qu'ont données Gerdien et Kähler. Ce fait est digne d'attention, bien que Simpson semble attacher peu d'importance aux valeurs absolues qu'il a pu obtenir dans des conditions d'installations défectueuses.

Les résultats concernant la variation diurne, moins affectés par ces défauts, lui paraissent du plus grand intérêt. On y trouve une opposition très nette entre la marche de la conductibilité et celle du potentiel, avec un maximum de nuit et un minimum de jour pour le premier de ces deux éléments. Au contraire, la variation du courant vertical et celle du potentiel sont, dans leur ensemble, assez analogues.

VI. — C. T. R. Wilson¹ a indiqué en 1906, une méthode extrêmement originale pour mesurer la charge superficielle, ainsi que la perte par déperdition de cette charge, sur un conducteur exposé au champ électrique terrestre *et maintenu au potentiel du sol (potentiel zéro)*.

On peut caractériser cette originalité en disant que les mesures, qui, dans les appareils d'Ebert et de Simpson, se font à l'aide d'un plateau de plusieurs mètres carrés de surface, s'obtiennent ici avec un disque de 7 cm. de diamètre. Mais l'appareil est remarquable à d'autres titres et, comme il paraît encore très peu connu en France, bien qu'il ait été signalé à deux reprises dans ce journal², nous croyons qu'il n'est pas sans intérêt de décrire avec quelque détail l'instrument lui-même et son usage.

Appareil de C. T. R. Wilson.

Pour maintenir au potentiel du sol (potentiel zéro) le conducteur isolé exposé au champ terrestre, et dont le potentiel tend à varier par le fait de la déperdition, la méthode consiste, en principe, à faire varier convenablement la capacité de ce conducteur.

Toute variation de capacité retentit inversement sur le potentiel, considéré comme une grandeur continue et sans le changement de signe qu'introduit, dans les notations habituelles, la convention de la valeur zéro pour le potentiel du sol. Les variations progressives nécessaires dans la capacité sont obtenues

1. *Cambr. Phil. Soc. Proc.*, **43** (1906) 184 et 364. — *Proc. Roy. Soc.*, **80** (1908) 557.

2. *Le Radium* **3** (1906) 155 et **6** (1909) 28.

nues ici à l'aide d'un condensateur cylindrique dont l'armature intérieure est une tige reliée au conducteur, et l'armature extérieure un tube métallique maintenu à un potentiel constant, et pouvant glisser parallèlement à la tige intérieure qu'il enveloppe ainsi sur une longueur plus ou moins grande. Les déplacements dans le premier sens augmentent la capacité et diminuent le potentiel; l'effet est inverse pour les déplacements en sens contraire.

Les variations du potentiel sont constatées, et peuvent être mesurées, à l'aide d'un électroscope à feuille d'or dont la disposition spéciale est un des caractères les plus remarquables de l'instrument. Elle permet, en effet, de mesurer, à partir du potentiel zéro, des potentiels positifs et négatifs, comme on peut le faire, par exemple, avec un électromètre à quadrants.

Pour cela, la cage conductrice qui enveloppe la feuille et son support est isolée et maintenue à un potentiel constant par communication avec l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde dont l'autre armature est au sol. Dans ces conditions, si la feuille d'or est elle-même au sol, c'est-à-dire au potentiel zéro, elle dévie d'un angle qui ne dépend que du potentiel de la cage. Cette position d'équilibre est observée à l'aide d'un microscope à échelle oculaire micrométrique; elle donne, pour ainsi dire, le zéro de l'appareil de mesures.

En général, pour un potentiel quelconque de la feuille d'or, la déviation ne dépend que de la différence entre ce potentiel et celui de la cage. Supposons à la cage un potentiel positif de 50 volts. Si le potentiel de la feuille d'or, initialement zéro, augmente, la déviation de la feuille diminue; si le potentiel diminue, c'est-à-dire passe au négatif, la déviation augmente. Le potentiel de la feuille augmentant jusqu'à 50 volts, la déviation diminue jusqu'à devenir nulle, et si le potentiel continue de croître, la déviation se produit de nouveau et va maintenant en croissant jusqu'au moment où, pour un potentiel de 100 volts, elle atteindra la position primitive d'équilibre correspondant au potentiel zéro.

L'échelle du microscope permet seulement les mesures de déviations correspondant à 10 volts de part et d'autre de la position d'équilibre. L'instrument est donc disposé pour la mesure des potentiels de -10 volts à $+10$ volts d'une part, et de $+90$ volts à $+110$ volts de l'autre, si la cage est, comme nous l'avons supposé, au potentiel de 50 volts. En faisant varier ce potentiel, on fera varier de même la valeur moyenne de la seconde série.

La feuille d'or est de très petites dimensions (1 cm environ de longueur et 0,1 à 0,2 mm de largeur); la sensibilité moyenne de l'instrument est alors telle qu'une variation de potentiel de 1 volt produise un déplacement de l'extrémité de la feuille de 0,1 mm.

environ, donnant, dans le champ du microscope, un déplacement de 2 divisions sur l'échelle micrométrique. On peut ainsi apprécier aisément le dixième de volts.

Sur la figure 2, qui représente une coupe verticale de l'appareil, on voit en B la cage, en E et F

Fig. 1.

la feuille et son support. Ce dernier est un prolongement de la tige verticale isolée U supportant le plateau de déperdition T.

La bouteille de Leyde en quartz D, dont l'armature intérieure, constituée par une couche d'argent, est reliée à la cage de l'électromètre, peut conserver pendant 24 heures une charge à très peu près constante, et le potentiel de l'armature ne varie, dans cet intervalle, que d'une fraction de volt. On vérifiera de temps à autre, au cours d'une longue série de mesures, l'invariabilité du zéro par une mise au sol de la feuille d'or, et l'on tiendra compte au besoin, dans les lectures sur l'échelle, du déplacement qui a pu se produire. Dans la pratique, l'appareil peut rester en service pendant plusieurs semaines, sans qu'il soit nécessaire de recharger la cage.

Le conducteur exposé à l'air libre, et dont on doit mesurer la charge sous l'influence du champ terrestre, est un plateau horizontal T, de 7 cm. de diamètre, en laiton noirci. Un disque annulaire W, dont la surface supérieure est exactement dans le même plan que celle du plateau, l'entoure en formant un anneau de garde séparé par un intervalle de 2,5 mm et en communication permanente avec le sol; son diamètre est de 17 cm. Sur ce disque, repose un couvercle métallique V enveloppant le plateau d'épreuve et que l'on enlève quand celui-ci doit être exposé au champ terrestre. C'est là une autre particularité intéressante de la méthode d'observation de C. T. R. Wilson.

L'appareil qui permet de faire varier à volonté la capacité du système plateau-électroscope, et dont nous avons indiqué plus haut le principe, porte le nom de *compensateur*. Il est constitué par une bouteille de Leyde en quartz P, argentée intérieurement, analogue à celle qui sert à la charge de la cage. L'armature

Fig. 2.

intérieure communique avec un tube métallique Q, qui prolonge en quelque sorte le col de la bouteille et peut envelopper, sur une longueur plus ou moins grande, une tige métallique horizontale R fixée latéralement sur le support commun de la feuille d'or et du plateau. L'ensemble de la bouteille et du tube est déplacé à la main par l'observateur et ces déplacements sont mesurés sur une échelle divisée.

Quand le compensateur est retiré autant que possible et se trouve au zéro de l'échelle, la tige intérieure au tube est entièrement dégagée, et il n'y a pas de condensation¹. Celle-ci se produit quand on enfonce le compensateur, et va en augmentant à mesure que le tube du système mobile recouvre plus complètement la tige.

Dans les conditions ordinaires de l'observation, la bouteille de Leyde et, par suite, le tube sont chargés *négativement*.

Pour nous rendre compte du fonctionnement de ce

1. Plus exactement : au zéro de l'échelle, la tige reste engagée d'une certaine quantité, et la condensation initiale a une certaine valeur, toujours la même.

dispositif, supposons d'abord que, le couvercle étant placé sur l'anneau de garde, le compensateur soit retiré jusqu'au zéro, et que l'on mette un instant au sol le système plateau-électroscope. Le plateau, au milieu de son enveloppe métallique, n'a évidemment aucune charge, et tout le système est au potentiel zéro. Si nous enfonceons le compensateur, la capacité du système augmente et, par suite, son potentiel diminue, c'est-à-dire qu'il devient négatif. En d'autres termes, l'action d'influence du tube du compensateur chargé négativement donne à l'électroscope une charge négative dont l'équivalent positif reste emmagasiné dans la tige intérieure au tube.

Pour donner à la feuille d'or une charge permanente positive, il suffirait maintenant de rétablir un instant la communication avec le sol, puis de retirer brusquement le compensateur qui abandonnerait alors au système la charge emmagasinée.

Il est facile d'étalonner le compensateur de façon à connaître, en unités absolues, pour chacune de ses positions, la quantité d'électricité positive accumulée sur la tige intérieure par la condensation.

Pour cela, on disposera sur l'anneau de garde, en regard du plateau d'épreuve, un disque métallique supporté par trois boutons isolants de façon à former avec le plateau un condensateur dont la capacité peut être aisément déterminée. Après avoir mis à la terre le disque et le plateau, on retire à fond le compensateur; puis on rompt la communication avec le sol, et on donne au disque un potentiel connu en

le reliant au pôle positif d'une batterie de quelques éléments dont l'autre pôle est à la terre. La feuille d'or de l'électroscope accuse une élévation du potentiel; on ramène celui-ci à zéro en enfonceant le compensateur qui capte, pour ainsi dire, l'équivalent positif de la charge négative accumulée sur le plateau par la condensation. Or, on connaît la valeur de cette charge, en unités absolues, par la capacité et le potentiel du condensateur disque-plateau. On notera la division de l'échelle du compensateur qui lui correspond, et l'on continuera ainsi en faisant varier la charge par le changement du potentiel du disque¹.

1. Nous nous bornons à cette indication pour éviter des longueurs. Dans la pratique, l'étalonnage tout entier se fait sous le même potentiel du disque par une multiplication de la charge de l'appareil facile à réaliser à l'aide du compensateur.

D'autre part, la disposition du compensateur, par rapport à la tige intérieure fixe, est telle que la courbe d'étalonnage soit très sensiblement une ligne droite dans toute sa longueur; c'est-à-dire que les déplacements du compensateur sont très sensiblement proportionnels aux charges absorbées ou libérées. Dans ces conditions, l'étalonnage ayant été fait pour une certaine charge de la bouteille, si cette charge vient à changer, il

Ainsi étalonné, le compensateur n'est plus seulement un appareil de réglage permettant de maintenir la constance du potentiel. C'est un instrument de mesures donnant les quantités d'électricité en unités absolues, comme l'électroscope peut donner les potentiels, de telle sorte que, si la capacité du système est connue, on pourra, dans certains cas, utiliser au besoin, pour les mêmes déterminations, soit le compensateur, soit l'électroscope.

Telles sont, dans leurs parties essentielles, les opérations que comporte l'ingénieux procédé de mesure de C. T. R. Wilson. Au point de vue de la pratique, la valeur de ce procédé dépendra beaucoup du soin apporté à la construction d'un instrument d'autant plus délicat que son auteur a tenu à en réduire le plus possible les dimensions, afin de le rendre aisément transportable¹. Tout l'appareil, tel qu'il est représenté par la figure (1), en place de son pied de bronze n'a, en effet, qu'une hauteur totale d'environ 55 centimètres. La boîte qui le renferme est disposée pour servir de support pendant les observations.

Nous allons indiquer maintenant comment on peut l'appliquer aux mesures du champ terrestre et du courant vertical de conductibilité.

L'appareil étant transporté dans un lieu bien découvert, le couvercle en place sur l'anneau de garde et le compensateur à sa complète extension, c'est-à-dire au zéro de l'échelle, on établit un instant la communication avec le sol et l'on vérifie la position de la feuille d'or correspondant au potentiel zéro. Puis on enlève le couvercle. Le potentiel du système plateau-feuille d'or s'accroît sous l'action du champ extérieur, si celui-ci a sa direction normale de beau temps. La feuille d'or s'écarte (en s'abaissant) de sa position initiale; on l'y ramène en enfonçant le compensateur. Le système est ramené ainsi au potentiel zéro, et le plateau est alors assimilable à une portion du sol, soulevée d'une certaine hauteur et recouverte de sa charge négative normale correspondant à cette position. Le compensateur a absorbé l'équivalent positif de cette charge et sa position sur l'échelle en donne immédiatement la valeur.

Prolongeons l'exposition pendant quelques minutes (de deux à cinq minutes). Par l'effet de la déperdi-

suffira d'une seule détermination avec le disque condenseur pour avoir le facteur de réduction.

La capacité du système formé par le plateau avec son couvercle, le support et la feuille d'or (le tube du compensateur étant retiré jusqu'au zéro), est d'environ 15 cm. On la détermine aisément, à l'aide du compensateur, par la quantité d'électricité nécessaire pour ramener le système, préalablement porté à un potentiel connu (indiqué par la feuille d'or), au potentiel zéro.

1. L'instrument est construit, sous le nom d' « *Universal portable electrometer* » par la « Cambridge scientific instrument Company » à l'obligeance de laquelle nous devons les clichés des figures 1 et 2 empruntées à son catalogue.

tion, le potentiel du système tend à s'élever; on le maintient à zéro en enfonçant progressivement le compensateur, de telle sorte que, pendant toute la durée d'exposition, le potentiel reste rigoureusement celui du sol, la charge négative sur le plateau conservant la valeur normale correspondant au champ. Le temps d'exposition écoulé, on remplace le couvercle.

On peut alors procéder de deux façons pour mesurer la quantité d'électricité dissipée, et faire cette mesure soit avec le compensateur, soit avec l'électroscope.

En remplaçant le couvercle, nous avons laissé sur le plateau, maintenu au potentiel zéro, une charge négative égale à la charge normale, et, l'action du champ n'existant plus, la feuille d'or accuse un potentiel négatif. Or, le compensateur, pendant son déplacement total, a capté d'abord l'équivalent positif de la charge normale, ensuite, progressivement, l'équivalent positif de la charge négative perdue par la dissipation. En retirant le compensateur jusqu'à ramener le système au potentiel zéro, nous libérerons la première partie; la seconde reste sur le compensateur qui la mesure par sa position sur l'échelle.

M. Wilson emploie de préférence le procédé de mesure par l'électroscope. Après avoir remplacé le couvercle, on retire à fond le compensateur. On libère ainsi la totalité des deux absorptions positives indiquées plus haut, et, après neutralisation de la charge négative restée sur le système, l'excès donne à celui-ci un potentiel positif mesuré par la feuille d'or. Connaissant la capacité, on en déduit la valeur de cet excès, c'est-à-dire de l'équivalent positif de la perte par déperdition.

Il faut passer de là aux données relatives *au sol lui-même*, pour lequel la charge par unité de surface et par suite la quantité d'électricité dissipée sont nécessairement différentes des valeurs observées dans les conditions où se trouve le plateau d'épreuve.

Une série de mesures, sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre ici¹, ont donné à M. Wilson le nombre 4,2 pour le rapport entre les charges par unité de surface sur le plateau de l'appareil et sur le sol voisin supposé nu².

Par d'autres expériences, M. Wilson a trouvé que le coefficient de déperdition, c'est-à-dire la perte pour 100 de la charge dans l'unité de temps, est indépen-

1. On en trouvera le détail dans le Mémoire de C. T. R. Wilson (*Proc. Roy. Soc.*, 80 (1908) 537). Ces mesures étaient faites en déterminant avec l'appareil, par des opérations alternées, d'une part la charge du plateau d'épreuve, de l'autre celle d'un autre plateau, identique aux dimensions près, c'est-à-dire avec anneau de garde et couvercle, placé sur le sol lui-même, à peu près au ras de la surface.

2. Il est bon de remarquer que la petite éminence formée par l'appareil en place sur la boîte-support, et d'une hauteur totale de 70 cm., suffit à multiplier par 4 la densité superficielle. La nécessité d'opérer au ras du sol lui-même dans les mesures directes de la déperdition est ainsi rendue manifeste.

dant de la nature de la surface du corps exposé. Par exemple, en opérant avec un morceau de sol gazonné recouvrant le plateau de l'appareil, on trouve, pour une charge qui est alors environ 5 fois plus forte que celle de la surface métallique nue, exactement la même valeur de ce coefficient. Les conditions sont cependant très différentes dans les deux cas, la charge sur le gazon étant accumulée sur les tiges qui hérissent la surface. M. Wilson fait remarquer en outre que cette égalité se maintient *même pendant les journées calmes et de forte insolation*, alors que l'on aurait pu s'attendre à voir se manifester quelque effet photo-électrique sur l'un ou l'autre du plateau ou du morceau de sol gazonné. « D'une manière générale, » dit M. Wilson, *les jours de forte insolation ne sont pas, cela est positif, des jours de dissipation anormalement forte.* »

Ces deux points établis : constance du facteur de dissipation et rapport de la charge sur le plateau à la charge sur le sol, on déduira des observations faites avec l'appareil la charge du sol et la déperdition à la surface de celui-ci supposée nue.

La charge μ par unité de surface donnera le champ par la formule $\frac{dV}{dh} = -4\pi\mu$, et l'intensité du courant vertical s'obtiendra par la déperdition. La valeur de la conductibilité résultera de la connaissance de ces deux éléments¹.

Les valeurs moyennes résultant d'observations, généralement faites au voisinage de midi, pendant 17 jours répartis sur une période d'une année environ (septembre 1906 à octobre 1907), en pleine campagne dans la région d'Edimbourg, et dans des conditions qui paraissent excellentes, sont les suivantes :

Charge par cm^2 du sol : $49,7 \cdot 10^{-3}$ U.E.S. (valeurs extrêmes : 29,6 et 107,0);

Champ en volts par mètre : 187 volts (valeurs extrêmes 111 et 401);

1. Les mesures par le procédé de M. Wilson n'échappent pas, bien entendu, au reproche qui peut s'adresser à toutes les observations discontinues en électricité atmosphérique et qui résulte de la variabilité extrême, au moins au voisinage du sol, des éléments observés.

Les variations accidentelles du champ, et, par suite, de la charge induite, sont souvent considérables et très rapides, surtout au milieu du jour. Dans l'espace de quelques minutes, ces variations peuvent être de 1 à 1,5 ou 1,5, parfois de 1 à 2 et même davantage, et cela sous des influences climatologiques ou locales qu'il est impossible de préciser et de prévoir. Dans le procédé de M. Wilson, la mesure de la charge précède immédiatement la mesure de la déperdition, et celle-ci ne dure qu'un très petit nombre de minutes. Ces conditions sont aussi bonnes que possible; mais, si court qu'il soit, le temps de la mesure est encore suffisant pour que, même sous un régime en apparence normal, le résultat puisse être quelquefois grandement altéré par une variation rapide de la charge induite pendant l'observation. Le fait est à prévoir pour l'explication de certaines anomalies dans les mesures; il montre aussi la nécessité de multiplier celles-ci le plus possible, à intervalles rapprochés.

Déperdition pour 100 par minute : 8,55 (valeurs extrêmes : 2,9 et 16,4);

Courant par cm^2 et par seconde : $6,72 \cdot 10^{-7}$ U.E.S. (valeurs extrêmes : 2,15 et 10,5);

Ou : $2,22 \cdot 10^{-16}$ ampères (valeurs extrêmes : 0,71 et 5,4).

On en déduit, comme valeur moyenne de la conductibilité : $\lambda = 1,1 \cdot 10^{-4}$ U.E.S.

VII. — La valeur de l'intensité du courant vertical, résultant des observations de C. T. R. Wilson, se trouve donc être exactement la même que celle qu'obtient Kähler comme moyenne d'une année d'observations par une méthode essentiellement différente. Cette coïncidence est évidemment fortuite, mais on ne saurait trop insister sur l'accord vraiment remarquable des résultats moyens des quatre séries de mesures systématiques du courant vertical qui constituent à peu près toutes les données acquises aujourd'hui sur cet élément. Cet accord est d'autant plus frappant que les observations, dans des lieux différents, ont été faites par des procédés ou des méthodes très dissemblables, car la différence entre les dispositifs de Gerdien et de Kähler, pour la mesure de la conductibilité, est, en réalité, aussi grande que celle qui sépare l'appareil à plateau minuscule de C. T. R. Wilson de l'énorme surface de déperdition de Simpson, aussi grande que la différence entre les méthodes elles-mêmes appliquées dans chacun des deux groupes.

Résumons ces résultats :

1^o Mesures indirectes par la conductibilité et le champ :

GERDIEN (Göttingue) :

$$i = 2,67 \cdot 10^{-16} \text{ amp./cm}^2,$$

$$V = 120 \text{ volts},$$

$$\lambda = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}$$

KÄHLER (Potsdam) :

$$i = 2,22 \cdot 10^{-16} \text{ amp./cm}^2,$$

$$V = 260 \text{ volts},$$

$$\lambda = 0,84 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}$$

2^o Mesures directes par la déperdition :

C. T. R. WILSON (Edimbourg) :

$$i = 2,20 \cdot 10^{-16} \text{ amp./cm}^2,$$

$$V = 187 \text{ volts},$$

$$\lambda = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}$$

G. SIMPSON (Simla) :

$$i = 1,8 \cdot 10^{-16} \text{ amp./cm}^2,$$

$$V = 29 \text{ volts},$$

$$\lambda = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}$$

Tandis que le champ varie de 1 à 9 et la conducti-

bilité de 7 à 1, le courant vertical varie seulement de 1 à 1,5. Il semble que l'on puisse conclure à une constance relative dans la valeur moyenne de cet élément.

Nous avons mentionné, au début de cet article, les recherches sur l'électricité atmosphérique exécutées par M. Rouch, dans l'Antarctique¹, au cours de la dernière expédition Charcot. Parmi les observations, figurent de nombreuses mesures de la conductibilité faites avec un appareil de Gerdien. Elles sont réparties sur neuf mois pendant lesquels le champ était, d'autre part, régulièrement enregistré.

M. Rouch a publié² les moyennes mensuelles correspondantes de ces deux éléments. Or, ces valeurs s'accordent mal avec la conclusion formulée plus haut.

En calculant, en effet, à l'aide de ces données, les intensités du courant vertical, on trouve, pour l'ensemble des neuf mois d'observations :

$$\lambda = 4,16 \cdot 10^{-4} \text{ U.E.S.}, \quad V = 165 \text{ volts}, \\ i = 7,1 \cdot 10^{-16} \text{ amp./cm}^2.$$

Sous un champ moyen relativement fort, la conductibilité conserve des valeurs très élevées, de sorte que l'intensité du courant vertical est ici trois fois plus grande que la valeur moyenne des résultats précédents.

1. A l'île Peterman ($L = 65^{\circ} 10' S$, $G = 66^{\circ} 54' W$), de février à novembre 1909.

2. *C. R.*, 18 juillet 1910.

Il est possible que les valeurs trouvées pour la conductibilité soient trop fortes. M. Rouch a signalé les difficultés de ces mesures dans les conditions où il opérait, soit par le fait de l'isolement difficile à maintenir, soit par l'influence de l'air glacé qui alimentait l'aspirateur. Néanmoins, toutes les précautions avaient été prises pour assurer autant que possible la valeur des observations. Une différence considérable, mais dans un sens fréquemment constaté en d'autres régions, s'est toujours manifestée entre les conductibilités des deux signes, la conductibilité positive étant, pour certains mois, deux fois plus forte que la négative. (Valeur moyenne du rapport : 1,62). D'autre part, la marche annuelle de la conductibilité s'est montrée rigoureusement inverse de celle du champ.

S'il était permis de généraliser d'après le petit nombre des données acquises, on pourrait supposer que l'intensité du courant vertical, peu variable dans les régions tempérées, aurait tendance à s'accroître aux hautes latitudes et, peut-être, à s'affaiblir aux latitudes basses. Hâtons-nous de le dire, rien n'autorise aujourd'hui une pareille conclusion; mais, malgré les réserves qu'il comporte, le résultat des consciencieuses observations de M. Rouch doit être retenu. Peut-on prévoir, dès à présent, ce que réserve à la physique du globe, la solution du mystérieux problème scientifique des régions polaires!

[Manuscrit reçu le 27 avril 1911].