ÉLECTROMÈTRE ENREGISTREUR DES IONS DE L'ATMOSPHÈRE.

Les expériences d'Elster et Geitel[1] et de C. T. R. Wilson ont montré que la conductibilité permanente de l'air est due à la présence d'ions des deux signes produits par les substances radioactives qui y existent toujours en très petite quantité, et peut-être aussi par des radiations pénétrantes, d'origine terrestre ou solaire.

Le rôle important joué par ces ions dans divers phénomènes météorologiques, tels que la production et les variations du champ électrique terrestre, les variations du champ magnétique attribuées par M. Schuster[2] aux courants induits dans l'air conducteur par son déplacement dans la portion permanente de ce champ magnétique, la production des nuages par condensation de la vapeur d'eau devenue sursaturante par refroidissement ou ascension des masses d'air humide sur les centres chargés fonctionnant comme germes pour la formation des gouttes d'eau, rend intéressante et nécessaire une observation continue de l'ionisation atmosphérique.

Depuis quelques années cette question est à l'étude et diverses méthodes ont été proposées pour la mesure des éléments caractéristiques. Il est nécessaire de rappeler tout d'abord quels sont ceux-ci et comment leur nombre s'est accru par suite d'un examen plus approfondi des diverses catégories d'ions contenus dans l'air de manière permanente.

Il s'y trouve tout d'abord des ions analogues à ceux que produisent les rayons de Röntgen ou de Becquerel, des «petits ions» des deux signes, de mobilité voisine de 1,5 centimètre par seconde, dans un champ de un volt par centimètre. Nous désignerons par p et n les quantités d'électricité portées respectivement par les petits ions positifs et négatifs dans l'unité de volume d'air, les densités en volume des charges positives et négatives disponibles sous forme de petits ions. Si e est la charge portée par chaque ion en valeur absolue, voisine de $3{,}4 \times 10^{-10}$ unité CGS électrostatique, les nombres des petits ions positifs et négatifs présents dans l'unité de volume sont respectivement $\frac{p}{e}$, et $\frac{u}{e}$. Nous désignerons par k_1 et k_2 les mobilités de ces deux catégories d'ions.

Au cours des expériences que nous poursuivons depuis deux ans à la Tour Eiffel, nous avons été conduits à reconnaître[1] qu'il existe constamment dans l'air des ions beaucoup moins mobiles que les précédents, de mille à trois mille fois, des «gros ions» véritables particules ou gouttelettes de l'ordre du centième de micron en diamètre et contenant au moins un million de molécules analogues aux ions observés par M. Townsend dans les gaz récemment préparés

---

(1) Voir H. Geitel, *Le Radium*, 1905, p. 193 et 225.
(2) Conférence de Pâques à la Société française de Physique, Paris, 1907.

www.rcin.org.pl

et par M. E. Bloch dans l'air en contact avec du phosphore. Les ions ordinaires sont au contraire beaucoup plus petits, de l'ordre des dimensions moléculaires; ils contiennent au maximum 10 à 20 molécules groupées par attraction électrostatique autour d'un centre électrisé.

Un point important est que les quantités d'électricité positive et négative portées par ces gros ions dans l'unité de volume d'air peuvent être beaucoup plus considérables, jusqu'à cinquante fois, que celles portées par les petits ions. Nous désignerons par P et N les densités en volume de ces charges disponibles sous forme de gros ions des deux signes dont les nombres par unité de volume seront aussi $\frac{P}{e}$ et $\frac{N}{e}$, si l'on admet l'égalité très probable de leur charge individuelle à celle des ions ordinaires.

Il est remarquable que l'expérience a démontré l'absence de centres intermédiaires entre les petits et les gros ions. Il existe ainsi dans l'air des catégories nettement tranchées de particules électrisées, et les rôles qu'elles jouent sont nettement différents.

Tout d'abord, la conductibilité de l'air est due aux petits ions pour la plus grosse part : en effet cette conductibilité ou densité de courant produite par un champ d'intensité égale à l'unité a pour valeur, si l'on désigne par K_1 et K_2 les mobilités moyennes des gros ions positifs et négatifs :

$$\gamma = pk_1 + PK_1 + nk_2 + NK_2$$

Nous désignerons par γ_+ et γ_- les deux parties :

$$\gamma_+ = pk_1 + PK_1 \qquad \gamma_- = k_2 + nk_2 \qquad \gamma = \gamma_+ + \gamma_-$$

de la conductibilité totale γ, dues séparément aux centres positifs et aux centres négatifs. Dans chacune de ces deux parties, le terme relatif aux petits ions l'emporte en général de beaucoup sur l'autre. En effet, si les densités en volume peuvent être cinquante fois plus grandes pour les gros ions que pour les petits, leurs mobilités sont environ deux mille fois plus faibles, de sorte que la conductibilité due aux gros ions n'est guère que le quarantième de celle due aux petits. Dans tous les phénomènes où cette conductibilité intervient, comme la neutralisation de la charge du sol par le courant que son champ électrique produit dans l'atmosphère, ou les phénomènes d'induction qu'invoque M. Schuster, ce sont les petits ions qui jouent le rôle important.

D'autre part les gros ions sont d'autant plus nombreux que l'atmosphère contient en suspension un plus grand nombre de particules et leur nombre doit croître proportionnellement au nombre de ces particules. Il doit en effet s'établir un régime d'équilibre entre les diverses catégories de particules chargées et non chargées, présentes simultanément dans l'atmosphère, les gros ions se formant par diffusion des ions ordinaires vers les particules neutres et se détruisant pour restituer la particule neutre par recombinaison avec les petits ions du signe opposé. La mesure de la charge présente en gros ions donne donc plus facilement que la numération des poussières par la méthode de

www.rcin.org.pl

condensation d'Aitken, une mesure du degré d'impureté de l'atmosphère, en relation avec les phénomènes optiques comme celui de la brume.

Enfin les gros ions et les particules neutres dont ils impliquent la présence jouent le rôle essentiel dans la formation des couches inférieures de nuages (stratus et cumulus entre 1 000 et 2 000 mètres d'altitude). Ces particules, en effet, condensent la vapeur d'eau à peine sursaturante et quand une masse d'air humide s'élève et se refroidit par détente adiabatique, c'est sur elles tout d'abord que les gouttes se forment. Quand ces gouttes sont assez grosses pour que leur chute composée avec la vitesse d'ascension de l'air les laisse stationnaires, la masse d'air continuant à s'élever ne peut plus former de gouttes que par condensation sur les ions ordinaires qui nécessitent une sursaturation considérable (une pression de vapeur de 6 à 8 fois plus grande que la pression maxima) de sorte qu'on doit monter à une altitude beaucoup plus élevée pour obtenir cette deuxième couche de nuages formée sur les petits ions, vraisemblablement jusqu'à l'altitude des cirrus, souvent situés à 10 ou 12 km.

De l'équilibre indiqué plus haut entre les ions et les particules en suspension dans l'air, il résulte que le nombre des gros ions doit varier en sens inverse de celui des petits, puisque la recombinaison entre les deux espèces doit pour la plus grosse part équilibrer la production d'ions par les divers rayonnements. L'expérience nous a montré en effet des variations opposées des deux catégories d'ions, ainsi que des variations du champ électrique terrestre opposées à celles des petits ions et parallèles à celles des gros. Ceci résulte en particulier du fait que le champ sera d'autant plus intense que la conductibilité de l'air sera plus faible, c'est-à-dire que seront plus rares les petits ions auxquels cette conductibilité est principalement due.

On voit par ce qui précède l'importance que présentent, pour des raisons diverses, les divers éléments que nous avons définis, principalement les densités en volume p, n, P, N des ions petits et gros, positifs et négatifs, ainsi que les conductibilités γ_+ et γ_-.

La première méthode proposée pour l'étude de ces phénomènes est la méthode de déperdition d'Elster et Geitel [1] qui consiste à suivre au moyen d'un électroscope la chute du potentiel d'un cylindre chargé placé dans l'air ambiant. De nombreuses mesures ont été faites par ce procédé très simple à la vérité, mais dont le défaut principal réside dans la difficulté d'interpréter les résultats obtenus et dans leur variabilité avec les conditions de l'expérience, le vent, la protection plus ou moins complète du corps de déperdition, etc.

Une méthode plus rigoureuse est celle indiquée par Ebert, et employée par nous dans nos expériences d'enregistrement avec la modification nécessitée par l'existence simultanée des petits et des gros ions. Elle consiste à faire passer dans le champ électrique d'un condensateur cylindrique un courant d'air assez lent pour que tous les ions d'un signe (il s'agissait uniquement des petits dans les expériences d'Ebert) puissent être recueillis par l'arma-

---

[1] Elster et Geitel, *Physik Zeitsch,* 1899, p. 11. — Ions, électrons corpuscules (*Société de Physique*), p. 185. — Voir aussi *Le Radium,* 1905, p. 121.

www.rcin.org.pl

ture intérieure, reliée à un électroscope. Si U est le volume d'air utilisé, q la quantité d'électricité recueillie, positive, par exemple, grâce à un sens convenable du champ, la densité p des charges portée par les ions positifs est donnée par $\frac{q}{u}$.

C'est la méthode d'Ebert que nous avons utilisée tout d'abord dans nos expériences de la Tour Eiffel. Elle nous a conduits, ainsi que nous l'avons rappelé plus haut, à découvrir dans l'air la présence des gros ions, et à constater en même temps des variations très brusques dans les résultats obtenus à des instants pourtant très rapprochés. Dans ces conditions, des observations isolées ne sont pas suffisantes et seule une méthode d'enregistrement permet de suivre un phénomène aussi rapidement variable.

Nous venons donner aujourd'hui le résultat des recherches que nous poursuivons dans ce sens depuis plus d'un an.

L'appareil dont nous allons donner la description et les résultats de fonctionnement nous semble être au point pour fournir une marche régulière pour l'enregistrement quotidien de courants d'une extraordinaire petitesse, puisque les plus intenses dépassent rarement 10^{-13} ampère.

Nous nous proposons, comme nous l'avons vu, de déterminer le nombre d'ions contenus dans l'unité de volume d'air. Dans ce but, un courant d'air (puisé à l'extérieur) passe dans un condensateur cylindrique C (fig. 55) dont

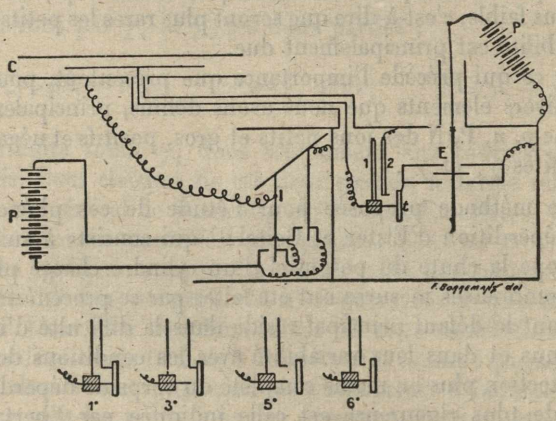


Fig. 55.

l'armature interne communique, par l'intermédiaire de l'aiguille isolée du levier 1, avec l'une des paires de quadrants de l'électromètre E. L'armature extérieure de ce condensateur est reliée à l'un des pôles, le pôle positif, par exemple, d'une batterie de petits accumulateurs dont l'autre pôle est à la cage de l'électromètre et à l'autre paire de quadrants. Dans ces conditions, l'armature intérieure, primitivement en communication avec la cage par le levier 2, reçoit des charges positives qui, se répandant sur le système isolé, font dévier

www.rcin.org.pl

l'électromètre d'une quantité proportionnelle à la charge totale reçue depuis le moment où l'isolement s'est produit.

Le courant d'air est obtenu à l'aide d'un compteur à gaz fonctionnant comme aspirateur et commandé par un petit moteur électrique qui ferme un contact électrique chaque fois que le compteur a fait un nombre déterminé de tours, c'est-à-dire chaque fois qu'un volume d'air U a passé dans le condensateur. Au moment où ce contact se produit, l'*électromètre aura donc dévié d'une quantité proportionnelle au nombre d'ions contenus dans le volume d'air* U, volume bien connu et toujours le même, grâce à l'emploi du compteur; et ceci, quelle que soit la vitesse du courant d'air, à condition, toutefois, qu'elle reste comprise entre des limites que nous déterminerons plus loin.

Le circuit, fermé par ce contact, commande un petit électro-aimant *e*, qui, au moment de la rupture provoque le déclanchement d'un mécanisme qui accomplit les opérations suivantes :

1° Mise à la cage du système isolé par l'intermédiaire du levier 2 qui vient au contact de la touche *t*;

2° Une came voisine inverse aussitôt le champ dans le condensateur, au moyen de l'inverseur I;

3° Le levier 1 quitte la touche *t*, isole, par conséquent l'électrode à laquelle il est relié et cette électrode commence à recevoir des charges de signe contraire à celles qui viennent de s'enregistrer.

Ces trois opérations n'ont duré que deux à quatre secondes au maximum, l'électromètre n'est pas encore revenu au zéro;

4° L'électromètre, toujours à la cage par le levier 2, revient au zéro et ce zéro s'enregistre (30 à 45 sec.);

5° Le levier 2 quitte la touche *t*, isole l'électromètre, puis le levier 1 revient au contact de *t* et l'électrode partage avec l'électromètre les charges qu'elle vient de recevoir. L'électromètre dévie brusquement d'une petite quantité et sa déviation augmente lentement jusqu'à ce qu'un nouveau volume d'air U ait passé dans le condensateur. Un contact se produit de nouveau et la même série d'opérations se répète alternativement pour les ions des deux signes.

L'enregistrement est obtenu par la méthode photographique. Le miroir de l'électromètre forme l'image du filament vertical d'une lampe à incandescence (ou d'une fente éclairée par une petite lampe à essence) sur une fente horizontale derrière laquelle tourne un tambour sur lequel est enroulée une feuille de papier au gélatino-bromure. Sur cette feuille nous obtiendrons donc, de chaque côté d'une série de points représentant le zéro, une série de lignes inclinées correspondant aux charges positives d'un côté et aux charges négatives de l'autre. Leurs extrémités représenteront la variation de l'ionisation de l'atmosphère en fonction du temps et nous donneront, après étalonnage, le nombre d'ions contenus par unité de volume d'air (voir plus loin).

La méthode se prête aussi bien à l'enregistrement des petits ions que des gros ions. L'énorme différence de mobilité de ces centres permet de les séparer facilement et nécessite pour chaque espèce d'ions un condensateur C de capacité différente.

www.rcin.org.pl

Il est facile d'établir la condition pour que tous les ions de mobilité k soient recueillis par l'électrode.

Considérons, dans le condensateur, les ions situés à une distance r de l'axe; ces ions seront entraînés, d'une part par le courant d'air avec une vitesse u_r

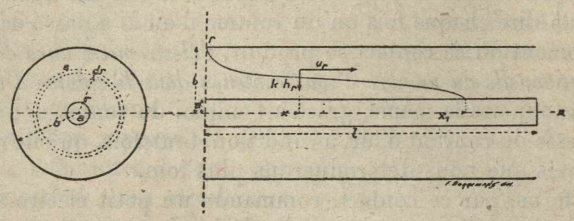


Fig. 56.

parallèle à l'axe et, d'autre part, par le champ, avec une vitesse radiale kh_r, k étant la mobilité de l'ion et h_r le champ électrique à la distance r. Si dx et dr sont les composantes du chemin parcouru par ces ions pendant un temps infiniment petit, dans le sens de l'axe et dans le sens radial, nous aurons :

$$\frac{dr}{dx} = \frac{kh_r}{u_r}. \tag{1}$$

Le champ électrique peut s'exprimer facilement en fonction de la quantité d'électricité qui charge le condensateur; le flux de champ électrique est, en effet, par unité de longueur du condensateur :

$$\Phi = \frac{4\pi Q}{l}$$

l étant la longueur de l'électrode et, si s est la longueur de la circonférence de rayon r, le champ électrique sera, à la distance r de l'axe :

$$h_r = \frac{\Phi}{s} = \frac{4\pi Q}{sl}.$$

Remplaçant h_r par cette valeur dans l'équation (1), il vient :

$$s\,u\,dr = \frac{4\pi\,kQ\,dx}{l}.$$

Or, $su\,dr$ représente le débit élémentaire dD du courant gazeux à travers une couronne de rayon r et de largeur dr et nous avons finalement :

$$dx = \frac{l}{4\pi kQ}\,dD.$$

Si a est le rayon de l'électrode et b celui du cylindre extérieur, le deuxième membre intégré depuis a jusqu'à b représentera la distance x_1, à laquelle

www.rcin.org.pl

arrivera sur l'électrode l'ion situé, à l'origine, au voisinage du tube extérieur; tous les ions qui pénètrent dans le condensateur seront donc recueillis sur cette longueur d'électrode :

$$x_1 = \frac{l}{4\pi k Q}\int_a^b dU = \frac{l}{4\pi k Q} D$$

D étant le débit total du courant d'air.

Tous les ions seront donc recueillis si l'on fait :

$$l > x_1,$$

c'est-à-dire :

$$l > \frac{l}{4\pi k Q} D$$

ou, en remplaçant Q par sa valeur CV (C capacité du condensateur et V son potentiel de charge) :

$$\frac{CV}{D} > \frac{1}{4\pi k}.$$

Par conséquent, pour les petits ions, il faudra prendre :

$$\frac{CV}{D} > \frac{1}{4\pi \times 1,5}, \text{ c'est-à-dire} > 0,053$$

et, pour les gros :

$$\frac{CV}{D} > \frac{3000}{4\pi}, \text{ c'est-à-dire} > 240.$$

Nous avons ainsi une relation nécessaire entre la capacité du condensateur, son potentiel de charge et le débit. Le choix des valeurs à donner à ces trois grandeurs est, de plus, soumis aux conditions suivantes :

Tout d'abord, le potentiel V ne doit pas être trop élevé pour ne pas exiger l'emploi d'un trop grand nombre de petits accumulateurs et le champ électrique ne doit pas atteindre la valeur pour laquelle la décharge par convection de poussières commence à apparaître.

D'un autre côté, quand on produit l'inversion du champ, le régime qui s'était établi est troublé, les ions qui se déplaçaient vers le tube devant revenir vers l'électrode. Le régime nouveau sera complètement rétabli quand l'air aura été renouvelé dans le condensateur et l'erreur maxima qui pourra résulter de ce fait sera négligeable si le rapport du volume du condensateur au volume total d'air utilisé U est assez petit. D'autre part, ce volume U doit être suffisant pour que la sensibilité de l'électromètre puisse avoir une valeur acceptable et le débit D sera déterminé par la condition que le temps qui s'écoule entre deux retours au zéro ne soit pas trop grand. Enfin le volume des condensateurs doit être assez petit pour que la production permanente d'ions à leur intérieur soit faible, par rapport au nombre total d'ions recueillis.

www.rcin.org.pl

Nous avons été ainsi conduits à adopter les valeurs suivantes :

Petits ions. — Volume d'air total U = 500 litres, passant en six à sept minutes (débit 1,4 à 1,2 l par sec.).

Condensateur... { Tube extérieur : diamètre 5 cm; longueur 30 cm.
Électrode : diamètre 1,8 cm; longueur 20 cm.

Capa-cité C = 10.

$\frac{\text{Volume du condensateur}}{\text{Volume d'air total U}}$ de l'ordre de 0,001.

Potentiel de charge (V) minimum : 7,5 V (pour 500 l en six minutes). En prenant 8 à 10 V, on sera à l'abri d'une augmentation possible de la vitesse du moteur.

Toutefois, il ne faudrait pas prendre un potentiel trop supérieur à la limite, car le nombre de gros ions recueillis cesserait d'être négligeable [1].

Gros ions. — Volume d'air total, U = 100 l, passant en six à sept minutes (débit 0,28 à 0,24 l par s).

Condensateur... { Tube ext. : diamètre 7 cm; longueur 130 cm.
Électr. : diamètre 5 cm; longueur 120 cm;

capacité C = 180.

$\frac{\text{Volume du condensateur}}{\text{Volume d'air total U}}$ de l'ordre de 0,02.

Potentiel de charge (V) minimum : 370 V pour 100 l en six minutes et 330 V pour 100 l en six minutes. Il faudra au moins 4 boîtes de petits accumulateurs de 88 à 90 volts chacune, telles qu'on les construit actuellement. Avec ce condensateur, le courant par convection de poussières n'apparaît que bien au-dessus de 600 V.

La période de six à sept minutes convient très bien pour avoir un bon enregistrement, comme on peut le voir par la courbe dont nous donnons la reproduction. Il n'y a pas intérêt à la diminuer : pendant l'inversion du champ, l'électrode doit rester en communication avec la cage de l'électromètre et les ions recueillis sont, par suite, perdus pour l'électromètre; dans notre cas, l'erreur qui en résulte est de l'ordre de $\frac{4}{360}$ à $\frac{4}{420}$, c'est-à-dire de l'ordre de 1 p. 100. Comme, d'ailleurs, l'état troublé que nous signalions tout à l'heure se produit au même moment, on voit que les erreurs systématiques de la méthode seront de l'ordre de :

1 p. 100 pour les petits ions;
et 2 p. 100 pour les gros ions,

précision supérieure à celle que l'on peut attendre de telles mesures.

D'autres causes peuvent introduire des erreurs dans les résultats. Même en

---

[1] Les gros ions sont, au maximum, cinquante fois plus nombreux que les petits et trois mille fois moins mobiles. Le rapport du nombre de gros ions recueillis au nombre de petits ions sera d'environ 1/60, ce qui conduira à une erreur d'environ 2 p. 100 en plus, dont on pourra tenir compte si l'on enregistre simultanément les gros ions et les petits.

www.rcin.org.pl

l'absence d'un courant d'air, la production permanente d'ions dans le condensateur fait dévier l'électromètre; la figure 59 (II) représente la courbe donnée par l'appareil sans courant d'air, pour les petits ions; pour les gros ions, elle est moins importante à cause de la grande capacité du condensateur. Il est nécessaire de remarquer que toute cette «fuite» n'intervient pas en réalité. La mesure a été faite en bouchant l'extrémité du condensateur et l'électrode a recueilli les ions produits dans le volume total du tube. Avec le courant d'air, tant que les ions ne sont pas arrivés dans le champ, l'ionisation de l'air reste normale, la production compensant la recombinaison et, quand les ions sont drainés par le champ vers l'électrode et vers le tube, suivant leur signe, la recombinaison a lieu encore tant que dure la filtration des ions les uns dans les autres, tant qu'ils ne sont pas complètement séparés; si nous considérons les trajectoires des ions situés à l'origine près du tube et près de l'électrode, nous voyons qu'il faudra déduire du volume du condensateur dans lequel la production d'ions n'est pas compensée la région 1 couverte de hachures (fig. 59).

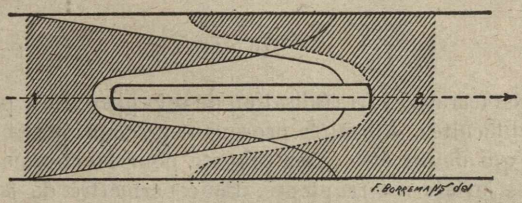


Fig. 57.

D'autre part les ions produits en dehors et à droite (région 2) de la ligne pointillée qui représente la trajectoire des ions qui arrivent à l'extrémité de l'électrode ne seront pas recueillis et nous devons encore exclure de la production mesurée tout ce volume. Une faible partie seulement de cette production permanente aura de l'influence sur les mesures, dans un sens d'ailleurs opposé à la fuite par l'air du conducteur isolé, dans la cage de l'électromètre. Les erreurs qui s'introduiront du fait de cette production permanente seront donc négligeables.

Étalonnage. — Il est intéressant de connaître en valeur absolue soit la charge, soit le nombre d'ions contenus dans l'unité de volume d'air, si l'on veut pouvoir comparer les résultats obtenus dans différents observatoires. L'étalonnage se fait très facilement en se servant du condensateur qui sert à recueillir les ions et dont on a déterminé le coefficient d'influence C de l'armature extérieure sur l'électrode par comparaison avec un condensateur étalon.

Le montage étant fait, et l'armature extérieure du condensateur étant reliée à la cage, si, après avoir isolé l'électromètre, on intercale, à l'aide d'un commutateur, une pile étalon de force électromotrice V (volts) entre cette armature et la cage, une quantité d'électricité CV est libérée sur le conducteur isolé et il se produit une déviation δ de l'électromètre [1].

---

[1] Voir *Le Radium*, mai 1907. L'électromètre à quadrants (mesure des quantités), p. 188.

www.rcin.org.pl

La quantité d'électricité qui correspond à une déviation d'une division sera en unités électrostatiques :

$$\frac{CV}{300\delta}$$

La charge par mètre cube d'air qui correspond à une déviation ε sera :

$$Q = \frac{10}{3}\frac{CV}{\delta U}\varepsilon,$$

U étant exprimé en litres.

La charge d'un ion étant de $3{,}4 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques le nombre d'ions par centimètre cube sera :

$$N = \frac{CV}{300\delta}\frac{1}{U \times 10^3 \times 3{,}4 \times 10^{-10}}\varepsilon$$

ou :

$$N = \frac{10^5}{10{,}2}\frac{CV}{\delta U}\varepsilon.$$

Détails de construction. — La réalisation de cet appareil n'a pas été, au début, sans quelques difficultés, difficultés provenant principalement de la commande de l'aspirateur qui devait être assez robuste pour fonctionner d'une manière continue, et des leviers interrupteurs. Pour permettre de faire l'installation dans une pièce éclairée, ce qui nous a semblé nécessaire pour pouvoir en suivre commodément le fonctionnement, nous avions enfermé l'électromètre et le cylindre enregistreur dans une caisse en bois, comme on le fait pour les oscillographes. Le bois ayant joué à l'humidité, nous avons dû modifier complètement la disposition primitive : la caisse a été construite complètement en métal et de manière à ce qu'elle puisse s'ouvrir entièrement pour permettre une vérification facile de l'électromètre et des leviers; de plus, nous avons trouvé nécessaire d'y adjoindre un dispositif permettant de suivre de l'extérieur les déplacements de l'image au cours de l'enregistrement.

Nous allons décrire l'appareil tel que le construit actuellement la « Compagnie des Compteurs » et tel que le représentent les clichés des figures 58, 60, 62 et 63.

L'électromètre et le cylindre enregistreur sont disposés aux extrémités d'une plate-forme en aluminium fondu, montée sur vis calantes, le tout étant recouvert d'un « capot » en tôle qui porte latéralement la fente éclairée ou la lampe à incandescence dont le miroir de l'électromètre forme l'image sur la fente placée devant le papier photographique. Un miroir incliné à 45° et dont la partie supérieure est à quelques millimètres au-dessous de la fente renvoie une partie de cette image sur une échelle divisée placée à la partie supérieure du capot au-dessus d'un verre rouge.

Électromètre. — L'électromètre est du même type que celui qui a été décrit dans un récent numéro de ce journal par l'un de nous [1]. Le pied a été sup-

---

[1] *Le Radium*, avril 1907, p. 149.

www.rcin.org.pl

primé et remplacé par une petite couronne (fig. 58 et 60); l'électromètre repose par sa plate-forme supérieure sur un support rapporté et démontable sur lequel il est maintenu par trois vis. Des trappes, glissant dans des rainures ménagées dans les pieds de ce support, complètent la cage de l'électromètre.

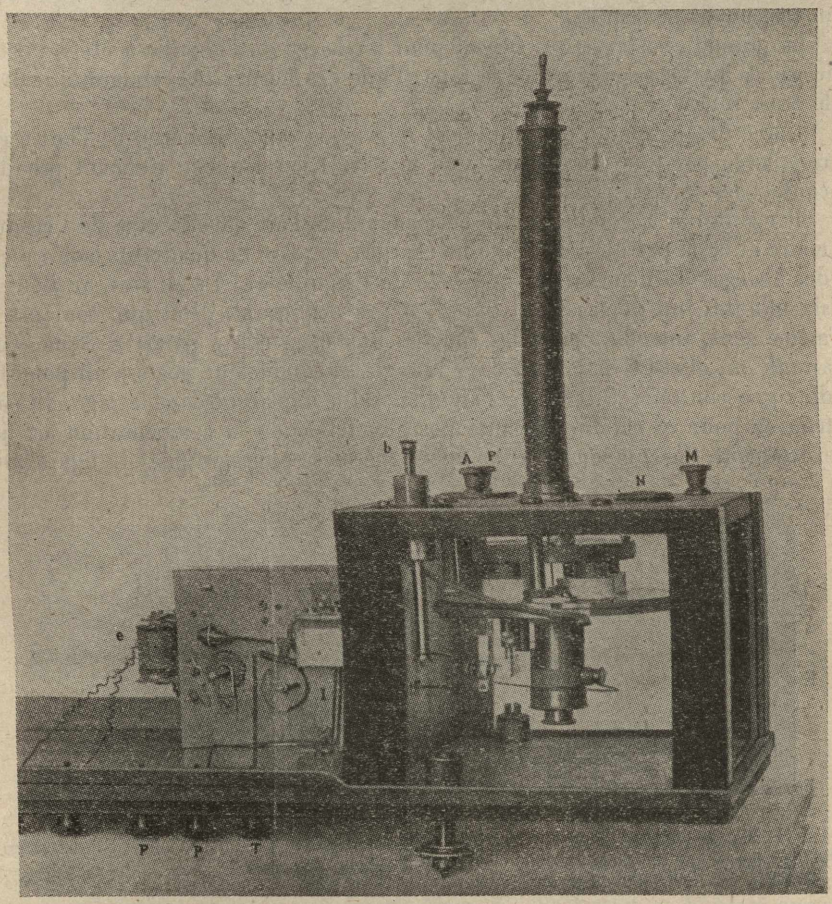


Fig. 58.

La suspension est longue de 17,5 cm environ. Avec une aiguille de 7 cm de diamètre, on peut atteindre facilement le maximum de sensibilité dans le cas des gros ions pour un potentiel de l'ordre de 88 V sur l'aiguille et, dans le cas des petits ions, pour un potentiel de l'ordre de 60 V, ce potentiel variant d'ailleurs avec la capacité des protections. La sensibilité ainsi obtenue est suffisante et, dans beaucoup de cas, il sera nécessaire de la diminuer. On pourra le faire en diminuant le potentiel de charge de l'aiguille ou mieux en changeant l'aiguille si l'on était obligé de trop diminuer son potentiel qui cesserait d'être

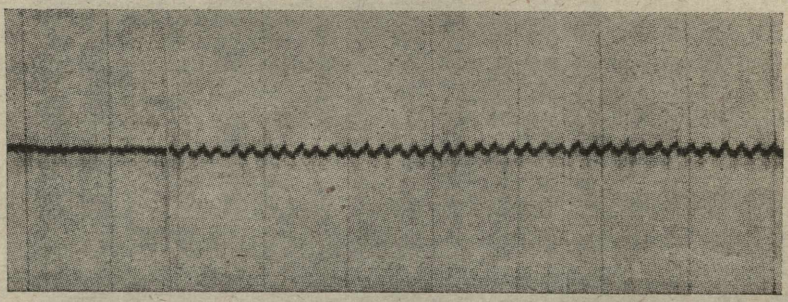
www.rcin.org.pl

grand devant la différence de potentiel entre les quadrants [1]. Avec une aiguille plus petite, l'électromètre ne sera plus à l'amortissement critique. L'amortissement s'obtient, dans ce cas, en disposant à la partie inférieure de l'équipage une palette d'aluminium ou de mica tournant dans le tube inférieur *a* qui est cloisonné et chargé au même potentiel que l'aiguille [2]. On pourrait aussi mettre un fil plus gros.

La grande résistance qui servait pour la charge de l'aiguille a été reportée ici sur la partie supérieure de la cage; l'une des bornes (A) communique avec le tube inférieur *a*.

L'une des paires de quadrants est reliée à la cage. La borne de l'autre est remplacée par une pièce métallique massive *t* sur laquelle viennent prendre contact les leviers.

Par suite de la conductibilité permanente de l'air dans la cage de l'électromètre et de la présence de l'aiguille chargée, la paire de quadrants isolée reçoit des charges du même signe que celle de l'aiguille et, il s'en suit, au bout de six minutes, un déplacement qui n'est pas négligeable [3] et qui, toujours de même sens, introduit dans les courbes une dissymétrie parasite. Nous avons annulé cet effet en disposant dans la cage un conducteur porté à un potentiel de signe contraire à celui de l'aiguille. En le déplaçant dans la cage, on peut trouver pour ce conducteur une position telle que la compensation ait lieu exactement. (Ce compensateur ne figure pas sur la photographie). La figure 59(I)



I. Pas de courant d'air. Pas de champ sur le condensateur.

II. Pas de courant d'air. Champ sur le condensateur. Production permanente d'ions dans le tube.

Fig. 59.

---

[1] Avec l'aiguille de 7 centimètres, l'électromètre donne environ 50 centimètres par volt pour 88 volts sur l'aiguille. Pour 30 volts sur l'aiguille la sensibilité est d'environ 18 centimètres par volt. La déviation maxima étant de 6 centimètres, le potentiel correspondant sera 1/3 volt; son rapport à celui de l'aiguille sera donc 1/90.

[2] Le tube amortisseur *a*, qui figure sur le cliché, est d'un modèle plus ancien que celui décrit dans le mémoire cité. Il n'est pas enveloppé d'un autre tube relié à la cage et il résulte que la fuite dont nous parlons plus loin est plus grande avec cet ancien modèle.

[3] Surtout au laboratoire de l'École de Physique et de Chimie où l'air est plus actif que partout ailleurs. Le déplacement était de 2 à 3 millimètres.

www.rcin.org.pl

donne une courbe obtenue en faisant fonctionner l'appareil sans courant d'air et sans champ sur le condensateur.

L'électromètre est toujours muni d'un niveau N qui sert pour le réglage de l'horizontalité de l'appareil. On amène l'image au zéro de l'échelle en faisant tourner la suspension à l'aide de deux fils que l'on attache aux bras de la clef [1].

Leviers interrupteurs. — Le mécanisme qui fait fonctionner les leviers interrupteurs est placé en dehors de la cage de l'électromètre. Ce mécanisme commande trois cames, dont une seule, la came de l'inverseur, est visible sur la photographie (fig. 58). Les deux autres, placées derrière, commandent chacune un petit levier monté sur ressort et relié par un fil métallique au levier interrupteur correspondant. Le remontage de ce mécanisme se fait par une ouverture fermée par un petit volet.

Les leviers interrupteurs sont fixés sur la couronne inférieure de l'électromètre (fig. 60), de sorte que l'on peut enlever à la fois l'électromètre et ces leviers

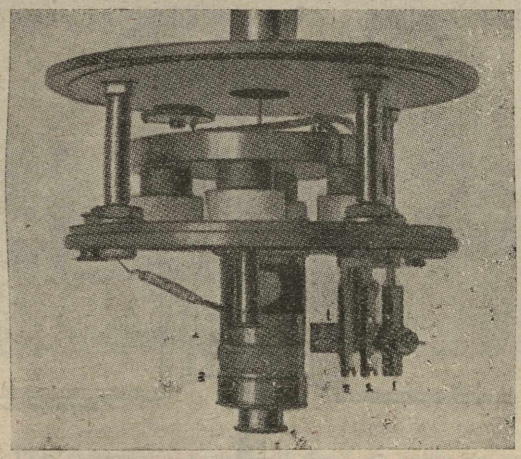


Fig. 60.

(après avoir détaché les fils), pour les visiter. Les pointes sont en platine et viennent appuyer sur des grains d'or. Pour que ces leviers ne libèrent aucune charge sur l'électromètre au moment de leur fonctionnement, il faut que le départ se fasse sans frottement. Cette condition a été réalisée en les montant sur des ressorts larges et en s'arrangeant de manière à ce que les fils les tirent bien normalement. La figure 59 (I) montre que le fonctionnement de ces leviers n'introduit aucune perturbation appréciable.

L'aiguille du levier 1 est fixée dans un petit mandrin américain isolé à l'ambroïde et muni d'un bouton de serrage pour recevoir le fil qui le relie à l'électrode par l'intermédiaire de la tige *b* (fig. 58). Le levier 2 est placé à côté

---

[1] Voir pour le réglage le mémoire déjà cité.

www.rcin.org.pl

du précédent; son aiguille, serrée à l'aide d'une vis, peut se régler et se démonter facilement. Un troisième levier identique (3), commandé par une manette *l* (fig. 64) placée à proximité de la main, du côté du cylindre enregistreur, sert à mettre le conducteur isolé à la masse ou à l'isoler à volonté.

Inverseur. — La troisième came commande l'inverseur I qui est visible sur la photographie (fig. 58) et qui est constitué par deux lames isolées dont l'extrémité, munie d'un grain d'or, vient s'appuyer sur des aiguilles à pointe de platine. Les aiguilles sont reliées à la batterie par l'intermédiaire des bornes PP; l'une des lames sera reliée à la cage par l'intermédiaire d'une petite bande très étroite de papier d'étain, serrée entre deux pinces. Cette bande joue le rôle de fusible et évite la détérioration des pointes en cas de court-circuit entre le condensateur et l'appareil.

Condensateurs. — Ces condensateurs sont formés de tubes de laiton concentriques dont nous avons déjà donné les dimensions. L'électrode est supportée par une ou deux tiges fixées dans des bouchons d'ambroïde. Ces bouchons sont assujettis dans un tube de garde, dont la figure 61 donne le détail, maintenu

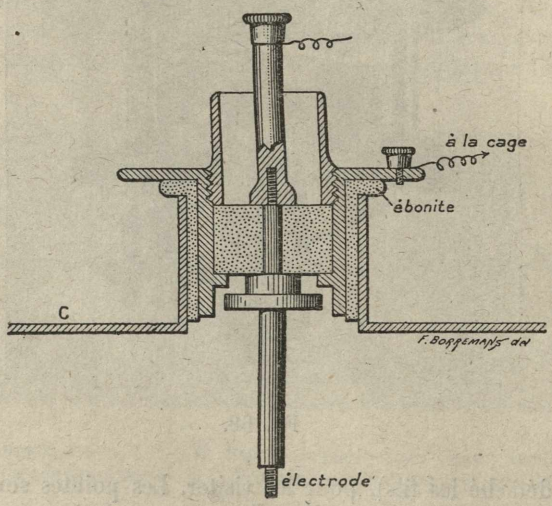


Fig. 61.

au même potentiel que la cage de l'électromètre et que les écrans de protection, potentiel initial de l'électrode.

L'air doit être puisé à l'extérieur. La prise d'air se fait à l'aide d'un tube dépassant le mur d'environ 30 à 40 cm à l'extérieur et muni d'une toile métallique pour arrêter les filaments végétaux qui, s'introduisant dans les condensateurs, établiraient une fuite entre le tube et l'électrode. Le tout doit être incliné vers l'extérieur pour éviter l'introduction d'eau en cas de pluie.

Il faut éviter, à l'entrée, tout champ électrique qui ferait disparaître une partie des charges que l'on veut mesurer. Il sera bon de réunir ces tubes au sol par

www.rcin.org.pl

un fil. L'appareil enregistreur est alors chargé; on l'isole à l'aide de crapaudines d'ébonite.

Canalisation électrique. — Le fil qui relie l'électrode du condensateur employé à l'électromètre doit être protégé par un écran métallique contre les perturbations extérieures. Ce fil (fil de manganine) est tendu à l'intérieur d'un tube de laiton entre deux bouchons d'ambroïde maintenus aux extrémités par des épaulements. Le fil est serré dans de petits mandrins qui portent un bouton de serrage servant de borne. Les joints sont protégés aux extrémités par des raccords composés de deux bouts de tube auxquels sont soudés à 45° des collerettes circulaires (fig. 62). On relie les bornes par un fil, après avoir enfilé

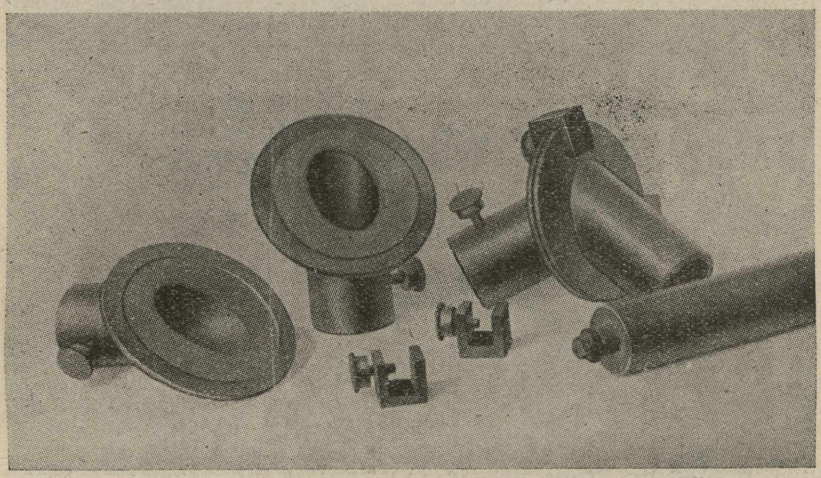


Fig. 62.

les raccords que l'on rapproche ensuite et dont on serre les collerettes l'une contre l'autre avec de petites presses. On peut ainsi raccorder ces tubes entre eux ou avec les appareils, suivant des angles variant entre 90 et 180°, et mettre les isolants complètement à l'abri des poussières.

Aspirateur. — Le courant d'air est obtenu au moyen d'un compteur à gaz du type «Duplex» de 20 becs, fonctionnant en surcharge, et relié aux condensateurs par un tube de caoutchouc. Un petit moteur électrique commande, par l'intermédiaire de deux vis sans fin successives tournant dans un bain d'huile, une chaîne qui attaque l'axe du compteur. Le pignon du moteur fait environ 5 à 6 tours par minute. L'axe du compteur porte deux pignons dont le rapport est 5 et qui correspondent aux débits nécessaires pour les deux espèces d'ions. Le contact électrique est donné par un mobile commandé directement par la réduction de vitesse du moteur. Il se produit tous les 35 tours du compteur pour les gros ions et tous les 7 tours pour les petits. Le volume d'air débité par tour étant de 14,3 l, le volume U est donc respectivement 500,5 et 100,1 l. soit avec une approximation plus que suffisante 500 et 100 l.

www.rcin.org.pl

Si l'on disposait de deux électromètres enregistreurs, l'un pour les petits ions, l'autre pour les gros, il y aurait avantage à n'employer qu'un seul moteur, commandant les deux compteurs, l'un de 20 becs, l'autre de 5, la même chaîne s'enroulent successivement sur leurs roues dentées.

Éclairage et cylindre enregistreur. — Sur le côté gauche du capot, se trouve le dispositif d'éclairage, que l'on peut déplacer verticalement pour régler la hauteur de l'image. Cette hauteur se règle facilement en observant l'image réfléchie sur l'échelle; l'extrémité de cette image doit arriver sur un trait longitudinal si le réglage du miroir à 45° est bien fait.

Le cylindre enregistreur est fixé dans un support spécial qui se glisse à l'extrémité de la plate-forme (fig. 63). Il est recouvert d'un chapeau cylin-

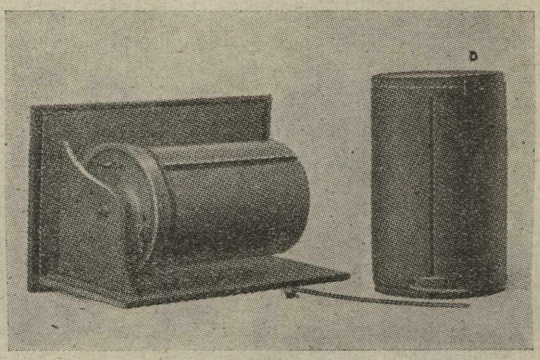


Fig. 63.

drique D, muni d'une fente, qui se fixe à l'aide de deux goupilles à ressort (*r*, *r*). Sur ce chapeau, tourne à frottement doux un deuxième cylindre fendu, commandé de l'extérieur par une came et servant d'obturateur.

Le cylindre fait un tour en vingt-six heures; le papier se fixe au moyen d'une barrette que l'on amène, avant de placer le chapeau D, devant la vis *f* servant de repère.

Pour faciliter la lecture des courbes, nous avons trouvé commode de marquer les heures sur le papier photographique. Pour cela, nous avons placé à l'intérieur de l'appareil une lampe à incandescence, commandée par une horloge, et qui, s'allumant toutes les heures pendant quelques secondes, donne une série de traits noirs verticaux. La figure 65 est la reproduction en vraie grandeur d'une partie de l'une d'entre elles. La partie supérieure correspond aux ions positifs (aiguille chargée négativement).

La vue d'ensemble (fig. 64) nous dispense de nous étendre sur le montage. Elle représente l'appareil tel qu'il a fonctionné à l'École de physique et de chimie dans un des nouveaux laboratoires. Pour les essais, nous n'avons pas cru nécessaire de puiser l'air à l'extérieur; l'air était pris dans la salle, la fenêtre étant ouverte. Les deux condensateurs sont placés ici bout à bout, de sorte que, sans les démonter, on pouvait passer facilement des gros ions aux petits.

www.rcin.org.pl

Le montage terminé, il est nécessaire de faire les vérifications suivantes :

1° Les deux bornes P *étant réunies par un fil* (condensateur non chargé), l'image ne doit pas se déplacer quand on a isolé l'électromètre au moyen de la manette *l*. Si l'image ne conserve pas une position stable, il y a un défaut de protection du système isolé (mauvais contact ou oubli d'une connection ; on retrouvera le défaut en touchant avec la main les différentes parties de l'appareil :

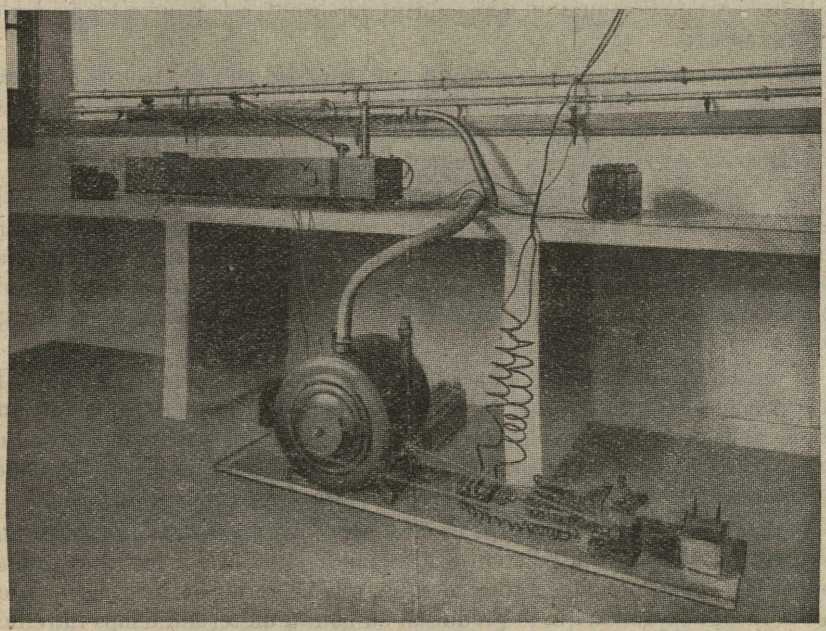


Fig. 64.

il se produira, en général, une déviation lorsque l'on touchera la partie intéressée par le mauvais contact). Si l'image se déplace lentement, il y a un défaut d'isolement ou la compensation de la fuite de l'aiguille n'est pas exacte ; dans le premier cas, la déviation change de sens quand on change le signe de la charge de l'aiguille ; dans le deuxième cas, elle ne change pas de sens. Un défaut d'isolement, si ce n'est pas un contact franc, produit une déviation, car il agit comme conducteur électrolytique. On retrouvera ce défaut par éliminations successives. Il y a avantage à employer du fil nu pour relier ensemble les fils protégés ; le coton ou la soie teinte qui recouvrent les fils venant en contact avec les raccords donneront lieu à des forces électro-motrices électrolytiques ; avec le fil nu, on aura un contact franc.

En touchant l'électrode avec le doigt ou en intercalant entre les deux bornes P, c'est-à-dire entre la cage et le tube du condensateur, une pile de 1 ou 2 V, l'image dévie d'une certaine quantité et la déviation doit rester fixe. Si la déviation ne se produit pas ou si l'image revient au zéro, il y a une fuite.

www.rcin.org.pl

2° Après avoir remis la manette *l* à la masse, intercalé la batterie de charge entre les bornes P et isolé de nouveau l'électromètre, on déclanche le mécanisme. Il ne doit résulter du fonctionnement des leviers qu'un déplacement très faible de l'image, correspondant à l'ionisation spontanée du gaz immobile dans le condensateur et, dans ce cas, le déplacement, symétrique pour les deux signes, aura doublé au bout d'un temps égal à celui pendant lequel le mécanisme vient de défiler.

Dans le cas où l'on aura un déplacement important, cela pourrait tenir à plusieurs causes;

Un déplacement en sens inverse du sens dans lequel l'électromètre devrait se déplacer sous l'influence des ions [1] proviendrait d'une baisse de tension de la batterie : ceci ne prend d'importance que pour les gros ions si la batterie est mauvaise ou si l'on s'en sert immédiatement après sa charge [2].

Un déplacement rapide dans le bon sens, ne se produisant qu'après le fonctionnement des leviers et ne se produisant pas quand on isole l'électromètre au moyen de la manette *l*, tiendrait à ce que le condensateur n'est pas complètement chargé au moment où l'électrode s'isole, soit par suite d'un mauvais contact sur les conducteurs ou aux leviers, soit par suite d'un mauvais réglage des cames.

Si un déplacement rapide se produisait, dans le bon sens, quand on isole l'électromètre et chaque fois qu'on l'isole, ce déplacement serait dû à une fibre végétale qui relierait le tube à l'électrode et qui aurait déjà introduit des perturbations dans les premiers essais. Le seul remède est de démonter le condensateur et d'en passer toutes les parties dans une flamme.

Nous rappellerons d'ailleurs qu'en électrostatique *tous les contacts doivent être excellents* et, pour une installation fixe comme celle-ci, il y a intérêt à souder toutes les connexions faites entre des fils qui ne sont pas bien serrés sous des bornes; l'oxydation qui se produisait au bout d'un certain temps introduirait des forces électromotrices de nature électrolytique et variables qui amèneraient des troubles sérieux dans le fonctionnement des appareils, les variations du potentiel se faisant sentir *en valeur absolue* [2].

---

[1] Sens que l'on reconnaît immédiatement si l'on approche du condensateur une substance radio-active.

[2] Nous employons des batteries de petits accumulateurs construites par M. J. Butaud. Les électrodes sont l'une au-dessus de l'autre, dans des tubes de verre placés dans un bac de verre contenant de l'huile de vaseline. Outre leur prix peu élevé, elles ont l'avantage de pouvoir se charger directement sur 110, 120 volts sans résistance et de se désulfater rapidement par une charge un peu prolongé. Leur résistance intérieure de 10 à 12 ohms les met à l'abri d'un court-circuit accidentel. Leur capacité est de 1,5 amp.-heure. On peut les laisser en service pendant plus d'un mois sans avoir besoin de les recharger. Les électrodes étant visibles la surveillance des batteries est très facile.

[3] Toutes ces vérifications de montage et ces remarques s'appliquent à toutes les mesures électrostatiques. C'est pour cette raison que nous avons insisté sur ce point, pensant être utiles à beaucoup. Nous avons indiqué les perturbations que nous avons rencontrées au cours des essais, un certain nombre d'entre elles auront peu de chance de se produire en fonctionnement normal.

www.rcin.org.pl

Le montage étant vérifié, il reste à régler la sensibilité de manière à ce que la courbe reste toujours dans les limites du papier.

Il est bon de faire l'étalonnage aussi souvent que possible, au besoin chaque jour, au moment où l'on change la feuille. On simplifie cet étalonnage en

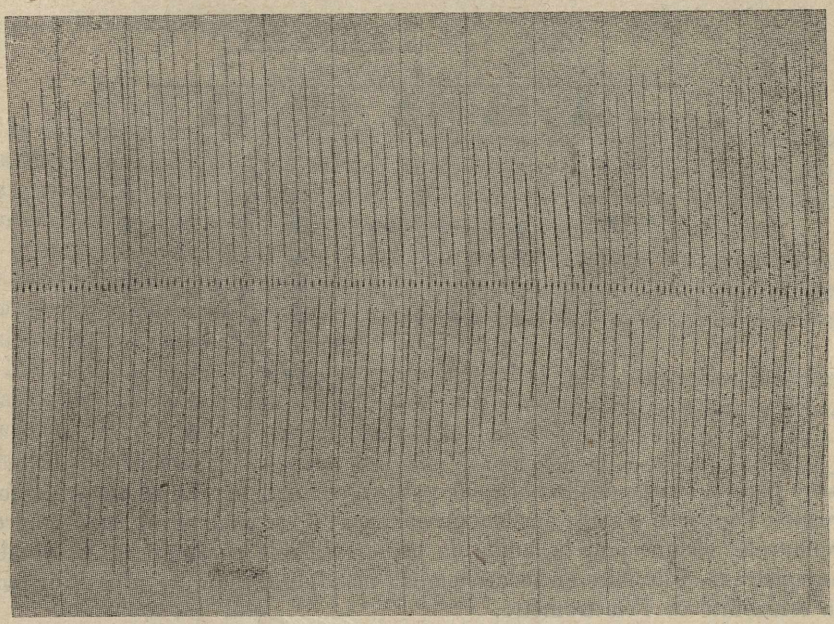


Fig. 65.

intercalant entre la batterie et l'appareil un commutateur à trois directions bien isolé, monté comme l'indique la figure 66. Les opérations à effectuer sont alors très simples.

On arrête le courant d'air, puis on met l'électromètre à la cage (au moyen de *l*) on ferme l'obturateur, on remonte le mécanisme, et on enlève le cylindre enregistreur sur lequel on met une nouvelle feuille. On le replace dans l'appareil et on ouvre l'obturateur.

On place la manette du commutateur en *m*, on isole l'électromètre après avoir ramené l'image au zéro si elle s'était déplacée, et l'on fait passer rapidement cette manette sur le plot *e*, pour intercaler l'élément étalon; on laisse la déviation s'enregistrer pendant quinze à vingt secondes. On remet l'électromètre à la cage et, quand il est revenu au zéro, on l'isole de nouveau et on ramène brusquement le commutateur de *e* en *m*; la déviation est de sens inverse et on la laisse s'enregistrer. On remet encore l'électromètre à la cage pour faire passer le commutateur sur le plot *p*, pour intercaler la batterie, et on isole définitivement l'électromètre. Il reste ensuite à faire passer le courant d'air et à assurer le graissage du moteur. Une deuxième vérification de ce graissage

www.rcin.org.pl

dans la journée est suffisante. Au bout de peu de temps, ces opérations d'étalonnage se font machinalement.

L'installation telle que nous venons de la décrire est actuellement réalisable dans tous les observatoires météorologiques où l'on dispose du courant néces-

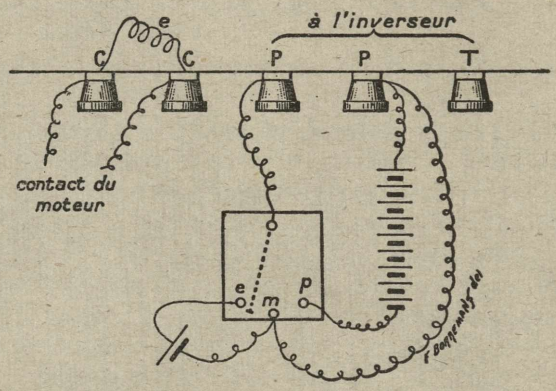


Fig. 66.

saire pour la charge des batteries de petits accumulateurs. Le montage une fois réalisé, l'appareil n'exige aucune surveillance; il est simplement nécessaire de renouveler chaque jour la feuille de papier sensible enroulée sur le cylindre enregistreur et de faire en même temps l'inscription indiquée plus haut pour la sensibilité de l'électromètre.

Le même appareil se prête à des mesures très diverses dont les plus importantes sont les suivantes :

1° Densités en volume des petits ions positifs et négatifs par le procédé qui vient d'être décrit;

2° Charge totale de l'air atmosphérique par unité de volume :

$$\rho = P + p - (N + n)$$

en aspirant le volume U d'air à travers un cylindre de Faraday contenant du coton qui absorbe tous les ions présents et en reliant ce cylindre à l'électromètre au lieu de l'électrode utilisée dans les mesures précédentes [1];

3° Mesure directe des conductibilités γ_+ et γ_- par le procédé indiqué par M. Gerdien [2] : on fait passer dans le condensateur cylindrique utilisé pour les petits ions un courant d'air dans des conditions de débit et de charge du condensateur telles que la saturation ne soit obtenue pour aucune des

---

[1] Nous avons fait construire par la Compagnie des Compteurs un modèle de cylindre de Faraday adapté à ce genre de mesures.

[2] H. Gerdien, *Physikalische Zeitschrift*, 1905, p. 800; *Radium*, 1904, p. 395.

www.rcin.org.pl

catégories d'ions présentes. Il est facile de montrer que, dans ces conditions, le courant recueilli par l'électrode est, pour un sens convenable du champ :

$$i = 4\pi CV(PK_1 + pk_1) = 4\pi CV\gamma_+$$

et pour le sens inverse du champ :

$$i = 4\pi CV(NK_2 + nk_2) = 4\pi CV\gamma_-$$

Si par conséquent les interruptions sont commandées par une horloge de manière à se produire à intervalles de temps réguliers, au lieu de correspondre au passage d'un volume déterminé d'air, les déviations de l'électromètre dans les deux sens sont respectivement proportionnelles à γ_+ et γ_-.

1° Enfin l'appareil peut être utilisé pour l'étude continue des phénomènes de conductibilité gazeuse en fonction du temps, tels que la conductibilité d'une masse de gaz enfermée dans un récipient clos, ou la destruction spontanée des substances radioactives.

Nous espérons que l'emploi d'un semblable appareil, dans des stations placées en différents points du globe permettra de réunir, avec le minimum d'efforts, des résultats de grande importance tant au point de vue de l'électricité et du magnétisme terrestre qu'à celui des condensations atmosphériques.

J. Z. 931709. 9 A

www.rcin.org.pl

www.rcin.org.pl

III. THÉORIE CINÉTIQUE

www.rcin.org.pl

www.rcin.org.pl