



HAL
open science

Utilisation rationnelle des électromètres a feuille mobile

L. Benoist

► **To cite this version:**

L. Benoist. Utilisation rationnelle des électromètres a feuille mobile. J. Phys. Theor. Appl., 1907, 6 (1), pp.604-615. 10.1051/jphystap:019070060060400 . jpa-00241240

HAL Id: jpa-00241240

<https://hal.science/jpa-00241240>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

UTILISATION RATIONNELLE DES ÉLECTROMÈTRES A FEUILLE MOBILE ;

Par M. L. BENOIST.

Les électroscopes à feuilles mobiles sont encore généralement considérés comme des appareils qualitatifs sensibles et commodes, mais comme des instruments de mesure très imparfaits.

Ils ont pour principaux avantages la simplicité de construction, la facilité de déplacement, même tout chargés, l'isolement pratiquement parfait, grâce aux isolants modernes tels que la diélectrine, la faible capacité, la sensibilité, la propriété de fonctionner comme appareils idiostatiques ou hétérostatiques à volonté, etc.

On leur reproche par contre la fragilité, la difficulté de préparation, d'installation et de renouvellement des feuilles mobiles, le défaut de comparabilité, la lecture difficile et incertaine des angles de divergence, l'absence de proportionnalité entre les angles et les charges ou les potentiels sur toute l'étendue de l'échelle, etc.

Néanmoins ces appareils ont rendu et continuent à rendre d'importants services, soit dans l'étude de l'électricité atmosphérique, soit dans celle des rayons X et des substances radioactives.

Il était donc intéressant de poursuivre dans une étude méthodique la suppression de leurs défauts ; c'est ce qui m'a paru aisément possible, soit par l'application de certains dispositifs pratiques de forme et de construction, soit par l'utilisation de certaines propriétés fondamentales que la théorie fait prévoir, et que l'expérience vérifie très exactement. Ainsi employés, les électromètres à feuilles mobiles peuvent rendre les meilleurs services dans un grand nombre de mesures électriques.

I. — DISPOSITIFS PRATIQUES.

Feuille mobile. — Il convient d'abord de constituer l'organe mobile par une feuille *unique* (d'or ou d'aluminium selon les cas). On obtient ainsi le maximum de sensibilité, en même temps que de simplicité dans la construction et de facilité dans la lecture des angles.

Cette feuille, dont les dimensions et le poids jouent un rôle qui sera défini plus loin, ne doit pas être collée, mais fixée de façon

amovible, permettant de la retirer et de la replacer aisément dans une position toujours identique, et sans aucun risque d'altération. On obtient ce résultat par l'emploi d'une languette d'acier dont l'élasticité maintient la feuille serrée contre une plaque métallique isolée, et dont le bord inférieur définit son axe de rotation ⁽¹⁾.

La feuille doit être découpée très nettement, suivant un gabarit rectangulaire de dimensions déterminées, telles que $6^{\text{cm}} \times 0^{\text{cm}},7$ par exemple ⁽²⁾.

Plaque fixe isolée. — La plaque métallique et isolée qui doit porter la feuille mobile peut être de mêmes dimensions que celle-ci, ou de dimensions beaucoup plus grandes, telle qu'un disque de 7 centimètres de diamètre, parallèle à la paroi latérale de la cage et porté par une tige traversant le bouchon isolant. Si la première forme permet à l'angle de divergence de croître presque jusqu'à 180°, la seconde est pratiquement plus avantageuse, car, tout en limitant la déviation maximum à 90°, elle empêche toute déviation latérale de la feuille, et la maintient absolument rectiligne sous n'importe quel angle, grâce au *champ uniforme* qui existe au départ entre le disque et la paroi, le pourtour de ce disque jouant en quelque sorte le rôle d'anneau de garde.

Cylindre récepteur. — Il convient de remplacer à la partie supérieure de la tige isolée le bouton classique par un petit cylindre métallique un peu plus profond que large, et dans lequel on pourra décharger un petit corps électrisé tel qu'une sphère ou un plan d'épreuve. Ce cylindre n'aurait, il est vrai, un *pouvoir captant* égal à l'unité, pour le corps électrisé que l'on y plonge à fond, qu'à la

(1) Pour placer ou retirer la feuille, il suffit de coucher l'électromètre; la plaque isolée étant horizontale, on glisse sous la partie supérieure de la languette, pour la soulever, un petit coin tel qu'un bois d'allumette taillé en biseau; on dépose la feuille d'or sur la plaque, et, après lui avoir donné la position voulue, on laisse retomber la languette en retirant le coin.

(2) Le tour de main le plus avantageux consiste à insérer la feuille d'or ou d'aluminium à l'intérieur d'une feuille de papier mousseline doublée, sur laquelle on trace au crayon le gabarit voulu; le découpage se fait à la règle, sur un carton uni et épais, au moyen d'une lame mince et fraîchement aiguisée telle que celle d'un grattoir. La même lame sert à détacher la feuille d'or de ses enveloppes protectrices, en évitant soigneusement la plus petite déchirure; on la conserve dans une enveloppe de papier fort non glacé (papier Japon), repliée à peu près comme les enveloppes de paquets d'aiguilles à coudre. Sur cette enveloppe on inscrit le *numéro d'ordre*, les *dimensions* et le *poids* de la feuille: pour manier la feuille, on se servira soit d'une pince spéciale en bois (pince des batteurs d'or), soit d'une lame large et très mince, telle que le couteau spécial des doreurs.

condition d'avoir une hauteur très grande, et par suite peu commode; mais, en se contentant d'une assez faible hauteur, par exemple égale à une fois et demie le diamètre, il suffira de déterminer une fois pour toutes, avec l'appareil étalonné et gradué, la valeur exacte du *pouvoir captant* de ce cylindre (telle que 0,95 pour un cylindre dont la hauteur atteint à peine le diamètre).

Cage. — La cage sera naturellement métallique (l'antique cloche de verre est depuis longtemps déjà abandonnée), avec deux fenêtres en verre conducteur, ou verre jaune à l'argent. La forme cubique, la plus simple à construire, offre certains avantages théoriques et pratiques. D'autres formes peuvent être utiles dans certains cas, comme on verra plus loin.

L'addition d'un disque métallique mobile, parallèle au disque isolé, mais rattaché à la paroi latérale de la cage, permet de modifier entre d'assez larges limites la capacité de l'appareil, ce qui est souvent utile, et aussi de la régler, au moment de l'étalonnage, à une valeur déterminée et simple, telle que 10 centimètres, correspondant à une distance donnée des deux disques⁽¹⁾.

Lecture des angles. — La simple projection de la feuille mobile sur une division qui ne saurait être dans le même plan entraîne des erreurs de parallaxe; pour les éviter, certaines combinaisons optiques ont été utilisées par divers auteurs : c'est tantôt un œillette fixe, tantôt un miroir plan qui, placé contre la vitre antérieure ou même constitué par celle-ci, forme, d'une division convenablement placée, une image virtuelle dans le plan même d'écartement de la feuille mobile; ce système n'est guère applicable qu'aux petits angles, sinon son emploi se complique.

Il m'a paru plus simple de conserver la division circulaire réelle, parallèle au plan de divergence, et d'éviter toute erreur de parallaxe par un alignement optique qui assure un centrage parfait et une position invariable de l'œil. Cet alignement est constitué par l'intersection de deux *plans rectangulaires* de visée simultanée : l'un, *horizontal*, passe par le bord supérieur du quadrant évidé qui porte les divisions et par le bord inférieur de la languette d'acier qui retient la feuille d'or; l'autre, *vertical*, qui est le plan même de la face antérieure du disque isolé, ferme en même temps ce même

(1) Ces changements de capacité laissent rigoureusement invariable la courbe de voltage.

quadrant. L'œil, soit libre, soit armé d'une lunette viseur, se place très aisément sur la ligne de visée ainsi définie, qui passe par l'axe de rotation de la feuille mobile en même temps que par le centre de la division circulaire.

On peut ainsi répondre de $1/2$ et même $1/4$ de degré dans la lecture des angles à l'œil nu, et de $1/10$ de degré en employant un viseur.

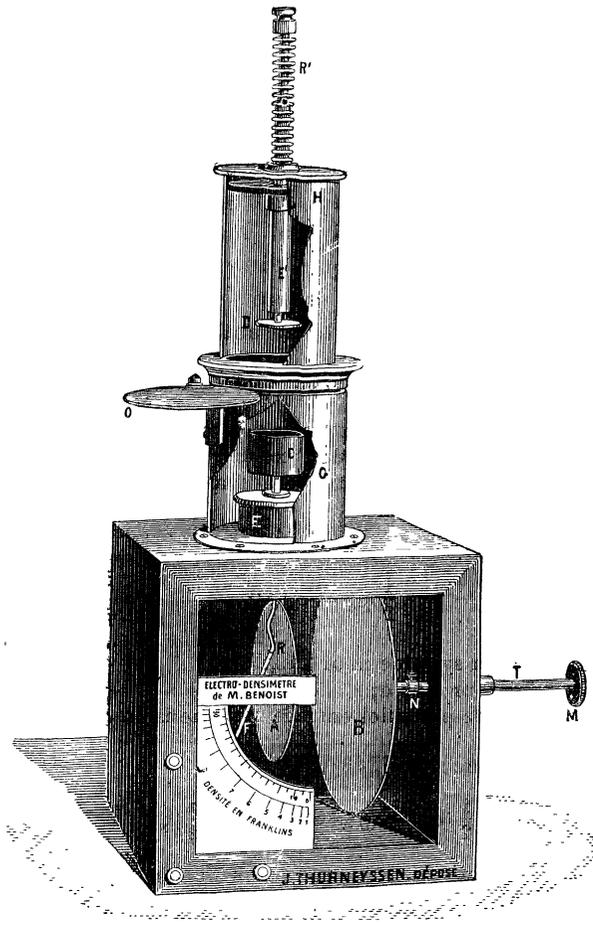


FIG. 4. — Electrodensimètre.

C'est l'ensemble de ces dispositifs pratiques que je me suis proposé de réaliser dans le modèle d'électromètre à feuille mobile que

représente la *fig. 1* sous le nom d'électro-densimètre, à cause de la disposition complémentaire qui permet, avec cet appareil étalonné et gradué, de mesurer d'une façon précise les densités électriques, en se servant du disque d'épreuve D, mobile, isolé et protégé électriquement (1).

II

Une formule suffisamment approchée de l'électromètre à une feuille mobile s'obtient aisément, et permet de prévoir certaines propriétés fondamentales que l'expérience vérifie très exactement.

Il suffit d'exprimer que, lorsque la feuille mobile s'élève d'un angle α , le travail négatif effectué par la pesanteur est égal au travail positif accompli par les forces électriques agissant sur ce conducteur en mouvement, travail égal lui-même à l'accroissement correspondant d'énergie électrique du système (celui-ci étant supposé en communication avec une source à potentiel constant).

Le travail négatif effectué par la pesanteur est exprimé par :

$$ph = lp \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right);$$

p , poids de la feuille, à partir de l'axe de rotation;

l , sa longueur à partir de l'axe de rotation;

h , élévation de son centre de gravité.

L'accroissement d'énergie électrique correspondant a pour expression :

$$\frac{1}{2}(c_\alpha - c_0)V^2;$$

c_α , capacité du système pour l'angle α ;

c_0 , capacité pour $\alpha = 0$;

V , différence de potentiel entre le système isolé et la cage.

La formule est donc :

$$\frac{1}{2}(c_\alpha - c_0)V^2 = pl \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right);$$

elle permet de prévoir le rôle du poids et des dimensions de la feuille mobile.

1° *Influence du poids de la feuille.* — Dans un même électromètre, les dimensions de la feuille mobile étant constantes, la différence de

(1) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. 140, 1905, p. 1106.

potentiel V qui correspond à un angle donné α est proportionnelle à la racine carrée du poids p de cette feuille ou, ce qui revient au même, à la racine carrée de son poids spécifique superficiel.

Cette propriété se vérifie expérimentalement avec une précision pratiquement parfaite.

J'ai substitué par exemple l'une à l'autre, dans le même électrodensimètre, deux feuilles d'aluminium battu découpées dans le même feuillet, de même longueur ; mais l'une, 4 fois plus *large* que l'autre, était repliée 4 fois sur elle-même pour être ramenée aux mêmes dimensions extérieures.

$$\begin{array}{l} \text{Poids de la feuille quadruple} = 2^{\text{mg}},46 ; \\ \text{— simple} = 0^{\text{mg}},6. \end{array}$$

La courbe de voltage fut établie successivement pour chacune de ces feuilles, en reliant le système isolé de l'électrodensimètre à l'un des pôles d'une batterie d'accumulateurs (dont le voltage était vérifié boîte par boîte), la cage communiquant avec l'autre pôle ⁽¹⁾.

Voici, sur les deux courbes, les potentiels relevés de 15° en 15°, et exprimés en unités C. G. S. ($u = 300$ volts) :

Déviatiou	V (feuille quadruple)	V' (feuille simple)	Rapport $\frac{V}{V'}$
15°	3 ^u	1 ^u ,5	2
30°	4 ,75	2 ,3	2,06
45°	6 ,45	3 ,05	2,02
60°	7 ,8	3 ,9	2
75°	10 ,2	5 ,05	2,02
90°	16 ,3	8 ,2	1,99

$$\text{Moyenne générale du rapport } \frac{V}{V'} = 2,016.$$

$$\text{Les poids donnent : } \sqrt{\frac{p}{p'}} = 2,023.$$

Autre exemple, fourni par deux feuilles de mêmes dimensions, l'une de platine, l'autre d'aluminium :

$$\begin{array}{l} \text{Feuille de platine} \dots\dots\dots p = 1^{\text{mg}} \\ \text{Feuille d'aluminium} \dots\dots p' = 0^{\text{mg}},6 \end{array}$$

$$\text{Moyenne générale du rapport } \frac{V}{V'} = 1,28.$$

$$\text{Les poids donnent : } \sqrt{\frac{p}{p'}} = 1,29.$$

⁽¹⁾ Grande batterie d'accumulateurs du laboratoire de physique (enseignement) de la Sorbonne.

De même encore, avec deux feuilles d'or pesant respectivement 24^{mg},14 et 13^{mg},39 :

$$\text{Moyenne du rapport } \frac{V}{\sqrt{r}} = 1,335.$$

$$\text{Les poids donnent : } \sqrt{\frac{P}{r}} = 1,342.$$

Cette propriété fondamentale est donc exactement vérifiée dans tous les cas, et permet d'étendre singulièrement les limites d'application d'un même électromètre à feuille mobile. Il suffit en effet de choisir un certain nombre de feuilles de mêmes dimensions, mais de poids différents, par suite du changement d'épaisseur ou de nature du métal battu employé (aluminium, argent, or, platine). La courbe de voltage établie pour l'une d'elles, par étalonnage direct, servira à calculer toutes les autres, ou bien servira comme courbe unique, en faisant intervenir un coefficient constant de transformation, quand on passera d'une feuille à une autre. Par exemple, avec des feuilles interchangeables, de poids respectifs 1, 4, 9, 16, 25, le même appareil mesurera, par les mêmes angles, des potentiels 1, 2, 3, 4, 5.

La substitution méthodique d'une feuille à une autre dans ces électromètres joue donc en quelque sorte le rôle du *shuntage* d'un galvanomètre ⁽¹⁾.

2° *Influence de la largeur de la feuille.* — En découpant dans un même feuillet d'aluminium battu deux feuilles de même longueur, mais de *largeur double* l'une de l'autre, et en les substituant l'une à l'autre *sans replier* la feuille double, de manière à laisser le poids spécifique superficiel constant, on trouve que les potentiels

(1) Pour la dimension de feuille précédemment indiquée, c'est-à-dire 6^{cm} × 0^{cm},7, on formera aisément une série allant de 0^{mg},4 à 24 milligrammes et même davantage. L'aluminium battu, tel qu'on le trouve en cahiers dans le commerce, a une épaisseur de l'ordre de 0^{micron},75. Il servira pour les feuilles les plus légères, soit de 0^{mg},4 à 0^{mg},8 la feuille; l'or le plus mince des cahiers courants (or dit de la moule) a une épaisseur de l'ordre de 0^{micron},1 et servira pour les feuilles dont le poids doit être voisin de 1 milligramme. Pour les poids plus élevés, on emploiera les feuilles d'or d'épaisseurs très variées que l'on trouve chez les principaux batteurs d'or, épaisseurs qui peuvent aller jusqu'à près de 10 microns. Il est bon de savoir que le numérotage des cahiers d'or battu correspond au poids de la feuille normale (environ 10^{cm} × 10 centimètres) exprimé en décigrammes. L'épaisseur correspondante s'exprime approximativement en microns par la moitié de ce numéro d'ordre. C'est ainsi que le plus élevé est 14, correspondant à 7 microns environ. On trouvera également chez les batteurs les pinces et outils nécessaires (par exemple chez Jacquesson, 7, rue Charlot, chez Buisson et Dauvet, 3, impasse Guéméné, et 181-183, rue Saint-Antoine, Paris, etc.).

correspondant à un même angle sont *identiques*, bien qu'ici le poids total soit double :

Déviatiou	V (feuille 6 ^m × 1 ^m ,4)	V' (feuille 6 ^m × 0 ^m ,7)
13°	1",52	1",55
44°	3,03	3
64°	4,14	4,12

Donc, au moins avec le dispositif décrit et grâce au rôle d'anneau de garde joué par le disque isolé, le potentiel qui correspond à un angle donné est absolument indépendant de la largeur de la feuille, tant que sa longueur et son poids spécifique superficiel ne changent pas.

Ce résultat est bien d'accord avec la formule précédemment établie :

$$\frac{1}{2} (c_{\alpha} - c_0) V^2 = pl \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right).$$

Car la feuille mobile forme avec la paroi correspondante de la cage une capacité qui, pour une même longueur de cette feuille, pour une même distance de son centre de gravité à la paroi et pour un même angle de divergence, est proportionnelle à sa surface, grâce à l'anneau de garde. Mais le poids de la feuille, à égal poids spécifique superficiel, est aussi proportionnel à sa surface.

Donc, les deux facteurs $c_{\alpha} - c_0$ et p variant dans le même rapport, celui de V à l'angle α ne change pas.

Il est cependant nécessaire d'imposer aux feuilles interchangeables une largeur donnée et constante, car cette condition supplémentaire est indiquée, d'autre part, pour faciliter la comparaison des poids. Une trop grande largeur pourrait être d'ailleurs la cause de déformations nuisibles; de plus, cette condition permet, quand on interchange les feuilles mobiles, de maintenir rigoureusement constante la capacité c_{α} ; les quantités captées par l'électromètre varient donc, pour un même angle, comme les racines carrées des poids des feuilles: par suite, la graduation de l'appareil en *franklins* (unité C. G. S. de quantité: 1 coulomb = 3×10^9 franklins) ⁽¹⁾ se déduit directement de la courbe de voltage et de capacité.

3° *Influence de la longueur de la feuille.* — Cette longueur doit demeurer rigoureusement invariable; car, si ses changements font

⁽¹⁾ *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. 140, 1903, p. 1106.

encore varier la surface de la feuille et son poids dans le même rapport ⁽¹⁾, ils font varier le facteur l sans compensation ; de plus, ils modifient la capacité $(c_\alpha - c_0)$, mais non proportionnellement à la surface, puisque la distance moyenne de la feuille à la paroi de la cage se trouve modifiée, bien que l'angle d'écart reste constant. On peut donc prévoir que, toutes choses égales d'ailleurs, le potentiel V variera, sans être d'ailleurs exactement proportionnel à \sqrt{l} .

Et en effet, en réduisant exactement de moitié la longueur mobile de la feuille, j'ai vu les potentiels correspondant aux mêmes angles décroître, mais moins que suivant le rapport $\frac{\sqrt{2}}{1}$.

Déviatiou	V (longueur complète)	V' (demi-longueur)
60°	4 ^u	3 ^{u,6}

Donc :

$$\frac{V}{V'} = 1,41$$

et

$$\sqrt{\frac{l}{l'}} = 1,41.$$

4° *Influence de la forme de la cage.* — L'accroissement de capacité qui résulte du déplacement angulaire de la feuille de 0° à α est fonction, d'une part, de la forme et des dimensions de la cage, et, d'autre part, de la variation de forme du conducteur formé par la partie fixe et la partie mobile du système isolé : de la loi de variation de cette capacité dépend la forme de la courbe de voltage.

Avec la forme et les dimensions que j'ai adoptées pour l'électrodensimètre, cette courbe a une forme caractéristique (fig. 2), sans correspondre d'ailleurs à une fonction simple de l'angle d'écart. Au départ, la courbe est tangente à l'axe des V , ce qui montre que, pour les très petits angles, la sensibilité est nulle ; mais elle se relève rapidement, et présente de 5° à 60° une allure presque rectiligne.

Au delà de 60°, la sensibilité décroît de nouveau, mais assez lentement, et la courbe est utilisable jusqu'à 90°. De plus, grâce à la loi relative au poids de la feuille mobile, on peut effectuer une

(1) Cette condition est aisément remplie grâce au mode de fixation précédemment indiqué : une fois la feuille mobile posée sur le disque isolé et horizontal, on fait exactement affleurer son extrémité au bord de celui-ci, avant de laisser retomber le ressort.

mesure donnée de potentiels dans les meilleures conditions de sensibilité, en employant une feuille mobile de poids tel que le potentiel à mesurer soit sur la portion quasi rectiligne de la courbe.

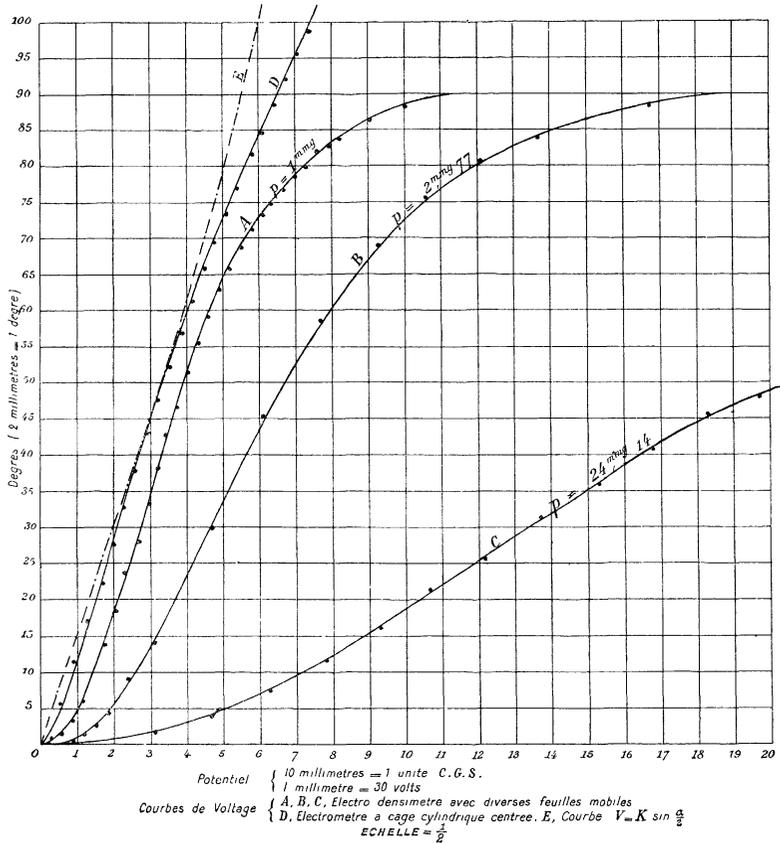


FIG. 2.

Il est d'ailleurs possible de rendre la sensibilité constante et la courbe rectiligne dans toute l'étendue de l'échelle; c'est au cours de mes recherches sur les rayons X, il y a déjà quelques années, que j'ai obtenu la solution de ce problème; j'avais en effet songé à réduire au minimum la variation de capacité qu'entraîne le déplacement angulaire de la feuille en donnant à la cage la forme d'un demi-cylindre circulaire dont l'axe coïncide exactement avec l'axe de rotation de la feuille; celle-ci, de mêmes dimensions que la

plaque isolée qui la porte, se déplace suivant un rayon mobile du cylindre-cage et conserve par suite, à l'égard de celui-ci, une situation constante. La capacité n'est donc plus modifiée du fait de la cage, mais seulement par le changement de forme du conducteur isolé.

L'expérience a bien justifié cette prévision et, dans l'électromètre ainsi construit (1), la divergence de la feuille, utilisable jusqu'à 150° environ, se fait à très peu près suivant une droite, dans toute son étendue (courbe D de la fig. 2). On peut remarquer que cette courbe quasi rectiligne (2) se rapproche beaucoup de la courbe $V = R \sin \alpha$ ou courbe E, ce qui prouve bien que, dans cette forme d'électromètre, le terme $c_\alpha - c_0$ est devenu presque constant, son effet se réduisant à incurver très légèrement la courbe vers l'axe des potentiels.

Toutefois cette forme n'offre pas au déplacement de la feuille un champ uniforme, et ne met pas celle-ci à l'abri des déviations latérales vers les parois vitrées ou vers le bouchon isolant; la feuille ne présente pas non plus une rectitude aussi parfaite que dans l'électro-densimètre.

En résumé, grâce aux diverses propriétés qui viennent d'être étudiées, l'électromètre à feuille d'or devient un appareil d'une précision et d'une souplesse remarquables, se prêtant avec sûreté aux mesures les plus variées. Les lectures se faisant au 1/10 de degré, et la courbe de voltage s'établissant au moyen d'une batterie d'accumulateurs qu'il est aisé d'étalonner au moins à 1/100 près, on voit que les mesures de potentiels se feront au moins au 1/100, et qu'il sera aisé d'avoir encore mieux. De plus, on est maître de la forme de cette courbe, c'est-à-dire de la loi de distribution des sensibilités le long de l'échelle, ainsi que de l'étendue de cette échelle, par la forme de la cage. On est maître, d'autre part, de la sensibilité moyenne (3) et des limites d'utilisation de l'appareil, par la loi des poids, qui permet d'évoluer entre 0 et 6 000 volts environ. Si enfin on

(1) Chez Carpentier, 1900.

(2) La sensibilité est donc constante, à partir des *plus petits angles inclusive-ment*. Il subsiste, il est vrai, au départ de la feuille, une certaine inertie due à de légères adhérences à la plaque-support, ou encore à une faible rigidité de cette feuille. Mais ce défaut peut être aisément supprimé: il suffit d'incliner très légèrement, dans le sens du déplacement de la feuille, tout l'électromètre muni de vis calantes, de telle sorte qu'à une différence nulle de potentiel entre la feuille et la cage corresponde déjà un petit angle initial, tel que 5°.

(3) Depuis 15 à 20 volts par degré, pour les feuilles les plus légères, jusqu'à 120 volts et au delà, pour les plus lourdes.

établit une fois pour toutes la capacité moyenne (10 centimètres pour $\alpha = 45^\circ$ dans l'électro-densimètre) ou mieux la courbe complète des capacités, soit en utilisant la courbe de voltage et une capacité étalon de 10 centimètres, facile à construire sous forme cylindrique, soit indirectement en construisant une courbe de charge par quantités égales, on disposera d'un appareil permettant, dans les limites très larges déjà indiquées, toutes mesures de potentiels, de quantités et de capacités.
