

INSPE Académie de Limoges

Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation

Master MEEF Second degré

Professeur de Physique et de Chimie

Didactique, épistémologie et histoire des sciences

2020–2021

Galvanomètres

Antoine Eggenspiller

Collège Guy de Maupassant

Rémi Metzdorff

Lycée Suzanne Valadon



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1 Principe de fonctionnement</b>	<b>3</b>
1.1 Principe général . . . . .	3
1.2 Modélisation . . . . .	4
1.2.1 Équations du mouvement . . . . .	4
1.2.2 Position d'équilibre . . . . .	5
1.2.3 Linéarité de l'affichage . . . . .	6
1.2.4 Validité du modèle . . . . .	7
1.2.5 Et avec un entrefer concave ? . . . . .	8
1.2.6 Le noyau en fer doux . . . . .	9
1.3 Remarques sur la conception des appareils . . . . .	10
<b>2 L'ampèremètre</b>	<b>10</b>
<b>3 Le voltmètre</b>	<b>14</b>
3.1 Description de l'appareil . . . . .	14
3.2 Premières expériences . . . . .	16
3.3 Les bobines résistives . . . . .	16
3.3.1 Démontage des bobines . . . . .	16
3.3.2 Caractérisation des bobines . . . . .	17
3.3.3 Test fonctionnel . . . . .	19
3.4 Remontage de l'appareil . . . . .	20
<b>4 Un test de fonctionnement</b>	<b>22</b>
<b>Conclusion</b>	<b>23</b>
<b>Références</b>	<b>24</b>
<b>Annexes</b>	<b>25</b>
<b>A Extraits du catalogue Chauvin &amp; Arnoux (1915)</b>	<b>25</b>

# Introduction

Ce rapport présente le fonctionnement et la restauration de deux galvanomètres datant du début du XX<sup>ème</sup> siècle. Il s'agit d'un ampèremètre et d'un voltmètre produits par Chauvin & Arnoux. Les détails concernant l'historique de ces appareils sont présentés extensivement dans un précédent rapport [AMN<sup>+</sup>16] et ne seront pas repris ici. La première section s'intéresse au principe de fonctionnement du galvanomètre et en présente un modèle simplifié. La restauration des deux appareils est ensuite détaillée. Finalement, une expérience simple impliquant les deux instruments est présentée.

## 1 Principe de fonctionnement

### 1.1 Principe général



FIGURE 1 – Le « cœur » du galvanomètre. Le champ magnétique est produit par l'aimant permanent torique. La cadre mobile, situé dans l'entrefer de l'aimant, est caché derrière un ressort en spirale qui maintient l'aiguille au centre du cadran en l'absence de courant électrique. Les deux fils situés de part et d'autre du cadre alimentent la bobine. Le fil noir fin en forme de ressort est propre à l'ampèremètre : il n'est pas indispensable au fonctionnement du galvanomètre et son rôle sera expliqué plus tard.

Il existe plusieurs types de galvanomètres adaptés à différents usages. Ceux présentés ici sont dit à *cadre mobile*. « Ces galvanomètres sont basés sur le principe d'un cadre galvanométrique mobile dans un champ magnétique produit par un aimant permanent », comme l'explique la notice du fabricant (Ann. A). Le cadre galvanométrique est un circuit qui prend la forme d'une bobine de fil de cuivre : lorsqu'elle est parcourue par un courant  $I$ , l'action du champ magnétique se traduit par une force de Laplace, proportionnelle à  $I$ , qui s'exerce sur chaque élément du circuit. La construction

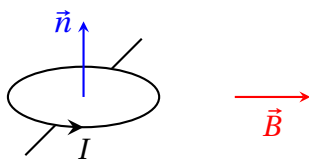
de l'instrument autorise simplement le cadre à pivoter. Celui-ci est lié à une aiguille qui permet de mesurer sa déviation et ainsi de mesurer le courant qui passe à travers la bobine (Fig. 1). Ce type d'instrument ne permet de mesurer que des courants et tensions continus mais a l'avantage d'être très précis. Pour des mesures en courant alternatif, on utilisera plutôt des galvanomètres à palettes par exemple.

Le galvanomètre est donc un instrument qui permet de mesurer un courant électrique. L'ampermètre fonctionne exactement sur ce principe : branché en série dans le circuit, la bobine est parcourue par le courant qui circule dans la branche mesurée.<sup>1</sup> Le voltmètre contient des résistances supplémentaires de valeurs relativement élevées : branché en parallèle aux bornes d'un dipôle, l'appareil et sa bobine sont parcourus par un courant faible qu'il est possible de mesurer.<sup>2</sup>

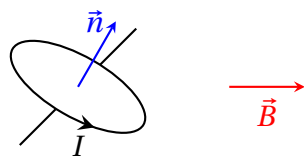
La modélisation du fonctionnement de l'appareil s'est avérée plus subtile que ce qui avait été anticipé. On commence ici par un premier modèle simple qui a le mérite de détailler le principe de fonctionnement de l'appareil. Les résultats obtenus ne sont cependant pas en accord avec les observations réalisées sur les instruments, comme nous le verrons plus tard : il sera donc nécessaire d'apporter plusieurs améliorations au modèle initialement choisi. Ce cheminement a toutefois permis de comprendre plusieurs aspects importants liés à la conception du galvanomètre à cadre mobile.

## 1.2 Modélisation

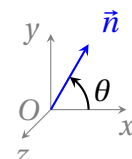
Tout d'abord, on souhaite décrire le mouvement de la bobine parcourue par un courant  $I$  dans le champ magnétique  $\vec{B} = B\vec{e}_x$  supposé uniforme, qui règne dans l'entre-fer de l'aimant. Le problème est similaire à celui du pendule de torsion soumis à un couple constant, en présence de frottements fluides. On s'intéresse au seul degré de liberté  $\theta$  du système, qui correspond à l'angle algébrique entre le champ  $\vec{B}$  et le vecteur  $\vec{n}$  normal aux spires de la bobine.



Courant nul :  $I = 0$ .



Courant non nul :  $I \neq 0$ .



Conventions utilisées.

### 1.2.1 Équations du mouvement

Le système étudié est l'ensemble {bobine + aiguille}. La bobine est supposée plate, rectangulaire de côtés  $a$  et  $b$  délimitant une surface  $S$  et formée de  $N$  spires parcourue par un courant constant d'intensité  $I$  dont l'orientation définit celle du vecteur  $\vec{n}$  normal à la surface  $S$ . On l'assimile à un dipôle magnétique dont le moment est  $\vec{\mu} = NSI\vec{n}$ . L'ensemble bobine et aiguille possède par ailleurs un moment d'inertie  $J$ .

Le temps caractéristique de l'évolution du système est au plus de l'ordre de quelques secondes. Le référentiel du laboratoire peut donc être considéré comme galiléen.

Plusieurs forces doivent être considérées :

— le poids : au mieux, son moment est nul, mais au pire, il est négligé<sup>3</sup> ;

1. On le verra, la réalisation pratique de l'instrument est un peu plus subtile, ce qui permet de mesurer des courants d'intensités variées.

2. Le courant qui parcourt l'instrument doit être beaucoup plus faible que celui qui traverse le dipôle de manière à perturber le moins possible le circuit : la résistance du voltmètre doit être aussi grande que possible. Toutefois, le courant passant à travers la bobine doit être suffisant pour que l'action des forces de Laplace conduise à une déviation significative de l'aiguille. Il y a donc un compromis à trouver.

3. Cette approximation semble raisonnable compte tenu de la très grande légèreté de l'aiguille. Le reste du cadre est centré autour de son axe de rotation et n'ajoute donc aucun couple.

- $\vec{\Gamma}_B = \vec{\mu} \wedge \vec{B} = -\mu B \sin \theta \vec{e}_z$  : moment subi par le dipôle magnétique  $\vec{\mu}$  dans le champ  $\vec{B}$  (moment des forces de Laplace) ;
- $\vec{\Gamma}_H = -k(\theta - \pi/2) \vec{e}_z$  : moment de la force de rappel du ressort spiral ;
- $\vec{\Gamma}_f = -\alpha \dot{\theta} \vec{e}_z$  : moment des forces de frottement. On choisit ici de ne considérer que des frottements fluides.<sup>4</sup>

Le moment cinétique de l'ensemble bobine et aiguille  $\vec{L} = J\dot{\theta} \vec{e}_z$  s'exprime en fonction du moment d'inertie  $J$  du système. On applique le théorème du moment cinétique :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\Gamma}_B + \vec{\Gamma}_H + \vec{\Gamma}_f, \quad (1)$$

et on le projette selon  $\vec{e}_z$  :

$$J\ddot{\theta} = -\mu B \sin \theta - k\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - \alpha \dot{\theta}. \quad (2)$$

Cette équation comprend un terme en  $\sin \theta$  : elle n'est pas linéaire et ne pourra pas être résolue analytiquement. Pour simplifier, on peut réaliser des approximations supplémentaires en supposant que la déviation reste faible, c'est-à-dire que  $\theta$  reste « proche » de  $\frac{\pi}{2}$ . On peut alors linéariser l'équation 2 pour obtenir l'équation

$$J\ddot{\theta} = -\mu B - k\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - \alpha \dot{\theta}. \quad (3)$$

Une approximation moins brutale peut aussi être obtenue en effectuant un développement limité à l'ordre deux :

$$J\ddot{\theta} = -\mu B \left[ 1 - \frac{(\theta - \frac{\pi}{2})^2}{2} \right] - k\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - \alpha \dot{\theta}. \quad (4)$$

La résolution de ces équations en régime permanent, c'est-à-dire quand  $\ddot{\theta}$  et  $\dot{\theta}$  sont nuls, permet d'obtenir la position d'équilibre de l'aiguille et donc la déviation correspondant à la mesure réalisée.

### 1.2.2 Position d'équilibre

Dans le cas le plus simple, on utilise l'équation 3 qui se simplifie et on trouve l'expression de la position d'équilibre  $\theta_{eq}^{lin}$  du système :

$$\theta_{eq}^{lin} = \frac{\pi}{2} - \frac{\mu B}{k}, \quad (5)$$

valable pour de faibles déviations, c'est-à-dire tant que  $\frac{\mu B}{k} \ll 1$ .

Quand on utilise le développement limité, la résolution de l'équation 4 en régime permanent fait apparaître deux solutions, dont l'une diverge pour les petites valeurs de  $\frac{\mu B}{k}$ . L'autre donne finalement :

$$\theta_{eq}^{DL2} = \frac{\pi}{2} + \frac{1 - \sqrt{1 + 2\left(\frac{\mu B}{k}\right)^2}}{\frac{\mu B}{k}}. \quad (6)$$

---

4. La modélisation de ces frottements n'est pas essentielle puisqu'on ne s'intéresse qu'au cas statique. Toutefois, la présence de frottements solides peut conduire à un phénomène d'hystérésis qui modifie la position d'équilibre de l'aiguille. Cependant, avec les appareils utilisés ici, les mesures ne montrent pas d'hystérésis important ce qui justifie cette approximation.

Lorsque  $\frac{\mu B}{k} \ll 1$ , on peut linéariser cette solution et on retrouve bien la position d'équilibre précédente, obtenue dans le cas de très faibles déviations.

L'équation 2 en régime permanent s'écrit

$$0 = -\mu B \sin \theta - k \left( \theta - \frac{\pi}{2} \right), \quad (7)$$

et n'admet pas de solution analytique. Il est toutefois possible de la résoudre numériquement pour obtenir  $\theta_{eq}^{num}$ .

Dans la suite, on repèrera la position d'équilibre par sa déviation  $D$ , avec

$$D = \frac{\pi}{2} - \theta, \quad (8)$$

qui correspond, à un facteur d'échelle près, à la valeur lue sur les galvanomètres.

### 1.2.3 Linéarité de l'affichage

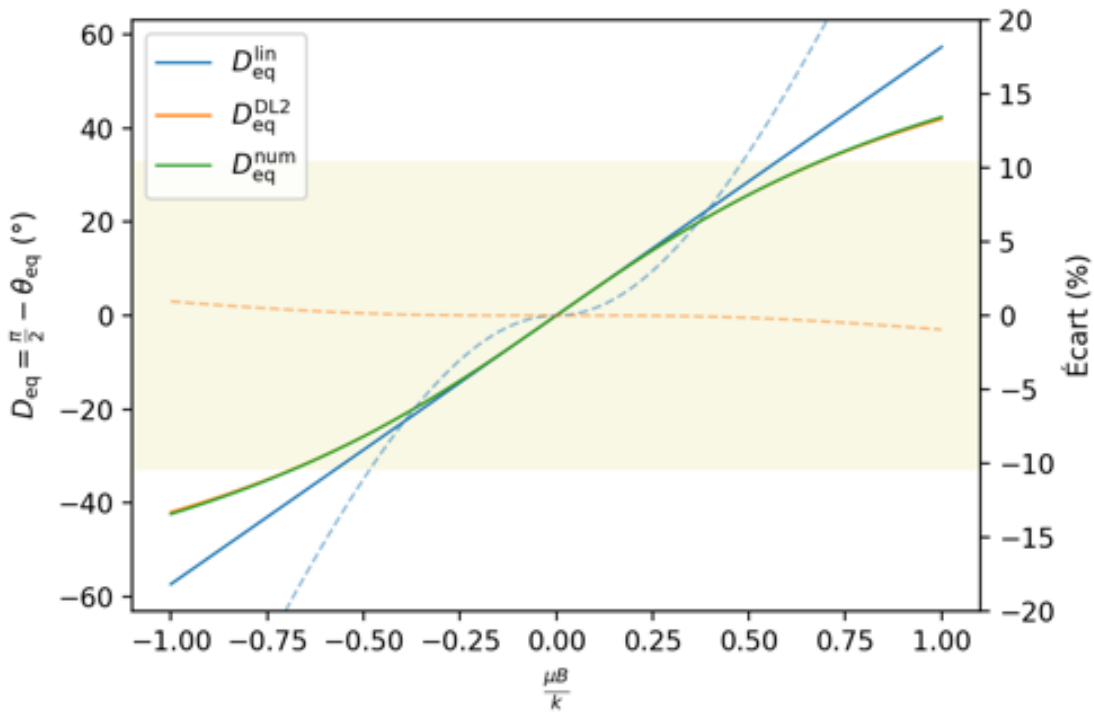


FIGURE 2 – Déviation de l'aiguille du galvanomètre en fonction du rapport  $\frac{\mu B}{k}$  proportionnel au courant mesuré. Les trois courbes pleines représentent les déviations associées aux trois solutions obtenues précédemment dans le cadre de l'approximation linéaire, du développement limité au second ordre et de la résolution numérique. Les courbes en pointillés montrent l'écart relatif entre les déviations calculées analytiquement (Éq. 5 et 6) et la résolution numérique (Éq. 7). La plage de déviations matérialisée en jaune pâle représente la gamme de valeurs effectivement mesurables par l'instrument, compte tenu de l'amplitude de mouvement de l'aiguille.

La comparaison des solutions obtenues avec différentes approximations (Fig. 2) montre que la solution analytique  $\theta_{eq}^{DL2}$  obtenue en faisant un développement limité à l'ordre deux (Éq. 6) permet d'obtenir une excellente approximation de la position d'équilibre du système sur la plage de mesure accessible à l'instrument. En effet, l'écart relatif avec la valeur calculée numériquement reste inférieur à 0,4 % sur l'ensemble de la plage de mesure. En revanche, l'approximation linéaire donne un écart

relatif inférieur à 1 % pour des déviations inférieures à 8°, mais proche de 20 % au maximum de déviation.

On s'attend donc à une déviation de l'aiguille sensiblement plus faible que celle attendue si la déviation était proportionnelle au courant  $I$ . Cet écart est parfaitement compréhensible dans notre modèle où la force de rappel du ressort est proportionnelle à l'angle  $\theta$  alors que le moment magnétique  $\Gamma_B$  s'affaiblit à mesure que le dipôle magnétique s'aligne avec le champ de l'aimant permanent.

#### 1.2.4 Validité du modèle

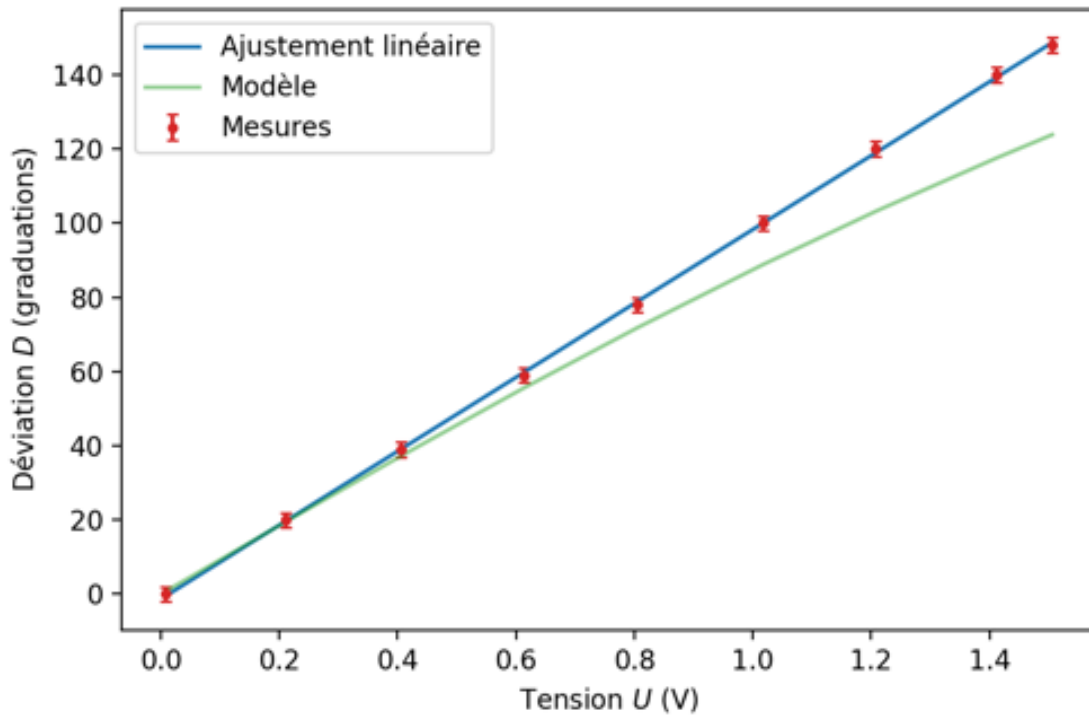


FIGURE 3 – Mesure de la déviation en fonction de la tension aux bornes du galvanomètre volt-mètre. La tension d'une alimentation stabilisée est modifiée et mesurée simultanément à l'aide du galvanomètre et d'un multimètre numérique pour reconstituer la courbe. Le calibre du galvanomètre est choisi pour explorer l'ensemble des déviations mesurables. De manière surprenante, l'ajustement linéaire semble excellent ( $\chi^2_r \approx 0,1$ ,  $r \approx 0,9998$ ), y compris aux « grandes » valeurs de déviation.

Des mesures rapides effectuées sur les différents appareils ont cependant montré que le comportement de l'appareil était très linéaire (Fig 3).<sup>5</sup> On peut donc tenter de revenir sur les différentes hypothèses utilisées pour établir le modèle précédent :

- uniformité du champ  $\vec{B}$  : cette approximation reste valable tant que l'on reste à proximité de l'axe de l'entrefer de l'aimant permanent (Fig. 4). Cependant, puisque la taille du cadre mobile est comparable à celle de l'entrefer, pour des déviations importantes, la bobine explore des régions sensiblement éloignées de l'axe de l'entrefer. À mesure que l'on s'éloigne de cet axe, le champ magnétique diminue. Quand l'intensité  $I$  est faible, la bobine est proche de l'axe ( $\theta \approx \frac{\pi}{2}$ ) et elle s'en éloigne quand l'intensité augmente : le couple magnétique devrait donc également diminuer à mesure que la déviation augmente. Cet effet, qui s'ajoute à la diminution du couple à mesure que le dipôle s'aligne avec le champ, devrait en réalité augmenter la non linéarité de l'affichage et ne convient pas pour expliquer les mesures réalisées ;

5. La linéarité des graduations sur les cadrans des instruments a été vérifiée à l'aide d'un réglet.

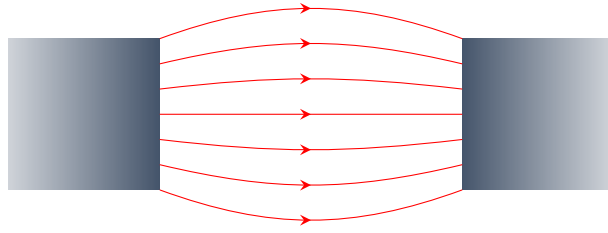


FIGURE 4 – Représentation schématique de quelques lignes de champ au niveau de l'entrefer de l'aimant permanent.

- poids négligeable : dans le cas où l'on devrait considérer le poids de l'aiguille, il faudrait rajouter à l'équation 2 un terme en  $\cos\theta$  correspondant au couple du poids, dont la valeur est par ailleurs difficile à estimer sans démonter complètement l'appareil. On obtient alors l'équation

$$J\ddot{\theta} = -\mu B \sin\theta - k\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - \alpha\dot{\theta} - \beta \cos\theta, \quad (9)$$

où  $\beta$  est lié au poids de l'aiguille. A priori, ce terme pourrait convenir : au contraire du moment magnétique, sa valeur augmente avec la déviation et pourrait ainsi compenser la diminution du moment magnétique. La résolution numérique de l'équation 9 dans le régime statique pour plusieurs valeurs de  $\beta$  ne laisse cependant pas apparaître d'amélioration significative. De plus, les galvanomètres affichent des valeurs identiques, qu'ils soient disposés verticalement ou horizontalement, en accord avec les annonces du fabricant : « *Ces galvanomètres fonctionnent dans toutes les positions et sous n'importe quelle orientation* » (Ann. A).<sup>6</sup> L'approximation réalisée en négligeant le poids semble donc également raisonnable ;

- force de rappel du ressort spirale : une dépendance plus complexe qu'une simple proportionnalité n'est pas impossible mais il semble que ce type de ressort soit l'un des rares qui ait un « comportement vraiment linéaire » [wik] ;
- géométrie de la bobine : le cadre mobile a une géométrie plus complexe que celle envisagée dans le modèle. Les détails sont toutefois difficiles à prendre en compte sans rentrer dans une démarche qui dépasse le cadre de ce travail. Il est par ailleurs difficile d'imaginer que ces détails améliorent la linéarité de l'affichage.

### 1.2.5 Et avec un entrefer concave ?

Dans ce qui précède, la forme de l'entrefer est très simple (Fig. 4). Toutefois, il est possible de considérer une forme plus évoluée, adaptée à un cadre mobile pivotant (Fig. 5).<sup>7</sup> On suppose toujours que le champ magnétique dans l'entrefer est orienté uniquement selon  $\vec{e}_x$  (la convention pour l'orientation des axes reste la même qu'avant).<sup>8</sup> Le champ magnétique n'est cependant plus uniforme car l'épaisseur  $e(v)$  de l'entrefer change et dépend de la distance par rapport à l'axe : on peut le noter  $B(v)\vec{e}_x$ . Pour calculer le champ magnétique  $B(v)$ , on procède par analogie avec le calcul du champ dans l'entrefer d'un électroaimant [FR98]. Il apparaît que le champ  $B$  est inversement proportionnel à l'épaisseur  $e(v) = 2r \cos v$ . Ici on a donc

$$B(v) \propto \frac{1}{\cos v}. \quad (10)$$

6. Le support des galvanomètres les destine à être orientés verticalement (aiguille vers le haut), ce qui a conduit à l'hypothèse selon laquelle le poids de l'aiguille joue un rôle dans la mesure.

7. Sur les instruments utilisés, la forme précise de l'entrefer est difficile à apercevoir sans démonter davantage l'appareil. Toutefois, elle n'est clairement pas rectangulaire (Fig. 4).

8. Cette approximation est discutable mais reste raisonnable tant que l'on reste assez proche de l'axe de l'entrefer.



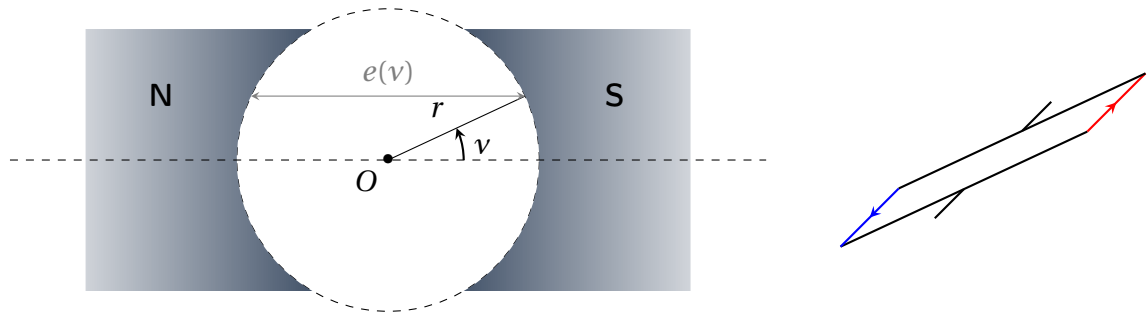


FIGURE 5 – Un entrefer plus travaillé pourrait expliquer la linéarité du galvanomètre.

Le couple des forces de Laplace se calcule en considérant cette fois le cadre mobile comme une bobine formée de  $N$  spires carrées de côté  $l$ , dont l'inclinaison est repérée par l'angle  $v$ . La résultante des forces de Laplace qui s'exercent sur un fil de la branche rouge parcourue par un courant  $I$  (Fig. 5) s'écrit  $-IlB(v)\vec{e}_y$  dont le moment est  $-\frac{Il^2B(v)}{2}\cos(v)\vec{e}_z$ . Le couple exercé sur le cadre mobile est donc<sup>9</sup>

$$\vec{\Gamma}_B = -NIl^2B(v)\cos(v)\vec{e}_z. \quad (11)$$

En utilisant le résultat précédent concernant la dépendance du champ  $\vec{B}$  avec l'angle  $v$ , on obtient finalement

$$\vec{\Gamma}_B \propto NIl^2\vec{e}_z, \quad (12)$$

où le facteur de proportionnalité dépend simplement de l'aimantation de l'aimant permanent.

Cette équation est remarquable puisque cette fois, le moment magnétique ne dépend pas de l'inclinaison du cadre ! L'équation du mouvement (Éq. 2) devient linéaire, sa résolution analytique en régime permanent est alors possible et conduira à une déviation proportionnelle à l'intensité qui parcourt le galvanomètre. Avec ce dernier modèle, on explique très bien les résultats obtenus expérimentalement (Fig.3).

### 1.2.6 Le noyau en fer doux

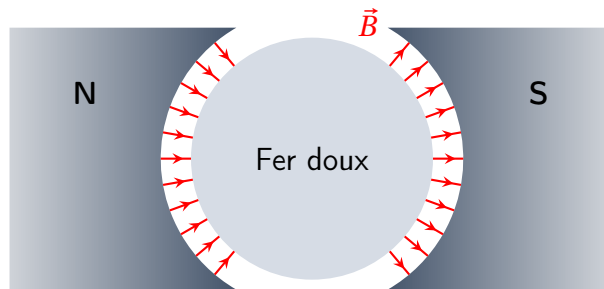


FIGURE 6 – La présence d'un noyau en fer doux simplifie les choses !

Dans le cas où un noyau de fer doux est présent dans l'entrefer de l'aimant (Fig. 6), la situation est encore plus simple [mov]. Dans la zone où évolue le cadre mobile :

- le champ magnétique est radial, donc le couple  $\vec{\Gamma}_B$  est simplement proportionnel à  $\vec{B}$  ;
- l'espace entre l'aimant et le fer doux est partout le même, donc  $B$  ne dépend pas de  $v$  ;

9. Cette fois, on obtient un terme en cosinus mais cela est simplement dû à la définition de l'angle utilisé pour repérer l'inclinaison du cadre mobile : en effet,  $\theta = v + \pi/2$ .

- l'épaisseur de l'entrefer est réduite par rapport au cas précédent : avec le même aimant permanent, le champ magnétique sera plus intense ce qui augmente la sensibilité de l'appareil.

L'inspection de l'appareil semble aller dans ce sens, puisque l'on observe bien un bloc cylindrique dans l'entrefer de l'aimant permanent sur nos appareils, autour duquel le cadre mobile est libre de bouger (Fig. 7). Cette conception se rapproche fortement de celle des machines synchrones, où l'on retrouve les mêmes géométries qui permettent de façonner le champ magnétique, pour améliorer l'efficacité de ces moteurs [CEG<sup>+</sup>17].

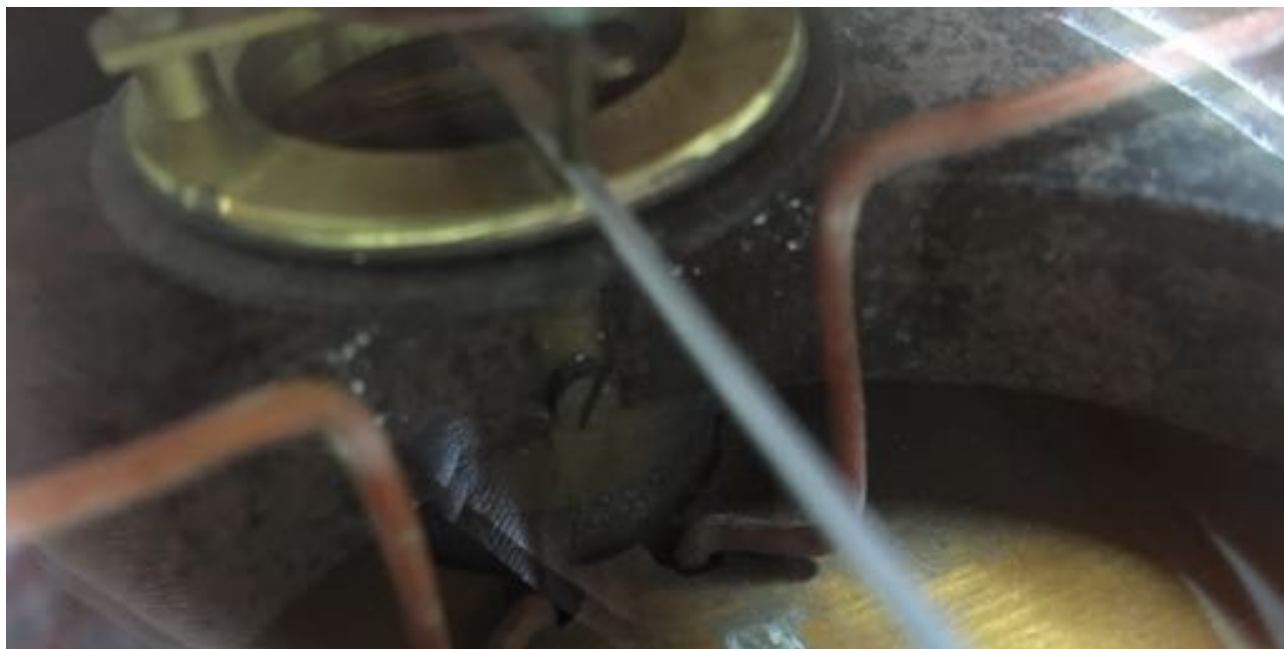


FIGURE 7 – L'entrefer de l'aimant permanent est à l'évidence de forme concave. On devine également la présence d'un bloc autour duquel pivote le cadre mobile.

### 1.3 Remarques sur la conception des appareils

La présence de frottements lors des mouvements du cadre mobile est essentielle au bon fonctionnement de l'appareil : ils permettent de s'assurer que l'aiguille atteigne sa position d'équilibre « sans oscillations et néanmoins avec exactitude » (Ann. A). Les appareils étudiés sont *apériodiques*, ce qui semble faire référence à cette absence d'oscillations lors du régime transitoire : on pourrait ainsi contraindre la valeur de  $\alpha$  dans notre modèle.

La longévité de la calibration des instruments repose notamment sur la constance du champ magnétique produit par l'aimant permanent. Dans le catalogue constructeur (Ann. A), on peut également lire que le principe de fonctionnement de ces instruments « permet de réaliser des appareils de mesure dont la permanence de l'étalonnage peut-être considérée comme pratiquement absolu ». Derrière cet argument de vente percutant se cachent deux vérités :

- « la très faible force magnétomotrice développée par le courant traversant les spires du cadre mobile et qui est sans action appréciable sur l'aimant permanent » ;
- la forme torique de l'aimant conduit naturellement à des lignes de champs quasiment fermées, ce qui préserve l'aimantation de l'aimant.

## 2 L'ampèremètre

L'ampèremètre auquel on s'intéresse ici était commercialisé par Chauvin & Arnoux, probablement au cours de la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Il s'agit d'un modèle de 25 cm de diamètre, qui peut



FIGURE 8 – Le galvanomètre ampèremètre avant toute manipulation.

fonctionner quelque soit le sens du courant (continu) et dont le cadran possède 150 graduations dans chaque sens. Bien que ce modèle précis ne soit pas dans le catalogue du fabricant présenté en annexe (Ann. A), on en trouve un modèle très similaire, qui était vendu au prix de 130 francs en 1915, soit environ 360 euros actuels [Ale14]. Le galvanomètre est monté sur un support en bois qui le maintient à la verticale.

Quand on le récupère sur son étagère pour l'examiner, le galvanomètre est en bon état et à peine poussiéreux. Comme premier test, on mesure sa résistance interne à l'aide d'un multimètre numérique : la résistance lue est de l'ordre de  $1\ \Omega$ , trop faible pour être mesurée précisément avec cet appareil. De plus lorsque le multimètre est connecté aux bornes du galvanomètre, l'aiguille de ce dernier bouge de quelques graduations : il semble donc en état de marche. Il y a toutefois quelques problèmes mineurs :

- en l'absence de courant, l'aiguille n'est pas centrée en zéro, et le réglage de l'« offset » est en bout de course ;
- le système de graduation est mystérieux ;
- l'aiguille et notamment sa pointe sont légèrement tordues.

Une expérience rapide permet de s'assurer qu'il permet de réaliser des mesures (Fig. 9).

En supposant que le galvanomètre fonctionne toujours comme en sortie d'usine, cette série de mesure permet de comprendre l'échelle de graduation. Le coefficient directeur de la droite obtenu lors de l'ajustement des mesures donne  $(2,74 \pm 0,07)$  graduation/mA. On compare aux valeurs indiqués sur le cadran : comme le suggère la notice, si la graduation la plus élevée (150) correspond au courant maximal mesurable avec l'instrument ( $I_{\max} = 0,05\text{A}$ ), le coefficient directeur devrait être de 3 graduation/mA. Ces deux valeurs sont raisonnablement proches à ce stade pour supposer que la dernière graduation correspond à la valeur maximale indiquée sur le cadran.<sup>10</sup> On détermine donc la valeur du courant en effectuant un simple produit en croix.

10. La graduation du cadran en 150 divisions semble être commune à de nombreux modèles commercialisés par Chauvin & Arnoux, même s'ils proposent d'autres échelles : 100, 125 et 150 divisions.

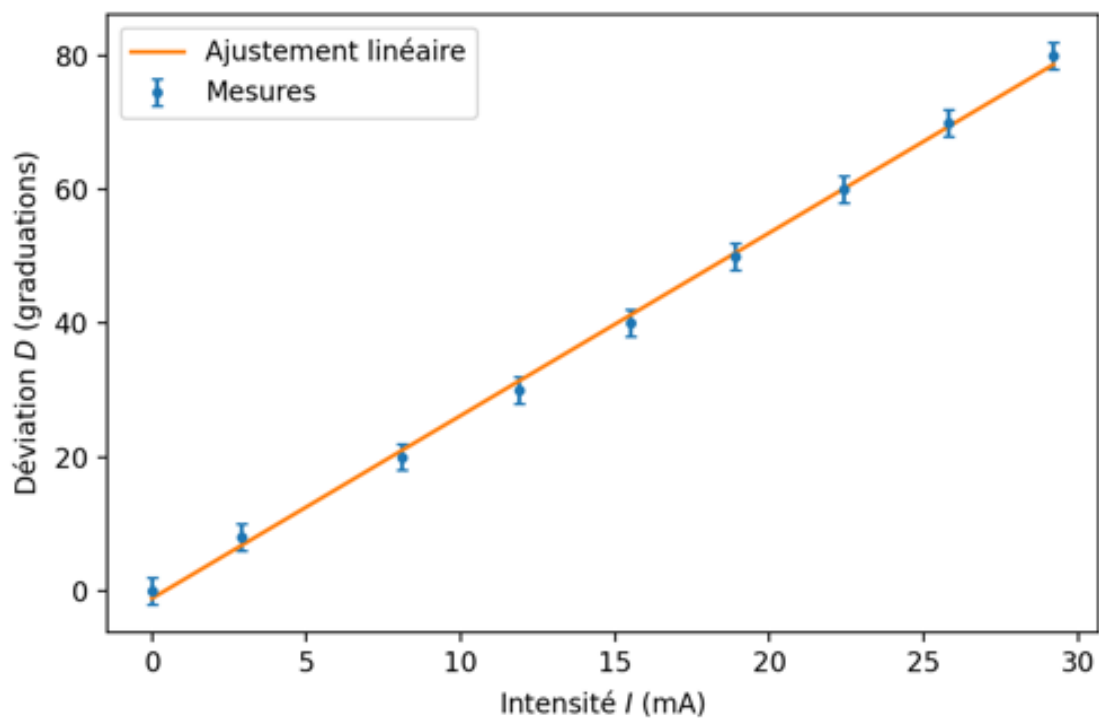


FIGURE 9 – Vérification du fonctionnement de l'instrument du galvanomètre ampèremètre. Le circuit utilisé est une simple résistance de  $1\text{ k}\Omega$  branchée à la sortie d'une alimentation variable stabilisée en tension. Le galvanomètre et un multimètre numérique utilisé comme ampèremètre sont branchés en série avec la résistance. On fait varier la tension de l'alimentation pour obtenir la courbe ci-dessus. Les barres verticales correspondent aux incertitudes de mesure avec le galvanomètre, correspondant à une graduation.

Pour en apprendre davantage sur l'instrument, nous décidons de le démonter :

- on l'enlève de son support vertical en bois en dévissant les quatre vis qui l'y maintiennent ;
- on retire la vitre de protection, maintenue par une bague en laiton ajustée au cylindre qui fait le tour de l'instrument. Pour cela, on procède avec précaution, en exerçant à l'aide d'un gros tournevis un effort sur le dessous de la bague pour la soulever, en prenant appui sur les bornes de branchement de l'instrument pour faire un levier. La vitre repose simplement sur deux grands anneaux, l'un métallique et l'autre cartonné ;
- on retire le cadran en dévissant les deux vis en laiton, puis en le faisant pivoter à droite, tout en maintenant l'aiguille complètement à gauche.

On se retrouve alors avec l'intérieur de l'instrument mieux visible (Fig. 10).



FIGURE 10 – Le même galvanomètre, une fois la vitre et le cadran retirés.

En plus des fils qui alimentent le cadre mobile, on remarque la présence d'un fil en forme de ressort qui relie les bornes du galvanomètre. Dans la notice (Ann. A), il est indiqué que la bobine du cadre mobile est de l'ordre de  $0,5\Omega$ . Il est par ailleurs indiqué qu'« une résistance en métal à coefficient de température nul est ajoutée pour le tarage de l'appareil ». Il semblerait que ce soit cette résistance qui fixe le calibre de l'appareil : plus la résistance est faible, plus il sera possible de mesurer des courants intenses puisque la plupart du courant passera à travers cette résistance. On parle de *shunt*. Les indications du cadran ( $I_{\max} = 0,05\text{A}$  et  $U_{\max} = 0,04\text{V}$ ) permettent de déduire la résistance équivalente de l'ensemble, correspondant à la résistance interne de l'appareil : on trouve  $0,8\Omega$ . Cette résistance est difficilement vérifiable en raison de sa faible valeur.

Alors que nous reprenons le galvanomètre pour effectuer des tests, nous nous apercevons que l'aiguille ne bouge plus lorsque l'appareil est branché dans un circuit. La mesure de la résistance interne totale de l'appareil entre ses deux bornes montre pourtant que le circuit est fermé, que les deux bornes sont bien reliées électriquement. Avec un montage réalisé trop rapidement, nous apercevons de la fumée qui s'échappe de l'appareil : nous débranchons immédiatement le tout.<sup>11</sup> Il

11. La fumée qui s'est échappée de l'appareil provient du matériau isolant qui recouvre le *shunt*. Celui-ci a trop chauffé pendant cette manipulation maladroite, sans toutefois dégrader le fonctionnement de l'appareil.

apparaît donc qu'un courant parcourt l'appareil, mais comme l'aiguille ne réagit pas, nous suspectons un problème de connection entre le *shunt* et la bobine du cadre mobile.

Une inspection plus poussée de l'appareil montre en effet qu'une des brasures situées à l'arrière de l'appareil, qui relie une borne de la bobine du cadre mobile à l'un des fils gainés oranges est cassée. Après avoir gratté la peinture noire qui recouvre l'étain sur la brasure, nous la consolidons avec un apport d'étain supplémentaire. L'appareil est à nouveau en bon état de marche.

L'instrument est finalement remonté après avoir nettoyé chaque pièce et notamment la vitre de protection, en veillant particulièrement à deux points :

- l'aiguille doit être parfaitement droite pour évoluer librement dans l'espace réduit entre la vitre et le cadran ;
- le réglage du zéro doit permettre de placer l'aiguille au centre du cadran : on y parvient en décalant légèrement la vitre pour placer convenablement le dispositif de réglage (voir section 3.4 pour plus de détails : les deux appareils étudiés sont conçus de manière très similaire).

Le travail de restauration sur cet appareil est donc assez limité puisque celui-ci était déjà en état de marche. Son démontage nous a cependant permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce type de galvanomètre.

## 3 Le voltmètre

Le galvanomètre utilisé comme voltmètre que nous avons choisi d'étudier pour ce rapport est un appareil commercialisé par la société Chauvin & Arnoux, probablement du début du XX<sup>ème</sup> siècle, au regard de la notice de 1915 (Ann. A).

### 3.1 Description de l'appareil

Le voltmètre est composé d'un cadre en laiton de 25 cm de diamètre fixé sur une plaque de bois circulaire, elle-même fixée sur un support de bois (noir) permettant de maintenir l'appareil en position verticale. L'aiguille est protégée par une plaque de verre circulaire qui comporte un insert permettant d'ajuster la position de l'aiguille sur le zéro de la graduation. L'aiguille est mobile, quand nous déplaçons l'appareil elle oscille légèrement et semble en bon état, le réglage du zéro est encore possible (Fig. 11).

Le cadran est gradué de 0 à 150 par pas de 2 dans les deux directions et semble destiné à mesurer les tensions des courants continus. Cet appareil ressemble très fortement à la description de la notice du constructeur et nous pouvons estimer son prix de 1915 selon les caractéristiques disponibles à ce stade :

- 130 francs pour un appareil de diamètre 25 cm ;
- trois sensibilités en 150 divisions :
  - 15 V par 0,1 : 10 francs ;
  - 3 V par 0,02 : 5 francs ;
  - 1,5 V par 0,1 : 5 francs ;

pour une estimation à 150 francs de 1915, soit un peu moins de 400 euros de 2021. L'appareil comporte quatre « bornes » sur la partie supérieure et une ligne rouge semble symboliser le circuit interne de l'appareil (Fig. 12). Il semble que pour une utilisation normale, le courant passe par la borne 0 (position Ouest) et par une des trois autres bornes (1,5 V, 3 V et 15 V) pour pouvoir traverser la bobine du cadre mobile. Les bornes portent des valeurs qui font immédiatement penser à des calibres à la manière des voltmètres modernes.

La borne 1,5 V (position Nord Nord Ouest) porte l'indication « R = 500 » et le schéma électrique tracé en rouge semblent indiquer qu'un dipôle, probablement une résistance se situe au niveau de cette borne.





FIGURE 11 – L'appareil avant le démontage.



FIGURE 12 – L'appareil après démontage de la vitre.

La borne 3 V (position Nord Nord Est) porte l'indication «  $R = 1000$  » et le schéma électrique tracé en rouge semblent indiquer que le courant traverse deux résistances avant d'entrer dans la bobine du cadre mobile.

La borne 15 V (position Est) porte l'indication «  $R = 5000$  » et le schéma électrique tracé en rouge semblent indiquer que le courant traverse trois résistances avant d'entrer dans la bobine du cadre mobile.

Sur le cadran figure aussi une valeur «  $I = 0,003$  » faisant penser à une valeur d'intensité électrique. En appliquant la loi d'ohm à ces valeurs, le tout semble cohérent : en effet, par exemple avec le calibre le plus élevé, on a  $15\text{ V} = 5000\Omega \times 0,003\text{ A}$ . Cette valeur est donc sûrement l'intensité maximale traversant l'appareil à sa valeur limite de 15 V.

## 3.2 Premières expériences

Nous avons essayé de placer l'appareil dans un circuit aux bornes d'un générateur de tension, en délivrant une tension inférieure au calibre sélectionné. À ce stade, aucune mesure n'est possible : l'aiguille ne bouge pas. Comme le cadran semble indiquer des résistances, nous utilisons un ohmmètre pour vérifier ces valeurs en utilisant les bornes de l'appareil. Aucune combinaison de borne, que ce soit entre la borne 0 et les autres ou entre les bornes 1,5 V, 3 V, 15 V entre elles, ne permet une mesure. Nous utilisons ensuite le multimètre en testeur électrique sans parvenir à trouver de connexions entre les bornes de l'appareil. Problèmes identifiés à ce stade : le courant ne circule pas dans l'appareil en utilisant les bornes extérieures.

Nous décidons donc d'enlever le cadran de mesure pour accéder aux composants de l'appareil. Il suffit pour cela de dévisser les vis en laiton qui maintiennent le cadran, de pivoter l'aiguille d'un côté et le cadran de l'autre pour le faire sortir. Nous voyons sur la figure 13 que le circuit est composé, comme le schéma du cadran le laissait penser, de trois bobines résistives sur des broches en cuivre, branchées en série. Une bobine résistive s'ajoute à la précédente quand le calibre de mesure augmente : une bobine résistive pour le calibre 1,5 V, deux bobines résistives pour 3 V et trois bobines résistives pour 15 V.

Nous essayons de trouver un contact électrique avec le multimètre en grattant un peu le verni sur les soudures de part et d'autre des bobines résistives, sans succès. Nous réussissons cependant à faire bouger légèrement l'aiguille en appliquant un courant faible (courant de test de conductivité du multimètre) à la bobine seule en créant un contact électrique directement au niveau des soudures des fils gainés oranges. Hypothèse à ce stade : le fil d'une ou plusieurs bobines est cassé ou trop endommagé pour conduire le courant, mais la bobine sur le cadre mobile à l'intérieur de l'aimant fonctionne toujours. Nous décidons de démonter les bobines résistives une à une en commençant par la plus proche de la bobine du cadre mobile (Fig. 14). En espérant qu'une seule des trois soit défectueuse.

## 3.3 Les bobines résistives

### 3.3.1 Démontage des bobines

**Protocole pour le démontage et la caractérisation des bobines :**

- la bobine est dessoudée de la borne de l'appareil. La brasure d'origine semble faite avec de l'étain : en effet le métal fond grâce à un fer à souder réglé sur  $400^\circ\text{C}$  ;
- la broche de cuivre traverse l'axe de la bobine et les deux pièces sont maintenues par une brasure à l'étain du côté opposé de la borne de l'appareil. On la retire également avec le fer à souder ;
- le diamètre du fil résistif est mesuré grâce à un pied à coulisse, puis avec un micromètre ;
- la bobine est ensuite déroulée dans un long couloir et la longueur de fil mesurée grâce à un décamètre ;





FIGURE 13 – Une fois le cadran retiré, on remarque trois bobines résistives (numérotées pour la suite 1, 2 et 3, de gauche à droite).

- la résistivité du fil a été mesurée avec un ohmmètre sur la plus grande distance possible de fil intacte, dont la longueur est mesurée grâce à un décimètre.

Lors du déroulage du fil résistif, nous avons observé à plusieurs endroits que le fil était cassé, ce qui explique que l'appareil ne soit plus fonctionnel. Nous avons aussi constaté que le fil métallique de couleur grise est isolé par un fil de soie très fin enroulé autour. Les fils de plus gros diamètre, qui relient les bobines entre elles sont des fils de cuivre isolés. Le fil résistif est maintenu en bobine par une bande isolante collante de couleur marron enroulée sur la bobine, seul le fil de cuivre isolé entre les bobines est visible une fois la bande collante mise en place.

### 3.3.2 Caractérisation des bobines

On s'intéresse au bobinage résistif correspondant au premier calibre du voltmètre (calibre 1,5 V, résistance affichée «  $R = 500$  »). Le protocole précédemment détaillé est appliqué à cette bobine pour la caractériser. Voici le compte-rendu des observations réalisées.

Il y a sept tours de fil de cuivre tressé au-dessus d'un tour de ruban adhésif en toile puis un fil plus fin entouré de fil de soie. On déroule la bobine en comptant le nombre de tours : il y a 680 tours. La longueur totale du fil est mesurée avec un décimètre dans le couloir : le fil fin mesure  $(21,8 \pm 0,2)$  m.

On mesure la résistance  $R$  du fil pour quelques longueurs de fil :

- pour 1 m : on mesure la résistance d'un mètre de fil avec un multimètre  $R = (16,6 \pm 0,2) \Omega$  ;
- pour 10 m : on mesure la résistance de dix mètres de fil avec le multimètre  $R = (177 \pm 5) \Omega$ .

La section du fil est mesurée avec un pied à coulisse puis avec un micromètre : on trouve  $200 \mu\text{m}$  à plusieurs endroits du fil (sans la soie). Le rayon  $r$  du fil résistif est donc proche de  $100 \mu\text{m}$  pour cette bobine.



FIGURE 14 – Une des trois bobines résistives sur sa broche de cuivre. On voit à droite la bande de maintien de la bobine et en bas, le fil de cuivre isolé qui relie les bobines entre elles.

Avec ces mesures on peut finalement estimer la résistivité  $\rho$  du matériau utilisé pour le fil :

$$\rho = R \frac{\pi r^2}{l}$$

et on trouve  $\rho \sim 50 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . Cette mesure de la résistivité du matériau ainsi que la couleur du métal plutôt grise nous fait dire que le fil résistif est probablement fait de constantan (alliage de cuivre et de nickel) [res]. La résistance totale de la bobine est par ailleurs estimée à  $21,8 \times 17,7 \sim 390 \Omega$ .

Ces mesures sont répétées pour les deux autres bobines (cassées également) ce qui permet d'obtenir les valeurs estimées du tableau 1.

	Bobine 1	Bobine 2	Bobine 3
Diamètre du fil ( $\mu\text{m}$ )	200	200	100
Longueur du fil (m)	21,8	37	78
Résistance linéique ( $\Omega/\text{m}$ )	17	13	46
Résistance totale estimée ( $\Omega$ )	386	480	3600

TABLE 1 – Bilan des mesures réalisées permettant d'estimer les caractéristiques des bobines résistives. D'après nos observations, tous les fils résistifs sont en constantan.

La mesure du diamètre du fil est délicate. Nous avons aussi tenté de mesurer sa dimension en exploitant le phénomène de diffraction : un faisceau laser illumine le fil et on observe sur un écran éloigné une figure de diffraction. La taille de la tache centrale pourrait nous indiquer précisément la taille du fil puisque l'on connaît la longueur d'onde du laser. Cette mesure réalisée à la hâte n'a cependant pas donné de résultats satisfaisants et devrait être répétée.

### 3.3.3 Test fonctionnel

Nous décidons de faire un test fonctionnel de l'appareil en utilisant des résistances modernes pour remplacer les bobines résistives. Nous choisissons une association de trois résistances correspondantes aux indications du cadran de l'appareil (Fig. 15), soit :

$$R_1 = 500\Omega \quad (200\Omega + 150\Omega + 150\Omega);$$

$$R_2 = 500\Omega \quad (250\Omega + 250\Omega \text{ et } R_1 + R_2 = 1000\Omega);$$

$$R_3 = 4000\Omega \quad (2000\Omega + 2000\Omega \text{ et } R_1 + R_2 + R_3 = 5000\Omega).$$

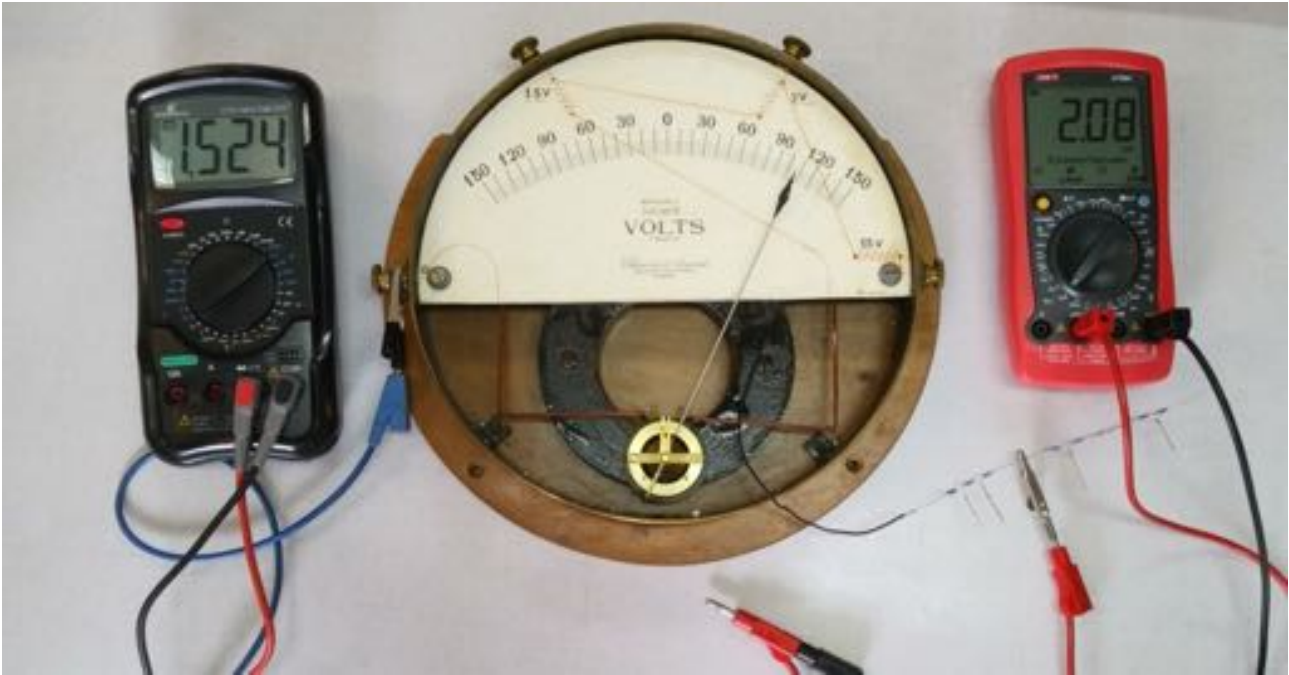


FIGURE 15 – Test de mesure pour une tension de 1,5 V sur le calibre  $R_1 = 500\Omega$  ( $150\Omega + 150\Omega + 200\Omega$ ).

Pour la mesure, nous réalisons un pont diviseur de tension, alimenté par un générateur de tension réglable. Un multimètre (noir) mesure la tension aux bornes du pont diviseur de tension : c'est grâce à cette mesure que nous ajustons la tension que le galvanomètre va mesurer. Le galvanomètre est branché lui aussi aux bornes du pont diviseur de tension, en série avec un multimètre qui nous permet de vérifier l'intensité du courant circulant dans le galvanomètre. Nous décidons de commencer les mesures en utilisant le plus petit calibre de l'appareil, nous devons donc utiliser seulement la résistance  $R_1$ , en série avec la bobine du cadre mobile. Une fois la tension de 1,5 V appliquée aux bornes du pont diviseur de tension, nous constatons que l'aiguille indique la graduation 106, et pas la graduation 150 comme nous l'espérions.

Une rapide application de la loi d'ohm pour la boucle du galvanomètre nous donne une résistance plus grande que  $500\Omega$  :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1,524}{2,08 \times 10^{-3}} = 732\Omega.$$

Nous décidons donc de vérifier la résistance totale du galvanomètre en utilisant un ohmmètre. Entre la résistance  $R_1$  et la borne 0 nous mesurons  $650\Omega$ , la valeur est plus élevée que la résistance  $R_1$  seule, mais pas égale à  $732\Omega$ . La première erreur est d'avoir utilisé de trop grandes longueurs de fil entre les appareils, l'addition des résistances bien que faibles des fils donne vite une erreur systématique de plusieurs dizaines d'ohms. La deuxième erreur, la plus importante, est que nous

n'avons pas pris en compte la résistance de la bobine du cadre mobile que nous mesurons à  $150\ \Omega$ . Le document constructeur des appareils de 1915 (Ann. A) fait mention d'une résistance interne de  $75\ \Omega$  en moyenne pour la bobine du cadre mobile, cette valeur semble cohérente avec ce que nous observons. Afin de prendre en compte cette résistance interne de l'appareil, nous changeons la valeur de la résistance  $R_1$  pour que la valeur totale de  $R_1$  et de la bobine du cadre mobile soit égale à  $500\ \Omega$ .

On modifie donc la valeur de  $R_1$  à  $350\ \Omega$  ( $200\ \Omega + 150\ \Omega$  et  $R_1 + R_{\text{cadre mobile}} = 500\ \Omega$ ). Nous menons à nouveau l'expérience précédente, en minimisant les longueurs de fils de connexion. Cette fois, en appliquant une tension de  $1,5\ \text{V}$ , l'aiguille du galvanomètre pointe exactement sur la graduation  $150$  et l'intensité traversant l'appareil est bien de  $3\ \text{mA}$  (Fig. 16).



FIGURE 16 – Test de mesure pour une tension de  $1,5\ \text{V}$  sur le calibre  $R_1 = 350\ \Omega$  ( $150\ \Omega + 200\ \Omega$ ).

Cette dernière expérience est bien conforme à l'utilisation prévue par le constructeur : « Dans les voltmètres, le circuit du cadre mobile à une résistance moyenne de  $75\ \text{ohms}$ , et un courant de  $5\ \text{milliampères}$  ( $0.005$ ) suffit pour donner à l'aiguille une déviation égale à la totalité de l'échelle. À la suite du cadre mobile, sont placées en série, avec lui, des bobines dont la résistance ne varie pas avec la température et dont la valeur est proportionnelle à la f. e. m. maxima à mesurer. » Pour notre appareil les valeurs sont de  $150\ \Omega$  pour la résistance du cadre mobile et de  $3\ \text{mA}$  pour la déviation maximale.

### 3.4 Remontage de l'appareil

À ce stade, nous avons deux options pour le remontage de l'appareil :

- remise en état à l'identique avec des matériaux neufs pour reconstruire les bobines résistives ;
- remise en état fonctionnelle à l'identique en utilisant des résistances à semi-conducteurs modernes en remplacement des bobines résistives.

Notre objectif premier était de pouvoir remonter les bobines résistives avec des matériaux neufs. Cependant malgré les recherches de fournisseurs de fils résistifs en constantan ou autre alliage aux propriétés comparables, nous n'avons pas réussi à trouver un fournisseur capable de répondre à nos



besoins très spécifiques. La problématique majeure pour eux étant de nous fournir de très petites quantités, comparées à leur échelle industrielle de fabrication. En effet, nous avons eu plusieurs propositions pour nous fournir des kilogrammes de bobines de fils résistifs en constantan alors que notre besoin est de l'ordre de quelques dizaines de grammes par bobine dans l'appareil. L'offre étant beaucoup trop disproportionnée par rapport à nos besoins, nous avons choisi d'utiliser des semi-conducteurs modernes pour faire fonctionner l'appareil.

D'un point de vue purement fonctionnel, l'utilisation de résistances modernes n'impacte en rien le fonctionnement original de l'appareil. Dans la conception de l'appareil, les bobines résistives avaient pour seul et unique rôle de fournir une résistance électrique constante avec la température.<sup>12</sup> L'appareil était d'ailleurs conçu de manière telle que les champs magnétiques induits par ces bobinages ne puissent pas influencer le mouvement de l'aiguille du cadre mobile. Les résistances choisies pour les différents calibres sont les suivantes (Fig. 17) :

- équivalents de la bobine résistive 1 :  $350\ \Omega$  (deux résistances de  $150\ \Omega$  en série suivies de deux résistances de  $100\ \Omega$  en parallèle) ;
- équivalents de la bobine résistive 2 :  $500\ \Omega$  (deux résistances de  $500\ \Omega$  en série) ;
- équivalents de la bobine résistive 3 :  $4000\ \Omega$  (deux résistances de  $2000\ \Omega$  en série).



FIGURE 17 – Remontage de l'appareil avec des résistances modernes.

Nous avons ensuite dépoussiéré et nettoyé sommairement les parties de l'appareil avant remontage comme à l'origine. Il est nécessaire d'être minutieux lors du remontage de la vitre tout particulièrement en ce qui concerne l'insert de réglage du zéro. Il faut placer l'axe derrière la vitre sur l'axe de symétrie de la vitre, et veiller à ce que le petit axe se place entre les deux languettes du dessus du cadre mobile. Une fois la vitre positionnée, il faut régler le zéro de l'appareil et s'assurer que rien n'entrave la course de l'aiguille qui a un espace réduit de quelques millimètres pour se déplacer entre la vitre et le cadran.

---

12. À ce titre, les résistances choisies ont une dépendance certaine avec la température qui peut nuire à la précision de l'appareil. Toutefois ces variations restent faibles.

## 4 Un test de fonctionnement

Avec les deux appareils remontés, nous réalisons un test rapide pour s'assurer que les appareils fonctionnent correctement. Une expérience plus poussée permettant d'évaluer la précision des appareils n'a pu être réalisée par manque de temps.

Un générateur stabilisé en tension et possédant deux calibres (6 V et 12 V) alimente une résistance de  $300\ \Omega$ . Le galvanomètre ampèremètre est branché en série avec la résistance et le galvanomètre voltmètre est branché aux bornes de la résistance (Fig. 18). Ce dernier est utilisé avec son plus gros calibre (15 V, résistance interne  $5000\ \Omega$ ). On mesure donc simultanément le courant  $I$  qui parcourt la résistance et la tension  $U$  à ses bornes. La loi d'ohm permet d'évaluer rapidement la cohérence des mesures obtenues en calculant le courant  $I_{\text{ohm}}$  attendu dans le circuit compte tenu des composants utilisés (Tab. 2).

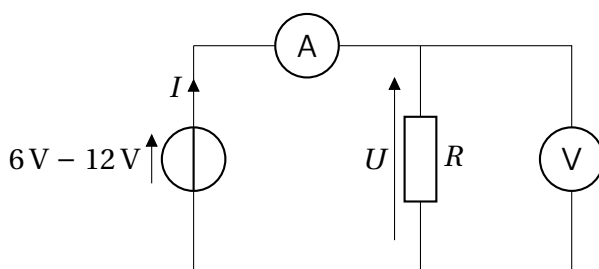


FIGURE 18 – Circuit utilisé pour les mesures.

Tension du générateur (V)	Tension $U$		Courant $I$		Courant $I_{\text{ohm}}$	
	(graduation)	(V)	(graduation)	(mA)	(mA)	corrigé (mA)
12	120	12,0	128	42,7	40	42,4
6	58	5,8	62	20,7	20	20,5

TABLE 2 – Mesures relevées lors du test de fonctionnement des appareils. La première colonne indique le calibre du générateur de tension. Les deux suivantes indiquent la valeur de tension relevée sur le galvanomètre voltmètre : la tension en volts se calcule à partir de la lecture sur l'appareil en tenant compte du calibre utilisé (ici, 15 V correspond à la graduation 150). Les deux d'après indiquent la valeur du courant mesuré avec le galvanomètre ampèremètre : le courant en ampère se calcule à partir de la lecture sur l'appareil (ici, 0,050 A correspond à la graduation 150). L'avant dernière colonne donne le courant estimé avec la loi d'ohm d'après le calibre du générateur. La dernière tient compte de la présence des différents appareils, notamment de celle du voltmètre dont la résistance interne de  $5\ \text{k}\Omega$  affecte le montage.

Avec ces résultats, on constate que les appareils fonctionnent convenablement :

- la tension correspond à la valeur du calibre du générateur (il faudrait la mesurer avec précision pour établir une comparaison plus quantitative). L'influence de l'ampèremètre sur le montage est négligeable, avec sa résistance interne de l'ordre du ohm ;
- le courant mesuré est en très bon accord avec les valeurs attendues, notamment lorsqu'on tient compte de la présence du voltmètre qui perturbe la mesure. En effet, sa résistance interne de  $5\ \text{k}\Omega$  n'est pas si grande par rapport à la résistance utilisée dans le montage. Elle est bien plus faible que la résistance de nombreux appareils plus modernes ( $\sim 1\ \text{M}\Omega$ ) et il faut la prendre en compte pour obtenir des résultats précis. La résistance équivalente à l'ensemble  $\{R, \text{galvanomètre}\}$  est de  $283\ \Omega$ , ce qui explique le courant légèrement plus important que celui attendu.

Si la présence de l'ampèremètre n'est pas source de perturbation majeure dans ce montage, le voltmètre affecte sensiblement la mesure. Il convient de prendre en compte la totalité du montage lorsque des mesures précises sont prévues.

## Conclusion

Durant ce travail nous avons pu étudier en détail le fonctionnement de deux galvanomètres ampèremètre et voltmètre du début du XX<sup>ème</sup> siècle et les remettre en état de fonctionnement. Leur démontage a permis de mieux comprendre leur principe de fonctionnement et d'apprécier leur conception astucieuse, qui permet des mesures sensibles et précises. Il est regrettable que la restauration des bobines résistives du voltmètre avec des matériaux neufs n'ait pas pu avoir lieu : l'obtention du fil résistif adapté est difficile compte tenu des faibles quantités dont nous avons besoin. Les résistances utilisées sont des résistances modernes, qui ne correspondent pas à l'époque de fabrication de l'appareil, mais l'appareil fonctionne selon ses caractéristiques d'origine.

D'un point de vue strictement personnel, nous restons impressionnés par la qualité de conception et de fabrication de ces appareils qui datent de près d'un siècle. En effet, grâce à seulement quelques composants, un aimant permanent et quelques fils aux propriétés finement connues et ajustés à l'usage, les industriels de l'époque étaient capables de fabriquer des appareils de mesure fiables et robustes qui n'ont rien à envier aux appareils grand public modernes en termes de précision. Les promesses du fabricant indiquées dans le catalogue se sont par ailleurs avérées complètement justifiées.

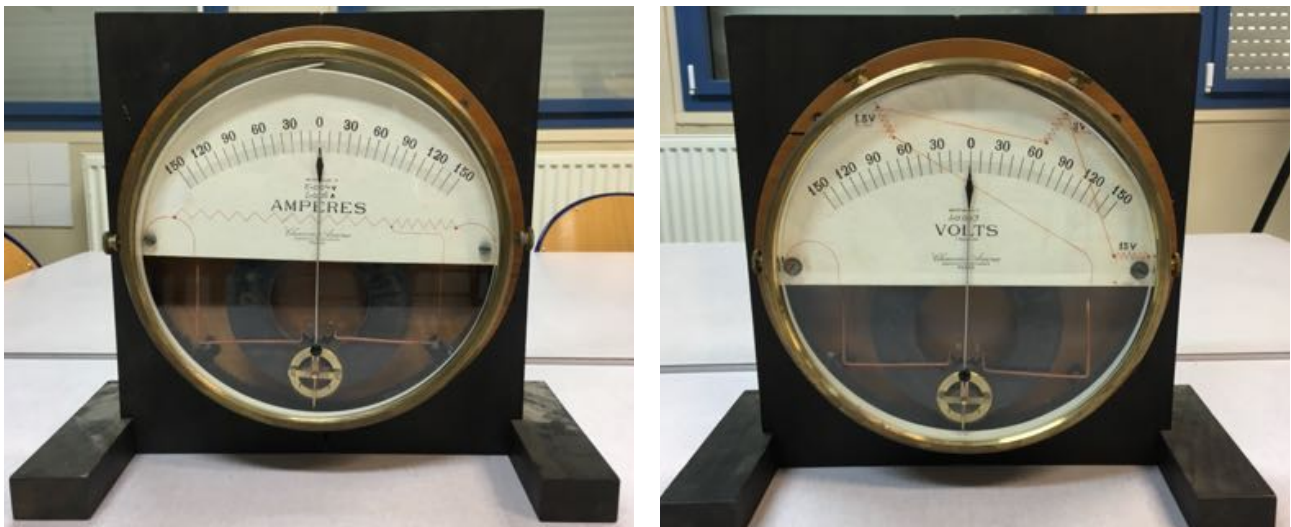


FIGURE 19 – Les deux galvanomètres remis en état.

## Références

- [Ale14] Alexandre, S. “Le tableau de conversion en francs/euros est actualisé.” (2014).
- [AMN<sup>+</sup>16] Ardellier, M., *et al.* “Le galvanomètre.” Technical report (2016).
- [CEG<sup>+</sup>17] Cardini, S., *et al.* *Tout en un Physique PSI/PSI\**. Dunod edition (2017).
- [FR98] Faroux, J.-P. and Renault, J. *Electromagnétisme 2*. Dunod edition (1998).
- [mov] “Moving Charges and Magnetism.” URL [https://www.thetestpapers.com/course/physics-neet-electricity-and-magnetism/lessons/moving-charges-and-magnetism/#110\\_THE\\_MOVING\\_COIL\\_GALVANOMETER](https://www.thetestpapers.com/course/physics-neet-electricity-and-magnetism/lessons/moving-charges-and-magnetism/#110_THE_MOVING_COIL_GALVANOMETER).
- [res] “Résistance d'un fil.” URL <https://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/Electro/e07fil.htm>.
- [wik] “Les ressorts/Lois de comportement.” URL [https://fr.wikibooks.org/wiki/Les\\_ressorts/Lois\\_de\\_comportement](https://fr.wikibooks.org/wiki/Les_ressorts/Lois_de_comportement).



## A Extraits du catalogue Chauvin & Arnoux (1915)

Le catalogue complet est disponible en cliquant sur le lien ci-dessous :

<http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?M9857.1/1/100/137/104/135>

Les pages qui concernent les instruments étudiés dans ce rapport sont rapportées ci-après.

Bruxelles 1897, Médaille d'Or  
 Paris 1899, Médaille d'Or  
 Paris 1900, Médaille d'Or  
 Paris 1900, Grand Prix  
 St-Louis 1904, Médaille d'Or  
 Liège 1905, Grand Prix

SEPTEMBRE 1915

Milan 1906, Hors Concours  
 Marseille 1908, Grand Prix  
 Londres 1908, Grand Prix  
 Bruxelles 1910, Grand Prix  
 Turin 1911, Grand Prix  
 Gand 1913, Grand Prix

# APPAREILS — DE — CONTROLE

CHAUVIN & ARNOUX

INGÉNIEURS-CONSTRUCTEURS

Bureaux & Ateliers

186 et 188, Rue Championnet, 186 et 188

PARIS



MARQUE DE FABRIQUE

Telegraphes :

ELECMESSUR-PARIS



TÉLÉPHONE

MARSEILLE 05-52

## VOLTMÈTRES ET AMPÈREMÈTRES

### Apériodiques de contrôle à sensibilité variable pour courants continus

Ces galvanomètres sont basés sur le principe d'un cadre galvanométrique mobile dans un champ magnétique produit par un aimant permanent. — Dans nos modèles, ce cadre est constitué par une petite couronne de fil de cuivre isolé à la soie. Cette couronne est sertie entre deux bagues concentriques de cuivre pur, découpées dans un tube obtenu par le procédé Ilmore. Ces deux bagues constituent un amortisseur électro-magnétique très énergique qui permet à l'aiguille indicatrice d'atteindre, **sans oscillations** et néanmoins **avec exactitude**, sa position d'équilibre pour chaque mesure. — Le principe de ces nouveaux galvanomètres, qu'il ne faut pas confondre avec celui des galvanomètres à aiguille ou palette de fer doux mobile entre les mâchoires d'un aimant, permet de réaliser des appareils de mesure dont la permanence de l'étalement peut être considérée comme pratiquement absolue. La raison d'être de cette permanence est due uniquement à la très faible force magnétomotrice développée par le courant traversant les spires du cadre mobile et qui est sans action appréciable sur l'aimant permanent. Ainsi, tandis que, dans nos galvanomètres, cette force magnétomotrice n'est pas supérieure à 2 ampères-tours pour une déviation de l'aiguille égale à la totalité de l'échelle, elle atteint dans certains appareils à palette de fer doux mobile, une valeur de près de 6.000 ampères-tours, force magnétomotrice qui, développée dans le **voisinage immédiat** de l'aimant permanent, ne peut qu'affaiblir considérablement cet aimant et, par conséquent, modifier à chaque mesure l'étalement du galvanomètre. — L'application rationnelle du principe sur lequel sont basés nos voltmètres et ampèremètres nous a permis de construire des galvanomètres **apériodiques** à lectures précises et rapides pouvant être faites dans toutes les positions de l'appareil et tellement sensibles qu'on peut aisément effectuer, avec un même appareil, des mesures pouvant **varier dans un rapport quelconque**. Ils échappent complètement aux erreurs dues à l'hystérésis, auxquelles sont sujets les appareils à fer doux mobile dans un solénoïde, surtout dans le voisinage du zéro de la graduation.

**Voltmètres.** — Dans les voltmètres, le circuit du cadre mobile a une résistance moyenne de 75 ohms, et un courant moyen de 5 milliampères (0,005) suffit pour donner à l'aiguille une déviation égale à la totalité de l'échelle. A la suite du cadre mobile, sont placées en série, avec lui, des bobines dont la résistance ne varie pas avec la température et dont la valeur est proportionnelle à la *V. e. m.* maxima à mesurer. Ainsi, par exemple, la résistance d'un appareil destiné à mesurer 150 volts est de  $150 : 0,005 = 30.000$  ohms comprenant 75 ohms cuivre et 29.925 ohms en fil dont la résistance est indépendante de la température. Une caractéristique de ces appareils est qu'ils peuvent être munis de sensibilités très différentes. Un voltmètre de 15 cm de diamètre, par exemple, peut être disposé pour donner une déviation égale à la totalité de l'échelle (150 divisions) pour 3—15—150—300—600 volts, etc.

**Ampèremètres.** — Dans les ampèremètres, le circuit du cadre mobile a une résistance moyenne de 0,5 ohm, et un courant moyen de 50 milliampères (0,05) suffit pour donner à l'aiguille une déviation égale à la totalité de l'échelle. Une résistance en métal à coefficient de température nul est ajoutée pour le tarage de l'appareil.



CHAUVIN & ARNOUX, INGÉNIEURS-CONSTRUCTEURS  
186 et 188, Rue Championnet, PARIS



VOLTMÈTRES

Gal. seuls.	Série . . . . .	10 c/m	15 c/m	25 c/m	32 c/m	40 c/m
	Prix . . . . .	70 fr.	95 fr.	130 fr.	160 fr.	190 fr.

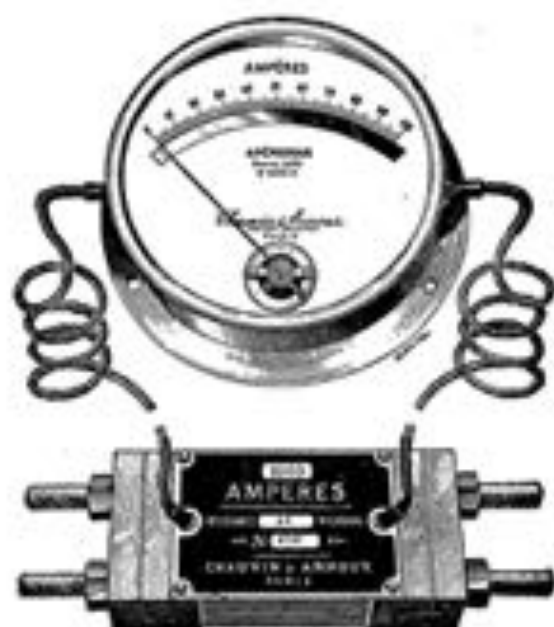
BOBINES DE CIRCUIT

pour Galvanomètres gradués en :

100 Divisions	125 Divisions	150 Divisions	Prix
VOLTS	VOLTS	VOLTS	Francs
1 par 0,01	1,25 par 0,01	1,5 par 0,01	5
2 " 0,02	2,5 " 0,02	3 " 0,02	5
10 " 0,1	12,5 " 0,1	15 " 0,1	10
20 " 0,2	25 " 0,2	30 " 0,2	15
50 " 0,5	62,5 " 0,5	75 " 0,5	20
100 " unités	125 " unités	150 " unités	30
200 " 2	250 " 2	300 " 2	40
500 " 5	500 " 5	600 " 5	50
" " "	" " "	750 " 5	60
" " "	625 " 5	" " "	65
1000 " 10	" " "	" " "	75
1500 " 15	1250 " 10	1500 " 10	85
2000 " 20	1675 " 15	" " "	95
" " "	2500 " 20	2000 " 15	110
" " "	" " "	3000 " 20	125

Pour établir le prix d'un voltmètre à plusieurs sensibilités, ajouter au prix brut du galvanomètre seul le prix de la sensibilité la plus élevée qu'on veut avoir et majorer de 15 francs pour chacune des sensibilités inférieures supplémentaires détaillées.

CHAUVIN & ARNOUX, INGÉNIEURS-CONSTRUCTEURS  
186 et 188, Rue Championnet, PARIS



AMPÈREMÈTRES

Gal. seuls.	Série . . . . .	10 c/m	15 c/m	25 c/m	32 c/m	50 c/m
	Prix . . . . .	80 fr.	100 fr.	120 fr.	160 fr.	190 fr.

SHUNTS

pour Galvanomètres gradués en :

100 Divisions	225 Divisions	150 Divisions	Prix
AMPÈRES	AMPÈRES	AMPÈRES	Francs
1 par 0,01	1,75 par 0,01	1,5 par 0,01	10
2 " 0,02	2,5 " 0,02	2 " 0,02	10
10 " 0,1	12,5 " 0,1	15 " 0,1	15
20 " 0,2	25 " 0,2	30 " 0,2	20
50 " 0,5	62,5 " 0,5	75 " 0,5	20
100 " unités	125 " unités	150 " unités	25
200 " 2	250 " 2	300 " 2	30
500 " 5	500 " 5	450 " 3	35
" " "	625 " 5	600 " 5	38
" " "	" " "	750 " 5	42
1000 " 10	" " "	" " "	48
1500 " 15	1250 " 10	1500 " 10	55
2000 " 20	1875 " 15	" " "	70
" " "	2500 " 20	2250 " 15	85
" " "	" " "	3000 " 20	100

CHAUVIN & ARNOUX, INGÉNIEURS-CONSTRUCTEURS  
186 et 188, Rue Championnet, PARIS

## MILLIAMPÈREMÈTRES APÉRIODIQUES DE PRÉCISION

pour Laboratoires, Usages Médicaux, Télégraphiques, T. S. F., etc.



Ces galvanomètres fonctionnent dans toutes les positions et sous n'importe quelle orientation.

Ils sont *apériodiques*, leur aiguille atteignant rapidement, et néanmoins avec une exactitude rigoureuse, sa position d'équilibre.

Leur sensibilité peut être augmentée ou diminuée instantanément dans une proportion quelconque déterminée lors de la construction de l'instrument, ce qui permet d'appliquer un seul appareil à la mesure de courants d'une intensité double, quadruple, décuple, etc., sans que la précision de la mesure ne soit altérée et sans avoir d'autres manœuvres à faire que d'agir sur une simple clé.

Leur résistance intérieure extrêmement faible ne dépassant jamais quelques ohms, et même dans la plupart des cas quelques dixièmes d'ohms, permet de réaliser une économie considérable sur les prix d'achat et d'entretien des batteries aux applications médicales.

Enfin, la permanence de leur étalonnage permet de retrouver, après quelques années, ces instruments toujours exacts.