

ÉSPÉ Académie de Limoges 2015-2016

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

Le galvanomètre



Maxime ARDELLIER

Grégory MARRE

Alex NADAUD

Kelly ROELS

Clément TOURDES

Encadré et dirigé par

Jérôme FATET

Table des matières

Table des illustrations.....	3
Table des images	4
Table des tableaux	5
Introduction.....	6
1. Recherches historiques	7
2. Fonctionnement [4, pp. 693–698].....	10
3. Vérification de l'état du galvanomètre	13
3.1. Détermination du nombre de spires de la bobine	13
3.2. Résultats	13
4. Rénovation	17
4.1. Les aiguilles	17
4.2. Test des aiguilles aimantées	18
4.3. Réparation du galvanomètre et problèmes rencontrés.....	19
4.4. Elaboration d'une table de références	22
Conclusion.....	24

Table des illustrations

Figure 1: Simplification du fonctionnement du galvanomètre de Nobili.....	10
Figure 2 : Action d'un courant sur une aiguille aimantée.....	10
Figure 3 : Légende des différents éléments du galvanomètre	11
Figure 4 : Variation du champ magnétique en fonction de l'intensité	14

Table des images

Image 1 : Ampèremètre.....	14
Image 2 : Teslamètre	14
Image 3 : illustration de la mesure du champ magnétique à l'intérieur de la bobine.	15
Image 4 : Bobine étudiée	16
Image 5 : Aiguilles commandées	18
Image 6 : Test de l'aimantation des aiguilles.....	18
Image 7 : Aiguilles à nettoyer	19
Image 8 : Ajustement du diamètre de la tige à celui du pivot des aiguilles.	20
Image 9 : Reconstruction du galvanomètre.....	20
Image 10 : Premières mesures	20
Image 11 : Mesure pour 10 mA et 20 mA	23

Table des tableaux

Tableau 1 : Répartition des tâches dans le groupe 6

Tableau 2 : Valeur étalons d'angle en fonction du courant injecté dans la bobine.... 22

Introduction

Au cours de l'année de master 2 MEEF en option sciences physiques et chimiques, une mission nous a été donnée dans le cadre du cours sur l'épistémologie et l'histoire des sciences. Cette mission consiste à restaurer un galvanomètre de Nobili vieux de plus d'un siècle.

Pour pouvoir répondre à cette demande, nous avons dû fixer un programme et un plan d'action. La rénovation de ce galvanomètre a donc pris deux directions importantes une partie qui porte sur le fonctionnement historique de ce galvanomètre ainsi que les notions physiques utilisées et maîtrisées à l'époque. Et, dans un deuxième temps l'analyse du galvanomètre physique avec la vérification de l'état de l'existant et les différentes étapes de sa rénovation.

Nous nous sommes réparties les différentes tâches de la façon suivante :

NOMS	TACHES
Alex	Fabrication/fonctionnement
Clément	Test de l'existant/Rénovation
Greg	Test de l'existant/Rénovation
Kelly	Recherches historiques/Encadrement de l'équipe
Maxime	Fonctionnement/Rénovation

Tableau 1 : Répartition des tâches dans le groupe

1. Recherches historiques

Le 21 juillet 1820, Hans Christian Ørsted (1777-1851) publie ses Expériences relatives à l'effet du conflit électrique (*Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*), c'est à dire l'action d'un courant électrique sur un aimant. [1] L'expérience d'Ørsted, décrite dans son mémoire, montre qu'un conducteur transportant un courant électrique fait dévier l'aiguille aimantée d'une boussole placée à proximité du conducteur. Mais Ørsted ne suggéra aucune explication satisfaisante du phénomène, ni n'essaya de le représenter dans une formulation mathématique. En effet, les physiciens ont dû se passer, dans leurs théories, du concept d'électron jusqu'aux années 1890. La notion de champ électromagnétique prendra corps lentement au cours du XIXe siècle. Le numéro de juillet 1820 du journal contenant le texte latin original d'Ørsted ainsi que son supplément en allemand constitue l'acte de naissance de l'électromagnétisme.

La réception en France des travaux d'Ørsted

Dans les mois qui suivent la réception des travaux d'Ørsted en France paraissent plusieurs travaux : ceux d'Ampère, sur l'action exercée par un courant électrique par un autre courant (découverte de l'électrodynamique) ; ceux de Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et Felix Savart (1792-1841) sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement (calcul de l'action d'un élément de courant sur un pôle magnétique) ; ceux de François Arago (1786-1853) sur les expériences relatives à l'aimantation du fer et de l'acier par l'action du courant électrique (découverte de l'électro-aimant) ; ceux de Michael Faraday (1791-1867) sur les mouvements électromagnétiques et la théorie du magnétisme (premier moteur électromagnétique).

Arago, fut le premier, à rendre compte de cette expérience à l'Académie des sciences le 4 septembre 1820.

Le lundi 11 septembre 1820, il y a répété les expériences d'Ørsted et a lu son mémoire. Ampère, qui assistait aux présentations d'Arago s'est immédiatement passionné par cette découverte. Dans un effort prodigieux, dont il rendra compte pendant sept semaines consécutives à l'Académie, il créera l'électrodynamique.

Ampère montre que deux fils parallèles s'attirent quand l'électricité les parcourt dans le même sens et se repoussent si les courants électriques circulent en sens

contraire. Le 25 septembre 1820, Ampère montre également qu'un conducteur enroulé en spirale peut être attiré ou repoussé, suivant le sens du courant, par le pôle d'un aimant, ce qui est l'effet réciproque de celui constaté par Ørsted, le solénoïde étant équivalent à un aimant.

Ampère intervient de nouveau à l'Académie le 16 octobre 1820, cette fois avec Arago, pour rapporter l'aimantation d'aiguilles d'acier soumises à l'action d'un fil électrique. Pour amplifier l'effet, Ampère enroule le conducteur en hélice, il invente ainsi le « solénoïde ». Il poursuit ses communications à l'Académie presque à chaque séance : le 30 octobre, le 6 novembre, le 13 novembre et le 27 novembre 1820. C'est à cette époque **qu'il construit le premier galvanomètre** et qu'il invente, avec Arago, le 10 novembre 1820, l'électro-aimant.

« Je pense que pour distinguer cet instrument de l'électromètre ordinaire, on doit lui donner le nom de *galvanomètre*, et qu'il convient de l'employer dans toutes les expériences sur les courants électriques, comme on adapte habituellement un électromètre aux machines électriques, afin de voir à chaque instant si le courant a lieu, et quelle en est l'énergie. »[2, p. 11]

Le 4 décembre 1820, il retrouve par une autre voie la loi donnée par Biot. Il poursuit ses communications les 11 et 26 décembre 1820 et continue en janvier 1821 (les 8 et 15 janvier) ; ce n'est donc pas moins de treize communications à l'Académie des Sciences qu'Ampère aura présentées entre le 18 septembre 1820 et le 15 janvier 1821.

Qu'est ce que le galvanisme ?

Ampère dit, dans une lettre au « Prof De La Rive », Paris, 15 Mai 1821 :

« On n'a pas fait une objection contre l'identité établie par Volta entre le galvanisme et l'électricité, de ce que le courant de la machine de verre n'agit pas sur l'aiguille aimantée, comme le fait le courant galvanique, pourquoi en ferait-on contre l'identité du magnétisme et de l'électricité [...] »[2, p. 123]

Qu'est-ce que le courant galvanique ?

D'après Ampère le « courant galvanique » correspond au courant électrique. « [...], et que le pôle de l'aimant qui regarde habituellement le nord soit à gauche de ce qu'on appelle ordinairement *le courant galvanique*, dénomination que j'ai cru devoir changer en celle de courant électrique [...] »[2, p. 49]

Etymologie du nom « galvanomètre »

(1797) De *Galvani*, Luigi Galvani (1737-1798), médecin et physicien italien qui découvrit les phénomènes électriques qui portent son nom. [3]

André-Marie Ampère (1775-1836) donne naissance au galvanomètre à la fin de 1820.

2. Fonctionnement [4, pp. 693–698]

Nobili utilise à l'époque deux notions différentes pour pouvoir construire son galvanomètre, dans un premier temps le multiplicateur de *Schweigger* ainsi que le principe du système quasi-astatique qu'il a eu l'idée d'utiliser. Ce galvanomètre permet à la fois de constater la présence des courants les plus faibles et de mesurer leur intensité.

Dans le cadre d'un système astatique, le principe est de s'absoudre de l'influence de la Terre de par la présence du champ magnétique. En présentant deux aiguilles de même aimantation parallèles, de pôles magnétiques inversés, comme sur l'image ci-dessous, on s'absout alors du champ magnétique terrestre.

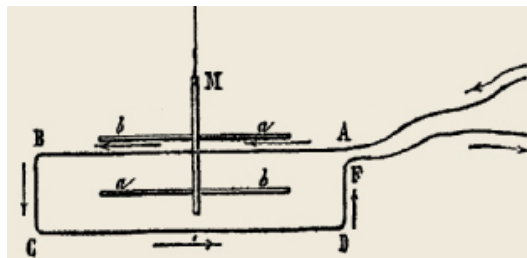


Figure 1: Simplification du fonctionnement du galvanomètre de Nobili

De ce fait le courant dévie toujours l'aiguille à angle droit quelle que soit son intensité. La déviation indique seulement la présence du courant, sans rien prouver sur son intensité. Hors, Nobili cherche à créer un instrument qui permet de mesurer à la fois l'intensité et le sens du courant. De ce fait il propose de mesurer l'influence par la déviation, si l'une des deux aiguilles présente une faible différence d'aimantation, on conserve alors l'influence de la Terre mais cette action sera très faible et dès lors, l'action des courants par l'intermédiaire du multiplicateur sera, au contraire, considérable.

Afin de rendre l'appareil plus sensible pour démontrer l'existence et le sens de courant électrique faible, Nobili a introduit des aiguilles compensées dans le multiplicateur de Schweigger.

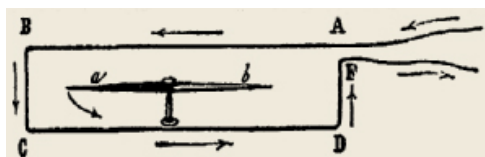


Figure 2 : Action d'un courant sur une aiguille aimantée

Le multiplicateur de Schweigger, du nom de son inventeur, permet de multiplier l'action du courant en plaçant l'aiguille au centre d'un fil métallique. Le courant circule de A vers B, au-dessus de l'aiguille, et en sens inverse, de C vers D, sous l'aiguille. Depuis l'expérience d'Ørsted on sait que ces deux portions de courant

ajoutent leurs actions sur l'aiguille. Il en est de même pour les portions BC et DF. L'aiguille est ainsi sollicitée par quatre actions concordantes comme présenté sur la figure ci-dessus.

En enroulant le fil de soie n fois (ici environ 500 fois), on va alors multiplier par n l'action d'une spire d'où le nom de cet élément, un multiplicateur. Plus le nombre de spire va être important et plus on pourra alors déterminer un courant de faible intensité.

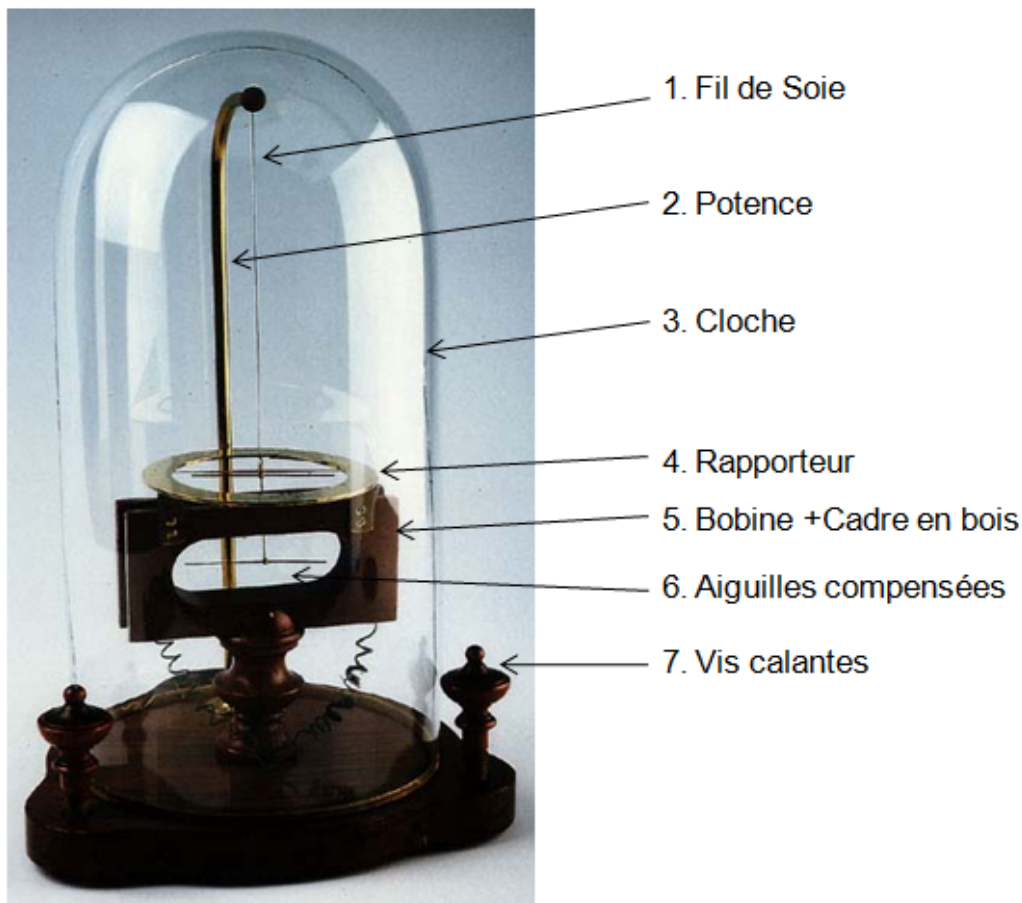


Figure 3 : Légende des différents éléments du galvanomètre

Les différents éléments présentés dans la figure ci-dessus ont tous leurs importances qui vont être détaillées dans le paragraphe suivant :

1. Le fil de soie permet de stabiliser et maintenir les aiguilles compensées, sans qu'il y ait de torsion ni de circulation de courant intempestive.
2. La potence, dans la continuité du fil de soie, permet de maintenir les aiguilles à l'intérieur de la bobine et au dessus du rapporteur sans qu'il y ait contact.

3. La Cloche en verre isole la totalité des éléments de toute action extérieure notamment les courant d'air qui pourrait faire tourner les aiguilles et modifier la mesure effectuée.
4. Le rapporteur permet d'obtenir une valeur de la variation d'angle faite par les aiguilles lors du passage du courant.
5. La bobine et le cadre en bois permettent de faire passer le courant. Le fait que ce cadre soit fixé avec le rapporteur, permet de faire tourner la totalité pour aligner le 0 du rapporteur sur l'un des pôles des aiguilles.
6. Les aiguilles compensées sont le point central du galvanomètre, ce sont-elles qui vont tourner en fonction du champ magnétique induit par le courant qui traverse la bobine.
7. Les vis calantes permettent de mettre d'aplomb le galvanomètre pour qu'il n'y ait pas d'inclinaison.

3. Vérification de l'état du galvanomètre

3.1. Détermination du nombre de spires de la bobine

Nous avons essayé de déterminer le nombre de spires de manière visuelle en dénombrant le nombre de spires sur la largeur de la bobine puis sur la profondeur.

Pour cela nous avons photographié la bobine et nous avons tenté de mesurer le nombre de spires sur la largeur en pointant les spires sur une photographie de haute résolution.

Pour la profondeur, nous avons mesuré à l'aide d'un pied à coulisse la largeur d'un fil, puis la profondeur de l'ensemble des fils. Nous avons donc pu estimer le nombre de spires sur la profondeur.

Nous devons signaler que cette méthode ne peut donner qu'un ordre de grandeur sur le nombre de spires de la bobine car nous ne pouvons être certain que la répartition des spires est uniforme sur l'ensemble de la bobine.

Nous avons effectué plusieurs mesures pour en faire une moyenne et réduire l'incertitude sur l'estimation.

3.2. Résultats

Un décompte a été fait pour les spires visibles à la surface puis nous avons fait la moyenne de ces valeurs : 34, 34, 36, 37 et 39. **Le nombre de spires moyen obtenu est de 36.**

Un comptage a ensuite été fait suivant une autre méthode pour le nombre de spires sur la hauteur. Nous avons estimé, à l'aide d'un pied à coulisse, l'épaisseur du fil de soie à 0,07 cm. Sur une hauteur de 1,1 cm, le nombre de spires en hauteur est donc **d'environ 15 spires.**

En conclusion cette estimation nous permet d'évaluer à 540 le nombre de spires de la bobine (**$15 \times 36 = 540$ spires**).

Pour vérifier cette mesure nous avons essayé de déterminer le nombre de spires de cette bobine par un moyen physique.

Nous avons pour cela assimilé la bobine au cas particulier du solénoïde (qui est une bobine particulière, avec une seule épaisseur de fil). Les formules que nous

allons utiliser ne sont valables que pour un solénoïde. Nos résultats ne peuvent déjà être qu'approximatifs.

Le champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde infini est défini par la relation suivante : $B = \frac{\mu N i}{l}$. Avec « μ » la perméabilité du vide (ou de l'air) en H.m^{-1} , « N » le nombre de spire du solénoïde, « l » la longueur du solénoïde en mètre. Le rapport $\frac{N}{l}$ représente en réalité la densité de spire par unité de distance.

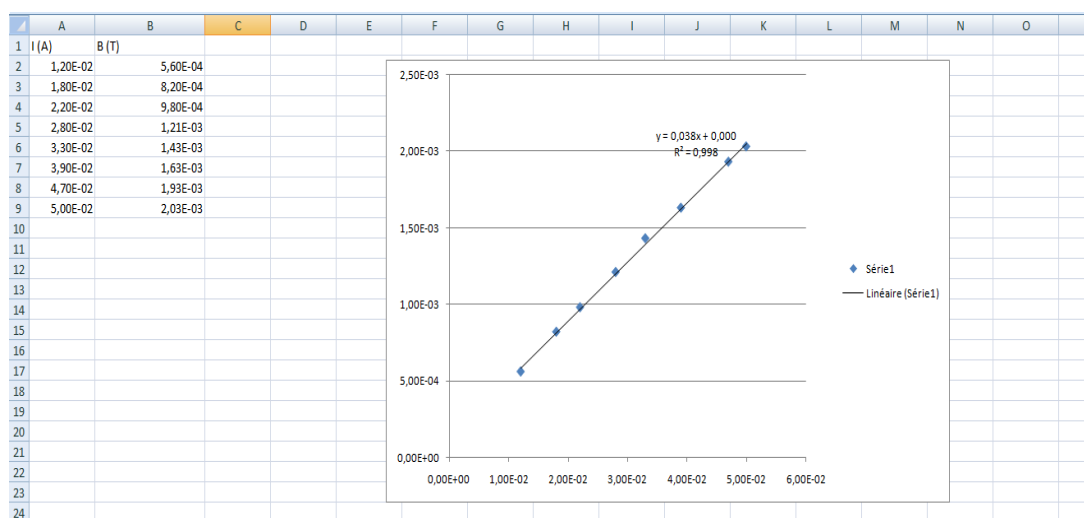


Figure 4 : Variation du champ magnétique en fonction de l'intensité

Nous avons mesuré le champ magnétique à l'intérieur de la bobine, comme le montre l'image ci-dessous (en considérant qu'il s'agissait d'un solénoïde infini) à l'aide d'un Teslamètre (image 2) et l'intensité à l'intérieur du circuit à l'aide d'un ampèremètre (image 1). Sur le graphique ci-dessus apparaît la variation du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde infini en fonction de l'intensité mesurée.



Image 1 : Ampèremètre



Image 2 : Teslamètre

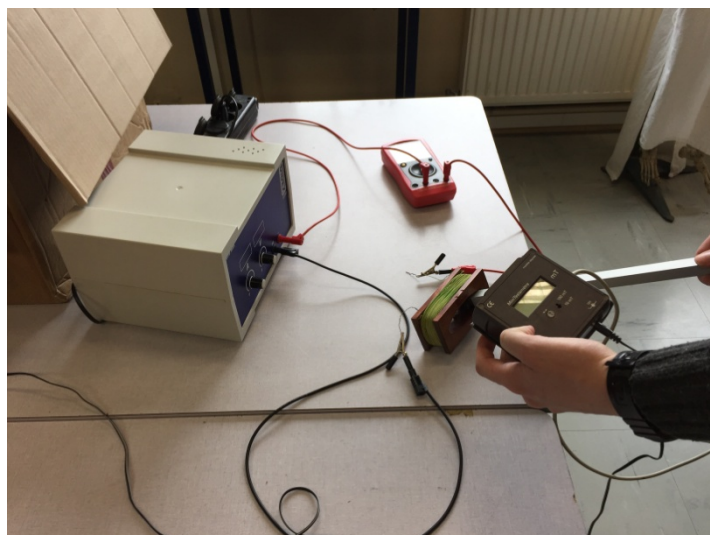


Image 3 : illustration de la mesure du champ magnétique à l'intérieur de la bobine

Il a dès lors était possible de construire le graphe $B = f(i)$, ci-dessus, le résultat attendu était une droite linéaire car il s'agit d'une fonction linéaire de la forme $y = ax$, où « a » représente le coefficient directeur de la droite, cette constante vaut « $\frac{\mu N}{l}$ ».

Nous sommes remontés à ce coefficient directeur de manière expérimentale, la valeur obtenue est de 0,038. Nous pouvons donc remonter à N en connaissant μ et l, avec $\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ et $l = 2,6 \text{ cm}$.

Le résultat obtenu est de **786 spires**.

Il est cependant à noter que ce résultat ne peut être d'approximatif car tout d'abord nous avons assimilé une bobine à un solénoïde, nous ne pouvons donc pas affirmer que la formule utilisée est appropriée. Nous pensons cependant qu'elle permet de nous donner un ordre de grandeur sur le nombre de spires de cette bobine. Pour étayer ce fait nous constatons que la proportionnalité de la formule utilisée est respectée puisque que nous obtenons une droite avec un coefficient de régression proche de 1.

En effet le coefficient de régression R^2 est de 0,998, plus ce coefficient est proche de 1, plus les valeurs prédites (de la droite), sont proches des valeurs mesurées.

Une deuxième source d'erreur est le fait que la répartition des spires n'est pas uniforme le long de la bobine, cela a pour effet d'augmenter le nombre de spires par unité de surface. Ce fait permet d'expliquer la différence entre le nombre de spires mesuré par le comptage et celui déterminé par la théorie.



Image 4 : Bobine étudiée

Nous pouvons donc affirmer que le nombre de spires de la bobine étudiée, ci-dessus, est compris entre 500 et 700 spires.

4. Rénovation

Les aiguilles présentes initialement sur le galvanomètre mis à notre disposition n'étant ni en ni en bon état ni celle d'époque, nous avons décidé de les remplacer.

4.1. Les aiguilles

Les aiguilles d'origine ayant disparu, il nous a fallu déterminer la taille des aiguilles à commander.

Les aiguilles doivent avoir une taille comprise entre 85 mm et 90 mm pour passer dans le dynamomètre et indiquer précisément des valeurs d'angles (les mesures ont été prises à l'aide d'un pied à coulisse). Nous avons choisi une taille intermédiaire de 88 mm.

Pour rechercher les aiguilles nous avons dans un premier temps fait des recherches sur « Google » pour trouver des sites de revendeurs :

« Acheter aiguille aimantée »

Nous avons ensuite exploré différents liens de sites proposés :

- Ebay (aiguille aimantée) → Pas de résultats
- Aliexpress (magnet needle) → Pas de résultats
- Amazone (aiguille aimantée) → Pas de résultats

Puis, nous avons cherché plus précisément sur les sites des fabricants de matériels de laboratoire :

- Le laborantin : Pas de résultats.
- Pierron : Les aiguilles n'ont pas la bonne taille (75mm au lieu de 87 mm).
- Jeulin : Les aiguilles n'ont pas la bonne taille de plus elles sont très chères.
- Sciencethic : Les aiguilles n'ont pas la bonne taille
- **Sordalab : Fabrication d'aiguilles aimantées de 100mm.**

Nous avons choisi d'acheter ces aiguilles de 100 mm pour ensuite les découper à la taille souhaitée de 88 mm.

Référence : AIGAIM100, d'une valeur de 2,75 €/pièce. Nous avons commandé 4 pièces, en prévoyant deux pièces de rechange.

Les aiguilles réceptionnées présentées dans la photo ci-dessous, ont ensuite subi un test d'aimantation.



Image 5 : Aiguilles commandées

4.2. Test des aiguilles aimantées



Image 6 : Test de l'aimantation des aiguilles

Le test de l'aimantation des aiguilles, nous a permis de nous assurer que nos quatre aiguilles soient identiques. Il s'est avéré qu'une des aiguilles avait un problème celle-ci n'indiquant pas le nord.

Parmi les trois aiguilles restantes, l'une d'elles, avait une faible aimantation et mettait trop de temps à se stabiliser, elle a donc également été mise de côté.

Il nous reste donc deux aiguilles dont la dimension doit être adaptée à 88 mm. Pour cela, après avoir fait le tracé des découpes sur les aiguilles, Grégory a demandé à ses collègues d'atelier en Aluminium du lycée professionnel, malheureusement, il n'y a pas le matériel nécessaire pour les découper sans détériorer l'aimantation. M. Fatet a donc proposé de faire ces découpes ainsi que des trous dans les axes des aiguilles pour fixer le fil de cuivre afin de lier les aiguilles entre elles.

4.3. Réparation du galvanomètre et problèmes rencontrés

Les aiguilles ayant été préparées, nous avons entrepris de les fixer au galvanomètre. Dans un premier temps nous n'avons pas trouvé de fil de cuivre, nous l'avons donc remplacé par un fil en nickel, puis nous avons fixé une première aiguille à l'intérieur de la bobine. Pour cela nous avons mis le fil de nickel au travers de la bobine et de l'aiguille puis soudé le tout à l'aide d'étain. Ensuite, la seconde aiguille ayant été endommagée lors du perçage le pivot c'est décroché de l'aiguille rendant bien plus complexe son accrochage au fil de nickel. De plus l'étain n'accroche pas sur le nickel ne rendant pas la fixation viable. Nous allons donc changer le fil de nickel par un autre matériau réagissant mieux à l'étain.

Avant de démonter et remonter le galvanomètre, nous avons cherché à savoir si le montage actuel fonctionnait. Nous voulions ainsi savoir si les aiguilles étaient toujours en état.

Nous avons alors branché en série un générateur de tension et d'intensité variable, une résistance de $1k\Omega$ et le galvanomètre. En faisant varier la tension délivrée par le générateur nous avons pu observer les aiguilles du galvanomètre changer de direction. Le galvanomètre était donc en état de fonctionner avant le changement de tige.

Notre problème était le suivant : les aiguilles n'étaient pas parallèles. Pour remédier à cela nous avons choisi de changer la tige qui reliait les deux aiguilles entres-elles, en la remplaçant par une tige en laiton. Pour cela il fallait tout d'abord dessouder et nettoyer les aiguilles.



Image 7 : Aiguilles à nettoyer

Une fois les aiguilles nettoyées, nous avons remplacé la tige en nickel par une tige en laiton. Le diamètre de cette tige étant trop important nous avons dû l'ajuster à celui du pivot de l'aiguille.



Image 8 : Ajustement du diamètre de la tige à celui du pivot des aiguilles.

Une fois tous ces détails ajustés nous avons commencé la reconstruction du galvanomètre.

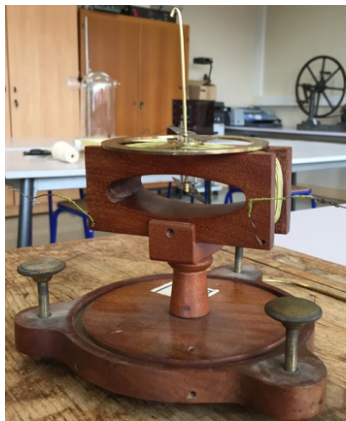


Image 9 : Reconstruction du galvanomètre

Le fil qui relie la potence aux aiguilles induit une légère torsion sur ces dernières ce qui rend délicat l'ajustement des aiguilles sur le « 0 » du rapporteur. Plusieurs réglages furent nécessaires avant de pouvoir réaliser les premières mesures. (Cf vidéo 1 en pièce attachée)

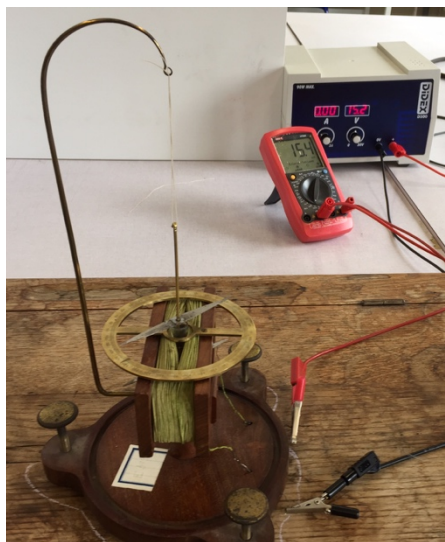


Image 10 : Premières mesures

La borne « noire » correspond à la borne négative du générateur et la borne « rouge » à la borne positive du générateur. Nous avons ajouté des repères pour identifier plus rapidement les différentes bornes du galvanomètre.

4.4. Elaboration d'une table de références

La dernière étape de cette rénovation est de réaliser une table de mesures dans laquelle nous faisons correspondre les mesures d'angles à des intensités.

Cette table va servir par la suite à mesurer des courants inconnus traversant la bobine du galvanomètre et ainsi de rendre cet appareil fonctionnel.

Le tableau étalon présenté ci-dessous regroupe donc les différentes valeurs correspondantes entre les angles et le courant traversant la bobine.

Sur la première partie, les angles présentés sont obtenus après une installation continue du courant. L'utilisation d'un interrupteur dans la deuxième partie permet de noter les valeurs à la suite d'une installation soudaine du courant, de ce fait, on obtient un angle équivalent au maximum de déviation ainsi que la valeur d'un angle après que le courant se soit stabilisé.

	INSTALLATION DU COURANT	AVEC INTERRUPTEUR	
I (mA)	$\theta(^{\circ})$	$\theta_{\max} (^{\circ})$ (angle maximum)	$\theta_{\text{stab}} (^{\circ})$ (angle stabilisé)
1	21	25	21
2	25	31	25
3	29	39	29
4	31	44	32
5	33	49	35
6	36	55	38
7	37	59	39
8	39	61	41
9	41	66	44
10	43	69	45
11	44	71	46
12	45	75	48
13	46	77	49
14	47	80	50
15	48	81	51

Tableau 2 : Valeurs étalons d'angle en fonction du courant injecté dans la bobine

Les premières mesures stabilisation avec interrupteur ouvert : 10°

Les mesures suivantes (à partir de 4mA) stabilisation vers 19°

Les mesures suivantes (à partir de 13mA) stabilisation vers 21°

La position quasi-astatique donne un angle de 20° .



Image 11 : Mesure pour 10 mA et 20 mA

Conclusion

Après plusieurs semaines de travail nous avons finalement réussi à rénover ce galvanomètre datant de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Pour cela il a fallu dans un premier temps comprendre le fonctionnement de ce galvanomètre. Après cela nous avons analysé le galvanomètre pour voir quelles pièces étaient d'époque et quelles pièces pouvaient être changées.

Cependant, lors de cette étude poussée sur cet appareil, nous avons pu constater les difficultés relevant de la rénovation d'un appareil ancien dont les notices d'utilisation et de fabrication n'existaient plus. La première difficulté que nous avons alors rencontrée portait sur la qualité de la bobine et sa précision. Plusieurs méthodes physiques ont alors été utilisées pour pouvoir corroborer le nombre de spires déterminé visuellement. La deuxième difficulté principale portait sur la recherche et l'acquisition de nouvelles aiguilles adaptées à la taille du galvanomètre et suffisamment semblables pour être dans un état quasi-astatique.

Une fois ces différents éléments rassemblés et le galvanomètre restauré, nous avons établi un étalon sous forme de tableau de correspondance degré/intensité. L'étalon permet alors de comparer les futures mesures à cette grille car aucune formule physique reliant les angles à l'intensité ne peut être formulée pour cet appareil.

Malgré toutes nos recherches et restaurations, les mesures effectuées avec le galvanomètre ne peuvent être considérées comme très précises car l'impossibilité de dérouler la bobine rend la détermination du nombre de spire approximative, de plus la suspension de l'aiguille ainsi que son alignement sur le zéro de la graduation apportent aussi une incertitude dans la mesure effective.

Néanmoins, le but principal de cette étude a été atteint, après plusieurs semaines de recherche et de travail, le principe de fonctionnement de l'appareil a été appréhendé par le groupe et ce galvanomètre est de nouveau fonctionnel.

Références bibliographiques

- [1] “L’acte de naissance de l’électromagnétisme | Bibnum Education.” [Online]. Available: <https://www.bibnum.education.fr/physique/electricite-electromagnetisme/l-acte-de-naissance-de-l-electromagnetisme>. [Accessed: 15-Jan-2016].
- [2] “Recueil d’observations électro-dynamiques : contenant divers mémoires, notices, extraits de lettres ou d’ouvrages périodiques sur les sciences relatifs à l’action mutuelle de deux courants électriques, à celle qui existe entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et à celle de deux aimants l’un sur l’autre / par M. Ampère,...” [Online]. Available: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94802p/f14.item.r=galvanom%C3%A8tre>. [Accessed: 05-Feb-2016].
- [3] “galvanisme — Wiktionnaire.” [Online]. Available: <https://fr.wiktionary.org/wiki/galvanisme>. [Accessed: 12-Feb-2016].
- [4] “Les phénomènes de la physique / par Amédée Guillemin,...” [Online]. Available: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k95107q/f112.image.r=multiplicateur%20de%20Schweigger>. [Accessed: 04-Mar-2016].