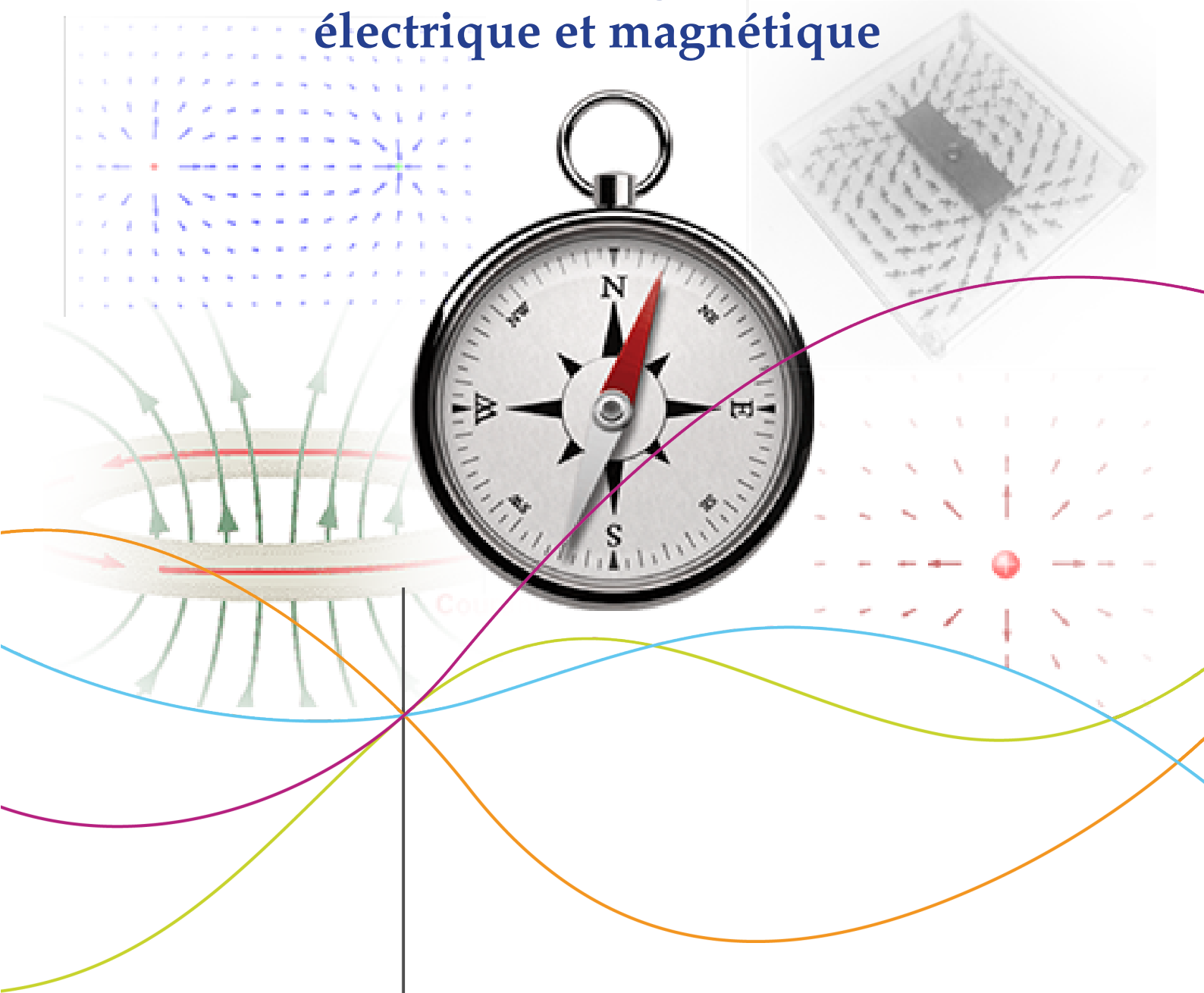


## Visualisation des lignes de champ électrique et magnétique



Enseignant responsable  
Diane DUVAL

Étudiants :

Clémence ODEZENNE  
Eymeric LAFRANQUE

Elliot SISTERON  
Aurélie MAIA E SILVA



**Date de remise du rapport :** 16/06/13

**Référence du projet :** STPI<sup>1</sup>/P6/2013 – 030

**Intitulé du projet :** Visualisation des lignes de champ électrique et magnétique

**Type de projet :** *expérimental*

**Objectifs du projet :**

- Aborder la notion de champ électrique et magnétique
- Découvrir ces champs au travers de l’histoire
- Lier cette notion à notre vie quotidienne
- Exposer les connaissances théoriques nécessaire à cette étude
- Présenter les instruments de mesures du champ électrique et magnétique
- Visualiser ces champs
- Proposer un TP associé aux lignes de champ pour les futurs STPI2

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>4</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Méthodologie, organisation du travail</b>	<b>6</b>
1.1 Répartition du travail . . . . .	6
1.2 Visite du Coria . . . . .	7
<b>2 À la découverte de la notion de champ électrique et magnétique</b>	<b>8</b>
2.1 Notion de champ en physique . . . . .	8
2.2 Présentation des champs . . . . .	8
2.3 Aspect historique . . . . .	9
<b>3 Appareils de mesure</b>	<b>13</b>
3.1 Les champs électriques (CE) . . . . .	13
3.2 Le champ magnétique . . . . .	14
3.3 Le champ électromagnétique . . . . .	14
<b>4 Expériences pour visualiser les champs</b>	<b>17</b>
4.1 Expériences permettant de visualiser le champ électrique . . . . .	17
4.2 Expériences permettant de visualiser les lignes de champ magnétique . . . . .	21
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>25</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>27</b>
<b>A Documentation technique</b>	<b>29</b>
A.1 Teslamètre . . . . .	29
A.2 Bobines d’Helmoltz . . . . .	30
<b>B TP d’introduction aux champs électriques et magnétiques</b>	<b>32</b>
B.1 Visualisation des lignes de champ électrique, expérience de la cuve rhéographique avec deux plaques conductrices parallèles . . . . .	32
B.2 Visualisation des lignes de champ magnétique : expériences sur la configuration de Helmholtz . . . . .	33

# Remerciements

Tout au long de notre projet, Mme Duval a su répondre à nos questions et nous aider dans l'avancement de celui-ci notamment en nous permettant d'aller visiter le laboratoire du Coria. C'est pourquoi nous tenons à la remercier, ainsi que M. Bultel et Boubert pour nous avoir permis d'accéder à leurs laboratoires et nous faire découvrir le domaine des plasmas et leurs différentes applications, mais aussi pour nous avoir proposé de lire et évaluer notre TP, dont la rédaction était l'un des objectifs de ce projet. Et enfin merci au doctorant du Coria qui nous a expliqué les différents aspects de sa thèse dans le domaine des plasmas induits par laser et qui nous aura aussi parlé de ce type de poursuite d'étude et donc éclairé sur ce sujet.

# Introduction

Sans en être vraiment conscients, nous baignons constamment dans des champs électriques et magnétiques, et de nos jours savoir les maîtriser et les prévoir est important dans beaucoup de domaines tels que l'ingénierie. Mais historiquement parlant, il n'a pas été évident pour l'homme de comprendre ces phénomènes parce qu'il ne pouvait pas les visualiser, et c'est sa curiosité qui l'a très vite poussé à chercher des moyens de voir et de comprendre ces phénomènes qui nous entourent.

Nous avons voulu exposer dans un premier temps les fondements théorique sur lesquels nous allions nous appuyer pour réaliser la visualisation des lignes de champ magnétiques et électriques.

Ensuite, nous avons fait une recherche bibliographique afin de montrer comment et quand ces concepts ont évolué au cours du temps.

Afin d'expliquer comment on peut mesurer et visualiser de nos jours ces champs nous avons listé les différentes techniques permettant de mesurer la valeur d'un champ selon ses caractéristiques.

Finalement, nous avons suivi une démarche expérimentale inhérente au projet afin de visualiser nous même ces phénomènes.

# Chapitre 1

## Méthodologie, organisation du travail

### 1.1 Répartition du travail

Durant ce semestre, il nous a été demandé d'effectuer un projet de P6 en groupe.

Dès la première séance, nous avons pu apprendre à nous connaître et prendre connaissance du sujet de ce projet en globalité, c'est à dire que nous avons pu en définir les objectifs. En effet avec l'aide de notre professeur référent, Mme Duval, nous avons pu appréhender les différents aspects du projet et ainsi définir ensemble différents axes de recherches et axes d'expérimentation pour la poursuite de notre travail.

A la fin de ce premier cours, nous avons déjà envisagé les différentes parties développées dans ce dossier, à savoir l'aspect théorique, l'aspect expérimental, l'aspect mesure des champs et l'aspect historique.

Durant les semaines qui ont suivi, nous avons pu soumettre l'idée d'une éventuelle visite au Coria à Mme Duval qui nous a permis par la suite de la concrétiser.

Concernant les expériences, nous avons très vite pu définir un protocole pour effectuer des prises de mesures sur des bobines en configuration Helmholtz puis envisager de futures expériences autour de la cuve rhéographique.

Pour les recherches et la rédaction nous nous sommes répartis les tâches ainsi :

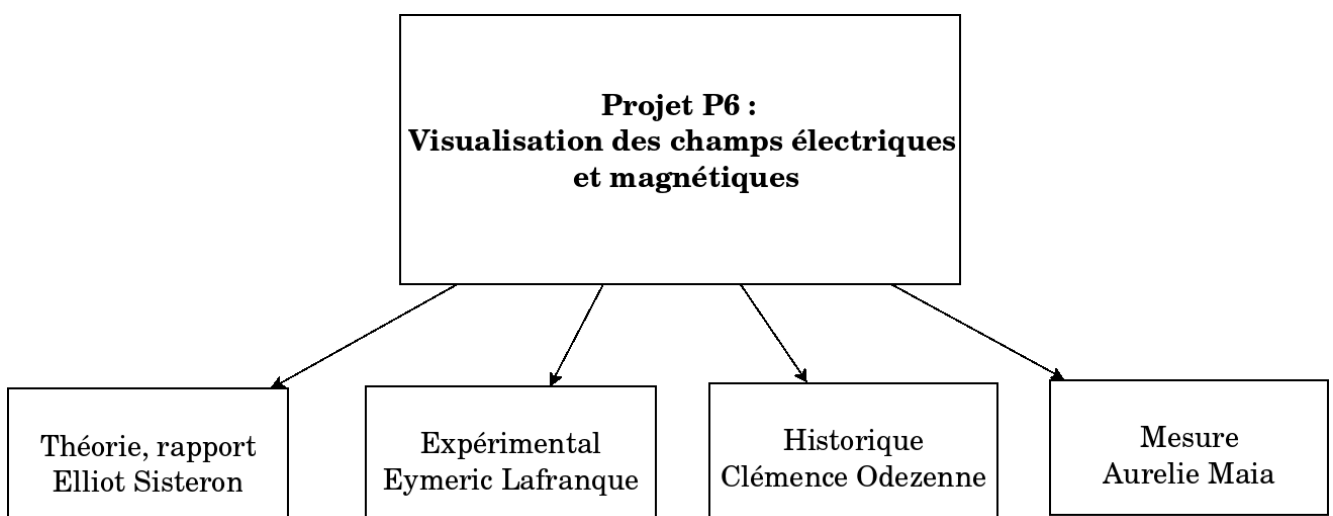


FIGURE 1.1 – Organigramme

## 1.2 Visite du Coria

Dans le cadre du projet, nous avons pu effectuer une visite au sein du complexe de recherche Coria, situé à Rouen. Cette initiative provient de notre volonté de voir de nos propres yeux des applications directes de l'électromagnétisme. Par ailleurs, nous espérons aussi enrichir notre dossier grâce à des connaissances différant du savoir dispensé à l'INSA.

Les notions qui nous ont été présentées durant la visite nous ont permis d'établir un lien entre le dossier et celle-ci. En effet nous avons pu constater qu'en générant un grand champ électrique on pouvait induire un plasma, un état de la matière où des électrons sont arrachés aux atomes du milieu. Dans ce milieu réactif, on retrouve des ions, des radicaux et des molécules excitées, c'est à dire des molécules changeant de niveau d'énergie (de l'état fondamental à l'état excité).

Lors de cette visite, nous avons pu aussi constater une des différentes applications des plasmas, la modélisation d'une sonde dans l'atmosphère terrestre. Les chercheurs que nous avons eu l'occasion de rencontrer là-bas, M. Arnaud Bultel et M. Pascal Boubert, travaillent sur la dimension physico-chimique des plasmas instationnaires en réalisant des modélisations et simulations, notamment pour comprendre les phénomènes liés à l'interaction entre une surface et un plasma crée par celle-ci lorsqu'elle rentre dans l'atmosphère. A ce propos, nous avons d'ailleurs eu la chance de voir un plasma, qui était restée jusqu'à ce jour une vague notion théorique. Ce fut une expérience enrichissante sur le plan scientifique et plutôt impressionnante par sa singularité. Cette première approche de leurs différentes activités avait pour but de nous montrer comment les conditions thermodynamiques de l'entrée planétaire d'une sonde étaient reproduites sur la surface du dispositif. L'intensité de la lumière émise par le plasma et collectée par un système de miroir est ensuite analysée en fonction de la température à l'intérieur du dispositif expérimental que nous avons vu.

Par la suite, suivant le fil conducteur de la notion de plasma, une expérience concernant les plasmas induits par laser nous a présentée par un doctorant. Son principe reposait sur la production de plasma par le tir sur un échantillon, dont on peut ainsi connaître la composition. Ce fut aussi l'occasion de pouvoir discuter avec un doctorant et de connaître ainsi ses impressions sur cette étape du cursus universitaire. Nous avons remarqué par ailleurs qu'il menait cette expérience en étant parti de zéro, notamment sur le montage des appareils. On se rend alors clairement compte du temps que peut prendre l'établissement d'un dispositif expérimental. Il était aussi intéressant de voir que le cheminement expérimental de ce jeune doctorant (5 mois de thèse) ne convergeait pas vers un but clairement connu puisqu'il n'avait pas pu encore l'appréhender totalement.

Sur la fin de la visite, nous avons pu aborder rapidement les plasmas de bord que l'on retrouve dans les tokamaks (les plasmas y sont contrôlés par confinement magnétique). Cette visite, par la gentillesse des deux intervenants ainsi que les expériences qui nous furent présentées fut réellement enrichissante pour notre projet, et à plus forte raison pour notre cursus scientifique.



# Chapitre 2

## À la découverte de la notion de champ électrique et magnétique

### 2.1 Notion de champ en physique

Un champ, en physique, correspond à une propriété qui se manifeste en tout point de l'espace-temps. Cette propriété physique est une grandeur mesurable qui dépendra de la position où elle est évaluée. On distingue deux types de champs :

- Les champs scalaire, dans le cas où la grandeur physique en question est une valeur numérique. Par exemple, on peut parler de champ scalaire de température.
- Les champs vectoriel, si l'on considère que la grandeur physique mesurable est caractérisée par un vecteur. Typiquement, on dira qu'un champ de force est un champ vectoriel.

### 2.2 Présentation des champs

#### 2.2.1 Champ électrique

Le champ électrique est lié aux charges, il est associé à la présence d'une tension. Plus la tension est élevée, plus son intensité est forte. On le note généralement  $\vec{E}$ . Il s'agit d'un champ vectoriel, il est donc défini, pour une charge ponctuelle par :

- Son origine
- Sa direction : radiale
- Son sens, vers l'intérieur pour une charge négative, vers l'extérieur pour une charge positive
- Sa valeur, en  $V.m^{-1}$

La valeur en un point donné du champ électrique dépend donc de la distribution de charges.

#### Champ électrostatique

On parle de champ « électrostatique » lorsque les charges qui créent le champ sont au repos. Le champ est associé à des courbes appelées « lignes de champs » qui en tout point de l'espace indiquent la direction du champ électrique.

D'après l'équation de Maxwell-Faraday en régime statique :

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \vec{0}$$

On a que le champ dérive d'un potentiel scalaire. En notant  $V$  ce potentiel, on a :

$$\vec{E} = -\text{grad}(V)$$

On définit alors les surfaces équipotentielles représentant l'équation :

$$V = \text{cste} \Leftrightarrow dV = 0$$

Et donc, les lignes de champ sont perpendiculaires aux équipotentielles.

## 2.2.2 Champ magnétique

Le passage d'un courant électrique crée un champ magnétique, c'est à dire que ce champ n'apparaît que lorsque le courant circule. Plus l'intensité du courant est élevée, et plus ce champ est grand. On le note  $\vec{B}$ . Ce champ est lui aussi vectoriel. Il se manifeste constamment, notamment avec le champ magnétique terrestre, les aimants, etc. Il se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges en mouvement (ou Force de Lorentz).

On exprime  $B$  en Tesla ( $T$ ). Le champ est, là encore, associé à des lignes de champs indiquant la direction du champ électrique.

## 2.2.3 Champ électromagnétique

On appelle champ électromagnétique l'association d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Ce type de champ permet de décrire une des 4 interactions fondamentales de l'univers : l'interaction électromagnétique.

## 2.3 Aspect historique

« C'est parce qu'un morceau d'ambre frotté de laine mettait en défaut les lois de la pesanteur, que la physique a créé les lois de l'électrostatique ; c'est parce qu'un aimant soulevait le fer en dépit de ces même lois de la pesanteur, qu'elle a formulé les lois de l'électromagnétisme. »

P. Duhem (1861-1916), physicien, chimiste, historien et philosophe des sciences français. La découverte de l'électromagnétisme a été un long chemin à travers les âges parsemé de découvertes et d'applications inattendues.

### 2.3.1 De l'antiquité à la fin du moyen-âge, la découverte des propriétés des phénomènes électriques et magnétiques

Les phénomènes électriques et magnétiques sont connus depuis l'antiquité, en effet on constate déjà à l'époque les propriétés de l'ambre qui, lorsqu'elle est frottée, attire des objets légers et celles du fer qui attire quant à lui certaines pierres. Ces propriétés donnent libre cours à des croyances et des légendes amusantes. Par exemple, vers 40-90 après J.-C., Dioscoride raconte qu'un aimant serait capable de révéler si une femme est infidèle ou non. Selon lui, placé sous le lit d'une femme infidèle, l'aimant l'en ferait tomber. On pense aussi à cette époque que la pierre d'aimant donne force, courage et permet de guérir des maux et des douleurs.

Deux siècles avant notre ère, les Chinois inventent déjà la boussole, elle n'est au départ qu'un morceau d'aimant naturel à la forme de cuillère magnétisée dans le sens de la longueur reposant sur une surface très lisse, de type bronze par exemple. Cet aimant, représentant en fait la Grande Ourse, s'oriente dans le sens nord-sud, avec le manche de la cuillère

pointant vers le sud. L'ensemble cuillère et plaque polie est appelé « shi ». Plus tard les Chinois perfectionnent le système à l'aide d'une simple aiguille aimantée par frottement posée sur un bouchon qui flotte à la surface de l'eau dans un bol. Celle-ci s'oriente directement selon le champ électromagnétique terrestre. Elle sera importée en Europe par l'intermédiaire du monde Arabe au XII<sup>ème</sup> siècle

Ainsi les premières applications des propriétés de l'aimant permettent de grandes avancées durant cette période de l'histoire. La boussole permet notamment l'essor de la navigation et guidera par exemple Christophe Colomb dans sa découverte d'un nouveau continent.



FIGURE 2.1 – La première boussole (source : <http://www.podcastscience.fm/dossiers/2013/05/16/lhi-de-lelectromagnetisme/>)

### 2.3.2 De la renaissance à la moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les premières hypothèses concernant l'électromagnétisme

Les premières déductions résultantes des propriétés si particulières des phénomènes électriques et magnétiques sont énoncées durant cette période de notre ère.

En effet, le napolitain Giambattista della Porta (1535-1615), physicien, opticien, philosophe, cryptologue et alchimiste, observe le premier le « spectre magnétique » ou les lignes de champ et c'est René Descartes (1595-1650), mathématicien, physicien et philosophe français, qui schématisera ses observations. Le physicien italien, dont certaines hypothèses sont plus qu'originales, comme par exemple le fait qu'une aiguille s'oriente dans la direction nord-sud si celle-ci est au préalable frottée contre du diamant ce qui est totalement faux, parvient tout de même à trouver un moyen d'évaluer la « puissance » d'un aimant à l'aide d'une balance à deux plateaux. Cela consiste à placer un aimant sous un des plateaux de la balance contenant un morceau de fer puis à chercher à contrebalancer l'attraction exercée par cet aimant sur le fer en ajoutant des poids sur l'autre plateau. Ainsi Della Porta réussira déjà à « mesurer » la force d'attraction de certains aimants.

Cependant, celui qui est le premier à différencier, à l'aide de ses expériences, les deux phénomènes à la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle est William Gilbert (1544-1603) un médecin faisant partie de la cour royale d'Angleterre. En travaillant notamment sur l'ambre frottée et l'aimant, il constate qu'il existe des différences entre les deux. Il observe que l'aimant n'attire que le fer alors que l'ambre, quant à elle, attire des matériaux variés. Par la suite, il fait la découverte de plusieurs autres matériaux qui une fois frottés acquièrent les mêmes propriétés que l'ambre. Il constitue alors une liste de ces corps et les regroupe tous dans une catégorie qu'il définit comme étant la catégorie des matériaux ayant une propriété « électrique »,

adjectif tiré du mot grec « elektron » signifiant ambre. Ainsi c'est pourquoi il est nommé par ses contemporains comme étant le « Père de la philosophie magnétique ».

Cependant tout reste à prouver, en effet jusqu'à la moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle les expériences électromagnétiques réalisées ne sont encore que qualitatives.

### 2.3.3 De la moitié du XVIII à nos jours, l'apparition de l'électromagnétisme

En 1785, Charles-Augustin Coulomb (1736-1806), un officier, ingénieur et physicien français, réussit à prouver que la valeur de la force électrostatique exercée par une sphère électrisée sur une autre est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux sphères. La balance de torsion ou dite de Coulomb est un appareil permettant de mesurer de très faibles forces constitué de deux barres horizontales dont l'une, immobile, possède deux grosses sphères à ces extrémités et dont l'autre, mobile, supporte deux petites sphères. Le mouvement de la dernière barre est influencé par l'exercice de la force électrostatique et par conséquent, de la mesure de l'angle entre les deux barres, on déduit l'intensité de cette force. Ainsi après de nombreuses prises de mesures sur sa balance, le physicien français parviendra à énoncer les lois de l'électrostatique.

C'est alors le début de nombreuses découvertes, en effet le XIX<sup>ème</sup> siècle est riche en avancées dans le domaine de l'électromagnétisme.

En avril 1820, par un heureux hasard, alors que Hans Christian Ørsted (1777-1851), professeur à l'université de Copenhague, donne un cours à ses élèves ayant pour but de montrer les dégagements de chaleur issus d'un fil alimenté par un courant, celui-ci découvre qu'une aiguille aimantée peut être déviée par le passage d'un courant électrique dans un fil à proximité. En effet, ses élèves et lui même constateront que selon le sens dans lequel le courant circule la boussole dévie dans un sens ou dans un autre. C'est la première mise en évidence du lien entre électricité et magnétisme, autrement dit la découverte de l'électromagnétisme.

Les observations du physicien danois sont reprises notamment par André-Marie Ampère (1775-1836), un français. Il veut expliquer le phénomène constaté par Ørsted en émettant l'hypothèse que si un fil exerce une force magnétique sur une boussole alors deux fils électriques alimentés devraient agir l'un sur l'autre par magnétisme. Il y parvient en découvrant, après plusieurs expériences, que si deux fils sont parcourus par le même courant alors ils s'attirent et que si au contraire ses deux fils sont parcourus par des courants opposés alors ils se repoussent. Ampère découvrira même par la suite que la force entre les deux courants est inversement proportionnelle à la distance qui les séparent et proportionnelle à l'intensité. Au cours de ses recherches sur l'électromagnétisme, le physicien français fait passer du courant dans un solénoïde qui acquiert alors les propriétés de l'aimant.

Cependant, c'est à François Arago (1786-1853), astronome et physicien français, que l'on doit l'invention du premier électroaimant. Il consiste alors en une barre de fer entourée par un fil dans lequel du courant passe. Les premiers moteurs électriques apparaissent aussi en cette période, le premier, datant de 1822, est inventé par un physicien britannique Peter Barlow (1776-1862) et sera d'ailleurs surnommé « la roue de Barlow ».

Le célèbre physicien anglais Michael Faraday (1791-1867) s'intéresse aussi de près à la découverte d'Ørsted. En 1821, il parvient à montrer la « rotation magnétique », c'est à dire comment un aimant peut tourner autour d'un courant électrique et inversement, ce sont les prémisses de la démonstration du phénomène d'induction électromagnétique. En effet, dix ans plus tard à la suite de nombreuses expériences, Faraday y arrive, en découvrant comme application notamment la dynamo ou la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et démontrera ensuite qu'un conducteur est uniquement chargé en surface, c'est à dire que, dans un conducteur, la charge n'influe pas sur ce qui pourrait se trouver à l'in-

térieur, ce qu'on appelle le principe de « la cage de Faraday ». Bien avant tout cela, Faraday introduit le terme de « lignes de forces », qui définit des lignes constamment tangentes à une petite aiguille que l'on déplace dans la direction de sa longueur selon lui, c'est à dire les lignes de champs magnétiques.

Environ vingt ans après le dépôt du brevet du premier télégraphe électrique bon marché, simple et pratique, par un peintre américain du nom de Samuel Morse en 1840, James Clerk Maxwell (1831-1879), un physicien écossais, crée le concept de champ, en effet ce qui n'était que des tentacules localisées selon Faraday devient un champ infini omniprésent de Maxwell. « Le champ magnétique » étant l'espace modifié par la présence des lignes de champ magnétique et « le champ électrique » étant celui dans lequel des forces électriques peuvent se sentir selon lui. En dehors de ces champs, il ne subsiste aucune force. Plus tard, il démontre la relation entre la force électrique et la force magnétique impliquant la vitesse de la lumière. Ainsi il découvre l'origine de l'existence des ondes et notamment que la lumière est une onde, de nombreux phénomènes découlent de cette découverte et fondent la physique d'aujourd'hui, notamment cela a permis une meilleure compréhension de l'optique et une meilleure description de l'espace ainsi une meilleure compréhension de l'interaction entre les corps. Maxwell parvient aussi à retranscrire mathématiquement et développer l'ensemble des travaux de Faraday et Ampère sur l'électromagnétisme en les réduisant en quatre équations, « les équations de Maxwell ». En 1873, il publiera même le « Traité de l'Electricité et du Magnétisme ».

# Chapitre 3

## Appareils de mesure

L'exposition à des champs électriques et magnétiques se fait aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments dans lesquels nous vivons : installations et appareils électriques (écrans d'ordinateurs) et électroménagers quotidiens, les installations électriques (lignes, câbles...), ainsi que les lignes de transport (notamment pour les voies ferrées). Nous sommes donc souvent entourés d'un champ dont il est utile de connaître la mesure, entre autres pour déterminer sa dangerosité. C'est pourquoi dans cette partie, nous allons nous intéresser à la mesure des champs électriques et magnétiques. Cependant celle-ci diffère suivant ce que l'on souhaite mesurer (champ électrique ou magnétique) et son état dans l'environnement (seul ou couplé, ce dernier cas correspondant aux champs électromagnétiques)

Mais avant de commencer, précisons qu'un appareil de mesure de champ, qu'il soit électrique ou magnétique, se compose d'une sonde et d'un boîtier de mesures, tous deux reliés par des conducteurs qui ont un rôle neutre lors de la mesure.

### 3.1 Les champs électriques (CE)

L'émission des champs électriques est en lien avec la présence de charges électriques. Si celles-ci sont immobiles, on parle d'électrostatique. Mais ces charges peuvent également être en mouvement, émettant alors un champ électrique sur toute la longueur du fil parcouru par le courant. L'apparition d'un champ électrique se fait grâce à une différence de potentiel entre deux points et la valeur du champ est proportionnelle à cette dernière. Plus la tension est élevée et la distance qui sépare la source de l'appareil de mesure est faible, plus le champ électrique que l'on mesure est élevé. En effet le champ électrique a trois composantes spatiales, ce qui est corroboré par l'unité de ce champ qui s'exprime en V/m (volts par mètre). Le champ peut être stationnaire ou variable selon que le courant est respectivement continu ou alternatif. Du fait du courant utilisé dans les installations électriques qui est alternatif, le champ électrique auquel les usagers sont exposés sera variable. Il faut ajouter qu'un courant alternatif peut être de basses ou hautes fréquences. Pour le premier type de courant, son émission est produite par des appareils électriques et les réseaux de fils électriques.

#### 3.1.1 Mesures

En ce qui concerne la mesure de ce type de champ, la mesure du champ électrique ne nécessite pas forcément une circulation de charges électriques. On peut, par exemple, mesurer un champ électrique proche d'un appareil alors que celui-ci est éteint. C'est pourquoi on peut aussi retrouver son émission en lien avec l'électricité statique où il n'y a pas de circulation de charges. Lors d'une mesure, la personne qui tient l'appareil modifie le champ

électrique à cause de sa main, ce qui rend difficile la mesure précise d'un champ de ce type. Certains appareils sont alors équipés d'une poignée isolante ou d'une perche.

## 3.2 Le champ magnétique

Le champ magnétique, à la différence du champ électrique, n'apparaît que lorsqu'il y a circulation de charges. Au bout d'un certain délai, la circulation du courant ne dépend plus du temps, et devient donc stationnaire, on parle alors de magnétisme. Le champ magnétique est dit stationnaire quand le courant est continu. Quant à la discipline qui étudie les champs magnétiques statiques ou « quasi stationnaires » (ne dépendant pas du temps) on parle de magnéto-statique. Ce type de champ est notamment émis par les moteurs électriques, les transformateurs, radio-réveils, sèche cheveux, tous les écrans, ordinateurs, imprimantes, fours à micro-onde, fers à repasser, téléphones mobiles, etc... Le champ magnétique sera d'autant plus important que l'intensité du courant qui circule sera forte. L'intensité d'un champ magnétique s'exprime en Ampère par mètre ( $A.m^{-1}$ ), en milligauss ( $mG$ ) ou en microteslas ( $\mu T$ ) (unité usuelle). Pour information,  $1\mu T = 10mG$ . A l'image du champ électrique, le champ magnétique peut être constant ou variable selon que le courant est respectivement continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, la valeur du champ sera sensible à la fréquence du courant. L'exposition aux champs magnétiques correspond aux champs variables. Les champs magnétiques existent dans les basses et hautes fréquences. Pour les premiers, on retrouve leurs émissions dans le voisinage des transformateurs et lignes électriques, ainsi que des appareils tels que des radiateurs électriques ou plaques de cuisson.

### 3.2.1 Mesures

Contrairement au champ électrique, il est facile de mesurer un champ magnétique. Mais, il reste toujours un détail qu'il faut prendre en compte lors de la mesure : la direction précise du champ magnétique. Il faut donc placer l'appareil de mesure dans la même orientation que celle du champ. Ces rayonnements magnétiques sont mesurés grâce à un teslamètre, qui permet, par ailleurs, d'en connaître l'orientation. Cependant pour obtenir une mesure précise, il faut régler le teslamètre de manière à ce qu'aucun autre champ ne vienne perturber le champ que l'on veut mesurer. En plus de pouvoir le mesurer, il est possible de visualiser les lignes de champs magnétiques grâce à une carte dite carte de visualisation de champs magnétiques. Aucun courant n'est nécessaire pour effectuer les mesures, puisqu'il suffit seulement placer la carte de visualisation devant l'objet émettant le champ pour voir apparaître les lignes de champs correspondantes.

## 3.3 Le champ électromagnétique

Un champ électromagnétique (CEM) résulte de l'émission d'un champ électrique et d'un champ magnétique, suite à la circulation d'un courant alternatif, rendant donc le champ variable. Dans ce cas, on parle d'électromagnétisme et les deux champs, à savoir le champ électrique et magnétique sont tous les deux couplés : un champ électrique peut induire un champ magnétique, et inversement. On retrouve la présence de ce champ dans tout notre environnement, au travers de tous les éléments utilisant l'électricité comme source d'énergie : les appareils et réseaux électriques, les réseaux de transports, de voies ferrées, ainsi que les relais de télécommunication. Le champ électromagnétique fait partie des rayonnements non ionisants, auxquels viennent s'ajouter les rayonnements infrarouges et la lumière visible. On



trouve différentes dénominations pour ces champs telles qu'ondes ou rayonnements électromagnétiques. On distingue trois types de champs électromagnétiques selon la fréquence qui leur est caractéristique, dans un éventail allant de 0 à 300 GHz :

- Les champs statiques, de fréquence égale à 0 Hz. On les retrouve notamment dans le champ magnétique terrestre, l'aimantation d'un barreau aimanté ou encore l'imagerie par résonance magnétique, IRM
- Les champs de fréquence extrêmement basses, dits d'extrêmement basse fréquence (« EBF » ou « ELF » (extremely low frequency) ), de fréquences allant de 3 Hz à 300 Hz. Les champs de basse fréquence ont une fréquence comprise entre quelques Hz et à 10 kHz
- Les radiofréquences, allant de 0,3 kHz à 300 GHz. Sur les fréquences allant 30 à 300 MHz on trouve les ondes utilisées pour la télévision et la radio FM. Les radiofréquences sont composées des fréquences radio, des hautes fréquences, des micro-ondes et des hyperfréquences. Les champs de ces dernières sont eux concentrés sur des fréquences allant de 300 MHz à 300 GHz quand ceux des micro-ondes se trouvent dans une gamme que l'on peut décomposer en deux tranches de fréquences :
  - Les fréquences allant de 0,3 à 3 GHz qui vont être émises par diverse sources comme la télévision, fours à micro-ondes ou les téléphones mobiles
  - Les fréquences allant de 30 GHz à 300 GHz. On retrouve ces ondes dans les radars, et les communications par satellite

Puisque les champs électromagnétiques se composent de champs électriques et magnétiques qui peuvent être variables, ils ont donc ces mêmes propriétés eux-aussi. En ce qui concerne les champs dits continus, la direction du champ est constante, comme par exemple le champ électromagnétique terrestre (même s'il a été démontré que celui-ci a subi des inversions de sens, sa direction reste la même)

### 3.3.1 Mesures

Pour mesurer la valeur d'un champ électromagnétique, il faut prendre en compte la longueur d'onde et la distance de l'appareil de mesure par rapport à la source d'émission de ce champ. Si celle-ci est inférieure à la longueur d'onde, il faudra alors effectuer les mesures dans le champ proche. Pour effectuer des mesures en champ lointain, la distance doit être trois fois supérieure à la longueur d'onde. Mais avant d'aller plus loin, il faut préciser que les champs électrique ( $E$ ) et magnétique ( $B$ ) sont liés par une formule :  $\frac{E}{B} = \eta$  où  $\eta$  est l'impédance intrinsèque. Puisque la valeur de  $\eta$  peut changer en fonction de la distance à la source quand on travaille en champ proche, il faut mesurer séparément les champs électrique et magnétique car le rapport de l'intensité entre leurs deux valeurs n'est pas constant. On trouve notamment cette méthode lorsque l'on travaille en basse fréquence, jusqu'à 30 kHz.

Les champs électromagnétiques de basse fréquence peuvent être mesurés par deux types d'appareils :

- Les détecteurs qui permettent de savoir si le champ électromagnétique a dépassé un certain seuil en émettant un signal (sonore ou/et lumineux)
- Les appareils de mesure qui en donnent une mesure précise. Pour obtenir cette précision, la sensibilité de ces appareils doit être au minimum de 0.1mG pour le volet magnétique et de 1V/m pour la partie électrique car souvent la mesure (qui elle, s'effectue séparément) de ces deux champs peut être faite par le même appareil

Cependant, quand on se trouve dans le champ lointain, c'est-à-dire à que l'on se trouve à quelques dizaines de centimètres des émetteurs et sur une gamme de fréquences élevées (ondes radio...), la valeur de  $\eta$  reste constante ( $= 377 \Omega$ ), les valeurs des deux champs sont



donc reliées. C'est pourquoi, la valeur d'un seul de ces deux champs suffit puisque le rapport d'intensité reste constant ; on mesure d'ailleurs plus généralement le champ électrique.

Les champs électromagnétiques de hautes fréquences peuvent être mesurés par deux types d'appareils :

- les appareils de mesures mesurant un champ dans une seule direction, celle vers laquelle l'antenne directionnelle qu'ils possèdent est orientée.
- les appareils de mesures fournissant la valeur d'un champ pouvant venir de n'importe quelle directions , grâce à leurs sondes isotropiques ou 3D (antennes non directionnelles, basées sur les axes  $x$ ,  $y$ , et  $z$ )

Nous avons donc vu comment mesurer ces champs. Et malgré le fait qu'un champ électromagnétique soit par définition invisible, il est possible désormais de le visualiser en utilisant les infrarouges selon le système EMIR qu'a mis au point l'Onera (Office national d'études et recherches aérospatiales). Le nom de ce dispositif provient d'ailleurs de la contraction entre électromagnétique et infrarouge.

Ce système se base sur l'effet Joule en plaçant une onde électromagnétique TEM (Transverse électrique magnétique) qui va provoquer par électromagnétisme (comme le ferait un micro-ondes) un échauffement de deux films, l'un légèrement conducteur tandis que l'autre sera magnétique. Une caméra infrarouge, qui permet de voir les variations de températures, filme ensuite les échauffements provoqués sur la surface du film conducteur. D'ailleurs, comme le confirme François Issac, ingénieur de recherches à l'Onera, ce film n'est pas un si bon conducteur que ça. C'est grâce à cela qu'il peut s'échauffer proportionnellement à l'intensité du champ électromagnétique, car s'il est trop ou non conducteur, il n'y a pas d'échauffement, respectivement à cause d'une réflexion de l'énergie du champ électromagnétique et d'un manque d'interaction avec ce même champ. Les films qui ont été testés sont soit composés de carbone conducteur, soit de polymère, dans ce cas recouvert par un dépôt métallique, soit de matériau isolant, dans ce cas recouvert par des encres conductrices.

Pour en revenir à la caméra, celle-ci va permettre d'obtenir une cartographie en deux dimensions que l'on va pouvoir transformer en trois dimensions en effectuant le processus de mesure sur différents plans. C'est donc grâce à l'échauffement qu'il produit que l'on va pouvoir visualiser le champ électromagnétique.

Grâce à ce dispositif, il est possible de mesurer des champs électromagnétiques à partir de 10 à 30 volts par mètre. L'intérêt d'EMIR, en plus de ces potentiels d'actions dans le domaine de la sécurité (comme notamment l'usage qu'en fait l'Onera à l'heure actuelle, c'est-à-dire, s'assurer qu'il n'y ait pas de fuites dangereuses de champ), et qu'il permet par une mise en place simple de visualiser en opposition de phase les champs électrique et magnétique, et ainsi vérifier la théorie.

# Chapitre 4

## Expériences pour visualiser les champs

Nous avons cherché à visualiser les lignes de champs magnétique et électrique avec les moyens mis à notre disposition dans deux optiques. La première était d'ajouter un sens pratique à la visualisation des lignes de champ magnétique et électrique dans notre rapport, ainsi la théorie que nous avons exposée est appuyée par nos propres expériences et nous avons pu voir par nous même des phénomènes mettant en évidence ces lignes de champ de façon directe ou indirecte. Le deuxième but était de mettre en oeuvre une séance de Travaux Pratiques introduisant les futures 2ème années à l'EC de P5 en leur permettant de visualiser les lignes de champ B et E, cela en prenant en compte les contraintes de temps, de matériel et les connaissances préalables acquises au lycée.

### 4.1 Expériences permettant de visualiser le champ électrique

#### 4.1.1 Champ électrique entre deux plaques métalliques

Dans cette manipulation, nous voulons pouvoir tracer les lignes équipotentielles du champ électrique existant entre deux plaques parallèles soumises à un courant et séparées par un liquide ionique, ici du sulfate de cuivre. En traçant ces lignes équipotentielles, nous avons été capables de visualiser comment le champ électrique se comporte en sachant que les lignes équipotentielles du champ sont perpendiculaires aux lignes de champ. De plus, en sachant que la décroissance des potentiels oriente le champ, nous étions en mesure d'orienter le champ électrique entre les deux plaques. Nous avons donc pris des mesures sur des positions de la cuve où le champ appliqué est constant, c'est à dire là où il y a des lignes équipotentielles. Pour ce faire, nous avons mesuré des différences de potentiels UOM entre un point O sur une plaque de référence et un point M représentant la sonde de touche.

#### Matériel utilisé

- Deux plaques de cuivre parallélépipédiques.
- Un générateur de tension continue 5V.
- Une dizaine de fils de connexion de 4mm et de 2mm dont au moins 4 de 2mm.
- Des adaptateurs 4mm-2mm.
- Un voltmètre numérique avec une sonde permettant de mesurer UOM en la plongeant dans l'eau (ou une solution plus ionique si nous pouvons en utiliser une).
- Une cuve rhéographique avec deux plaques métalliques parallèles.
- Un amplificateur opérationnel.

## Schéma du système

Schéma de montage de l'expérience de la cuve rhéographique avec deux plaques parallèles.

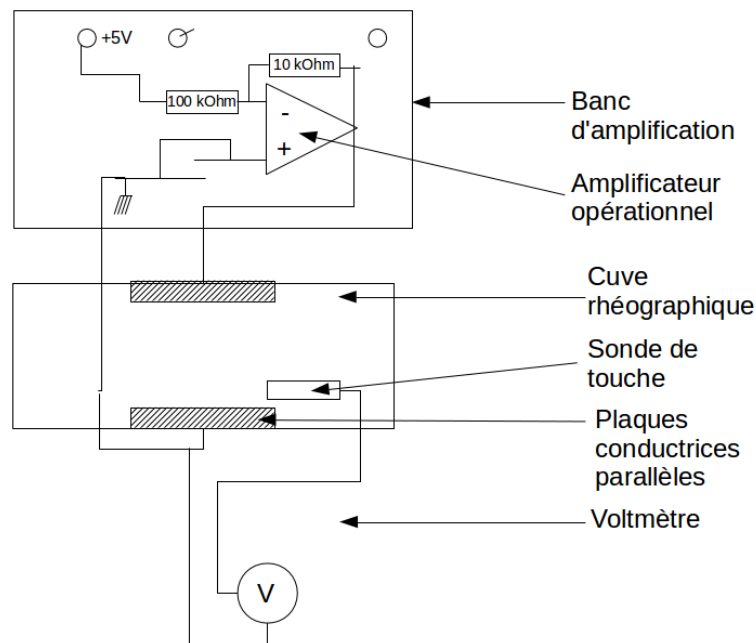


FIGURE 4.1 – Schéma 1

## Observations préliminaires

Dans un premier temps, nous avons évalué qualitativement le comportement du champ électrique dans la cuve afin de faire une conjecture et l'infirmier ou la confirmer par la suite. Pour cela, nous avons d'abord déplacé la sonde parallèlement aux plaques, puis perpendiculairement. Nous avons ainsi pu observer que les potentiels étaient décroissants de l'anode à la cathode en faisant varier la position de la sonde perpendiculairement aux plaques. Au contraire, la valeur du potentiel était constant sur une ligne parallèle aux plaques.

## Protocole

### - Installation du système

Les différentes étapes pour installer le système sont illustrées sur le schéma.

- Brancher l'amplificateur opérationnel sur la prise de courant
- Alimenter l'amplificateur opérationnel
- Réaliser le montage de division de tension
- Placer la grille de mesures sous la cuve rhéographique
- Relier le montage à la cathode et l'anode de la cuve
- Relier le Voltmètre à l'électrode de référence
- Relier la sonde de touche au voltmètre

### - Manipulations

Nous avons mesuré le champ électrique dans la cuve rhéographique en prenant comme référence une des plaques métalliques, que l'on a nommé "O" comme « origine ». Grâce à

la sonde de touche nous avons donc pris une série de points tels que UOM soit constant pour chaque série de mesures. Nous avons choisi de prendre 5 valeurs de UOM différentes, pour visualiser plusieurs équipotentiels. Nous avons ensuite inséré les valeurs que nous avons mesuré dans un tableau *OpenOffice*. Nous avons finalement dressé un tableau en 3D qui représente les valeurs du potentiel en fonction de la position de la sonde dans la cuve rhéographique.

### Observations

Après ces manipulations, nous arrivons à un tableau de valeurs qui nous permet de dresser une carte en 3D des potentiels entre les deux plaques. Nous constatons que sur chaque ligne, la valeur du potentiel reste relativement constante. On constate aussi un écart net de la moyenne de valeur de chaque série de mesure sur les bords de la matrice.

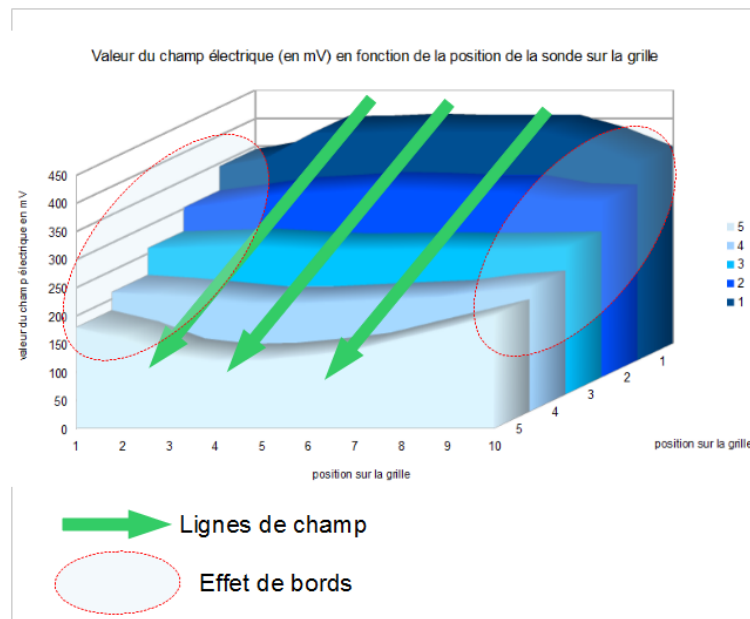


FIGURE 4.2 – Carte en 3D des potentiels

### Exploitation des résultats

Après observation, on constate que lignes parallèles à aux plaques conductrices sont bien des équipotentiels, ce qui est cohérent avec ce que nous avons prévu avant de faire les manipulations . En sachant que les lignes de champ sont perpendiculaires aux équipotentiels, nous pouvons donc voir indirectement les lignes de champ électrique créées par cette configuration. De plus, nous déduisons que les écarts de valeur que l’on constate aux extrémités du rectangle formé par les deux plaques conductrices sont dus aux effets de bord que la théorie néglige.

#### 4.1.2 Champ électrique entre deux plaques circulaires concentriques

Nous savons que le champ est perpendiculaire à la surface conductrice, nous pouvons donc nous attendre à ce que les lignes équipotentiels décrivent des cercles entre les deux plaques concentriques.

## Matériel utilisé

Le matériel utilisé était le même que pour l'expérience précédente, à la différence que nous avons utilisé deux plaques circulaires concentriques de diamètres différents à la place de deux plaques parallèles.

## Schéma du système

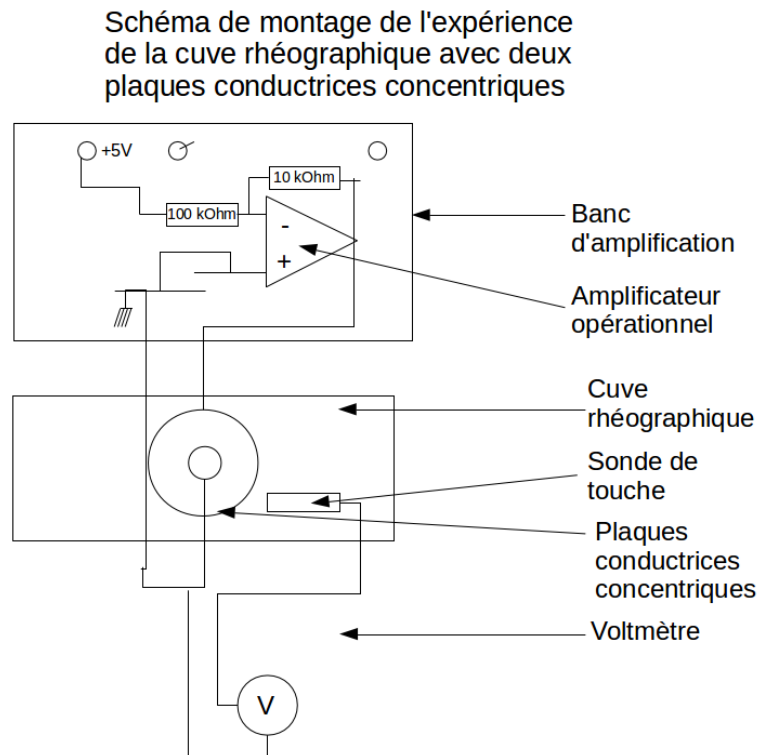


FIGURE 4.3 – Schéma 2

## Observations préliminaires

Nous avons pu observer qu'en décrivant des cercles autour de la première plaque, nous arrivions à avoir des équipotentielles, même de manière peu précise. Nous savions donc qu'il faudrait prendre des points équidistants du centre du système pour avoir une équipotentielle à chaque série de mesure. De la même manière que lors de l'expérience précédente, en faisant des mesures sur plusieurs rayons à partir du centre du système, nous avons pu constater une diminution des potentiel depuis le centre.

## Protocole

Le protocole est le même que pour l'opération précédente. Nous n'avons eu à changer que les plaques, étant donné que le système fonctionne sur le même principe. Néanmoins, nous n'avons que la possibilité de prendre 3 séries de mesures pour que celles-ci arrivent à se différencier malgré l'espace restreint entre les deux plaques. Pour chaque série de mesures nous avons décidé de relever une série de 8 mesures sur des points équidistants au centre des deux plaques conductrices.

## Observations

Après ces manipulations, nous arrivons à un nouveau tableau de valeurs qui nous permet de dresser un diagramme en toile des potentiels entre les deux plaques. Remarque : Ce type de diagramme nous permet de bien voir que pour une série de valeurs constantes, un cercle est décrit autour du centre du diagramme. Grâce aux séries de valeurs que nous avons relevées, nous avons pu voir que la valeur du potentiel reste relativement constante sur un cercle autour du centre du système. C'est ce que nous avons voulu représenter en reportant ces valeurs sur un diagramme en toile. Nous constatons sur ce diagramme que chaque série de valeurs décrit un cercle plutôt régulier.

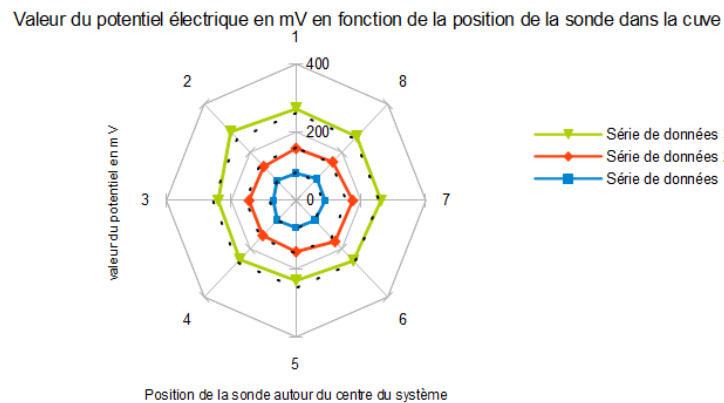


FIGURE 4.4 – Diagramme en toile

## Exploitation des résultats

Contrairement à l'expérience précédente, nous n'avons pas pu constater d'effet de bord car nous avons réalisé ces mesures seulement entre les deux plaques conductrices. Grâce aux séries de valeurs que nous avons relevé, nous avons pu voir que la valeur du potentiel reste relativement constante sur un cercle autour du centre du système, comme attendu en faisant des observations préliminaires. De la même manière que précédemment, on en déduit donc que les lignes de champ sont des rayons partant du centre des deux plaques conductrices mais n'existant qu'entre celles-ci.

## 4.2 Expériences permettant de visualiser les lignes de champ magnétique

### 4.2.1 Observations qualitatives

Il existe des moyens de visualiser des lignes de champ magnétiques et électrique avec du matériel plutôt simple, comme par exemple des boussoles ou des plaques transparentes. Avant de faire des expériences plus poussées, nous avons décidé de faire ces expériences afin de voir comment on peut commencer à voir l'effet du champ magnétique grâce à des instruments simples.

### Boussoles

Nous avons d'abord utilisé une boussole à pointe afin de visualiser l'effet du champ magnétique créé par différents objets ou différentes configurations. Nous avons donc pu voir qu'avec des appareils électroniques tels que des ordinateurs ou des téléphones portables

récents, le champ est nettement plus influent que celui de la Terre. Ainsi, en bougeant la boussole autour de tels appareils, nous pouvons prévoir le sens et la direction du champ autour de ces appareils, mais en ayant une précision très limitée.

### Plaques transparentes comportant des barreaux de fer encapsulés

Nous avons utilisé des plaques transparentes où des barreaux de fer sont encapsulés de manière régulière pour visualiser le champ magnétique créé par différents objets ou configurations. Sans interaction directe avec un champ, l'organisation des barreaux de fer est désordonnée et ne rend pas compte de l'action du champ magnétique terrestre par exemple. Mais à l'approche d'un aimant, nous étions en mesure de voir que le champ magnétique a un caractère rotationnel grâce à l'orientation des barreaux de fer. Nous avons répété cette expérience plus tard pour la configuration de Helmholtz afin de prévoir l'action du champ à l'intérieur et à l'extérieur de la configuration.



FIGURE 4.5 – Observation du champ magnétique

### 4.2.2 Observation du champ créé à l'intérieur et à l'extérieur d'une configuration de Helmholtz

#### Rappel de P5

On a calculé en TD de l'EC P5, via la loi de Biot et Savart, la valeur du champ magnétique généré par une bobine en configuration Helmholtz, sur l'axe passant par le centre de la bobine :

$$B(x) = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

avec  $x$  la distance sur l'axe,  $n$  le nombre de spires et  $R$  le rayon de la bobine.

L'expression du champ avec deux bobines au centre du dispositif, par le principe de superposition, est donc le suivant :

$$B = B(R/2) + B(-R/2) = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \times \frac{\mu_0 n I}{R}$$



### Matériel utilisé

- Deux bobines d'un rayon théorique de 6,25 cm, rayon mesuré de 5,7 cm.
- Un teslamètre
- Un banc pour tenir les bobines avec des graduations pour la position des bobines
- Un générateur de courant continu
- 4 fils de 4mm

### Schéma du système

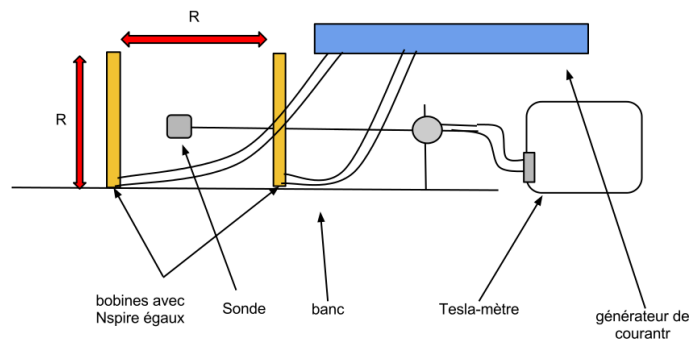


FIGURE 4.6 – Observation du champ magnétique

### Observations préliminaires

Nous avons utilisé la boussole sur une bobine seule et la configuration de Helmholtz afin de prévoir le sens du champ et son comportement aux alentours des systèmes ou à l'intérieur. Ainsi, nous avons pu vérifier par exemple qu'à l'intérieur de la configuration de Helmholtz le champ magnétique a un sens et une direction bien définis quelque soit la position de la boussole.

Nous avons aussi utilisé des plaques transparentes comportant des barreaux de fer encapsulés pour faire une observation directe du champ créé par la configuration de Helmholtz. En choisissant des positions intéressantes, c'est-à-dire à l'intérieur et aux extrémités de la configuration, nous avons pu avoir une visualisation directe du champ magnétique créé. En effet, nous avons pu constater qu'aux extrémités les barreaux semblaient s'organiser en décrivant une courbe autour des lignes de courant. A l'intérieur du système, les barreaux sont tous parallèles et nous montrent donc une fois de plus que la configuration de Helmholtz permet de créer un champ magnétique uniforme.

### Protocole

- Brancher le générateur de courant sur le secteur
- Faire le montage en parallèle des deux bobines comme indiqué sur le schéma
- Brancher le Tesla mètre sur le secteur et tarer la sonde
- Installer l'extrémité de la sonde à équidistance des deux bobines à l'intérieur de la configuration de Helmholtz.
- Imposer aux bobines un courant continu de la valeur maximale du générateur, pour notre expérience :  $I = 5,67$  A.
- Relever une série de 20 points à partir de l'intérieur de la bobine et à l'extérieur en prenant un point tous les centimètres
- Mettre les valeurs relevées dans un tableau sous Open Office



- Réaliser un graphique représentant la valeur du champ magnétique en fonction de la position de la sonde sur l'axe centrale des bobines

### Comparaison entre la manipulation et la théorie

Pour modéliser la théorie, nous avons utilisé un tableau de valeurs sur Open Office. Ainsi, nous étions en mesure de comparer nos résultats avec deux modèles : un modèle prenant en compte le rayon théorique des bobines avec les données du fournisseur et un autre modèle avec le rayon que nous avons mesuré. Au final, nous arrivons à voir que nos valeurs expérimentales s'accordent relativement bien avec la théorie, mais à l'extérieur de la configuration, l'écart est très important. Nous avons émis l'hypothèse que cet écart est dû aux conditions opératoires : c'est à dire que le champ magnétique créé par la Terre et les appareils de mesure ont dû avoir une influence plus forte sur la sonde que les bobines en dehors du champ uniforme. Au final, nous avons pu voir l'effet du champ magnétique créé par cette configuration

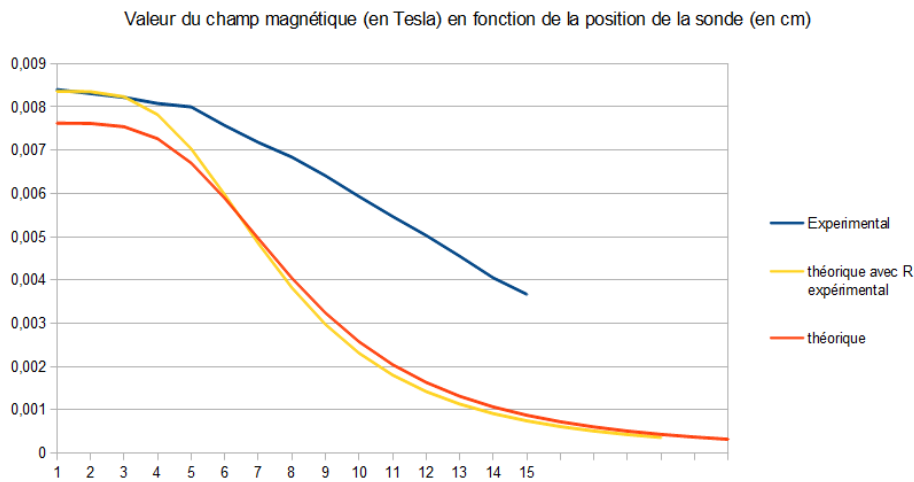


FIGURE 4.7 – Comparaison entre nos manipulations et la théorie

# Conclusion et perspectives

## Conclusion

Au fil de ce projet, nous avons pu aborder à notre manière la problématique de la visualisation des champs magnétiques et électriques.

En effet, nous nous sommes d'abord demandé comment a évolué la compréhension des champs électriques et magnétiques au cours des siècles. Nous avons donc fait des recherches bibliographiques afin de dresser une histoire simplifiée des découvertes et des modèles mathématiques qui ont apporté des outils de modélisation et de visualisation des champs électrique et magnétique.

Ensuite, nous avons réalisé une recherche afin de recenser les différents types d'appareils qui permettent de mesurer le champ électrique et magnétique. En effet, visualiser et modéliser le champ électrique ou magnétique est une chose, mais arriver à en mesurer sa valeur en sachant que le champ peut être variable peut s'avérer plus difficile. Nous avons donc voulu montrer comment on peut mesurer la valeur de ces champs. En faisant cette recherche bibliographique nous avons réalisé qu'il peut s'avérer compliqué de faire des mesures.

Finalement, afin d'avoir notre propre approche des champs électriques et magnétiques en régime stationnaire, nous avons élaboré des protocoles et réalisé plusieurs expériences pour pouvoir visualiser les champs électriques et magnétique avec le matériel mis à notre disposition. Ces expériences nous ont permis d'avoir une démarche scientifique complète en réalisant les difficultés de leur mise en place.

Dans le futur, les réacteurs à fusion nucléaires seront très probablement contrôlés par des champs magnétiques puissants afin de maîtriser de grandes quantité d'énergie. On peut donc remarquer que l'on résoudra plus tard des problématiques d'énergie grâce à des concepts qui découlent d'une démarche de modélisations, nous ayant permis au fil des siècles de visualiser les champs magnétiques et électriques.

## Apports personnels

**Clémence** : Le projet de P6 a été pour moi plus qu'un projet de physique. En effet comme tout travail à réaliser en groupe, il a fallu apprendre à s'organiser, à se répartir les tâches et surtout à prendre des initiatives.

De plus, une difficulté avait été rajoutée par rapport à tous les projets que j'ai pu mener jusqu'ici à savoir que je ne connaissais pas forcément les personnes avec qui j'allais devoir travailler et que nous n'allions pas tous avoir le même emploi du temps. Un challenge d'autant plus intéressant à relever qu'à l'avenir je serai sûrement confrontée à ce genre de situations dans ma future carrière d'ingénieure.

Enfin concernant l'organisation du projet en lui-même, j'ai été chargée notamment de la rédaction de la partie historique, ne me destinant pas à un métier dans le domaine de la physique, j'ai pourtant apprécié effectuer des recherches à propos de l'électromagnétisme qui m'ont apporté des connaissances variées et enrichissantes sur ce sujet. Pour ma part, je

trouve que le fait d'avoir pu gérer ce projet par nous même nous aura beaucoup apporté. En effet, nous avons rencontré plusieurs difficultés dans notre organisation ou encore dans nos expérimentations auxquelles il a fallu trouver des causes et des solutions adaptées par nous même.

Pour conclure, j'ai compris à quel point ce projet avait un rôle important dans notre cursus d'ingénieur.

**Aurélié** : Le semestre dernier fut l'occasion pour nous de nous initier à la notion de champ électromagnétique. Mais celle-ci était principalement focalisée sur une vision théorique des grands concepts. Or, avec ce projet dont le thème portait sur la visualisation des champs électriques et magnétiques, nous pouvions aborder ce domaine d'une toute autre façon, notamment expérimentale. Cela nous a donc permis d'avoir une approche un peu plus transversale. Ce projet fut très enrichissant dans le sens où nous avons pu établir une certaine démarche scientifique dans notre travail, avec la mise en place et réalisation des protocoles expérimentaux. A ce propos, je fus plutôt étonnée de voir à quel point cela pouvait demander du temps. Quant au travail théorique dont j'ai été responsable, celui-ci a éclairci ma vision de la mesure de tous types de champs, ce qui me sera certainement utile si je souhaite me diriger vers l'hygiène et la sécurité. Par ailleurs, ce genre de projet est toujours profitable au niveau de la gestion de projets : gestion de la répartition des expériences pour que l'on puisse réaliser ce que l'on souhaite pendant le temps imparti... Pour finir, la proposition de nous faire réfléchir sur un futur TP pour deuxièmes années.

**Elliot** : Ce projet, tout comme les projets Mathématiques et Informatique, m'aura appris à travailler sur un sujet en groupe. En effet, cela nécessite une certaine organisation. C'est pour cette raison qu'il est, je pense, nécessaire de bien connaître les autres membres du groupe avant de se lancer dans une telle réalisation. Or, ici, nous ne pouvions pas les choisir. De plus, lors de l'affectation à un sujet, l'étudiant n'est pas forcément assigné au sujet le plus pertinent pour lui. Et, malheureusement, ce projet sur les champs était mon dernier choix. J'étais donc sceptique quant à l'issue de ce dossier. Finalement, les membres de mon groupe furent tous captivants, tant par leur apport concernant mes lacunes sur le sujet que par leur intérêt porté aux notions d'électromagnétisme. J'ai donc pu m'intéresser à ce sujet avec eux et je dois dire que j'ai pu découvrir l'univers fascinant de Maxwell, Faraday et tous les autres scientifiques de renom qui ont tant apporté à nos connaissances actuelles sur les champs. Je dois admettre que cette expérience fut des plus enrichissantes et que, malgré mes doutes, ce projet aura été très intéressant.

**Eymeric** : Ce projet a été intéressant tant sur le sujet lui même que sur le travail d'organisation qu'il a demandé. En effet, bien que nous avions déjà travaillé en groupe sur des projets, c'était la première fois que je faisais un projet de physique sur une durée aussi longue. J'ai appris à avoir un nouveau point de vue sur les travaux pratiques en général en prenant l'aspect expérimental du projet. En effet, il m'a fallu élaborer des expériences et des protocoles en gardant à l'esprit que cela devait être à la fois assez pertinent pour le rapport et à la fois assez facile d'accès pour introduire ce sujet à une personne non initiée. C'était difficile mais enrichissant, car j'ai appris à insérer un aspect plus pédagogique que d'habitude dans un projet. En travaillant avec d'autres personnes sur un projet scientifique sur une aussi longue durée, j'ai appris à avoir une vision plus large en terme d'organisation. De plus, travailler avec des personnes que je ne connaissais pas avant ce projet a été enrichissant quand à l'écoute et au recul qu'il faut avoir lors de l'élaboration d'un rapport, de recherches bibliographiques et de protocoles expérimentaux. Finalement, je pense que cet enseignement sera sans doute utile pour de futurs projets dans le cadre de la formation d'ingénieur.

# Bibliographie

- [1] Encyclopédie, *Tout l'univers*, édition 1980.
- [2] <http://vivre-au-moyen-age.over-blog.com/article-l-invention-de-la-boussole.html> (Valide à la date du 09/06/13)
- [3] <http://seaus.free.fr/spip.php?article646> (Valide à la date du 09/06/13)
- [4] [http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fichiers/infos\\_sciences/revue/complements/346\\_mars\\_07/KF\\_n346\\_p44-59\\_w.pdf](http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fichiers/infos_sciences/revue/complements/346_mars_07/KF_n346_p44-59_w.pdf) (Valide à la date du 09/06/13)
- [5] [http://www.loverde.fr/\\_cours/histoire\\_electromagnetisme.pdf](http://www.loverde.fr/_cours/histoire_electromagnetisme.pdf) (Valide à la date du 09/06/13)
- [6] <http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Fwhmfield.html> (Valide à la date du 09/06/13)
- [7] [http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/909229008399980604907622855707/18\\_champs\\_electromagnetiques.pdf](http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/909229008399980604907622855707/18_champs_electromagnetiques.pdf) (Valide à la date du 12/06/13)
- [8] <http://www.bbemg.ulg.ac.be/fr/50hz-information-generale/champs-electriques-magnetiques/notions-champs.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [9] <http://www.puremaison.fr/analyseur-ondes-electromagnetiques-hf/689-analyseur-hautes-frequences-hf4-rom-elektronik.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [10] <http://www.electrosmog.info/IMG/pdf/Appareils-Mesure.pdf> (Valide à la date du 12/06/13)
- [11] <http://www.pheline-em.fr/a-propos/champs-electromagnetiques/9-mesure-champs.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [12] <http://www.bbemg.ulg.ac.be/fr/sante/faq-fr/faq-mesures.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [13] <http://sante.lefigaro.fr/mieux-etre/environnement/champs-electromagnetiques/dou-viennent-ils> (Valide à la date du 12/06/13)
- [14] <http://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectrostatique> (Valide à la date du 12/06/13)
- [15] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9tostatique> (Valide à la date du 12/06/13)
- [16] <http://www.narda-sts.de/fr/information-de-base/quest-ce-que-lelectrosmog.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [17] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ\\_magn%C3%A9tique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique) (Valide à la date du 12/06/13)

- [18] <http://boutique.comelec.fr/fr/instruments-de-mesure/2168-detecteur-de-champs-electriques-magnetiques-electromagnetiques.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [19] <http://www.narda-sts.de/fr/information-de-base/proprietes.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [20]
- [21] (Valide à la date du 12/06/13) <http://www.narda-sts.de/fr/information-de-base/tables-de-conversion.html>[http://www.babbco.fr/babbco/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=356&category\\_id=97&option=com\\_virtuemart&Itemid=56&lang=fr](http://www.babbco.fr/babbco/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=356&category_id=97&option=com_virtuemart&Itemid=56&lang=fr) (Valide à la date du 12/06/13)
- [22] <http://www.onera.fr/coupdezoom/44-emir-visualisation-champ-electromagnetique.php> (Valide à la date du 12/06/13)
- [23]
- [24] (Valide à la date du 12/06/13) <http://www.puremaison.fr/mesureur-ondes-electromagnetiques-hf/554-mesureur-ondes-hautes-frequence.html?gclid=CIXg-bnIybUCFUnMtAodpk0AIQ> (Valide à la date du 12/06/13)
- [25] <http://www.pheline-em.fr/a-propos/champs-electromagnetiques/9-mesure-champs.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [26]
- [27] <http://www.puremaison.fr/detecteur-ondes-electromagnetiques-hf/263-detecteur-champs-electromagnetiques-basses-et-hautes-frequence-esi.html#description> (Valide à la date du 12/06/13)
- [28] <http://www.electromagnetique.com/bf.php> (Valide à la date du 12/06/13)
- [29] <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/> (Valide à la date du 12/06/13)
- [30] <http://www.bbemg.ulg.ac.be/fr/50hz-information-generale/champs-electriques-magnetiques/notions-champs.html> (Valide à la date du 12/06/13)
- [31] [http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/909229008399980604907622855707/18\\_champs\\_electromagnetiques.pdf](http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/909229008399980604907622855707/18_champs_electromagnetiques.pdf) (Valide à la date du 12/06/13)
- [32] [www.conrad.fr/ce/fr/product/507705/Carte-de-visualisation-des-champs-magnetiques](http://www.conrad.fr/ce/fr/product/507705/Carte-de-visualisation-des-champs-magnetiques) (Valide à la date du 12/06/13)

# Annexe A

## Documentation technique

### A.1 Teslamètre

#### > Teslamètre numérique

- Affichage à cristaux liquides 2000 points
- Indication du sens du champ (+ ou-)
- Sélection de la composante Bx ou By
- Sélection du calibre 1 ou 1/10 sur chacune des voies



PAM 067 360

Accessoire :  
Sonde biaxiale +/-100mT

PAM 067 390

## A.2 Bobines d'Helmoltz

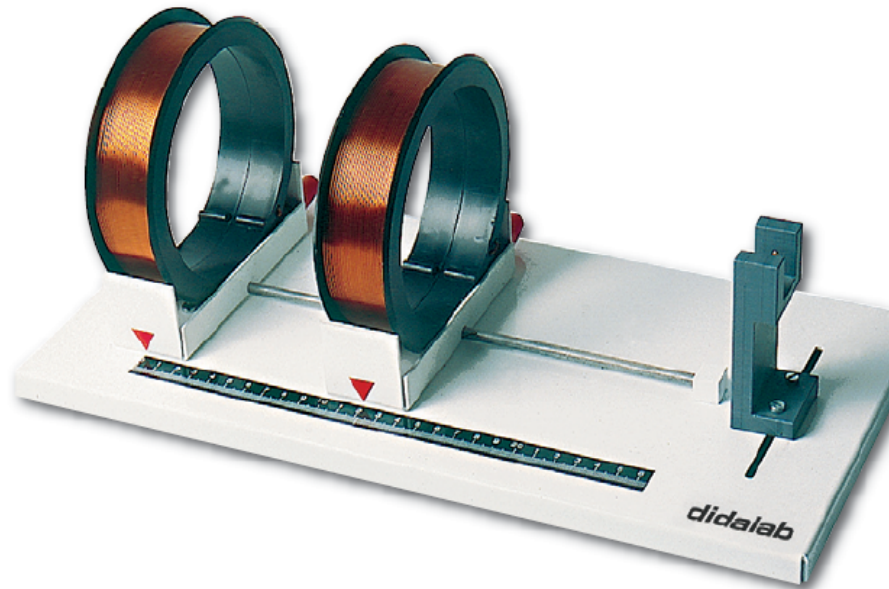
### > Bobine de Helmholtz sur socle

Deux bobines plates à écartement variable sont montées sur un socle commun de 400 x 200 mm. Une des deux bobines est fixe, l'autre mobile.  
L'écartement des bobines peut être mesuré sur une échelle graduée de 250 mm.

#### CARACTÉRISTIQUES D'UNE BOBINE :

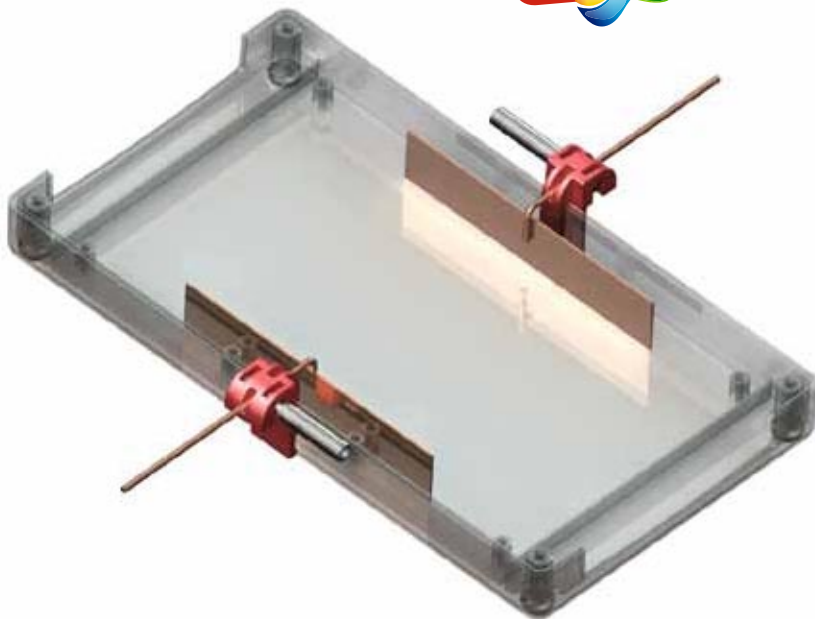
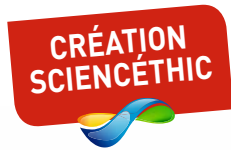
- Fil émaillé 13/10 - 100 spires sur 4 couches
- Diamètre moyen d'enroulement : 125 mm
- Largeur de la bobine : 34 mm
- Sortie sur douilles de sécurité  $\varnothing$  4 mm avec repérage de la polarité
- Courant maximum : 5 A

**PAM 067 370**





## Cuve rhéographique



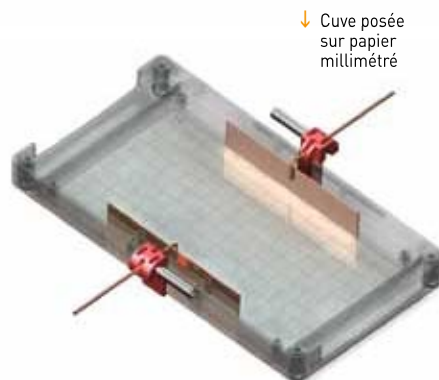
Cette cuve transparente étanche permet de tracer point par point les lignes équipotentiellles entre les 2 électrodes planes en cuivre. La distance entre les 2 électrodes est ajustable.

Chaque électrode est munie d'un connecteur pour cordon banane de sécurité diamètre 4 mm pour être reliée à une alimentation 12 V continu.

Les électrodes sont amovibles et il est possible de compléter cette cuve pour étudier d'autres types de champs électriques (radial, ponctuel) à l'aide des accessoires réf. E 000 115.

### ■ Composition

- 1 cuve,
- 1 paire d'électrodes planes en cuivre,
- 1 paire de connecteurs pour cordon banane de sécurité Ø 4 mm.



- Dimensions : 210x110x17 mm.

Réf. E 000 114

43,98 €TTC

### COMPLÉMENT

## Accessoires pour cuve rhéographique

### ■ Composition

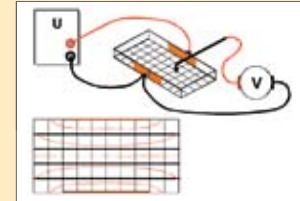
- 1 paire d'électrodes concentriques en cuivre,
- 1 paire d'électrodes ponctuelles en cuivre,
- 1 sonde à 2 fils.



## Manipulation : Champ et potentiel électriques

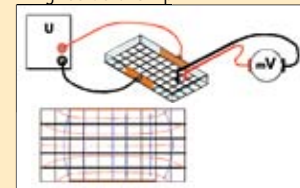
### Cas d'un champ uniforme

- Lignes équipotentiellles



Les deux électrodes planes parallèles sont immergées dans l'eau du robinet et branchées à un générateur de tension constante (6 V-12 V). Une sonde à un fil, reliée à un voltmètre, est placée en un point de la solution. On note la tension. Si on considère que la borne négative du générateur est au potentiel zéro de référence, la tension mesurée est le potentiel électrique du point où se trouve la sonde. On déplace la sonde de façon à maintenir le potentiel mesuré constant et on définit alors les lignes équipotentiellles, qu'on trace sur une feuille de papier millimétré.

- Lignes de champ

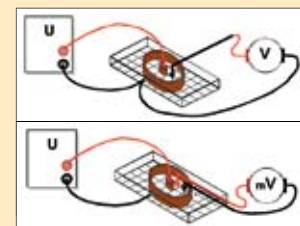


On utilise la sonde à 2 fils distant de  $d$ . On place un des fils en un point d'une équipotentielle et on fait tourner la sonde jusqu'à obtenir la plus grande valeur de la tension affichée.

On note cette valeur  $U \left( E = \frac{U}{d} \right)$ .

On repère la direction qui passe par les deux fils. Sur le diagramme obtenu des équipotentiellles, on pointe les positions des deux fils de la sonde et on trace le segment correspondant. En déplaçant la sonde, on peut alors tracer les lignes de champ et les orienter (le vecteur champ électrique est orienté vers les potentiels décroissants).

### Cas d'un champ radial



Pour tracer les équipotentiellles et les lignes de champ dans le cas des électrodes cylindriques, les méthodes sont semblables aux précédentes :

- Visualisation des lignes de champ

On remplace l'eau de la cuve par de l'huile sur laquelle on dépose de la semoule que l'on répartit à la surface. Les électrodes sont branchées à une machine électrostatique de type générateur de Van de Graaff. Lorsque au-delà d'une certaine tension entre les électrodes, on observe que les grains de semoule, électrisés par influence s'orientent, et on visualise les lignes de champ électrique.

Réf. E 000 115

66,25 €TTC



# Annexe B

## TP d'introduction aux champs électriques et magnétiques

### B.1 Visualisation des lignes de champ électrique, expérience de la cuve rhéographique avec deux plaques conductrices parallèles

#### B.1.1 Matériel nécessaire

- Deux plaques de cuivre paralépipédiques.
- Un générateur de tension continue 5V.
- Une dizaine de fils de connexion de 4mm et de 2mm dont au moins 4 de 2mm.
- Des adaptateurs 4mm-2mm.
- Un voltmètre numérique avec une sonde de touche.
- Une cuve rhéographique avec deux plaques métalliques parallèles.
- Un amplificateur opérationnel.
- Deux résistances de 10kOhm et 100kOhm.

#### B.1.2 Montage du système

- Brancher l'amplificateur opérationnel sur la prise de courant
- Alimenter l'amplificateur opérationnel
- Réaliser le montage de division de tension :
- Placer la grille de mesures sous la cuve rhéographique
- Relier le montage à la cathode et l'anode de la cuve
- Relier le Voltmètre à l'électrode de référence
- Relier la sonde de touche au voltmètre

#### B.1.3 Observations préliminaires

1. Déplacer la sonde d'une plaque à l'autre en suivant une ligne orthogonale aux plaques, qu'observez vous ?
2. Déplacer la sonde le long d'une ligne parallèles aux plaques que constatez vous ?

### B.1.4 Mesures dans la cuve rhéographique

1. Faites une série de 10 mesures le long d'une ligne parallèle aux plaques, et e long d'un équipotentiel, moyenne
  - Comment les valeurs varient elles le long d'une ligne ?
  - Peut-on prévoir le sens du courant ?
  - Que constatez vous lorsqu'elles s'éloigne de la surface rectangulaire formé par les 2 plaques ?

## B.2 Visualisation des lignes de champ magnétique : expériences sur la configuration de Helmholtz

### B.2.1 Matériel nécessaire

- Deux bobines d'un rayon théorique de 6,25 cm, rayon mesuré de 5,7 cm.
- Un tesla-mètre
- Un banc pour tenir les bobines avec des graduations pour la position des bobines
- Un générateur de courant continu.
- Au minimum 4 fils de 4mm

### B.2.2 Montage du système

Se référer au schéma inclus dans le rapport

- Brancher le générateur de courant sur le secteur
- Faire le montage en parallèle des deux bobines comme indiqué sur le schéma
- Brancher le Tesla mètre sur le secteur et tarer la sonde
- Installer l'extrémité de la sonde à équidistance des deux bobines à l'intérieur de la configuration de Helmholtz.
- Imposer aux bobines un courant continu de la valeur maximale du générateur, pour notre expérience :  $I = 5,67 \text{ A}$ .

### B.2.3 Observations préliminaires

A l'aide d'une boussole à pointe et des plaques transparentes, essayez de prévoir le comportement du champ à l'intérieur et à l'extérieur de la configuration :

1. Comment se comporte la boussole à l'extérieur de la configuration de Helmholtz ? Y a-t-il une distance limite de l'influence du système sur la boussole ?
2. Que se passe-t-il lorsque la boussole est à l'intérieur ?
3. Comment les barreaux de fer s'orientent-ils sur les bords du système ?
4. Comment s'orientent-ils à l'intérieur du système ?
5. Essayez de modifier la distance entre les deux bobines : est-ce que les observations préliminaires sont toujours valables ?

### B.2.4 Partie théorique

(Données : expression du champ pour une bobine seule, invariances et plans d'antisymétrie.)

1. Calculez l'expression du champ sur l'axe central pour une configuration avec deux bobines
2. Montrez que le champ est constant à l'intérieur de la configuration de Helmholtz.

### B.2.5 Manipulations

1. Faire les manipulations suivantes :
  - Relever une série de 20 points à partir de l'intérieur de la bobine et à l'extérieur en prenant un point tous les centimètres
  - Mettre les valeurs relevées dans un tableau sous Open Office
  - Réaliser un graphique représentant la valeur du champ magnétique en fonction de la position de la sonde sur l'axe centrale des bobines.
2. Questions
  - Les résultats sont-ils cohérents avec la théorie ?
  - Quelles peuvent être les causes de la différence entre la théorie et l'expérience ?