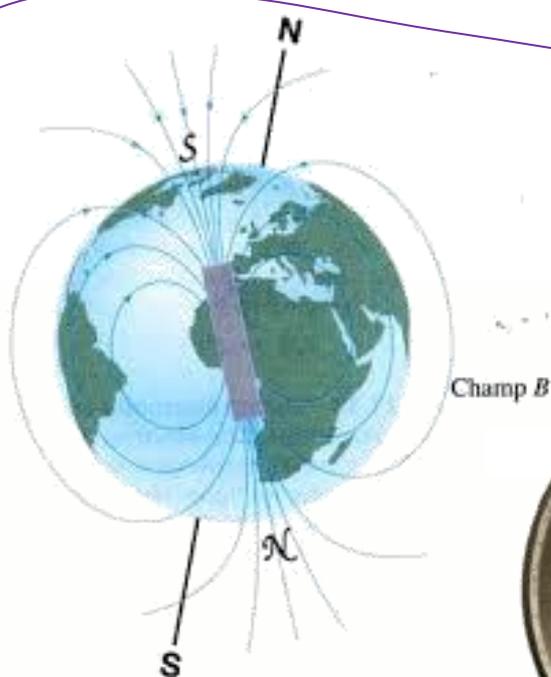


# Visualisation des lignes de champs électriques et magnétiques



**Etudiants :**

**Moncef CHAIRAT**

**Klervi HAVARD**

**Pierre PORCHE**

**Albéric DE DIEULEVEULT**

**Julie PAIN**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Diane DUVAL**



Date de remise du rapport : 16/06/2014

Référence du projet : STPI/P6/2014 – 022

Intitulé du projet : *Visualisation des lignes de champs électriques et magnétiques*

Type de projet : *expérimental / bibliographie*

Objectifs du projet:

- *Mettre en place des expériences simples permettant de visualiser les champs électriques et magnétiques ;*
- *Rédiger un énoncé de TP de P5.*

Mots-clefs du projet :

- *Champ magnétique ;*
- *Champ électrique.*

Si existant, n° cahier de laboratoire associé :

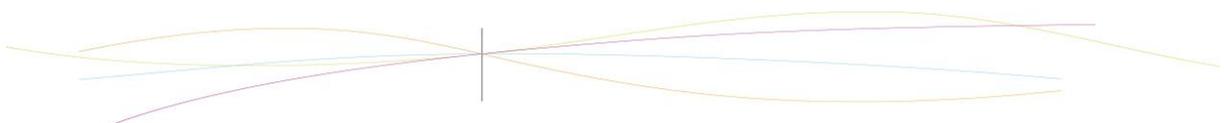
## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3. Le champ électrique.....	8
3.1. Notions.....	8
3.1.1. Historique.....	8
3.1.2. Théorie.....	9
3.1.3. Applications.....	11
3.2. Les manipulations .....	11
3.3. Résolution de l'équation de Laplace.....	14
4. Le champ magnétique.....	16
4.1. Notions.....	16
4.1.1. Historique.....	16
4.1.2. Théorie.....	17
4.1.3. Applications.....	18
4.2. Les manipulations .....	19
5. Réalisation du TP.....	22
5.1. Partie champ électrique.....	22
5.2. Partie champ magnétique .....	23
6. Visite au palais de la découverte.....	24
7. Conclusions et perspectives.....	27
8. Bibliographie .....	28
9. Annexes.....	29
9.1. Expérience de la cuve rhéographique – Schémas.....	29
9.2. Programme de résolution de l'équation de Laplace .....	30
9.3. Résultats du programme .....	31
9.4. Expériences champ magnétique – Schémas.....	32
9.5. TP : Visualisation des lignes de champ électrique et magnétique.....	34

## NOTATIONS, ACRONYMES

champ  $\vec{E}$  : champ électrostatique

champ  $\vec{B}$  : champ magnétique



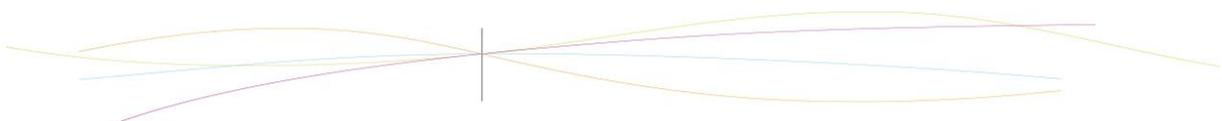
## 1. INTRODUCTION

Les champs électriques et magnétiques nous entourent sans même qu'on ne le sache et ils occupent une place prédominante dans le monde scientifique. Ils se manifestent lors des orages par des champs électriques mais aussi, pour l'orientation de l'aiguille d'une boussole, par des champs magnétiques. Cependant, la notion de champ est complexe car on ne peut pas le visualiser et il est donc difficile de comprendre tous les phénomènes qui y sont liés. C'est pourquoi nous avons décidé d'apporter une apparence concrète à ce projet en essayant de visualiser les lignes de champs électriques et magnétiques.

Nous avons, dans un premier temps, revu les notions étudiées en P5 concernant les propriétés du champ pour mieux appréhender le sujet. A partir de là, nous avons réfléchi aux expériences qui nous semblaient être les plus intéressantes; puis, nous avons pu entamer une démarche expérimentale afin de visualiser les lignes de champs électriques et magnétiques. Il a été important pour nous de fixer des objectifs concrets à chaque séance pour mener à bien ce projet de sa réalisation à sa conception.

Par la suite, nous avons cherché à étudier l'histoire et l'évolution au cours du temps des champs électriques et magnétiques ainsi que leurs applications dans l'industrie actuelle.

Finalement, nous avons réalisé le TP pour les futurs étudiants de deuxième année. Pour cela, il a fallu faire une partie préparatoire et une partie expérimentale qui tiennent compte de plusieurs facteurs: le temps, la difficulté, les connaissances des étudiants, la cohérence avec le sujet, le but des manipulations.

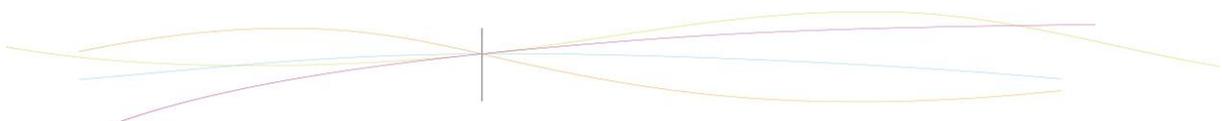
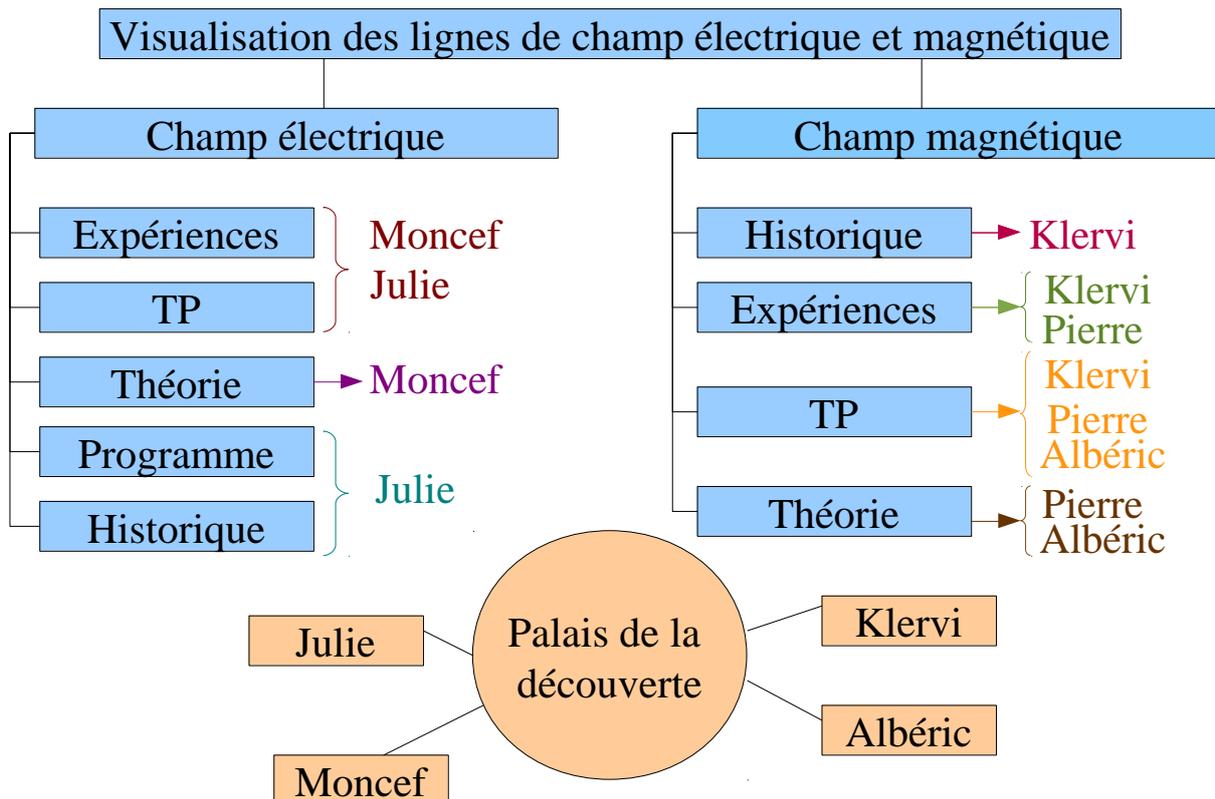


## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

### ✚ Description de l'organisation adoptée pour le déroulement du travail

Semaines 1-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Découverte du projet ;</li> <li>- Recherches documentaires ;</li> <li>- Répartition des tâches ;</li> </ul>
Semaines 3 à 6-7	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation des expériences ;</li> <li>- Mesures ;</li> </ul>
Semaines 7-8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse des résultats ;</li> </ul>
Semaines 9 à 11	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation du TP (rédaction et vérification du temps des manipulations) ;</li> </ul>
Judi 15 Mai 2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visite du Palais de la Découverte ;</li> </ul>
Semaines 12 à 14	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en commun ;</li> <li>- Rédaction du rapport et du diaporama.</li> </ul>

### ✚ Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés



### 3. LE CHAMP ELECTRIQUE

#### 3.1. Notions

##### 3.1.1. Historique

###### Vers la charge électrostatique ...

Le concept de l'électrostatique est celui de la charge électrostatique. Cette notion n'est évidemment pas apparue d'elle-même, mais est le résultat de nombreuses recherches, de différents travaux et expériences menés au cours des siècles.

Le premier à donner une description de l'électrostatique, fut Thalès de Milet, au Ve siècle avant J.C. A cette époque, les notions de charge et de force électrostatique étaient inconnues. Cependant, Thalès rapporte que lorsque l'on frotte un bâton d'ambre (résine fossilisée qui se dit "àlektron" en grec) avec une peau de chat et que l'on approche ensuite certains matériaux légers comme des morceaux de papiers, ceux-ci sont attirés par le bâton d'ambre. C'est l'expérience de base qui a conduit à élaborer la théorie de l'électrostatique.

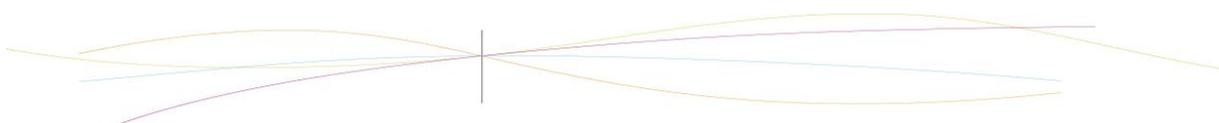
Cependant, l'étude scientifique de l'électrostatique n'a véritablement commencé qu'au XVIe siècle avec les travaux de William Gilbert. Il a été le premier à séparer les corps en deux groupes : les conducteurs et les isolants.

Dans les années 1700, Stephen Gray apporte une contribution significative dans la compréhension des phénomènes électrostatiques. De ses observations et de ses expériences, ressortent les propriétés suivantes :

- l'électrisation d'un corps est transmissible à un autre corps ;
- les conducteurs électriques peuvent être électrisés s'ils sont isolés ;
- les isolants électriques peuvent toujours être électrisés ;
- l'électricité est un courant qui circule dans un conducteur ;
- la Terre, le corps humain et l'eau sont des conducteurs ;
- les isolants dont les surfaces sont mouillées sont conducteurs.

Un peu plus tard, Du Fay prouve que tous les corps sont plus ou moins conducteurs. Il remarque aussi que des isolants à température ambiante peuvent devenir conducteurs à haute température. D'autre part, il propose également une théorie qui repose sur l'existence de deux sortes d'électricité. Cette théorie est aujourd'hui appelée « la théorie à deux fluides » et est inexacte mais a permis de poser les éléments décisifs pour la compréhension exacte de ce phénomène.

Se basant sur l'étude de Du Fay, Benjamin Franklin présente en 1747 sa théorie du fluide unique. Il imagina l'électricité comme étant un type de fluide présent dans toute matière. Il a posé notamment plusieurs principes : le frottement de surfaces isolantes fait changer le fluide d'endroit, un écoulement de ce fluide constitue un courant électrique, quand la matière contient trop peu de ce fluide, elle est négativement chargée et quand il est excédentaire, la



matière est positivement chargée. Grâce à cette théorie, il a pu déduire les propriétés suivantes :

- la matière contient des charges positives et des charges négatives ;
- le courant électrique est dû au déplacement des charges négatives ;
- les charges positives restent fixes.

De plus, il a affirmé que deux corps chargés positivement ou négativement se repoussent alors qu'un corps chargé positivement et l'autre négativement s'attirent. C'est également lui qui a posé le principe de la conservation de la charge électrique.

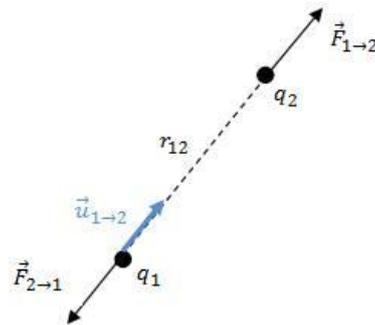
En 1785, Charles-Augustin Coulomb découvre expérimentalement l'expression décrivant le module de la force électrique que deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères s'exercent. De nos jours, nous savons que la loi de Coulomb s'applique à toutes les particules pouvant être considérées comme étant ponctuelles. Pour mesurer les forces, Coulomb se servit d'une balance de torsion.



*Balance de Coulomb*

Expression de la loi de Coulomb :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$



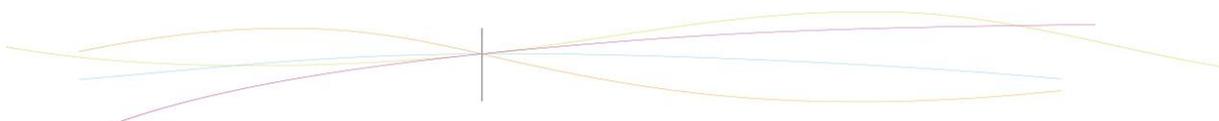
### 3.1.2. Théorie

#### De la force de Coulomb au champ électrostatique ...

##### Notion de champ en Physique

La notion de champ est une notion fondamentale qui intervient notamment aujourd'hui dans le domaine de la physique. C'est Maxwell, en 1861 qui créa le concept du « champ ». D'après lui, un champ désigne une perturbation de l'espace qui, en chaque point, est un potentiel de force indépendant des corps qui s'y trouvent. Aujourd'hui, on définit un champ de la façon suivante : « grandeur physique définie en tout point et à tout instant, décrite par une fonction de l'espace et du temps » (*Larousse*). Les champs peuvent être scalaires, vectoriels, ou encore tensoriels.

Le champ est scalaire lorsque la grandeur physique à déterminer est une valeur, on peut parler de champ de pression par exemple. Un champ est vectoriel lorsqu'il est caractérisé par un vecteur, c'est le cas du champ électrique.



**✚ Définition du champ électrique**

Le champ électrique, noté  $\vec{E}$ , est un champ de forces invisible généré par un ensemble de particules avoisinantes qui sont électriquement chargées. Plus précisément, il est créé par l'attraction et la répulsion de charges électriques. Il permet de déterminer en tout point de l'espace la force électrique exercée à distance par ces charges. L'intensité du champ électrique augmente lorsque la distance qui le sépare de sa source diminue.

Le champ électrique est caractérisé par un vecteur qui en tout point de l'espace associe une direction radiale identique à celle de la force électrique (car  $\vec{F} = q\vec{E}$ ), un sens (orienté vers l'intérieur s'il s'agit d'une charge négative et vers l'extérieur pour une charge positive), une origine et une norme exprimée en Volts par mètre (V/m).

**✚ Le champ électrostatique et surfaces équipotentielles**

Lorsque les charges sont fixes dans le référentiel d'étude, le champ électrique est appelé "champ électrostatique".

Si on adopte la vision de champ avec la formule de Coulomb vu précédemment, on obtient :

$$\vec{F}_{\text{subis par 2}} = q_2 \vec{E}_1(M) \text{ avec } \vec{E}_1(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

→  $\vec{E}_1(M)$  est par définition le champ électrostatique créé en M par  $q_1$ .

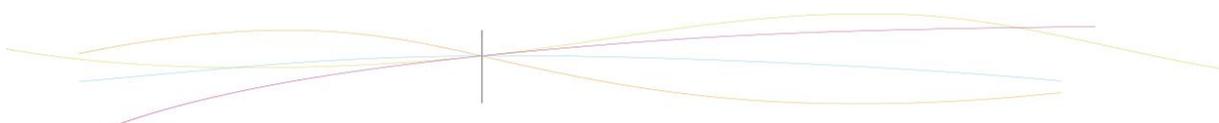
Grâce à cette notion de champ, nous pouvons considérer les choses d'un autre point de vue en remarquant que toute charge  $q_i$  placée en M subira une force  $\vec{F} = q_i \vec{E}_1(M)$  qui ne dépend que de la valeur du champ en M.

Le champ électrostatique est lié à des courbes qui lui sont tangentes : ce sont les "lignes de champ". Elles sont définies par la condition suivante :  $d\vec{r} \wedge \vec{E} = \vec{0}$ . Les lignes de champ ne se coupent jamais et indiquent en tout point de l'espace la direction du champ  $\vec{E}$ .

L'association des surfaces équipotentielles et des lignes de champ permettent de visualiser l'allure du champ

Par définition, une surface équipotentielle est définie comme le lieu où le potentiel V est constant.

Le champ électrostatique dérive d'un potentiel scalaire, en effet on a la relation :  $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$  donc  $dV = -E \cdot dx$  pour un déplacement infinitésimal  $dx$ . Or, les surfaces équipotentielles répondent à la condition suivante :  $dV = 0$  donc  $-E \cdot dx = 0$ . On en conclut que les lignes de champ sont toujours perpendiculaires aux surfaces équipotentielles.



### 3.1.3. Applications

L'électricité statique peut engendrer beaucoup de problèmes mais présente également des avantages. Intéressons-nous aux applications industrielles du champ électrostatique.

Les imprimantes laser et les photocopieurs fonctionnent en utilisant un procédé d'impression à sec lié à l'électrostatique: c'est la xérogaphie. Elles possèdent une surface imprimante qui est recouverte d'une matière photoconductrice. Dans l'obscurité, cette surface se comporte comme un isolant électrique. Les zones éclairées perdent leurs charges et deviennent conductrices. Les autres zones de la surface, qui conservent des charges, attirent à elles des particules d'encre de charges opposées que l'on appelle "toner". Le toner est finalement reporté sur le papier par attraction électrostatique.

La peinture électrostatique est utilisée dans certains cas pour remplacer les peintures liquides. Elle s'applique exclusivement sur des surfaces métalliques. Le principe est simple. La surface à peindre est chargée positivement et les particules de peinture négativement. Une tension électrique se crée entre la surface métallique et le pulvérisateur, ce qui provoque un champ électrostatique. Ainsi, la peinture se dépose sur l'objet par attraction électrostatique et évite toute perte de gouttelettes de peinture. La peinture électrostatique présente de nombreux avantages: un meilleur rendement, une répartition uniforme de la peinture sur la pièce et un gain de temps au séchage.

## 3.2. Les manipulations

### La cuve rhéographique

#### Description :

Cuve remplie d'une solution ionique qui permet de déterminer expérimentalement la distribution de potentiels d'un conducteur immergé.

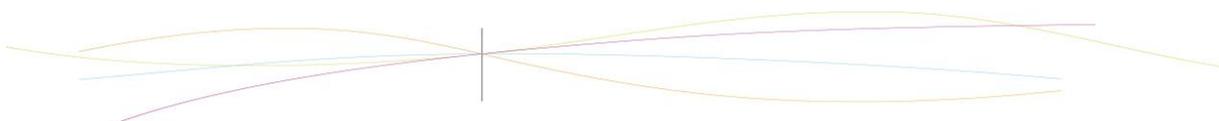
#### But de l'expérience :

Le but de cette expérience est de mesurer à différents endroits le potentiel dans la cuve afin de pouvoir déterminer les équipotentiels. Ainsi nous pourrons tracer les lignes de champ électrique, celles-ci étant orthogonales aux équipotentiels.

#### Réalisation du montage :

Afin de pouvoir mesurer le potentiel entre les deux plaques de cuivre, il faut une solution ionique dans la cuve ce qui permet un déplacement des électrons. Les électrodes étant en cuivre, nous avons décidé de mettre une solution de sulfate de cuivre. Cependant, les électrodes étant alimentées d'une tension, une réaction d'électrolyse se produit. Ainsi, pour éviter une trop forte dégradation des électrodes, il est indispensable de diminuer la tension dans la cuve. Nous avons donc décidé d'utiliser un montage amplificateur-inverseur permettant d'abaisser la tension d'entrée de 5V à 0.5V. Afin de déterminer la valeur des résistances, nous avons simplement utilisé la formule suivante (formule de l'amplificateur

inverseur) :  $V_s = V_e \times \frac{R_2}{R_1+R_2}$  .

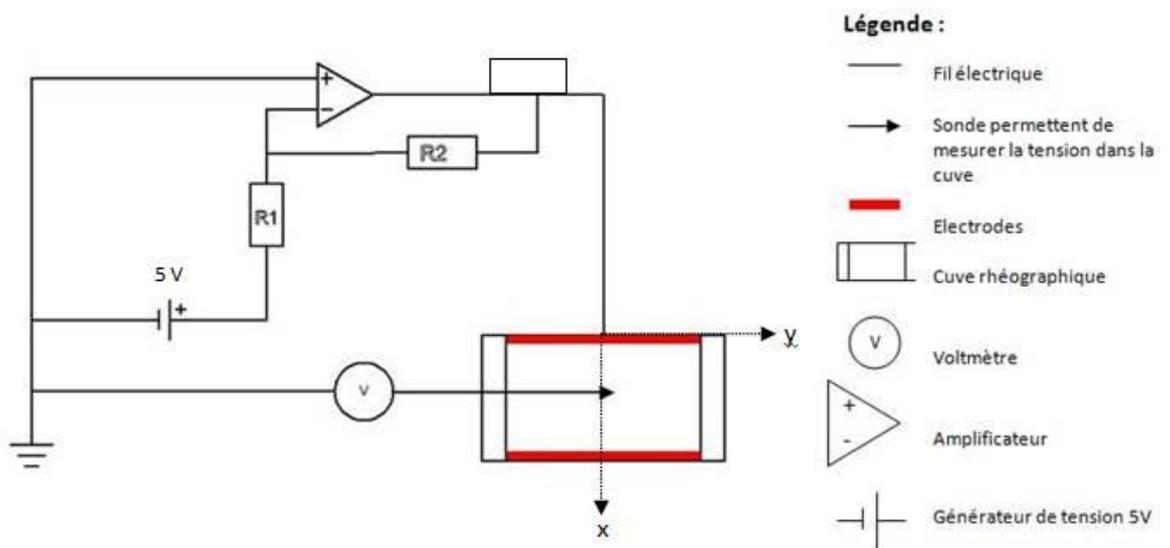


$V_e=5V$ ,  $V_s=0.5V$  et on choisit  $R_1$  à  $10k\Omega$ , ce qui nous donne  $R_2=1k\Omega$  pour satisfaire l'équation.

**Matériel :**

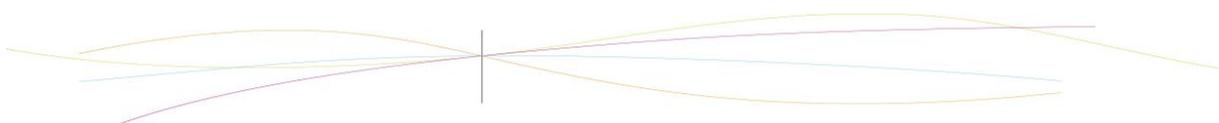
- Alimentation continue de 5 V ;
- deux résistances : 10 k $\Omega$  et 1 k $\Omega$  ;
- un amplificateur opérationnel ;
- un voltmètre ;
- une cuve rhéographique ;
- deux électrodes de cuivre ;
- un repère quadrillé ;
- un tableur.

**Schémas du montage :**

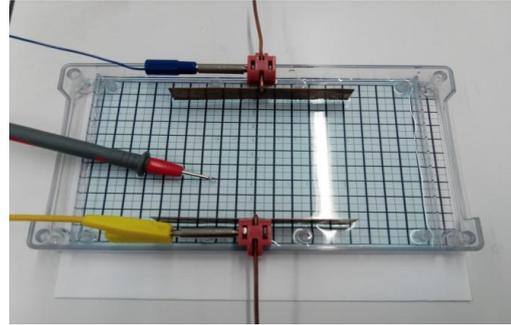
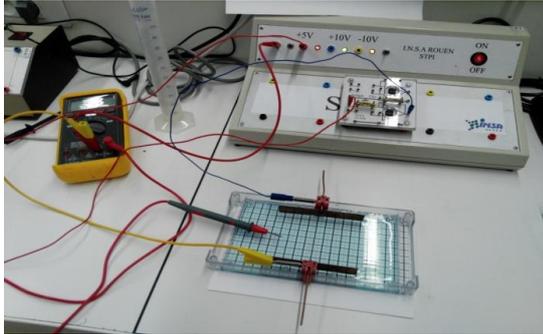


**Manipulation :**

- Réaliser le montage ;
- Placer le repère sous la cuve (si celui-ci n'est pas déjà présent) ;
- Verser 80 mL de la solution de sulfate de cuivre dans une éprouvette ;
- Verser le contenu de l'éprouvette dans la cuve ;
- Alimenter le circuit avec une tension de 5V ;
- A l'aide du repère et du voltmètre, pour un potentiel donné, entrer dans le tableur les valeurs de X et Y correspondantes ;
- Tracer les équipotentielles à l'aide des fonctionnalités du tableur.



**Avec deux électrodes de cuivre parallèles**



*Photos du montage et de la cuve rhéographique*

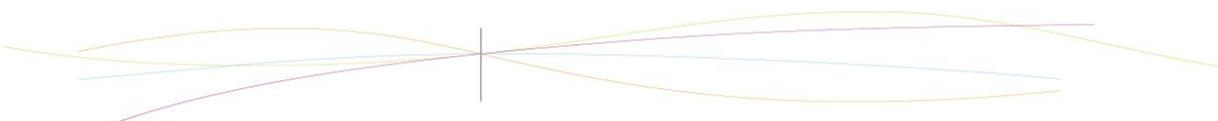
**+** Observations, Analyse :

Lorsque l'on mesure le potentiel à l'aide de la sonde, celle-ci étant très sensible, les valeurs possèdent un grand nombre de chiffres significatifs et varient malgré l'immobilité de la sonde. Nous avons donc choisi de garder seulement deux chiffres significatifs pour permettre plus de stabilité dans les mesures. Pour faire les mesures, nous repérons les équipotentiels en fixant une valeur pour notre tension, et nous entrons dans le tableur les valeurs des X correspondantes en faisant varier notre Y de 0,5 à chaque mesure.

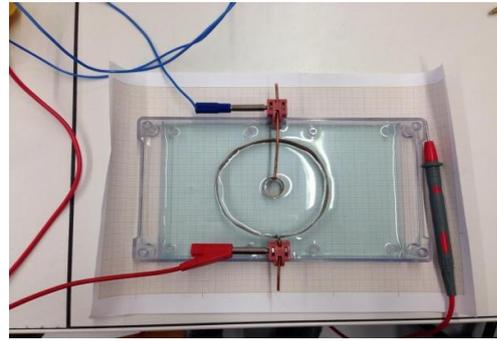
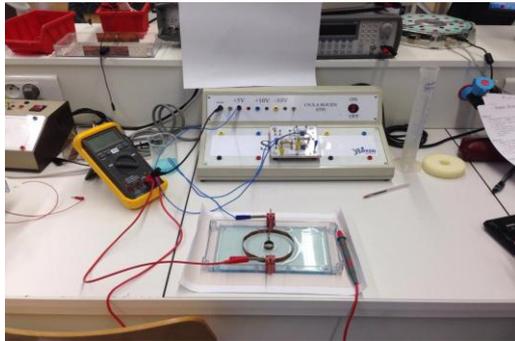
Le graphique représentant les lignes équipotentiels est présent en **Annexe 9.1**

Les deux électrodes de cuivre jouent le rôle de conducteurs chargés électriquement. Comme nous l'avons vu dans la première partie, lorsqu'un conducteur est chargé électriquement, il donne naissance dans l'espace qui l'entoure à un champ électrostatique. Nous ne visualisons pas ici les lignes de champ, lignes dont le champ  $\vec{E}$  est tangent en chaque point, mais les équipotentiels. La présence de ces équipotentiels prouve l'existence des lignes de champ, celles-ci étant perpendiculaires aux équipotentiels.

On remarque que les équipotentiels sont quasiment parallèles les unes par rapport aux autres entre les électrodes comme c'était à prévoir, ce qui met en évidence la présence d'un champ uniforme entre les deux conducteurs. Au-delà des deux électrodes, nous observons les effets de bord.



**Avec deux électrodes de cuivre circulaires**



*Photos du montage et de la cuve rhéographique*

**+** Observations, Analyses :

Pour cette deuxième expérience, de même que pour la première, nous avons repéré les équipotentielles en cherchant à quels endroits de la grille le potentiel est constant.

Le graphique représentant les lignes équipotentielles est présent en **Annexe 9.1**

Nous pouvons faire ici la même remarque que précédemment. On constate la présence d'un champ électrostatique entre les deux électrodes de cuivre circulaires. La direction radiale du champ uniforme est donnée par la forme circulaire des équipotentielles (les lignes de champ étant perpendiculaires aux équipotentielles). Ici, nous ne percevons pas les effets de bord puisque nous n'avons pas pris de mesures à l'extérieur des électrodes.

**3.3. Résolution de l'équation de Laplace**

Dans une zone vide de charge,  $\rho=0$ , ce qui donne l'équation dite de Laplace :  $\Delta V=0$

Laplacien en 2D :  $\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$

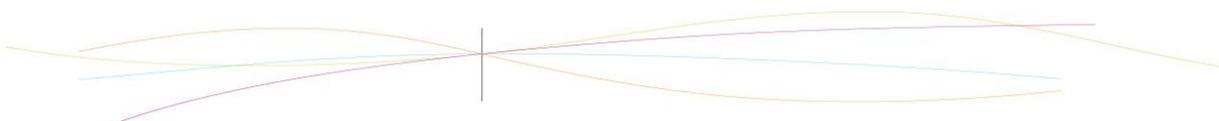
Afin de résoudre cette équation, nous allons utiliser une méthode numérique afin de pouvoir visualiser les lignes équipotentielles.

Nous allons donc tout d'abord utiliser la méthode des différences finies :

Si  $h \ll 1$ , le développement de Taylor au voisinage de 0 donne :

$$V(x + h) = V(x) + h \cdot V'(x) + \frac{h^2}{2} \cdot V''(x) + O(h^3) \quad (1)$$

$$V(x - h) = V(x) - h \cdot V'(x) + \frac{h^2}{2} \cdot V''(x) - O(h^3) \quad (2)$$



(1)+(2) :

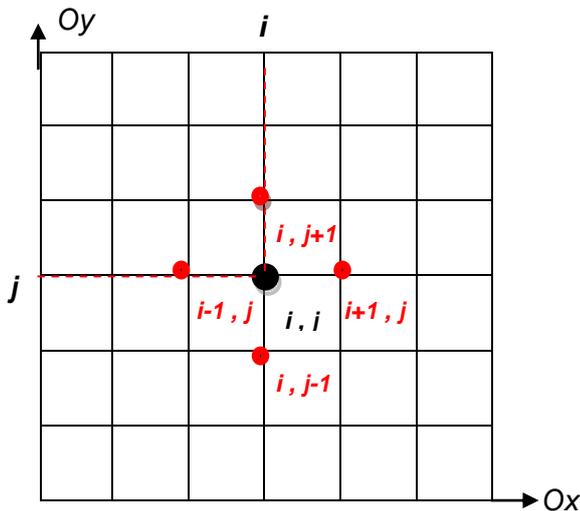
$$V''(x) = \frac{1}{h^2} \cdot (V(x+h) + V(x-h) - 2 \cdot V(x))$$

Donc :  $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{1}{h^2} \cdot (V(x+h,y) + V(x-h,y) + V(x,y+h) + V(x,y-h) - 4 \cdot V(x,y))$

Or, pour h suffisamment petit, on a :  $\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$

Ce qui nous donne :  $V(x,y) = \frac{1}{4} \cdot (V(x+h,y) + V(x-h,y) + V(x,y+h) + V(x,y-h))$  (3)

On utilise ensuite un maillage carré dont les nœuds sont repérés par les indices *i* selon l'axe **Ox** et *j* selon l'axe **Oy** (voir la figure ci-dessous). Cette méthode nous permet de représenter les solutions par un tableau de points.



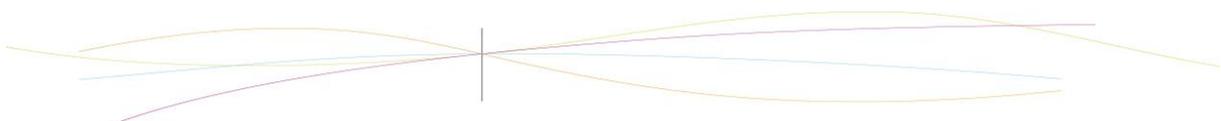
Il nous faut tout d'abord initialiser notre tableau de points : on impose le potentiel en chaque nœud à 0 et on impose le potentiel des nœuds aux limites.

Ensuite, on parcourt le domaine en écrivant que la valeur du potentiel sur le nœud (*i* , *j*) est fonction de la valeur des potentiels des nœuds (*i-1* , *j*) , (*i+1* , *j*) , (*i* , *j-1*) et (*i* , *j+1*).

On montre que si on itère un nombre de fois suffisant, la valeur du potentiel en chaque nœud converge vers sa valeur réelle. Nous avons donc réalisé un programme matlab (présent en **Annexe 9.2**).

Pour représenter la grille ci-dessus, nous utilisons une matrice et plaçons tout d'abord les potentiels initiaux. Le programme réalise ensuite une boucle contenant la formule (3) qui permet ensuite de déterminer le potentiel en chaque point. Ce tableau peut être assimilé à une cuve rhéographique.

Ce programme effectue également le tracé des équipotentielles. Les résultats que l'on peut obtenir sont présentés en **Annexe 9.3**



## 4. LE CHAMP MAGNETIQUE

### 4.1. Notions

#### 4.1.1. Historique

##### De l'Antiquité au Moyen-âge

La magnétite (oxyde de fer) ou "pierre d'aimant" (ou "pierres qui s'aiment", *tzhu shih* en chinois) a été trouvée en Magnésie (à l'est de la Thessalie, Grèce). Les Grecs, les Chinois et les Romains avaient remarqué que la magnétite pouvait attirer des objets contenant du fer et qu'elle permettait à un élément en contact avec elle d'acquérir cette même propriété.

D'après la légende, un berger grec nommé Magnès s'aperçut un jour qu'une pierre resta accrochée au bout de son bâton ferré. Il décida de découper cette pierre en feuillets et de l'appliquer en guise de semelles pour ses sandales. C'est ainsi qu'il accomplit de longues distances sans se fatiguer (c'est ce que l'on appelle aujourd'hui des semelles magnétiques). Dès le II<sup>e</sup> après J.-C., les Chinois avaient remarqué qu'en frottant une aiguille de fer avec un aimant naturel puis en la laissant libre de ses mouvements, elle s'orientait suivant le Nord et le Sud.

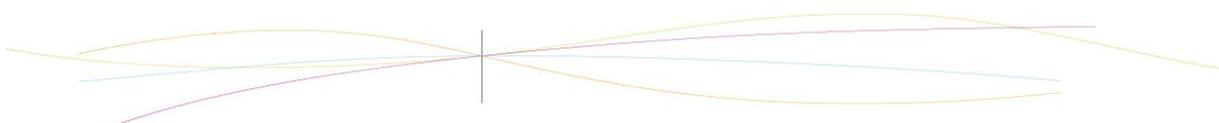
Cependant ce n'est qu'à partir du XI<sup>e</sup> siècle que l'on parle de boussole, objet qui devint tout de suite indispensable à la navigation mais on pensait à cette époque que l'aiguille pointait vers l'étoile polaire. La découverte de ce phénomène ouvrit alors la porte à l'étude des propriétés magnétiques de la Terre qui n'est en réalité qu'un gigantesque aimant. C'est Petrus Peregrinus qui découvrit le concept de pôles et la loi selon laquelle les pôles de même charge se repoussent et les pôles de charges opposées s'attirent.

##### Des Temps modernes à aujourd'hui

Tout d'abord, en 1600, Sir William Gilbert (physicien anglais et médecin de la Reine) théorise les grands principes du champ magnétique terrestre.

A la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Alexandre von Humboldt découvre que l'intensité du champ magnétique varie avec la latitude, en effet au cours de ses voyages en Amérique, il fait "vibrer" l'aiguille de sa boussole et compte le nombre d'oscillations pendant 10 minutes. Le nombre d'oscillations sur l'équateur magnétique au Pérou est de 211 et décroît symétriquement vers le Nord et vers le Sud, cela indique une augmentation de l'intensité du champ magnétique vers les pôles. Et Charles Augustin Coulomb effectue de premiers travaux sur l'étude quantitative du magnétisme en mesurant les forces s'exerçant entre deux charges magnétiques.

Puis, en 1820, Hans Christian Ørsted découvre les liens entre électricité et magnétisme en observant une aiguille. Il remarque que celle-ci est déviée par un courant électrique



traversant un fil conducteur. Sa découverte est à la base de la théorie de l'électromagnétisme élaborée par André-Marie Ampère puis par James Maxwell. En 1895, Pierre Curie montre que les propriétés magnétiques des corps dépendent de leur température. Lors de ce même siècle, le physicien Macedonio Melloni découvre que chaque roche volcanique possède sa propre aimantation. Il formule alors l'hypothèse que cette aimantation fut acquise lors du refroidissement de la lave qui enregistra le champ magnétique terrestre de l'époque. Il conclue que les laves possèdent une mémoire magnétique. Sa découverte est confortée par deux chercheurs français, Brunhes et Mercanton, et ils y apportent les fondements théoriques.

Une interprétation quantique du phénomène magnétique a été faite au début du XXe siècle grâce aux progrès réalisés dans l'étude de la matière à l'échelle atomique. Niels Bohr explique ainsi, à l'aide du tableau périodique, pourquoi le magnétisme apparaît chez les éléments de transition tels que le fer. Puis les physiciens américains Samuel Abraham Goudsmit et George Eugene Uhlenbeck montrent que l'électron lui-même se comporte comme un petit aimant.

Pour finir, il y a une différence à faire entre pôles magnétiques et géographies. Même si ces derniers sont bien connus et ne changent pas, les pôles magnétiques, quant à eux, peuvent varier dans le temps. Le pôle Nord magnétique est découvert en 1831 et en 1909, l'expédition Shackleton se trompe d'environ 130 km en voulant découvrir le pôle Sud magnétique. Notons que l'inversion des pôles a eu lieu environ 300 fois au cours de ces dernières 200 millions d'années et que la dernière est survenue il y a 780.000 ans.

#### 4.1.2. *Théorie*

On peut faire plusieurs parallèles entre le champ électrique et le champ magnétique notamment sur le fait que les deux champs sont vectoriels et possèdent les mêmes invariances que leur source. Cependant, le champ magnétique diffère du champ électrique sur de nombreux points, dont certains sont mis en évidence dans le TP préparé.

Tout d'abord, les sources du champ magnétique sont des charges en mouvement, il existe plusieurs types de charges en mouvement : le courant de conduction, le plus usuel, utilisé dans l'expérience des bobines de Helmholtz, le courant de convection et le courant de particule. Le courant de convection est le mouvement de charges dans un conducteur sous l'effet d'une différence de potentiel.

Alors que le champ électrique a un caractère divergent, le champ magnétique a lui un caractère rotationnel. Ce caractère s'exprime par le fait que le champ magnétique tourne autour du courant qui est sa source, pour déterminer le sens du champ, on utilise la règle de la main droite : si le pouce indique le sens du courant électrique, les quatre autres doigts indiquent le sens du champ magnétique. Dans les formules de Biot et Savart, le caractère rotationnel est exprimé par le produit vectoriel entre le déplacement élémentaire le long d'un fil dans le cas d'une description filiforme, ou le vecteur densité volumique du courant dans le cas d'une description volumique, et le vecteur unitaire donnant la direction entre la source du champ et son point d'étude. Puisque ce produit vectoriel dépend des conventions d'orientation de l'espace, le champ magnétique est appelé un pseudo-vecteur.



Un autre point important concernant le magnétisme est qu'il n'existe pas de monopole magnétique, on a toujours un pôle nord par lequel sortent les lignes de champ et un pôle sud par lequel entrent les lignes de champ. Ce phénomène est observé lors de l'expérience 0 avec une bobine.

Tout comme le champ électrique, le champ magnétique est proportionnel à sa source donc au courant qui lui a donné naissance, et inversement proportionnel au carré de la distance le séparant de sa source. Son unité est le Tesla(T).

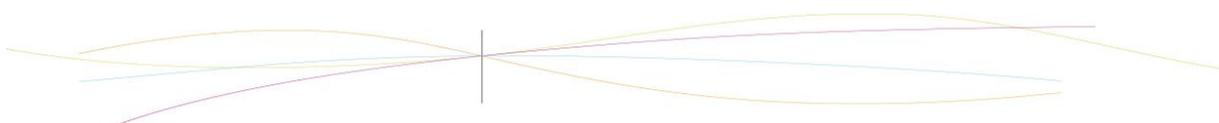
### 4.1.3. Applications

Le champ magnétique, en plus d'être, comme nous avons pu le voir, une notion plutôt complexe avec un historique complet, est un concept porteur pour les avancées scientifiques. En effet, nous allons voir les applications du champ magnétique tout d'abord à l'échelle quotidienne puis dans le champ scientifique et de la recherche.

Une des premières applications du magnétisme a été l'écriture et la lecture d'informations sur des bandes, par exemple sur cassettes ou cartes de crédit. Dans la vie de tous les jours, nous pouvons également utiliser les effets de l'induction magnétique grâce notamment aux plaques chauffantes à induction. A l'heure de l'avènement des voitures électriques, il convient de rappeler que le stator et le rotor du moteur tournent l'un par rapport à l'autre grâce aux forces de Lorentz, qui sont des forces magnétiques. Le domaine de la médecine n'est lui non plus pas épargné car l'outil de diagnostic non-invasif qu'est l'Imagerie par Résonance Magnétique (abrégé I.R.M.) est, comme son nom l'indique, basée sur les moments magnétiques intrinsèques des noyaux d'atomes et sur l'induction mutuelle.

Dans un domaine qui est plus éloigné de la plupart d'entre nous, les chercheurs s'intéressent à ce champ notamment pour sa capacité à dévier les particules sans altérer leur vitesse : c'est pourquoi on l'utilise dans les accélérateurs de particules. Les recherches sur la fusion nucléaire sont également liées aux recherches sur le magnétisme : en effet, la fusion ne peut se faire que dans des conditions extrêmes, conditions qui peuvent être approchées grâce à l'induction magnétique.

Plusieurs centres de recherche européens se regroupent afin de former un laboratoire européen des champs magnétiques intenses afin d'accélérer la recherche en magnétique : le EMFL. Il regroupe le *Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI)*, le *High Field Magnet Laboratory (HFML)* et le *Dresden High Magnetic Field Laboratory (DHMFL)*.



## 4.2. Les manipulations

### ✚ Matériel:

- Un teslamètre ;
- une sonde à effet Hall ;
- deux bobines plates ( $d = 125 \text{ mm}$ ,  $N = 100$  : les spires sont réparties sur 4 couches) ;
- un générateur ( $I_{\max} = 2 \text{ A}$ ) ;
- plusieurs boussoles.

### ✚ Expérience 0:

#### Objectif

Mise en évidence d'un champ magnétique autour d'une bobine alimentée.

#### Manipulation

On pose plusieurs boussoles près d'une bobine non alimentée puis on allume le générateur. On attend la stabilisation des boussoles et on regarde leur orientation. On les change de place et on effectue la même opération.

#### Observations

Avant alimentation de la bobine, les boussoles s'orientent selon le champ magnétique terrestre (Nord/Sud), elles ont toutes la même orientation. Sous alimentation, celles-ci s'orientent selon pôle négatif/positif de la bobine (couleur de flèches).

#### Analyse

Il existe bien un phénomène magnétique autour de la bobine qui fait varier la position de la boussole selon un axe, leur orientation finale correspond aux lignes de champ magnétique de la bobine.

### ✚ Expérience 1:

#### Objectif

Mise en évidence d'une relation mathématique entre le champ magnétique et la distance sonde/bobine.

#### Manipulation

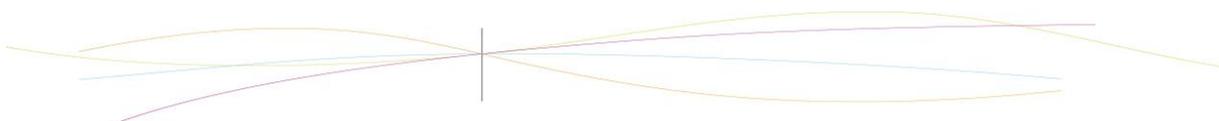
On règle le générateur (avant output) sur 4A et 10V.

Avec une bobine, on mesure le champ ( $B_x$  et  $B_y$ ) à différentes distances en faisant varier la position de la sonde selon l'axe des x. On trace les courbes  $B_x$ ,  $B_y$  en fonction de la distance sonde/bobine. On trace la même courbe mais en prenant la formule de Biot et Savard.

#### Observations

On observe une forte variation de  $B_x$  (faible pour  $B_y$ ) avec un extremum à 4 mT.

La courbe  $B_x=f(D)$  est de la forme  $\frac{-1}{x^2+k}$  avec  $k = \text{cte}$  mais la courbe  $B_y$  n'est pas une droite.



### Analyse

L'allure de  $B_y$  est dû au fait que la sonde n'est pas parfaitement centrée. Il existe bien une relation entre la distance sonde/bobine et la valeur du champ magnétique  $B_x$ .

### Problèmes rencontrés

Concernant l'application théorique de Biot et Savart appliquée à une bobine, nous avons rencontré une incohérence par rapport à la courbe expérimentale. L'allure de la courbe était proche (même maximum) mais la pente était beaucoup plus importante.

Résolution du problème: nous avons fait varier la valeur du rayon, l'allure restait la même mais l'ordre de grandeur était toujours différent. Finalement, on s'est rendu compte qu'il y avait deux erreurs puisque nous avons oublié un facteur 2 dans la relation et que nous avons pris le diamètre au lieu du rayon.

### Remarque

Le signe moins est dû à une convention de signe dans la sonde. Le changement d'orientation du courant dans la bobine implique un changement du signe.

## 🚦 Expérience 2:

### Objectif

Evaluer les effets de la valeur du courant sur le champ magnétique.

### Manipulation

On règle le générateur (avant output) sur **2A** et 10V. Avec une bobine, on mesure le champ ( $B_x$  et  $B_y$ ) à différentes distances en faisant varier la position de la sonde selon l'axe des  $x$ . Puis on trace les courbes  $B_x$ ,  $B_y$  en fonction de la distance sonde/bobine.

### Observations

On observe toujours une forte variation de  $B_x$  (faible pour  $B_y$ ) avec un extremum également divisé par 2.

### Analyse

La valeur du courant a bien une implication sur la valeur du champ magnétique. Ce résultat était prévisible connaissant la formule de Biot et Savart.

## 🚦 Expérience 3:

### Objectif

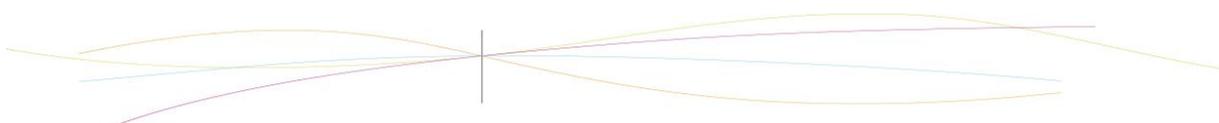
Montrer l'existence des effets de bord.

### Manipulation

On règle le générateur (avant output) sur 2A et 10V et on place la sonde au centre de la bobine. On mesure le champ ( $B_x$  et  $B_y$ ) à différentes distances en faisant varier la position de la sonde selon l'axe des  $y$  puis on trace les courbes  $B_x$ ,  $B_y$  en fonction de la distance sonde/bobine.

### Observations

On observe de faibles variations du champ ( $B_x$  et  $B_y$ ) et on remarque que les valeurs maximales sont près des bords.



### Analyse

Cela met bien en évidence les effets de bords.

### **Expérience 4:**

#### Objectif

Vérifier la loi de Biot et Savart en branchement en série et dérivation.

#### Manipulation

On règle le générateur (avant output) sur 2A et 10V puis on branche deux bobines en dérivation. On mesure le champ ( $B_x$  et  $B_y$ ) à différentes distances en faisant varier la position de la sonde selon l'axe des x et on trace les courbes  $B_x$ ,  $B_y$  en fonction de la distance sonde/bobine.

On branche les deux bobines en série et on refait la même manipulation.

#### Observations

En dérivation: la courbe ne change pas beaucoup car I et N se compensent dans l'équation.

En série: cohérence avec la formule avec  $B_{max}$  multiplié par 2.

### Analyse

La loi de Biot et Savart est vérifiée en configuration Helmholtz (série). En dérivation, cette loi n'est pas vérifiée puisque les bobines ne reçoivent pas le même courant.

### **Expérience 5:**

#### Objectif

Comparer la variation du champ magnétique pour des bobines en configuration Helmholtz et anti-Helmholtz

#### Manipulation

On règle le générateur (avant output) sur 4A et 10V et on branche les deux bobines en série, la distance entre les deux est environ égale à la valeur du rayon. Puis on mesure le champ ( $B_x$ ) à différentes distances en faisant varier la position de la sonde selon l'axe des x et on trace la courbe  $B_x$  en fonction de la distance sonde/bobine.

On fait ensuite de même en inversant l'orientation du courant dans l'une des deux bobines

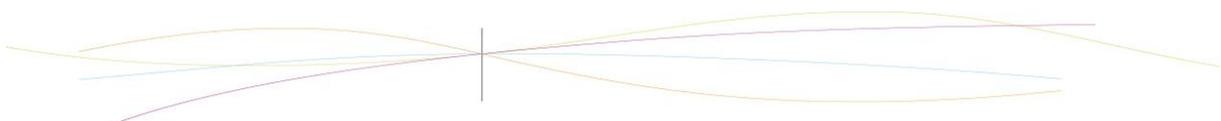
#### Observations

En configuration Helmholtz, on observe un maximum à 6mT au milieu de la distance entre les bobines et en configuration anti-Helmholtz, deux extrema se distinguent par leur léger décalage à 3 mT).

### Analyse

Le champ magnétique total produit par les deux bobines en configuration Helmholtz est  $B = B_1 + B_2$ . En configuration anti Helmholtz, les effets magnétiques se compensent.

Les schémas correspondants aux différentes expériences sont en **Annexe 9.4**



## 5. REALISATION DU TP

Nous avons choisi de réaliser ce TP en deux parties distinctes : une partie sur le champ électrique et une autre sur le champ magnétique.

### 5.1. Partie champ électrique

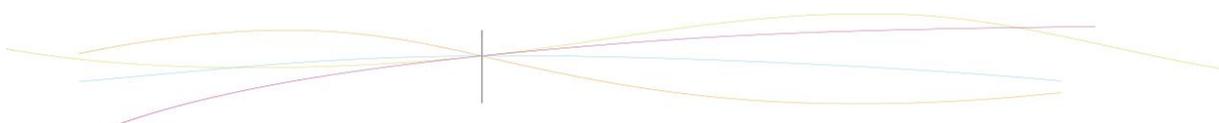
Pour réaliser cette partie de TP, nous nous sommes évidemment basés sur les expériences de la cuve rhéographique, les résultats obtenus mais également les informations trouvées sur internet.

Il est vrai que de nombreux TP sur la cuve rhéographique existent et nous nous en sommes inspirés. En effet, nous les avons soigneusement lus et nous avons cherché à les comprendre afin de proposer aux élèves de l'année prochaine un TP riche et bien construit. En ce qui concerne la partie préparatoire, nous avons décidé d'introduire la notion de champ par le biais d'un travail de recherche documentaire sur la foudre. En effet, nous avons pensé que cette introduction pourrait marquer les élèves et les intéresser car la foudre est un phénomène que nous avons tous eu un jour l'occasion de voir. Il est de plus très intéressant de faire le lien entre champ électrique et foudre.

La deuxième partie de la préparation permet aux élèves de se familiariser avec le TP qu'ils vont réaliser. Grâce à cet exercice, ils pourront comprendre le montage et le but de la manipulation.

En ce qui concerne le TP en lui-même, nous avons intégré la liste du matériel ainsi qu'une partie « manipulation » dans laquelle nous avons anticipé les éventuels problèmes que les élèves pourraient rencontrer lors du TP. A titre d'exemple, nous avons mis à la disposition des élèves une éprouvette pour faciliter le versement de 80mL de la solution de sulfate de cuivre dans la cuve (quantité choisie avec soin lors de nos expériences). Nous avons ensuite divisé ce TP en deux parties : les « observations qualitatives » et les « mesures à réaliser ». Les « observations qualitatives » ont pour but d'habituer l'élève à la cuve afin qu'il puisse se rendre compte des résultats qu'il doit obtenir par la suite. La partie « mesures à réaliser » se divise également en deux questions :

- la première question aborde l'étude des équipotentielles et, par conséquent, la direction du champ électrique entre les deux électrodes. Afin que les élèves puissent obtenir les mêmes résultats que ceux que nous avons eu lorsque nous avons tracé les équipotentielles, nous avons réalisé un fichier Excel pré-rempli.
- La deuxième question demande à l'étudiant de tracer et de modéliser le potentiel  $V$ . Il doit calculer la valeur du champ entre les électrodes de cuivre et conclure sur le caractère uniforme du champ.



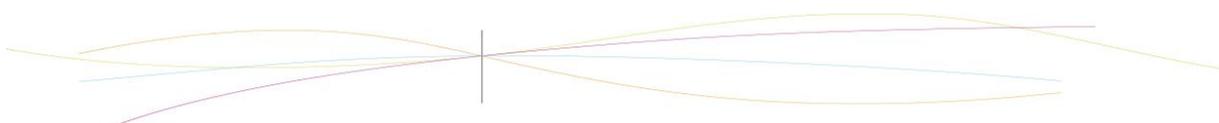
## 5.2. Partie champ magnétique

Pour la partie magnétique de ce TP, nous nous sommes bien sûr basés sur les expériences que nous avons faites au cours de notre projet mais aussi des expériences abordées en cours de P5 ou sur internet.

Si de nombreux travaux pratiques sur le champ magnétique existent, aucun n'abordait ces notions de la manière que nous voulions. C'est pourquoi nous avons réalisé un TP qui, selon nos critères, correspondait le plus à la manière d'aborder l'EC P5 et à la réalisation des TP à l'INSA.

La partie préparatoire est axée sur une approche "ludique" avec l'utilisation d'une simulation en Flash pour visualiser les lignes de champs. Cette approche permet aux élèves de comprendre les phénomènes mis en jeu au niveau magnétique lorsqu'une bobine est alimentée. La deuxième partie de la préparation, un peu plus scolaire, vise à retrouver la formule de Biot et Savart dans le cas d'une bobine à partir du modèle filiforme. Cette partie vise à introduire la partie expérimentale qui va essayer de la vérifier.

En effet, la partie manipulation contient une liste du matériel ainsi que quelques questions qualitatives pour commencer : que se passe-t-il pour une boussole lorsqu'elle est à proximité de sources de champ magnétique? Il a été complexe de prendre le recul nécessaire pour prévoir les difficultés que pourraient rencontrer les élèves puisque nous étions plongés dans le sujet depuis plus d'un mois lors de la rédaction de l'énoncé. Ces questions ont pour but de faire appréhender par l'élève le comportement du champ magnétique et de lui faire observer en face ce qu'il a pu voir sur l'ordinateur. Suivent les questions quantitatives qui servent, après plusieurs prises de mesures et plusieurs graphiques faits en semi-autonomie par l'élève, à trouver les valeurs d'une constante fondamentale à partir de valeurs expérimentales. Finalement, une incertitude relative est calculée afin de majorer l'erreur, ce qui est important, à notre sens, pour un futur ingénieur.



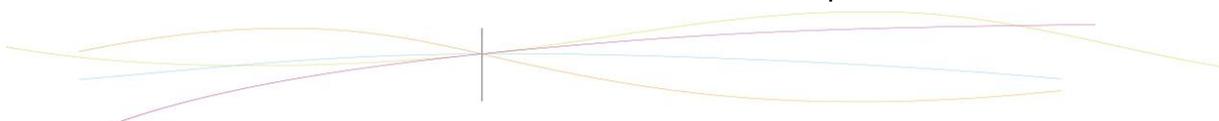
## 6. VISITE AU PALAIS DE LA DECOUVERTE

Le jeudi 15 mai, nous avons eu la chance d'aller au palais de la découverte à Paris avec Mme Duval afin de voir des exposés en rapport avec notre projet de P6. Le premier, concernant l'électrostatique se déroulait à 14h, et le deuxième à 15h concernait la partie magnétique.

### Electrostatique spectaculaire

Lors de cet exposé, l'intervenant nous a présenté plusieurs expériences :

- A l'aide d'une machine haute tension de 350 000 V, nous avons observé le chargement d'une plateforme à 300 000 V. Cela peut nous sembler énorme en comparaison avec le voltage de nos prises à la maison qui est de 220 V, mais reste très faible par rapport aux éclairs qui sont de l'ordre de milliards de Volts. Tenant une baguette en métal reliée à la Terre, le présentateur l'a approchée de la plateforme chargée formant ainsi une étincelle impressionnante. Bien qu'il tienne la baguette dans sa main, celui-ci n'a rien ressenti car le courant dispose de deux possibilités : il peut soit passer par le métal qui est relié à la Terre ou bien par le corps du présentateur qui possède des semelles isolantes. Le courant passe donc exclusivement par la baguette car il choisit le chemin le plus facile. De plus, le métal est significativement plus conducteur que le corps humain.
- La deuxième expérience consiste en la simulation d'un orage dans une cloche en plastique. Le nuage, matérialisé par une boule de métal, est chargé positivement vers le haut et négativement vers le bas. Les charges négatives présentes dans le sol sont donc repoussées vers le noyau de la Terre car deux charges de même signe s'opposent. Le présentateur ayant introduit également des « moutons », ceux-ci se chargent donc positivement et sont attirés par le nuage. A son contact, ils se rechargent négativement et redescendent vers le sol. En réalité, si l'on ne voit pas les moutons sauter ainsi par temps d'orage, c'est simplement dû au fait de leur poids qui les maintient au sol. Nous avons ensuite observé la formation de « mini éclairs » rejoignant le sol de manière tout à fait aléatoire. Pour aborder la notion « d'effet de pointe », le présentateur a introduit une « mini tour Eiffel » dans la cage. On a remarqué que les éclairs passent uniquement par la tour pour rejoindre le sol.  
Ce phénomène traduit la particularité de la foudre à prendre le chemin le plus facile du nuage à la Terre, expliqué par Benjamin Franklin lorsqu'il a inventé le paratonnerre.
- La troisième expérience a été réalisée avec l'aide de quatre garçons du public. Ceux-ci étaient placés les uns à côté des autres à proximité d'une structure chargée à très haute tension. Cette dernière chargeait l'air alentour; le garçon le plus proche devait être le plus chargé, celui d'à côté un peu moins et ainsi de suite. Pour vérifier cette hypothèse et mesurer le voltage qui traverse le corps de chaque garçon, le présentateur leur a demandé d'approcher leur doigt d'une barrière en métal située devant eux et reliée à la Terre. Nous avons constaté que lorsque la personne s'approchait de cette barre, une étincelle se formait entre le doigt et la barre. Cela confirme que le corps de la personne était bien chargé. Par ailleurs, plus la personne est proche de la structure chargée, plus l'étincelle est grande. L'intervenant leur a ensuite demandé de se tenir la main, ce qui a été très difficile au début



puisque les garçons n'étaient pas au même potentiel. Une fois qu'ils se tenaient tous la main, le plus éloigné de la structure a approché son doigt de la barre ce qui a produit une étincelle. Le courant s'est propagé du dernier garçon jusqu'au premier qui avait l'air de souffrir plus. Puis, le garçon le plus proche de la structure a levé son doigt vers celle-ci pendant que le dernier tenait fermement la barre reliée à la Terre. Nous avons ainsi observé l'effet de pointe, car son doigt devenait lumineux.

Malgré le très haut voltage auquel ils étaient soumis, cette expérience n'était pas dangereuse pour les garçons car le courant était de très faible intensité.

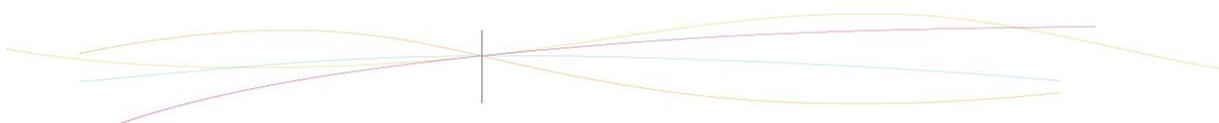
- La dernière expérience a fait intervenir deux femmes. Elles sont montées sur la plateforme chargée de la première expérience en enlevant leurs chaussures pour qu'il n'y ait pas d'isolation entre elles et la plateforme. Avec le voltage, nous avons observé leurs cheveux se dresser. En effet, les femmes étant chargées à l'identique de la plateforme, les charges ont tendance à se repousser et cela se manifeste par les cheveux qui « montent », ceux-ci étant légers.

Ensuite, nous avons constaté l'efficacité de la cage dite de Faraday. Les femmes se sont retrouvées à l'intérieur d'une cage de métal, toujours debout sur la plateforme. Le présentateur leur a demandé de poser les mains sur la paroi intérieure de la cage pendant qu'il formait des étincelles sur la cage à l'aide de la baguette de métal reliée à la Terre. Elles étaient totalement isolées à l'intérieur de la cage et n'ont rien ressentis.

### **Bonjour M. Ampère !**

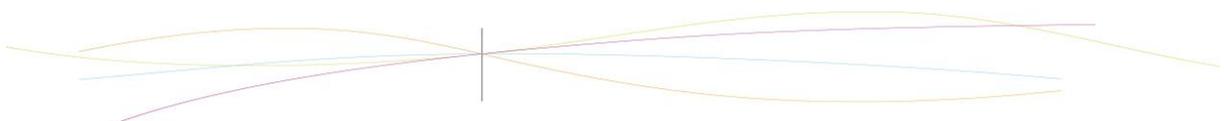
Ce second exposé, basé sur le magnétisme, regroupe également plusieurs expériences :

- La première est réalisée avec deux bobines d'une certaine de spires placées parallèlement : ce sont les bobines de Helmholtz. Ces deux bobines étaient alimentées par un courant d'intensité de 500 ampères.  
L'intervenant a tout d'abord demandé à un jeune du public de se placer entre les deux bobines. Il lui a donné une barre métallique et lui a demandé de la tenir verticalement. Lorsqu'il a chargé les bobines, le jeune homme ne pouvait plus maintenir la barre à la verticale car celle-ci prenait la direction des lignes de champ qui sont horizontales. L'intervenant a ensuite demandé à des jeunes filles de venir se placer à l'extérieur de chaque bobine avec une chaîne à la main. Lors de l'alimentation des bobines, nous avons observé que les chaînes suivaient également les lignes du champ magnétique et se comportaient comme des aimants. Grâce à ces petites expériences, l'orientation des lignes de champ à l'intérieur des deux bobines a été mise en évidence.
- Afin de nous montrer l'orientation des lignes de champ à l'extérieur des bobines, l'intervenant a fait passer au dessus une grande plaque contenant des barreaux aimantés. Cette expérience nous a confirmé ce que nous avons déterminé précédemment avec nos expériences mais également ce que nous avons déjà vu en cours de P5.
- Pour terminer avec les bobines, il a placé près de l'une d'elles une autre petite bobine de cuivre avec une lampe, le tout maintenu par un support équipé d'une manivelle. La lampe ne s'allumait que lorsque la manivelle était actionnée. En effet, pour produire un courant, il faut un aimant (ici la grande bobine), un circuit électrique (petite bobine et support) et de l'énergie de mouvement. Ce phénomène est communément appelé l'« induction ».



- L'expérience suivante fut celle que nous avons baptisée : « plateau volant ». Une plaque en métal posée sur deux bobines, alimentées par une fréquence de 900 Hz, entre en lévitation magnétique et se soulève. Ce phénomène de lévitation est dû au courant alternatif qui change de sens 900 fois par seconde et induit 1800 allers-retours du plateau par seconde. Cette manipulation produit un bruit strident dû à la fréquence élevée. L'intervenant a ensuite placé un chandelier de fer avec des ampoules sur le plateau. La présence d'un aimant (bobines), d'un circuit (chandelier) et d'une énergie de mouvement (lévitation du plateau) a formé un courant ce qui a provoqué l'éclairage des lampes.
- Cette dernière expérience s'est déroulée autour de deux transformateurs (deux bobines primaires et secondaires): un élévateur de tension et un abaisseur de tension, élévateur de courant. Nous avons ainsi vu des étincelles d'1m50 se former au dessus de nos têtes.

Cette visite au palais de la découverte fut très instructive et enrichissante puisqu'elle nous a permis de confronter nos compétences à l'expérience de plus grande taille. Cette excursion nous a donnée l'occasion de compléter nos connaissances mais aussi d'échanger avec intervenants.



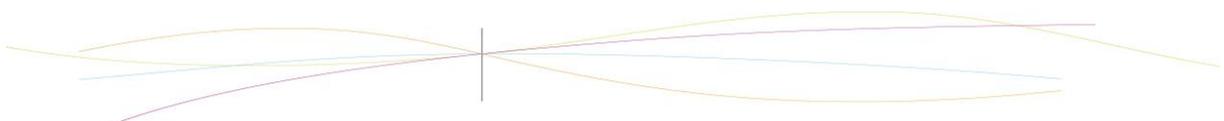
## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Lors de cet E.C projet, nous avons approfondis nos connaissances sur les champs électriques et magnétiques. Cela dans l'optique de préparer un TP d'électromagnétisme pour les prochains élèves de deuxième année.

Afin de réaliser cette production, nous avons cherché les expériences qui ont permis aux premiers scientifiques de découvrir et visualiser les lignes de champs magnétique et électrique. Puis nous les avons adaptées afin qu'elles puissent être facilement réalisables par les prochains élèves de STPI2 avec les appareils possédés pas l'INSA de Rouen. Nous nous sommes ensuite demandés quels étaient tous les aspects positifs de ces expériences ainsi que toutes les informations que nous pouvions en tirer afin que ce TP soit le plus productif et efficace possible.

Ce projet nous a permis de nous familiariser encore un peu plus avec le travail en groupe et la poursuite de celui-ci sur plusieurs semaines. L'organisation et la répartition du travail a donc été primordial. De plus ce projet nous a appris à travailler avec des personnes que nous ne connaissions pas forcément. Nous avons dû surtout réfléchir à la création d'une démarche expérimentale et à la manière d'enseigner des notions de physique.

Bien sûr des améliorations peuvent être apportées à ce projet, on pourrait par exemple choisir différentes expériences pour le TP, aborder les champs électrique et magnétique d'un point de vue non stationnaire ou plus appliqué tel que les orages pour le champ électrique et les IRM pour le champ magnétique. Un projet intéressant serait par exemple d'essayer de reproduire les expériences que nous avons vu au palais de la découverte, la reproduction d'un orage et l'expérience du plateau volant, afin de les montrer à tous les autres étudiants.



## 8. BIBLIOGRAPHIE

[http://physique.ac-orleans-tours.fr/fileadmin/user\\_upload/physique/lycee/premiere\\_S/observer/observer\\_champ\\_electrostatique.pdf](http://physique.ac-orleans-tours.fr/fileadmin/user_upload/physique/lycee/premiere_S/observer/observer_champ_electrostatique.pdf), au 15/05/2014

<http://phyusdb.files.wordpress.com/2013/03/tp02.pdf>, au 15/05/2014

[http://www.lpm.u-nancy.fr/activite\\_physique\\_statistique/PDF/elect.pdf](http://www.lpm.u-nancy.fr/activite_physique_statistique/PDF/elect.pdf), au 26/05/2014

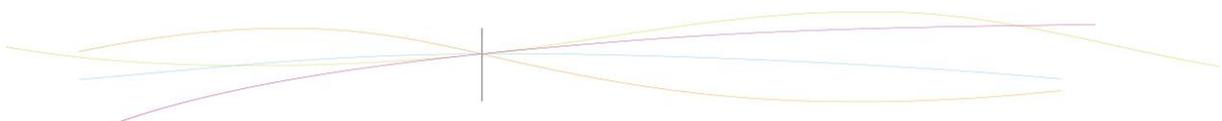
<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/magn%C3%A9tisme/67396>, au 24/05/14

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/L3-cour-champ-magnetique-champ-terrestre.pdf>, au 20/05/14

<http://inversion.e-monsite.com/pages/i-le-champ-magnetique-terrestre.html>, au 20/05/14

<http://ifips-physique.wikispaces.com/file/view/biot-savart.pdf>, au 20/05/14

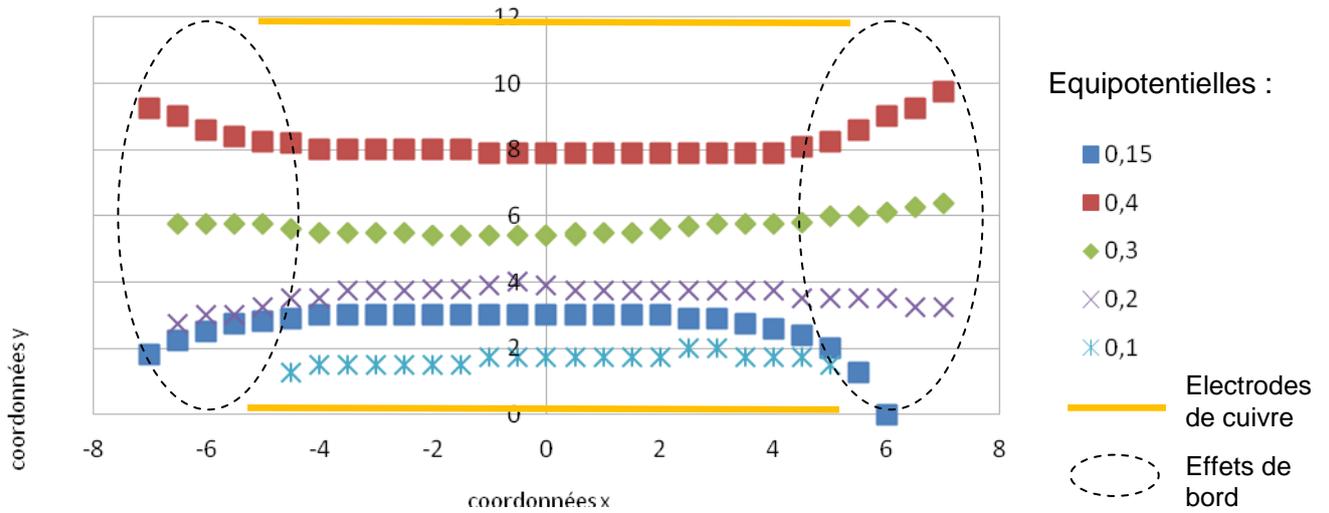
<http://www.magnetiseur-hypnotiseur.com/spip/IMG/pdf/magnetisme.pdf>, au 20/05/14



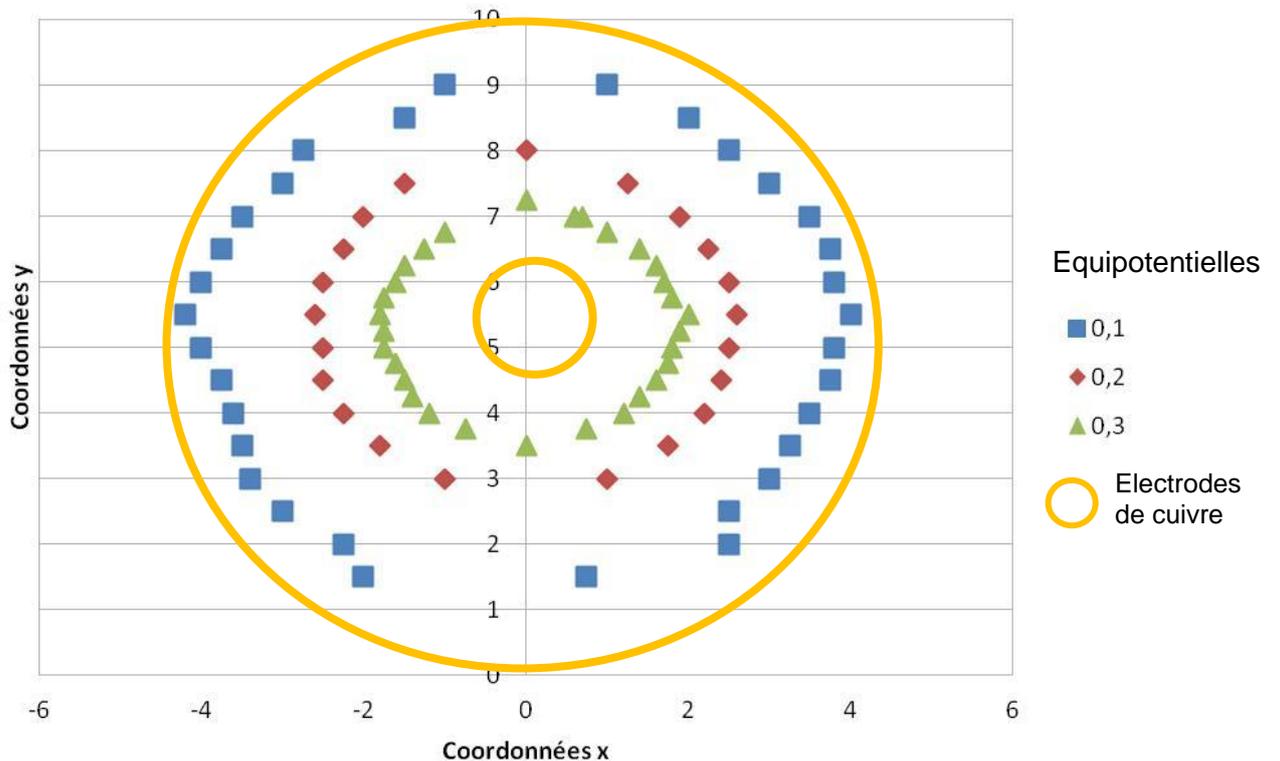
## 9. ANNEXES

### 9.1. Expérience de la cuve rhéographique – Schémas

Tracé des équipotentiellles avec deux électrodes en cuivre parallèles



Tracé des équipotentiellles avec deux électrodes de cuivre rondes



## 9.2. Programme de résolution de l'équation de Laplace

### Algorithme :

```

N=50 % nombre de ligne = nombre de colonnes
Vzero=0.5 % Potentiel initial

% initialisation

V=zeros(N); % Remplis le tableau V de 0

% Placement des potentiels initiaux (aux limites)

for k=ceil((N/4)):ceil((3*N/4)) % Rmq : ceil= valeur entière
    V(ceil(N/6),k)=Vzero;
    V(ceil(5*N/6),k)=Vzero;
endfor

% Calcul des potentiels dans le tableau grâce à la formule

for l=1:100
    for i=2:(N-1)
        for j=2:(N-1)
            V(i,j)=(1/4)*(V(i+1,j)+V(i-1,j)+V(i,j-1)+V(i,j+1));
        endfor
    endfor
endfor

V %on affiche V

% Tracé des équipotentielles

pas=1;

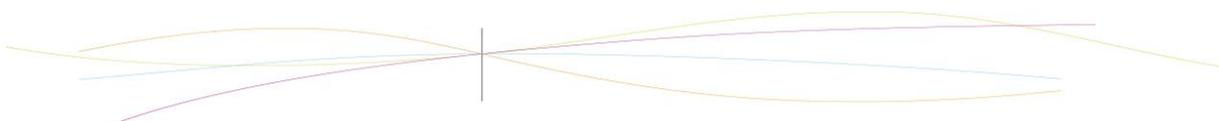
% création d'un maillage, de maille de longueur h,
% du domaine [xmin , xmax] x [ymin , ymax] grâce à la commande meshgrid
[X,Y] = meshgrid(xmin:h:xmax, ymin:h:ymax).

[Y,X] = meshgrid(1:pas:N,1:pas:N)

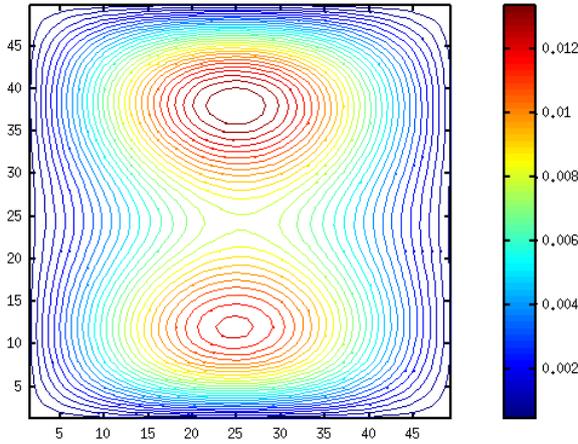
CS = contour(Y ,X ,V ,50); %trace les équipotentielles
colorbar;

```

Dans le programme ci-dessus, on décide de placer deux potentiels à 0.5V à deux endroits de notre tableau. Ce tableau peut être assimilé à une cuve rhéographique.



### 9.3. Résultats du programme

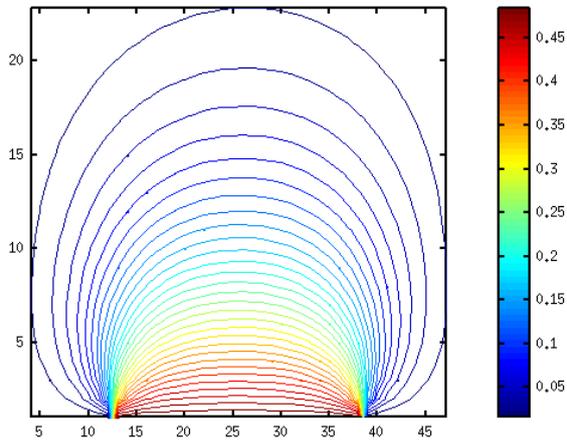


**AVEC LES POTENTIELS INITIAUX :**

```

% PLACEMENT DES POTENTIELS INITIAUX (AUX
LIMITES)

FOR K=CEIL ( N/4 ) : CEIL ( (3*N/4) )
    V (CEIL (N/6) , K) =VZERO;
    V (CEIL (5*N/6) , K) =VZERO;
ENDFOR
    
```

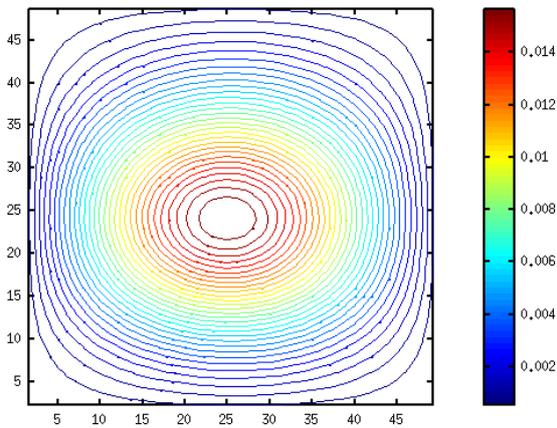


**AVEC LES POTENTIELS INITIAUX :**

```

% PLACEMENT DES POTENTIELS INITIAUX (AUX
LIMITES)

FOR K=CEIL ( N/4 ) : CEIL ( (3*N/4) )
    V (1 , K) =VZERO;
ENDFOR
    
```

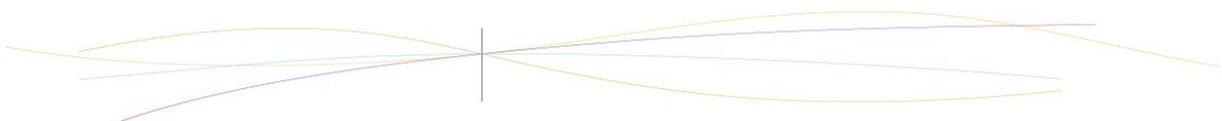


**AVEC LES POTENTIELS INITIAUX :**

```

% PLACEMENT DES POTENTIELS INITIAUX (AUX
LIMITES)

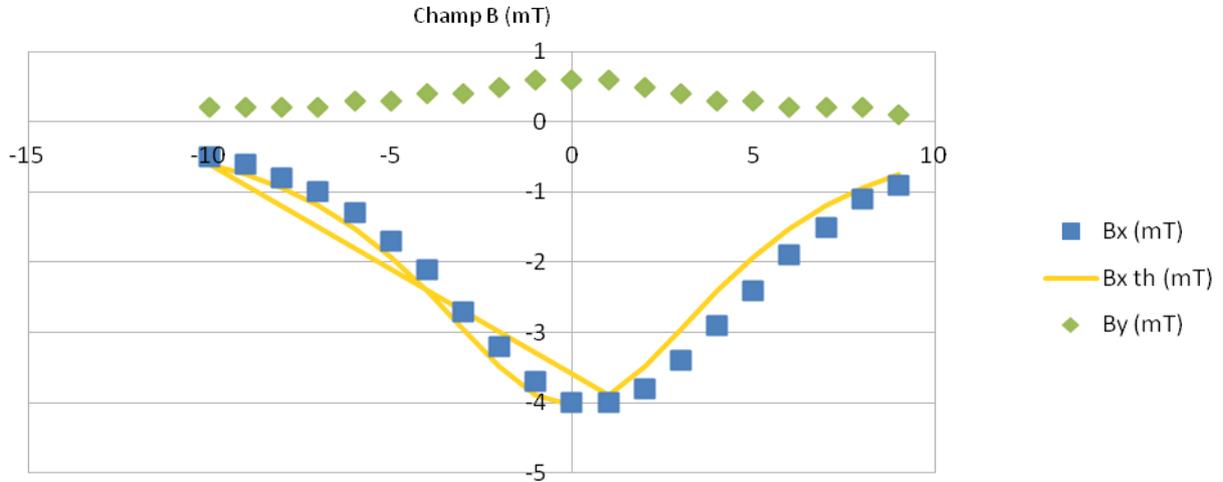
FOR K=CEIL ( N/4 ) : CEIL ( (3*N/4) )
    V (N/2 , K) =VZERO;
ENDFOR
    
```



### 9.4. Expériences champ magnétique – Schémas

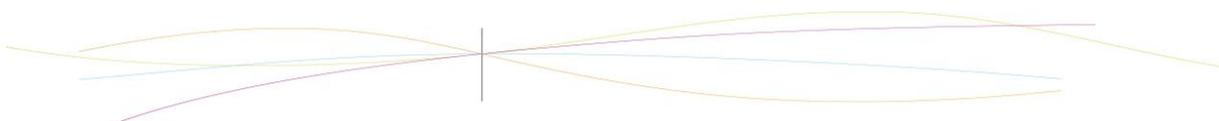
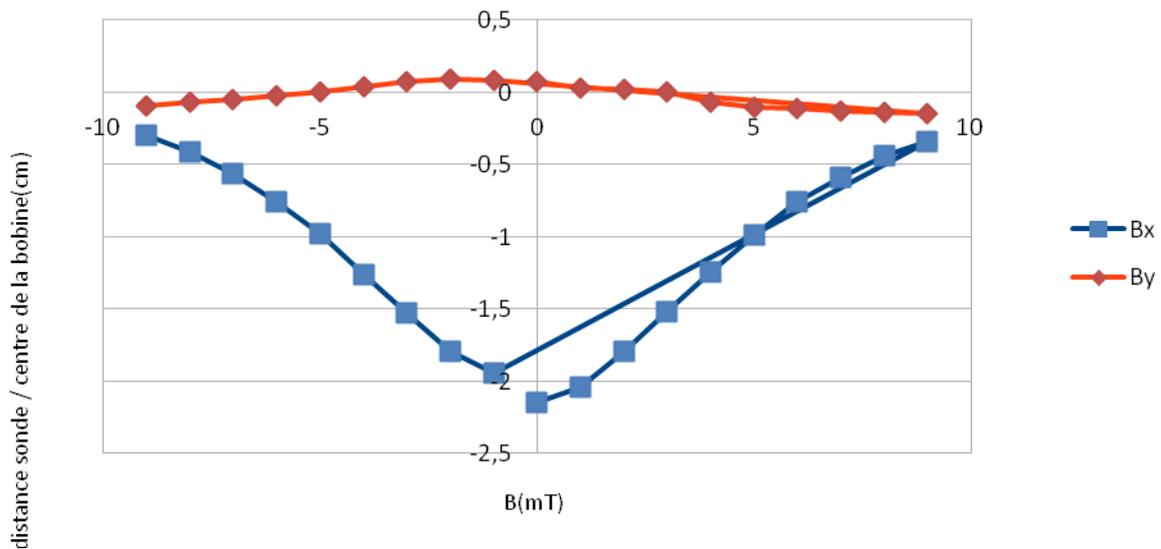
#### Expérience 1 :

Variation du champ magnétique en fonction de la distance à la bobine



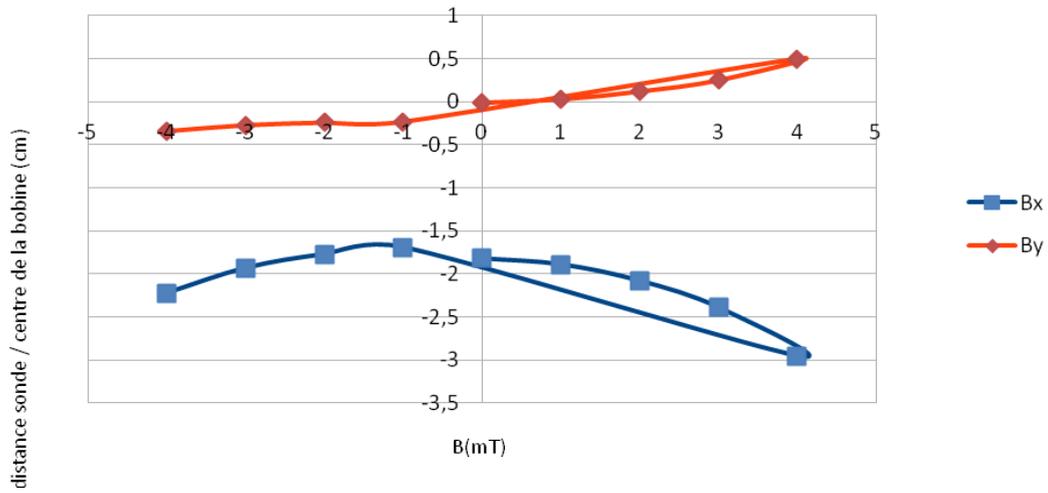
#### Expérience 2 :

Evaluation du facteur I (courant divisé par 2)



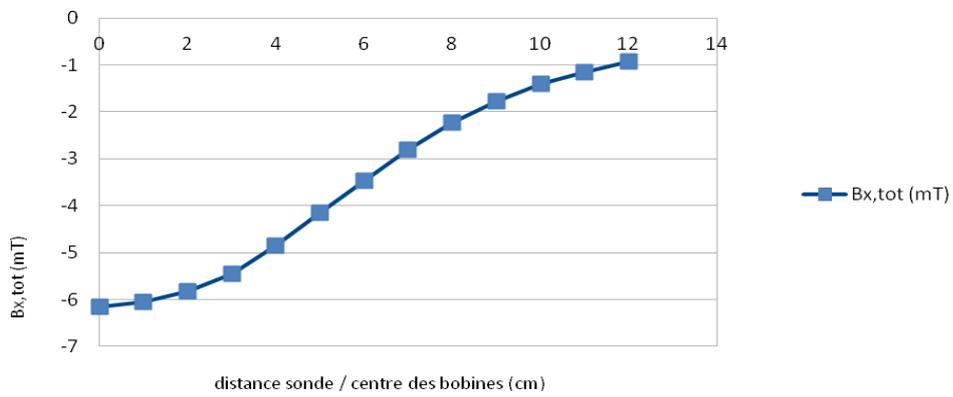
**Expérience 3 :**

Variation de la sonde selon l'axe des y

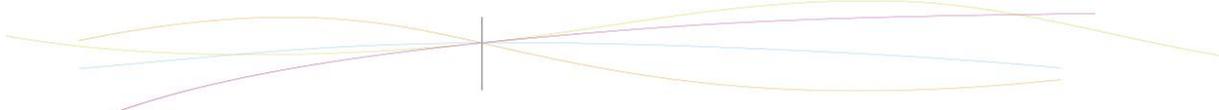
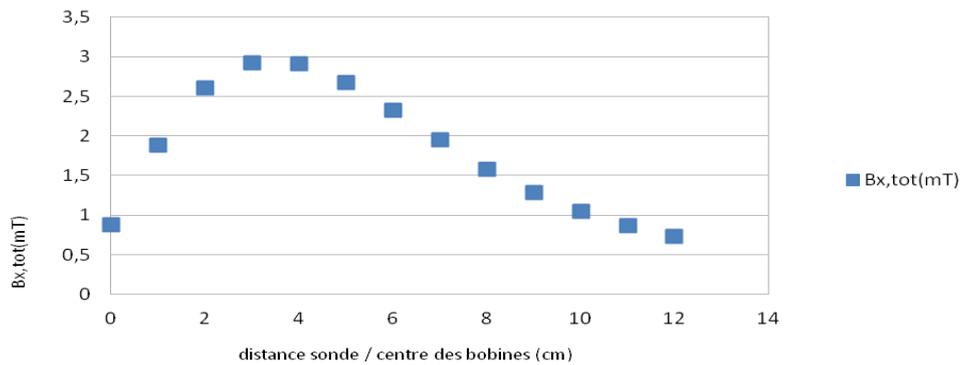


**Expérience 5 :**

Configuration bobines Helmholtz



Configuration anti Helmholtz



## 9.5. TP : Visualisation des lignes de champ électrique et magnétique

### 1<sup>ère</sup> Partie : Le champ électrique

#### I) PARTIE INTRODUCTIVE

La notion de champ est une notion fondamentale qui intervient énormément aujourd'hui dans le domaine de la physique. Cette notion n'est évidemment pas apparue d'elle-même, mais est le résultat de nombreuses recherches, de différents travaux et expériences menés au cours des siècles.

De grands chercheurs ont notamment essayé de comprendre le phénomène de la foudre, et de savoir s'il y avait un lien avec le champ électrique ...

#### Champ électrique et la foudre

Le nuage d'orage à l'origine de la foudre est appelé le « cumulo-nimbus ». Il apparaît lors d'importants contrastes de températures, grâce à de puissants courants d'air chaud ascendants. Ce nuage se trouve en très haute altitude et possède d'importantes quantités d'eau et de glace. Des courants d'air ascendants et descendants dans le nuage entraînent des chocs entre les molécules d'H<sub>2</sub>O, ce qui crée des charges positives et négatives. Les charges positives, plus légères, s'accumulent au sommet du nuage ; les charges négatives qui sont plus lourdes se retrouvent en-dessous.



2) Un champ électrique est-il lié à ce phénomène et si oui, à quoi est due sa présence ?

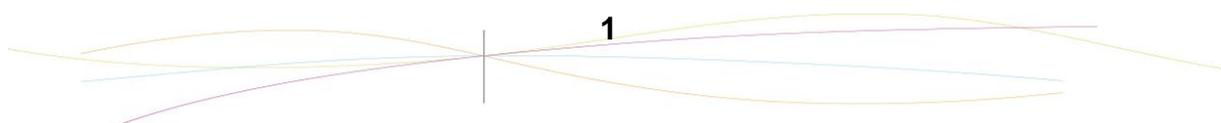
→ La présence d'un champ électrique est due à la dissociation des charges dans le nuage orageux.

3) Pourquoi la foudre tombe-t-elle sur les paratonnerres ?

→ Un paratonnerre est composé d'une pointe métallique placée à l'endroit le plus haut de la maison, sur le toit. En effet, lorsque la foudre tombe, elle choisit le chemin le plus direct pour réunir les charges électriques entre un nuage d'orage et la terre.

4) Quel est l'inventeur du paratonnerre ? Quelle expérience célèbre a-t-il réalisé pour mettre en évidence le caractère électrique de la foudre ?

→ Le paratonnerre a été inventé par Benjamin Franklin en 1752. L'expérience célèbre qu'il a réalisée pour mettre en évidence le caractère électrique de la foudre est « L'expérience du cerf-volant ».



## II) MANIPULATIONS

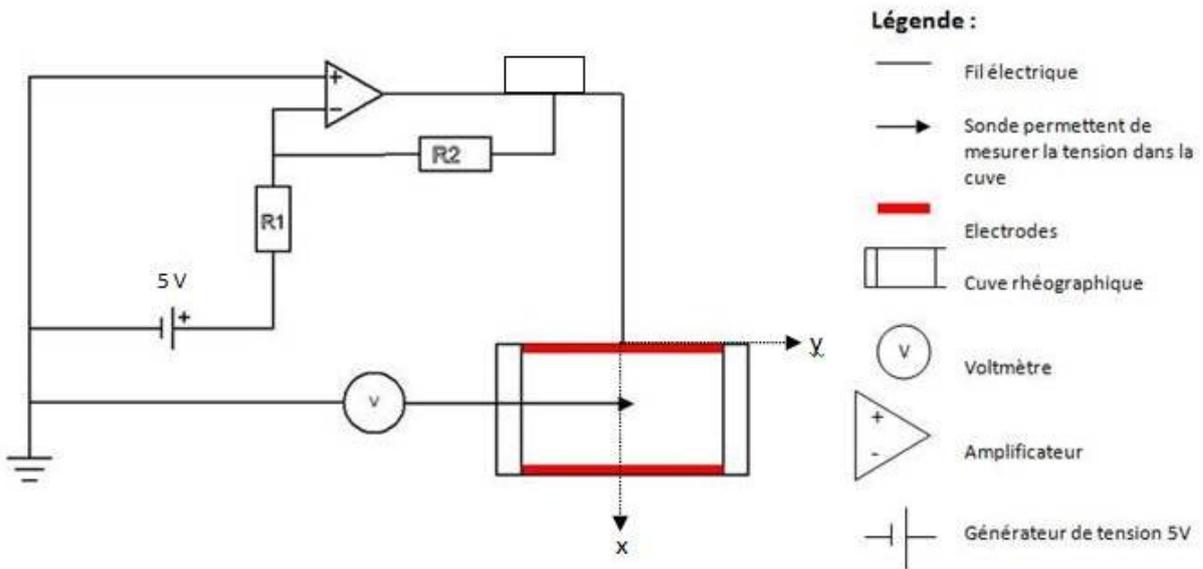
### 1) Préparation

#### Mise en évidence du champ électrostatique

Ce TP va nous permettre de mettre en évidence la présence d'un champ électrostatique entre deux conducteurs chargés. Ces deux conducteurs, l'un chargé positivement et l'autre chargé négativement, sont séparés d'une distance fixée ( $d=11\text{cm}$ ). La différence de potentiel va provoquer un champ électrostatique. A partir des lignes de potentiel électrostatique, nous déterminerons le sens et la direction du champ électrostatique engendré par ce dispositif.

Nous allons ici uniquement nous concentrer sur l'espace séparant les deux électrodes. Pour pouvoir mesurer le champ et le potentiel, nous placerons ces conducteurs (électrodes de cuivre) dans une cuve remplie d'une solution ionique (sulfate de cuivre) pour permettre le passage d'un faible courant entre les deux conducteurs; ainsi, nous pourrions mesurer le potentiel en un point quelconque de la cuve.

#### Schémas du montage :



1) Comment peut-on qualifier ce montage ? Justifier

*Montage amplificateur inverseur car la tension  $V_e$  est divisée par 100,  $V_s = 0,05\text{ V}$ .*

*Montage amplificateur NON INVERSEUR  $\rightarrow$  amplifier la tension*

*Montage amplificateur INVERSEUR  $\rightarrow$  amplifier/diviser la tension*

2) Pourquoi utilisons-nous ce montage ? *Indice : Étudier la réaction chimique*

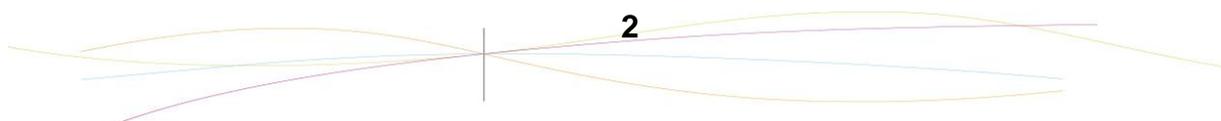
*Les électrodes étant alimentées par une tension, une réaction d'électrolyse se produit. On divise la tension afin d'éviter la dégradation des électrodes.*

3) Rappeler la formule reliant  $V_s$ ,  $V_e$  et les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ .

$$V_s = V_e \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

4) On fixe la résistance  $R_1$  à  $10\text{k}\Omega$ , déterminer la valeur de la résistance  $R_2$

$$R_2 = 1\text{k}\Omega$$



## 2) TP

But de l'expérience : Étude expérimentale du champ et du potentiel électrique créés par deux conducteurs chargés.

Relations :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V} \quad \text{ou} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (1)$$

Avec :

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (\text{en coordonnées cartésiennes}) \quad (2)$$

Matériel requis pour réaliser le montage:

- Une cuve rhéographique, avec un repère quadrillé, munie de deux électrodes de cuivre parallèles
- Générateur de tension continue
- Un amplificateur opérationnel
- Un voltmètre connecté avec une sonde de tension
- Plusieurs résistances : R1=10kΩ et R2=1, 5 ou 10 kΩ (à déterminer dans la préparation de TP)
- Des fils de connexions et des adaptateurs
- Un logiciel de traitement de données

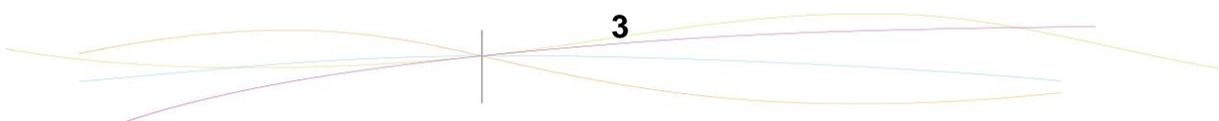
Manipulation :

- Réaliser le montage

*Remarque : Vérifier que les deux électrodes soient bien parallèles entre elles pour un souci de précision.*

**(Appeler le professeur pour vérifier le montage)**

- Verser 80 mL de la solution de sulfate de cuivre dans une éprouvette, puis verser son contenu dans la cuve.
- Alimenter le circuit avec une tension de 5 V.



**a) Observations qualitatives**

1) Déplacer la sonde sur la surface de chacune des plaques. Noter vos observations.

*Électrode de référence : 0V*

*Autre électrode : 0,5 V*

2) Déplacer la sonde perpendiculairement aux électrodes en partant de l'électrode de référence vers celle de potentiel plus élevé. Noter vos observations.

*Les valeurs du potentiel augmentent*

3) Déplacer la sonde parallèlement aux électrodes. Qu'observez-vous ?

*Le potentiel est à peu près constant parallèlement aux électrodes.*

4) Qu'observez-vous lorsque vous déplacez la sonde aux limites des électrodes ? Comment appelle-t-on ce phénomène ?

*Effets de bord*

**b) Mesures à réaliser**

1) - A l'aide de la sonde, déterminer 5 à 6 points régulièrement répartis le long de la cuve pour lesquels le voltmètre indique une tension  $V_1 = 0,2V$  ( $\pm 0,05V$ ).

*Remarque : La sonde doit être tenue verticalement et ne doit pas toucher le fond de la cuve.*

- Reporter les valeurs obtenues sur la feuille n°1 du tableur.

- Répéter cet ensemble de mesures pour  $V_2 = 0,3V$  et  $V_3 = 0,4V$  ( $\pm 0,05V$ ) et tracer les courbes correspondantes à l'aide du tableur.

- Quel nom donne-t-on à ces courbes ?

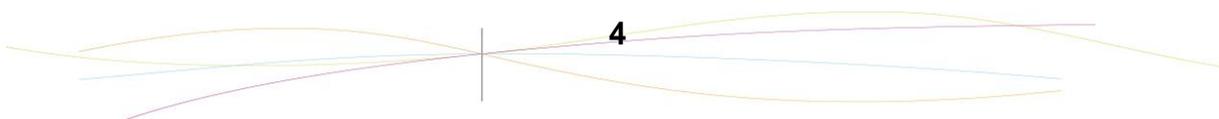
*Equipotentielles*

- Comment sont placées ces courbes ?

*Entre les électrodes, elles sont parallèles aux plaques de cuivre. Au niveau de l'extrémité des électrodes, les courbes ne sont plus parallèles entre elles : effet de bord.*

- En déduire la direction et le sens du vecteur champ électrostatique noté  $\vec{E}$ . Imprimer les courbes et représenter quelques vecteurs  $\vec{E}$  sur la feuille de papier millimétré sans soucis d'échelle.

*Les lignes de champ électrostatique sont perpendiculaires aux équipotentiels et le champ électrostatique  $E$  est dirigé dans le sens des équipotentiels décroissants.*



2) - Mesurer les valeurs du potentiel  $V(x)$ , en déplaçant la sonde d'un pas de 2cm le long de l'axe des  $x$  (axe perpendiculaire aux deux conducteurs plans dans le sens des équipotentiels décroissants). Reporter les valeurs dans le tableau (page n°2).

- Tracer et modéliser la courbe  $V=f(x)$ .

- En déduire la loi de variation de  $V$  en fonction de  $x$ . Que peut-on dire de  $V$  et de  $x$  ?

*L'équation de la droite est  $V=a*x$*

*$V$  est proportionnel à  $x$*

*Remarque : On doit modéliser l'équation car sinon elle ne passe pas par l'origine (électrolyse de la solution).*

- On considère la cuve comme un système infini à deux dimensions. En étudiant les symétries et invariances, montrer que :  $\vec{E} = \frac{-dV}{dx} \vec{i}$

*Grâce à (1), on a :*

$$\vec{E} = \frac{-\partial V}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k}$$

*Or, notre cuve est considérée infinie, il y a donc une invariance par translation selon  $y$ . De plus, on se place dans un plan  $z=\text{constant}$ . Donc :*

$$\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial V}{\partial z} = 0$$

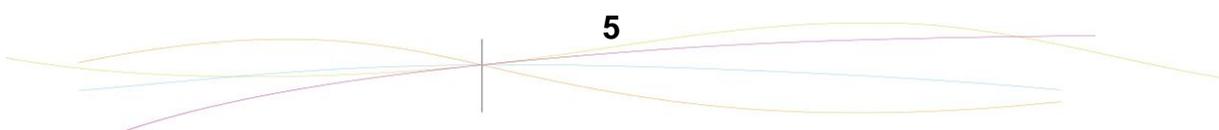
*Donc :  $\vec{E} = \frac{-\partial V}{\partial x} \vec{i}$*

- En utilisant la relation démontrée précédemment, calculer le champ moyen  $E_m$  dans les intervalles indiqués par le tableau.

- Comme le champ moyen dans un intervalle peut être assimilé au champ local au milieu de cet intervalle, écrire le champ électrique en  $x = 2, 4, \dots, 10$  cm (complétez le tableau).

- Tracer le graphe  $E = f(x)$ . Conclure.

*Le champ  $E$  est bien uniforme.*



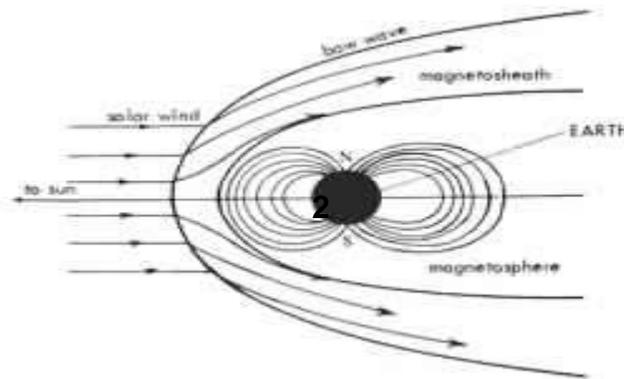
2<sup>ème</sup> partie : Le champ magnétique

**I) INTRODUCTION**

L'effet des phénomènes magnétiques a pu être observé dans l'Antiquité par les Grecs vivant près de la ville Magnésie et les Chinois. Ils avaient remarqué qu'une pierre (la magnétite, constituée d'oxyde de fer) avait le pouvoir d'attirer les objets contenant du fer et que tout morceau de fer en contact avec la magnétite acquérait cette propriété. Au II<sup>e</sup> siècle après J.-C., les Chinois se sont aperçus qu'en frottant une aiguille d'acier avec un aimant naturel puis en la laissant libre de ses mouvements, elle indiquait le Nord et le Sud.

Mais ce n'est qu'en 1600 que ce phénomène est expliqué par Sir William Gilbert qui théorise les grands principes du champ magnétique terrestre. Cependant, il faut attendre 1820 pour que Hans Christian Ørsted découvre les liens entre électricité et magnétisme.

On sait à présent que le champ magnétique terrestre est issu du noyau de la Terre et qu'il s'est inversé plus de cent fois à cause des flux dans le noyau liquide de notre planète.

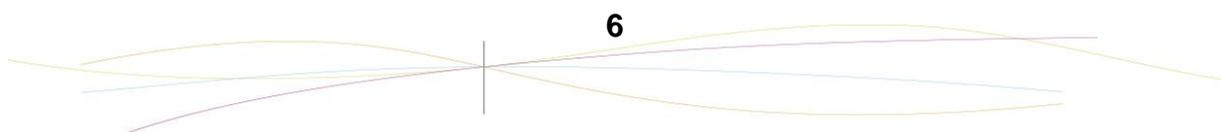


La terre et son champ magnétique.

**II) OBJECTIFS DU TP**

Ce TP a pour but de vous familiariser avec les phénomènes magnétiques pour cela vous devrez :

- Mettre en évidence l'existence d'un champ magnétique ;
- Vérifier la loi de Biot et Savart dans le cas d'une bobine.



### III) QUESTIONS PREPARATOIRES

#### 1) Visualisation du champ magnétique

Tout d'abord, allez sur le site:

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Elec/Champs/topoB.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Elec/Champs/topoB.html)

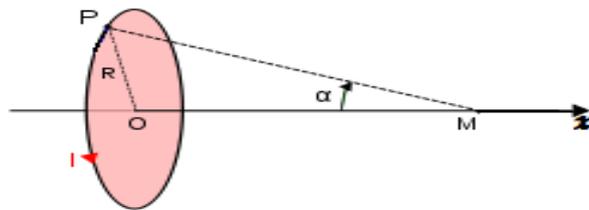
Ajouter une spire. Sur la copie tracer les lignes de champ de cette spire. Une spire alimentée est-elle un dipôle ou un monopole? *Dipôle*. Existe-t-il des monopoles magnétiques? Si oui, donner des exemples. *Non*. Ajouter une deuxième spire et tracer les lignes de champ. Que constatez-vous? *Les champs s'additionnent*.

**Ne pas oublier l'orientation**

#### 2) Démonstration de la relation de Biot et Savard.

Le but de cette partie est de démontrer la formule de Biot et Savard pour une bobine.

Soit une spire circulaire de rayon R, de centre O et d'axe x, parcourue par un courant



stationnaire d'intensité I.

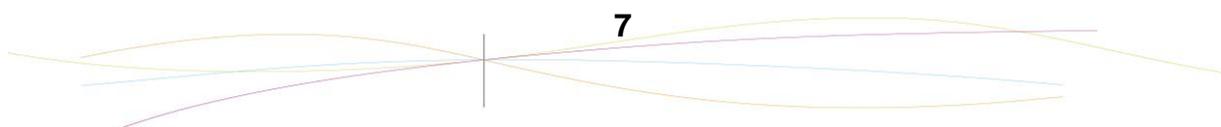
La formule de Biot et Savard pour un modèle filiforme s'écrit :

$$\vec{B}(M) = \int_{P \in \Gamma} \frac{\mu_0 I d\vec{l}_P \wedge \vec{u}_{PM}}{4\pi r_{PM}^2}$$

Préciser ce que sont chacun de ses composants ainsi que leurs unités. Tracer sur le schéma  $\vec{dl}_P$  et  $\vec{u}_{PM}$ . La démonstration se fait en cinq temps :

- calculer  $\vec{dl}_P \wedge \vec{u}_{PM}$  ;
- après avoir effectué l'analyse des symétries, mettre la formule sous forme scalaire ;
- remarquer que  $\sin\alpha = \frac{R}{r_{PM}}$  et simplifier la formule ;
- généraliser au cas d'une spire contenant N tours de fils ;
- exprimer la formule en fonction x et non de  $\sin\alpha$ .

Vous obtiendrez le résultat suivant  $B(x) = \frac{NI\mu_0 R^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}}$ . Tracer la courbe  $B(x) = f(x)$  et calculer  $B_{max}$ .



## IV) MANIPULATIONS

### 1) Étude qualitative

#### Matériel :

- 1 boussole ;
- 1 bobine (N=100 spires, d=125mm, l=34 mm,  $I_{\max}=5A$ ) ;
- 1 aimant ;
- 1 générateur.

A l'aide de ce matériel, quatre expériences vous sont proposées afin de vous familiariser avec la notion de champ magnétique. Pour les trois premières expériences, vous remarquerez un phénomène et trouverez pourquoi il se produit.

#### Expérience 1 :

Poser la boussole sur la table et attendez qu'elle se stabilise. Observer la direction de l'aiguille, comparer avec celle votre voisin.

*Les aiguilles pointent toutes dans la même direction, cela est dû à l'homogénéité du champ magnétique terrestre.*

#### Expérience 2 :

Approcher l'aimant de la boussole.

*La boussole change de direction, elle est attirée par l'aimant. L'aimant créé un champ magnétique propre.*

#### Expérience 3 :

Approcher maintenant votre téléphone cellulaire de la boussole.

*La pointe de la boussole est attirée par le téléphone, la variation est due aux ondes électromagnétiques créées par le téléphone.*

Comparer les deux expériences précédentes avec la première.

*Il existe un champ magnétique terrestre qui n'a qu'une action réduite à cette distance du noyau terrestre. Elle est négligeable devant celle du champ produit par un aimant ou par un téléphone.*

#### Expérience 4 :

Alimenter la bobine puis déplacez la boussole aux environs de celle-ci. Que remarquez-vous ?

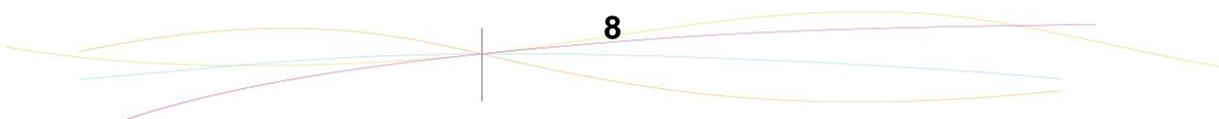
Comparer avec les lignes de champs que vous avez tracées dans votre travail préparatoire.

Maintenant, inverser le courant à l'intérieur de la bobine. Que se passe-t-il ?

*L'orientation de la boussole change suivant un schéma qui correspond aux lignes de champ tracées au préalable.*

#### Interprétation

*Les champs magnétiques sont présents tout autour de nous au quotidien. Ils peuvent être créés de façon naturelle (aimant, terre) ou artificielle (alimentation d'une bobine). Il existe deux sources du champ magnétique : les aimants et les courants électriques.*



Maintenant que le premier objectif a été atteint, intéressons-nous à l'aspect quantitatif du champ magnétique statique.

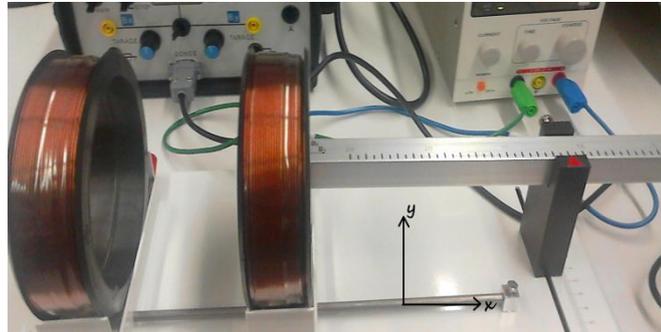
## 2) Étude quantitative

### Matériel :

- 2 bobines ( $N=100$  spires,  $d=125\text{mm}$ ,  $l=34\text{ mm}$ ,  $I_{\text{max}}=5\text{A}$ ) ;
- 1 générateur (réglage :  $I=4\text{A}$ ,  $U=10\text{V}$ ) ;
- 1 teslamètre ;
- 1 sonde à effet Hall.

### Questions préliminaires:

A votre avis, d'après le schéma suivant, est-il plus judicieux de faire varier la sonde selon l'axe des  $x$  ou bien selon l'axe des  $y$ . Justifiez.



Si vous ajoutez une deuxième bobine collée à la première, pourquoi faut-il les brancher en série (que se passe-t-il s'il elles sont branchées en dérivation)?

*En série car en dérivation, les bobines ne recevraient pas le même courant donc la relation de Biot et Savard ne pourrait pas être vérifiée.*

### Expérience :

Connecter la sonde au teslamètre. Ce dernier a besoin d'être étalonné, le faire. Pourquoi doit-on faire cette première manipulation ?

*Pour supprimer l'effet du champ magnétique terrestre.*

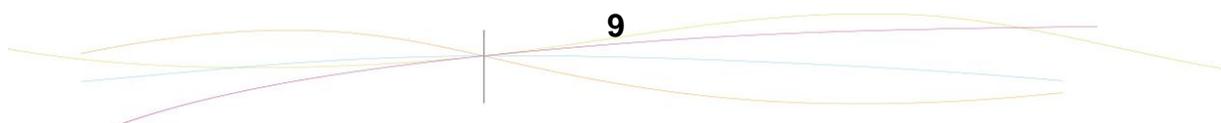
Quelle précaution faut-il prendre par rapport à la sonde à effet Hall afin d'obtenir de meilleures mesures ?

*Bien la centrer.*

Régler le générateur (bouton output en position off). Placer l'extrémité de la sonde à 10 cm de la bobine, puis prendre suffisamment de mesure pour tracer la courbe représentant le champ en fonction de la distance sonde-bobine. Comparer avec la courbe théorique.

En tenant compte du matériel fourni, quels paramètres pouvez-vous faire varier ? Que provoquent ces variations ? Tracer les différentes courbes obtenues.

*Paramètres : augmentation du nombre de spires ( $B$  doublé si  $N$  doublé, plus belle courbe), mouvement de la sonde selon l'axe des  $y$  (champ plus fort aux extrémités  $\rightarrow$  effet de bord), variation de l'intensité du courant ( $B$  proportionnel à  $I$  donc est doublé si  $I$  doublé)*



A l'aide des valeurs expérimentales, trouver la valeur de  $\mu_{0,exp}$ .

Sachant que  $\mu_{0,th} = 4 \pi 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$ , quel est le pourcentage d'erreur ? *Nos résultats: 5% donc correct*

Interprétation :

*Grâce aux différentes courbes tracées, on constate que la loi de Biot et Savard est vérifiée pour une bobine en faisant varier tous les paramètres possibles avec le matériel à disposition. Le champ magnétique, dans une bobine, est soumis à des effets de bord et est d'autant plus grand que l'intensité à l'intérieur ou le nombre de spires de celle-ci augmentent.*

**V) CONCLUSION GENERALE**

Vous venez d'observer plusieurs phénomènes magnétiques. Où se manifestent-ils ? Quelles sont les sources de leur existence ? Que pouvez-vous dire sur la relation de Biot et Savard ? Conclure.

*Les phénomènes magnétiques sont présents dans tout type d'appareil électrique en fonctionnement ainsi que dans divers objets produits de façon naturelle.*

*La magnétique statique modélisée par Biot et Savard est vérifiée dans le cadre d'une bobine (modèle filiforme).*

