



**HAL**  
open science

## Expériences quantitatives et symétries du champ magnétique

Renaud Mathevet, Nabil Lamrani, Charlotte Fabre, Patrice Marchou

► **To cite this version:**

Renaud Mathevet, Nabil Lamrani, Charlotte Fabre, Patrice Marchou. Expériences quantitatives et symétries du champ magnétique. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2023, 117, pp.783. hal-04226965

**HAL Id: hal-04226965**

**<https://hal.science/hal-04226965v1>**

Submitted on 4 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Expériences quantitatives et symétries du champ magnétique

par **Renaud MATHEVET**

Institut de recherche pour l'enseignement des sciences (IRES)

Université Paul Sabatier - 31062 Toulouse Cedex 9

Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI)

CNRS UPR 3228, UGA, UPS, INSA, EMFL - 31400 Toulouse et 38042 Grenoble

[renaud.mathevet@lncmi.cnrs.fr](mailto:renaud.mathevet@lncmi.cnrs.fr)

**Nabil LAMRANI, Charlotte FABRE et Patrice MARCHOU**

Groupe recherche-formation « Smartphone instrument de mesure »

Institut de recherche pour l'enseignement des sciences (IRES)

Université Paul Sabatier - 31062 Toulouse Cedex 9

**L**A PLUPART DES SMARTPHONES sont équipés de capteurs à effet Hall 3D. Ils permettent de mettre facilement en évidence les symétries singulières du champ magnétique et rendent possibles des positionnements précis et des mesures que l'on peut comparer quantitativement à des modèles analytiques. Nous considérons tout d'abord l'expérience historique d'Orsted. Les mesures sont très bien décrites par le modèle du fil infini. Nous étudions ensuite la spire carrée dont le champ possède une expression analytique dans tout l'espace. En fonction de la distance  $d$  du capteur au côté de la spire, on passe progressivement du modèle du fil infini à celui du dipôle magnétique ce que l'on vérifie expérimentalement sur l'intensité du champ qui passe d'une décroissance en  $1/d$  à  $1/d^3$ .

## 1. CHAMP MAGNÉTIQUE AU VOISINAGE D'UN FIL

### 1.1. Repérage du capteur

Avant toute expérience, nous devons déterminer la position du capteur de champ magnétique dans le smartphone. Elle est variable selon les modèles, mais globalement tout en haut et à gauche dans ceux que nous avons utilisés. Pour localiser précisément ce capteur, nous avons aimanté un petit clou que l'on déplace à quelques millimètres au-dessus de la surface du smartphone tout en mesurant l'intensité du champ magnétique au moyen de l'application *Phyphox*<sup>(1)</sup>. Une fois le maximum du champ grossièrement repéré, on applique un post-it sur la zone en question. On peut alors faire glisser le clou sur le papier sans risquer de rayer la surface, repérer le champ maximal et le marquer d'un point de stylo sur le papier. Ce point est juste au-dessus du capteur à l'intérieur du smartphone.

(1) <https://phyphox.org>

## 1.2. Expérience d'Ørsted (1820)

C'est une expérience d'un intérêt historique considérable puisqu'elle marque le début de l'électromagnétisme, car pour la première fois, elle démontre qu'un phénomène électrique donne naissance à un effet magnétique [1]. Avant cette date, électricité (force de Coulomb sur des charges électriques, pile de Volta...) et magnétisme (forces entre «pierres d'aimant») étaient deux disciplines fondamentalement séparées. Quelques mois plus tard, Ampère a formalisé l'expérience d'Ørsted en considérant que les charges issues de la pile sont en mouvement dans le fil, ce que l'on nomme depuis un courant électrique dont l'intensité se mesure en ampères.

Nous avons réalisé l'expérience selon le protocole suivant [2]. Entre deux potences, nous avons tendu un fil électrique (en jaune sur la figure 1, page ci-contre) relié à un générateur de courant continu (10 A). Au moyen d'un élévateur («boy»), on place une boussole traditionnelle et le capteur du smartphone juste au-dessous du fil. Nous avons utilisé ici une application boussole générique<sup>(2)</sup>. La partie délicate consiste à déplacer les potences jusqu'à ce que le fil électrique soit aligné sur la composante horizontale du champ magnétique local (cf. figure 1A, page ci-contre).

Lorsqu'on alimente le fil avec un courant d'intensité croissante, on constate que la boussole s'écarte de sa direction initiale jusqu'à être quasiment perpendiculaire au fil pour 10 A (cf. figure 1B, page ci-contre).

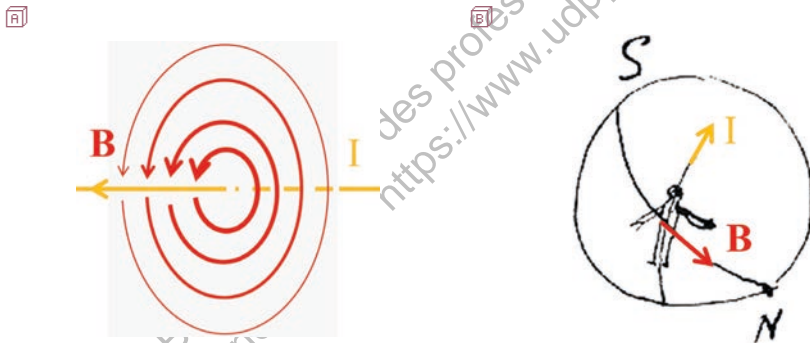
On en déduit que le courant dans le fil génère un champ magnétique qui s'ajoute au champ magnétique local. On peut inférer qu'en absence de champ magnétique local, la boussole s'alignerait perpendiculairement au fil. Le champ magnétique ainsi généré s'enroule autour du fil : il est orthoradial (cf. figure 2A, page ci-contre). On utilise un certain nombre de moyens mnémotechniques pour retrouver la direction du champ magnétique tel que la règle du bonhomme d'Ampère (cf. figure 2B, page ci-contre).

Il convient de bien insister sur le caractère très contre-intuitif de la situation : l'effet (le champ) est orthogonal aux plans de symétrie de la cause (le courant) et, au contraire, il appartient au plan d'antisymétrie du courant [3]. Nous allons maintenant détailler quelques résultats de plus en plus quantitatifs rendus facilement accessibles par les capteurs des smartphones.

(2) La boussole traditionnelle était le seul instrument sensible au champ magnétique au début du XIX<sup>e</sup> siècle. La mesure est qualitative mais donne une représentation visuelle assez intuitive du phénomène et de sa symétrie singulière. C'est, le plus souvent, la seule approche concrète du magnétisme pour les étudiants jusqu'au niveau post-bac. L'utilisation d'une application boussole n'apporte rien de particulier mais permet de se familiariser avec l'utilisation du smartphone. À ce stade, relativement qualitatif, l'emploi de *Phyphox*, qui fournit des données numériques 3D nous semble plus difficile.



**Figure 1** - Expérience d'Ørsted. (A) Le fil (jaune), à courant nul, est aligné sur le champ local indiqué par la boussole (numérique ou traditionnelle) - (B) Avec un courant non nul, le champ, repéré par les boussoles, tend à s'aligner perpendiculairement au fil.



**Figure 2** - (A) Le champ magnétique créé par un courant continu est orthoradial - (B) Règle du bonhomme d'ampère : si le courant entre par les pieds et sort par la tête, la main gauche pointe vers le nord magnétique (adapté de [1]).

### 1.3. Principe de superposition

On utilise l'application *Phyphox* (cf. note 1) en mode « graphe ». Nous avons choisi cette application gratuite, car elle permet de communiquer avec le smartphone par Wi-Fi. On peut ainsi facilement contrôler l'acquisition et récupérer les données avec un ordinateur distant.

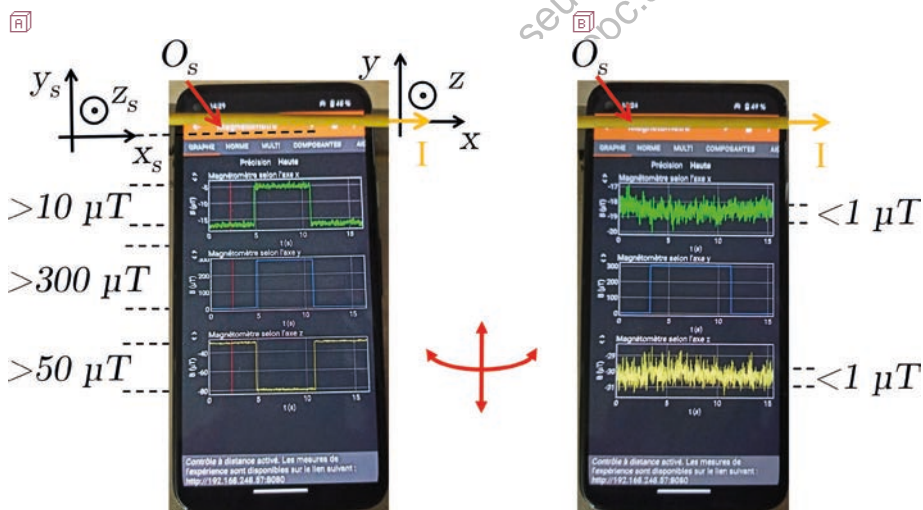
#### 1.3.1. Positionnement du smartphone

On distingue le repère  $(Oxyz)$  lié au circuit dont l'axe  $O_{y_s}$  est le long du fil et l'axe  $O_{z_s}$  vertical, du repère  $(O_s x_s y_s z_s)$  lié au smartphone (cf. figure 3, page ci-après).

Dans tout ce qui suit, l'orientation et le positionnement précis du smartphone sont très importants pour obtenir des données exploitables quantitativement : cela consiste à confondre les directions des deux repères et à placer  $O_s$  le centre du capteur à la verticale du fil.

Dans l'expérience d'Orsted, le fil est orienté de sorte que le champ magnétique local soit nul selon la direction  $Oy$ . Ainsi, lorsque le smartphone est bien en place, le champ créé par le courant est purement selon  $Oy_s$ . Sinon, des composantes  $B_{x_s}$  et  $B_{z_s}$  s'ajoutent au champ magnétique local.

Pour procéder au réglage, on lance l'acquisition dans *Phyphox* à courant nul ce qui nous donne les valeurs  $B_{x_s}$  et  $B_{z_s}$  du champ local. Après quelques secondes, on fait passer un courant de quelques ampères dans le fil. Il apparaît un fort champ  $B_{y_s}$  mais, en général,  $B_{x_s}$  et  $B_{z_s}$  sont modifiés (cf. figure 3A). On déplace et on tourne alors finement le smartphone de façon à retrouver les valeurs  $B_{x_s}$  et  $B_{z_s}$  de référence (cf. figure 3B).



**Figure 3 - A** Le repère  $(O_s, x_s, y_s, z_s)$  lié au smartphone fait un angle d'un degré environ avec le repère  $(Oxyz)$  lié au fil (en jaune). Le centre du capteur  $O_s$  sous le «M» de «Magnétomètre» est décalé d'environ 2 mm de l'axe du fil. Lorsque l'on commute le courant dans le fil de 0 à 10 A (vers  $t=5$  s) de fortes variations sur  $B_{x_s}$  et  $B_{z_s}$  (courbes verte et jaune) sont mesurées - **B** Par tâtonnements, on retouche la position et l'orientation (flèches rouges) de sorte que pratiquement seule la composante  $B_{y_s}$  (courbe bleue) varie lorsque l'on commute le courant.

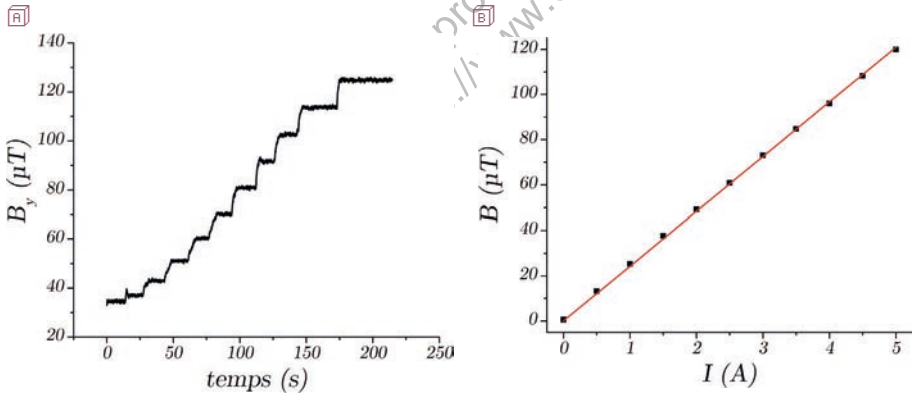
### 1.3.2. Observations

On peut alors mettre en évidence le principe de superposition à savoir que les champs magnétiques issus de sources différentes – y compris en nature, le champ

magnétique local est issu du champ magnétique terrestre et des armatures ferromagnétiques de la paillasse – s'ajoutent vectoriellement. Il suffit de couper puis remettre le courant pour le constater au moins qualitativement : cette configuration est particulièrement favorable puisque le champ du fil est perpendiculaire au champ magnétique local.

#### 1.4. Linéarité en fonction de l'intensité du courant

On lance l'acquisition et l'on augmente l'intensité  $I$  du courant par paliers de 1 A (cf. figure 4A) toutes les dix à quinze secondes par exemple. Une fois l'acquisition terminée, on télécharge les données dans l'ordinateur. À l'aide d'un logiciel de traitement de données (*LatisPro*, *Regressi*, *Python*...), on relève la valeur du champ  $B_{ys}$  sur chaque palier que l'on reporte dans un tableau en fonction de  $I$ . Il ne reste plus qu'à représenter  $B_{ys}(I)$  et faire un ajustement linéaire (cf. figure 4B). Aux incertitudes expérimentales près, on démontre que le champ magnétique est proportionnel à l'intensité du courant. Suivant le niveau visé, on peut mettre en place des procédures de traitement des données plus poussées avec mesure de la valeur moyenne et de l'écart type sur chaque plateau ainsi qu'une analyse des résidus [4].



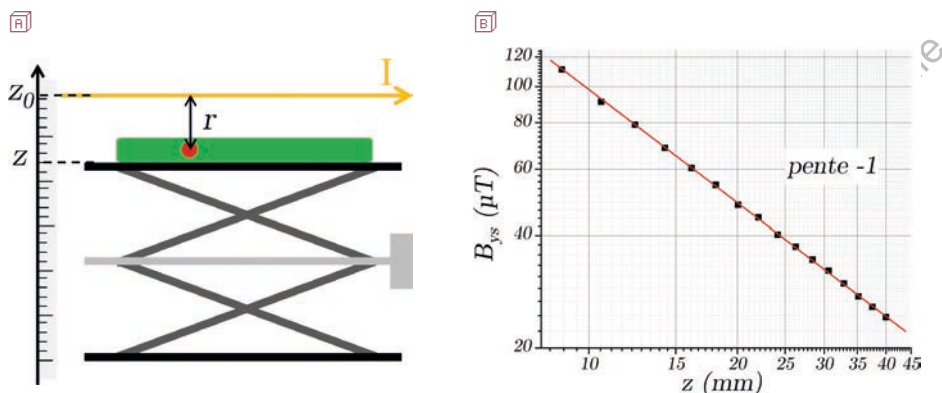
**Figure 4** - (A) Acquisition de  $B_y$  en fonction du temps par plateaux de courant  $I$  de 0,5 A toutes les dix à quinze secondes - (B) Champ magnétique sur chaque plateau en fonction du courant correspondant (carrés noirs) et régression linéaire (ligne rouge).

$B_y(I_1 + I_2) = B_y(I_1) + B_y(I_2)$  c'est-à-dire que des champs de même direction s'ajoutent. Avec les résultats du paragraphe précédent, nous pouvons ainsi conclure que des champs de directions quelconques s'ajoutent, quelle que soit la nature des sources.

#### 1.5. Dépendance spatiale du champ en fonction de la distance au fil

On fait passer un courant d'intensité 10 A dans le fil et on lance l'acquisition en

fonction du temps. On baisse le boy par paliers d'un quart de tour en notant l'altitude  $z$  du plateau (cf. figure 5A). On obtient ainsi  $B_{ys}(z)$  (cf. figure 5B).



**Figure 5 -** (A) Le smartphone (en vert) et son capteur (en rouge) bien à la verticale du fil (en jaune) parcouru par un courant  $I$ . Le smartphone est placé sur un boy qui permet de faire varier la distance du capteur au fil. La côte  $z$  du boy est repérée par un régle. Le champ magnétique  $B_{ys}$  (perpendiculaire au plan de la figure) ainsi que la position  $z$  sont mesurés tous les quarts de tours de la poignée de réglage du boy - (B)  $B_{ys}$  en fonction de  $z$  (carrés noirs) et ajustement numérique (ligne rouge) en échelle log-log.

Pour un fil de typiquement  $L = 1\text{ m}$  de long et des distances au fil de quelques centimètres nous faisons l'approximation du fil infini pour lequel le champ décroît comme l'inverse de la distance  $r$  du capteur au fil :  $B_{ys}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r}$ . Toutefois, cette distance est *a priori* mal connue, car on ne connaît pas précisément la position du capteur à l'intérieur du smartphone.

Nous avons choisi un ajustement du type  $B_{ys}(z) = B_0 + \beta/(z_0 - z)$ .  $B_0$  représente le champ asymptotique,  $z_0$  est la côte à laquelle le capteur serait au centre du fil.

Ce modèle est en accord avec les données mesurées aux incertitudes expérimentales près (cf. figure 5B). L'ajustement correspond à un centre du fil en  $z_0 = 206\text{ mm}$ . Lorsque le smartphone est au contact du fil la côte mesurée du plateau est  $z_p = 196\text{ mm}$ . En négligeant le diamètre du fil, la position du capteur  $z_0 - z_p$ , estimée à 10 mm au-dessus du plateau, ce qui, après mesure au régle, correspond au millimètre près au milieu de l'épaisseur du smartphone. L'ajustement nous semble ainsi tout à fait raisonnable. De plus, l'ajustement fournit les valeurs  $B_0 = 6 \pm 1\ \mu T$  et  $\beta = 980 \pm 25\ \mu T/\text{mm}$ .  $B_0$  est ainsi de l'ordre d'un dixième du champ magnétique local ce qui provient probablement d'une légère imperfection de l'alignement du smartphone. De la valeur de  $\beta$  on déduit une intensité du courant  $I = 9,80 \pm 0,25\text{ A}$ , compatible aux incertitudes près avec la valeur mesurée  $I = 10,2 \pm 0,05\text{ A}$ .

Le modèle du fil infini, bien que très classique, n'a rien d'intuitif pour les étudiants : comment peut-on former un circuit avec un tel fil ? Il devient ici plus concret. Nous sommes dans la situation où la distance au fil  $z_0 - z$  est très petite devant la longueur  $L$  du fil, et plutôt qu'« infini » il est préférable de dire qu'on est ici à la limite  $(z_0 - z)/L \ll 1$ .

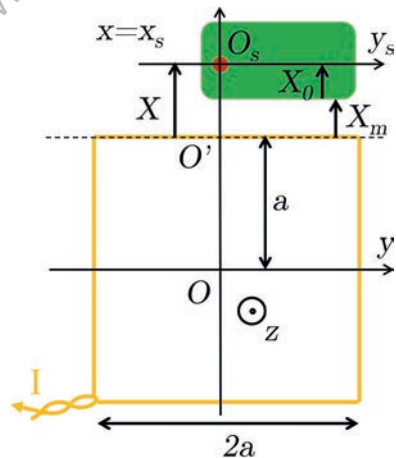
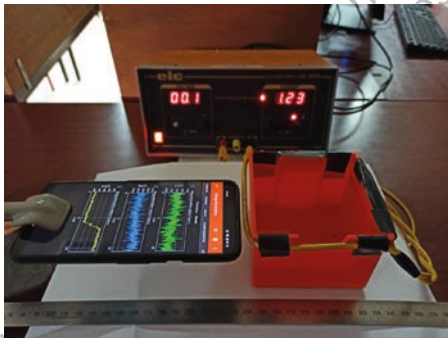
Pour mieux préciser cette notion de modèle, nous proposons d'étudier un autre exemple moins classique.



## 2. CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN CIRCUIT

### 2.1. Spire carrée

#### 2.1.1. Montage

Nous avons choisi une spire carrée, car, contrairement à la spire circulaire, il existe une expression analytique du champ dans tout l'espace. La spire carrée est simplement réalisée en enroulant un cordon électrique autour d'une boîte en plastique de section carrée de longueur  $2a = 94$  mm (cf. figure 6A). Les extrémités du cordon sont torsadées pour limiter les champs magnétiques parasites.



**Figure 6 -**  Photo du dispositif expérimental : un cordon électrique jaune est maintenu autour d'une boîte plastique orange par de l'adhésif noir. Le smartphone est maintenu par une pince. L'enregistrement des composantes du champ magnétique a débuté avant que l'on fasse passer du courant dans la spire : suite à l'établissement du courant  $B_{xs}$  (courbe verte) et  $B_{ys}$  (courbe bleue) sont quasiment inchangés tandis que l'effet est très significatif sur  $B_{zs}$  (courbe jaune) : le smartphone est précisément positionné dans le plan et parallèlement aux axes de la spire -  Spire carrée de côté  $2a$  (en jaune). Le capteur du smartphone est à la distance  $X$  du centre  $O'$  du côté de la spire.  $X_m$  est la distance mesurée entre le bord du smartphone et le fil.



### 2.1.2. Champ sur l'axe

En combinant les champs issus de quatre segments de longueur  $2a$  [5] on obtient des expressions sous forme de fractions rationnelles<sup>(3)</sup>. Sur la figure 6B (cf. page précédente), les plans  $Oxz$  et  $Oyz$  sont plans d'antisymétrie des courants. Le champ magnétique appartient aux plans d'antisymétrie donc ici à leur intersection, c'est-à-dire qu'il est dirigé selon  $Oz$ . Quantitativement, il vient :

$$\mathbf{B}(0, 0, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{8a^2}{\sqrt{2a^2 + z^2} (a^2 + z^2)} \mathbf{e}_z. \quad (1)$$

L'expression est un peu plus compliquée que pour la spire circulaire, mais on retrouve globalement le même comportement en assimilant  $a$  au rayon de la spire. Le champ varie peu tant que  $z \ll a$  puis asymptotiquement décroît comme  $(z/a)^{-3}$  lorsque  $z \gg a$ . Nous ne présentons pas cette mesure, très classique pour la spire circulaire, car la spire carrée se prête à une expérimentation à la fois plus originale et plus riche.

### 2.1.3. Champ dans le plan de la spire

Le plan  $Oxy$  de la spire est plan de symétrie des courants. Par conséquent, le champ dans ce plan lui est perpendiculaire c'est-à-dire dirigé selon  $Oz$ . On peut ainsi exprimer le champ dans ce plan en fonction de la distance  $X$  du capteur au côté de la spire. Choisir  $O'$  comme point de référence peut sembler moins naturel que prendre le centre  $O$  de la spire (cf. figure 6A). Cependant,  $X \ll a$  correspond au modèle du fil infini et  $X \gg a$  à l'approximation dipolaire ce qui permet une comparaison aux modèles plus aisée. Quelques manipulations algébriques permettent de démontrer qu'alors :

$$\mathbf{B}(\xi, 0, 0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left[ -\frac{2\sqrt{1+\xi^2}}{\xi} + \frac{2\sqrt{5+4\xi+\xi^2}}{2+\xi} \right] \mathbf{e}_z, \quad (2)$$

avec  $\xi = X/a$ , la distance du capteur au fil normalisée par rapport au demi-côté de la spire.

### 2.1.4. Comportements asymptotiques

Il est facile de voir sur l'équation (2) que  $B_z$  diverge en  $\frac{1}{\xi}$  quand  $\xi \rightarrow 0$  ce qui est compatible avec le modèle du fil infini. Le comportement à grande distance est plus délicat à établir. Pour  $\xi \rightarrow \infty$  on pose  $u = \frac{1}{\xi} \rightarrow 0$  :

$$B_z(u, 0, 0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left[ -2\sqrt{1+u^2} + \frac{2\sqrt{1+4u+5u^2}}{1+2u} \right] \quad (3)$$

et il faut faire un développement limité jusqu'à l'ordre 3, car, comme on le constate sur l'équation (4) ci-dessous, les ordres inférieurs se compensent :

$$B_z(u, 0, 0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} [(-2 - u^2 + O[u]^4) + (2 + u^2 - 4u^3 + O[u]^4)] = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} [-4u^3 + O[u]^4]. \quad (4)$$

(3) Par exemple à l'aide d'un logiciel de calcul symbolique tel *Mathematica*.

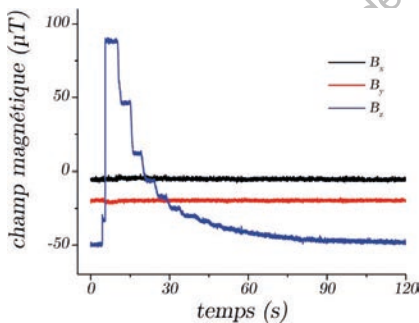
On retrouve ainsi  $B_z(\xi, 0, 0) \sim 1/\xi^3$  comme attendu à l'approximation dipolaire. Nous disposons ainsi d'un système modèle qui illustre deux comportements qualitatifs limites de la magnétostatique.

### 2.1.5. Positionnement et mesures

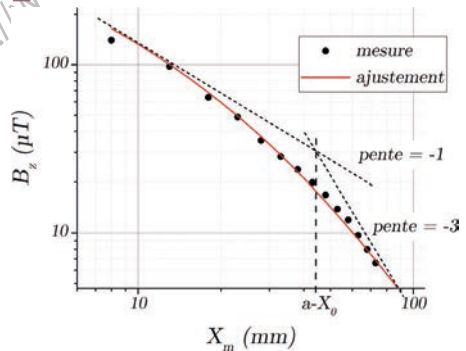
Là encore, le positionnement du capteur dans le plan de la spire doit être réalisé avec soin. On fixe le smartphone, bien horizontalement, au moyen d'une pince, une noix et une potence. On met la spire sur un boy. On règle finement l'orientation et la hauteur du boy. Le capteur est bien dans le plan de la spire si les valeurs de  $B_{x_s}$  et  $B_{y_s}$  sont quasiment inchangées lorsque l'on coupe ou remet le courant (cf. figure 6A, pages précédentes).

Comme le champ décroît très vite nous fixons le courant à son intensité maximale :  $10,2 \pm 0,1$  A. La spire est accolée au smartphone puis déplacée sur le boy le long d'un régllet par pas réguliers  $\delta X_m$  de 5 mm toutes les 5-6 s. Au-delà de 80-100 mm le champ créé par la spire est inférieur au champ local et n'est plus mesurable (cf. figure 7A). Toutefois, comme la transition entre les régimes champ proche/lointain a lieu autour de  $X \approx a = 47$  mm, le changement de comportement est clairement identifiable (cf. figure 7B).

Ⓐ



Ⓑ



**Figure 7 -** Ⓐ Le smartphone est déplacé sur le boy par pas de  $\delta X = 5$  mm toutes les 5-6 s dans le plan de la spire carrée. En bleu, le champ  $B_z$  perpendiculaire au plan de la spire. En noir et rouge les composantes  $B_{x_s}$  et  $B_{y_s}$  qui ne varient quasiment pas et permettent de s'assurer que l'on est bien dans le plan de la spire : le caractère 3D du capteur permet à la fois une mesure de la composante pertinente et de s'assurer que l'on reste bien dans le plan de symétrie - Ⓑ  $B_z$  en fonction de la distance au côté (ronds noirs) de la spire et ajustement (courbe rouge selon l'équation 2) en échelle log-log. En pointillés les asymptotes de pentes  $-1$  et  $-3$  conformes au modèle théorique (équations 2, 3 et 4).

### 2.1.6. Ajustement

On peut alors réaliser un ajustement des données (cf. figure 7B) en imposant

$a = 47$  mm (mesuré au réglet) et en se donnant un peu de latitude sur la distance au fil. En effet, là encore, la position  $X_0$  du capteur n'est pas connue avec précision : on modélise donc les données par  $B_z(X_m + X_0)$  selon l'équation 2. L'ajustement numérique fournit une position du capteur  $X_0 = 2,9 \pm 0,5$  mm compatible avec la valeur déterminée précédemment. Toutefois, la valeur estimée du courant dans la spire par le modèle  $I = 11,6 \pm 0,5$  A est en excès significatif avec la valeur mesurée sans que nous ayons pu en déterminer la cause.

Sur le graphique en échelle log-log, nous avons figuré des asymptotes de pentes  $-1$  et  $-3$  conformément aux comportements limites du modèle. Elles approchent raisonnablement les valeurs mesurées et se coupent au voisinage de  $X = a$  (soit  $X_m = a - X_0$ ), c'est-à-dire le « rayon » caractéristique de la spire ce qui est une bonne indication de la cohérence des données avec le modèle.

## CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article un ensemble d'expériences de magnétostatique. D'un point de vue pédagogique, elles sont simples à mettre en œuvre à l'échelle de toute une classe puisque désormais presque tous les étudiants ont un smartphone. Elles permettent de se familiariser avec les symétries singulières du champ magnétique, d'acquérir facilement un grand nombre de données et se prêtent bien à une exploitation quantitative.

Plus particulièrement, nous avons proposé l'utilisation d'une spire carrée plutôt que la très classique spire circulaire. Le champ possède une solution analytique dans tout l'espace ce qui permet une étude non seulement sur l'axe, mais aussi dans le plan de la spire. Cela permet de rendre plus concrète la notion de modèle (fil *infini* ou dipôle *ponctuel*) que nous avons discuté en termes de comportements asymptotiques,  $X \ll a$  ou  $X \gg a$ .

## BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

L'ensemble de nos travaux est disponible sur <https://ires.univ-tlse3.fr/sim/>

- [1] J.-J. Samuëli et A. Moatti, « L'acte de naissance de l'électromagnétisme », *Open Edition Journal*, 2017. Consultable à l'adresse : <https://doi.org/10.4000/bibnum.704>
- [2] R. Mathevet, L. Martin, P. Ferrand, Ch. Fabre, N. Lamrani, J.-P. Castro et P. Marchou, « Expériences avec un smartphone autour du magnétisme en relation avec la tectonique des plaques », *APBG*, n° 4-2022, p. 73-80, 2022.

- [3] La démonstration est très classique et se trouve dans tous les manuels post-bac, par exemple : J.-Ph. Pérez, R. Carles et R. Fleckinger, *Électromagnétisme*, 4<sup>e</sup> édition, Fondements et applications, Dunod, 2020.
- [4] Voir procédure analogue, quantitativement plus poussée :
- P. Marchou, R. Mathevet, E. Jammes, C. Fabre, N. Lamrani, S. Martin, J.-P. Castro et S. Staacks, « Une approche quantitative de la loi de Beer-Lambert avec un smartphone (première partie) », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1017, p. 1079-1089, octobre 2019.
  - R. Mathevet, E. Jammes, C. Fabre, N. Lamrani, S. Martin, J.-P. Castro, P. Marchou et S. Staacks, « Une approche quantitative de la loi de Beer-Lambert avec un smartphone (seconde partie) », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1019, p. 1357-1366, décembre 2019.
- [5] Voir référence [3] ou [https://fr.wikiversity.org/wiki/Champ\\_magn%C3%A9tique,\\_magn%C3%A9tostatique/Calculs\\_classiques](https://fr.wikiversity.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique,_magn%C3%A9tostatique/Calculs_classiques)

**Renaud MATHEVET**

*Enseignant chercheur*  
Université Paul Sabatier  
Toulouse (Haute-Garonne)

**Nabil LAMRANI**

*Professeur*  
Collège Claude Nougaro  
Toulouse (Haute-Garonne)

**Charlotte FABRE**

*Professeur PCSI*  
Lycée Déodat de Séverac  
Toulouse (Haute-Garonne)

**Patrice MARCHOU**

*IA-IPR honoraire*  
Toulouse (Haute-Garonne)