Correction Montage 15 : Production et mesure de champ magnétiques.

Préparation à l'agrégation 2007-2008, **Thibaut Divoux***
Université de Lyon, Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon, CNRS, 46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France.

N'ayons pas peur d'enfoncer les portes ouvertes: ce montage a pour vocation de présenter différentes manières de produire et de mesurer des champs magnétiques. Il y a quelques années, le titre de ce montage était le suivant: *"Production et mesure de champs magnétiques de divers ordres de grandeur"*. Si la seconde partie du titre a disparu, elle n'en reste pas moins d'actualité. On essayera de donner le plus large panel d'ordres de grandeurs de champs **B** possible. Faut-il pour autant s'intérresser à la production de champ magnétique avant d'en envisager la mesure ? Pas nécessairement. On pourra traiter la production et la mesure dans l'ordre souhaité, le tout étant de vouloir faire passer un message clair qui transparaîtra d'autant mieux que l'enchaînement entre les différentes expériences choisies sera soigné et naturel.

Je vous propose une relecture linéaire du montage qui nous a été présenté en classe, assortie d'un certain nombre de questions auxquelles, pour la plupart, nous avons déjà apporté une réponse par oral. Enfin, je vous propose un large choix d'expériences alternatives à celles qui nous ont été présentées. Non pas que celles que nous ayons vu soient hors sujet, bien au contraire, mais ce montage se prête à une foultitude d'expériences intéressantes. Commençons par la canonique lecture des rapports de Jury sur lesquels nous reviendrons tout au long de l'exposé :

- 2000, "L'usage de l'électro-aimant occasionne de grosses erreurs, souvent dues à la non-linéarité de la réponse des pièces en matériau ferromagnétique. Correctement alimentés, de petits électro-aimants (comme ceux qui sont disponibles) créent pour un entrefer usuel ($e \simeq 1$ cm) un champ de l'ordre d'une fraction de tesla ($B \simeq 0,3$ T). Trouver des ordres de grandeur différents doit conduire à une analyse critique immédiate des opérations effectuées. De même la formule donnant $B \propto 1/e$, N et i suppose en particulier que la carcasse et l'entrefer forment un tube de flux de section constante, ce qui est rarement justifié, en particulier avec des pièces polaires tronconiques. L'emploi d'un teslamètre à sonde de Hall exige un minimum de soin (réglage du " zéro ", orientation..."[10]

- 2005, "L'ordre de grandeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre doit être connu. Il en est de même de l'existence d'un décalage systématique du zéro d'une sonde à effet Hall également."

- 2006, "Cette étude ne doit pas se limiter aux champs de l'ordre du millitesla. Par ailleurs, les solénoïdes disponibles dans la collection ne sont pas de longueur infinie."

- 2007, "La maîtrise du maniement de la sonde de Hall et une connaissance sommaire de son principe de fonctionnement sont indispensables."

Quelques remarques générales : lorque le jury vous annonce qu'il ne vous reste plus que 5 minutes, alors qu'il vous reste en stock deux ou trois expériences à présenter, la bonne attitude à adopter n'est pas, comme nous l'avons vu, d'accélérer votre débit et de bâcler les trois expériences en vous privant du même coup d'un point essentiel: votre conclusion. **Prenez votre temps : détaillez correctement une seule et dernière expérience de votre choix** pour ensuite conclure sur les points essentiels et le message que vous souhaitiez faire passer. Deuxième point : **le montage qui nous a été présenté comporte trop d'expériences** : trois sont restées sur la table inutilisées ! Le jury est très sensible à la monopolisation abusive de matériel. Le jour du concours, prenez le matériel pour 4 expériences, mettez-les en place complètement. Et s'il vous reste du temps, alors et seulement alors, demandez à monter d'autres expériences. Troisième et dernier point : **il est un peu décevant de voir encore autant de désinvolture dans le traitement des incertitudes**. Les mesures faites à l'oscilloscope ou à l'ordinateur de maxima de courbes sont à faire en utilisant la fonction *Zoom* pour réduire au mieux les incertitudes de lecture; les expressions du type "c'est le dernier digit qui bouge" au moment de l'évaluation de l'incertitude qui entache une mesure effectuée au multimètre ne doivent plus être entendues. L'erreur commise est un pourcentage de la valeur lue, dépendant du calibre de lecture, auquel il faut rajouter un certain nombre de fois le dernier digit (il faut avoir ouvert au moins une fois la documentation accompagnant le multimètre). Vous ne pouvez écrire au tableau des incertitudes relatives du type: $\delta X/X \simeq 2$, soit une erreur de 200 % sur la grandeur X sans que cela ne provoque de réaction de votre part ou appelle un commentaire. Dernier conseil : éloignez-vous de vos notes de préparation (pas de lecture), notamment lors du discours introductif qui est votre premier contact

*Thibaut.Divoux@ens-lyon.fr

visuel avec le Jury.

L'introduction proposée est d'ailleurs pertinente et très bienvenue. Si vous êtes un passionné du piégeage de particules (piège de Paul, ou de Penning [1]) ou encore du stockage de l'information, faites du pied au Jury qui ne manquera pas de vous poser quelques questions sur les points que vous aurez évoqué si votre montage se déroule bien : *Donner succintement le principe de la RMN. Quelles applications du champ magnétique peut-on faire au quotidien?...*

I.1 Expérience qualitative des petites aiguilles sur rétroprojecteur. Cette expérience a sa place dans ce montage ; essayer d'en pousser un peu la description et l'interprétation à partir des questions suivantes: *Pourquoi les petites aiguilles oscillent-elles à l'approche de l'aimant? Pourrait-on a priori en déduire un ordre de grandeur du champ magnétique auquel on soumet le réseau de petites boussoles?*

Questions: *Quelle direction réelle pointe une boussole? Comment s'orienter alors?*

I.2 Mesure d'un champ magnétique à l'aide d'un fluxmètre: expérience qui a sa place dans le montage. Une chose me gêne cependant : pour que l'intégrateur fonctionne en tant que tel, il faudrait que la fréquence à laquelle l'expérimentateur bouge la boucle dans l'entrefer de l'électro-aimant soit grande devant la fréquence propre de l'intégrateur, soit :

$$T_{exp} \ll R_1 C \simeq 0.1s$$

Or dans l'expérience à laquelle nous avons assisté, $T_{exp} \simeq$ 1 s. Il faut veiller à vérifier les conditions de validité des approximations que vous êtes amené à faire. Une autre chose manquait à cette expérience : un message clair qui pourrait être le suivant : le fluxmètre permet d'avoir accès au champ dans la matière (contrairement à la sonde à effet Hall); cette méthode est donc à présenter comme étant complémentaire de la sonde de Hall. Cette expérience peut être aussi **l'occasion de discuter en détail les incertitudes** : incertitude sur la lecture à l'oscilloscope (utiliser la fonction Zoom : veiller à faire les traces les plus fines possibles et à travailler avec des calibres qui correspondent aux gains maximum) et sur la valeur des composants (mesure au RLCmètre); enfin on peut présenter le principe d'un "traitement statistique" des erreurs de mesure en passant plusieurs fois la spire dans l'entrefer de l'électro-aimant.

Questions: *Quelle est l'incertitude typique sur la valeur des résistances avec lesquels vous travaillez quotidiennement en TP? Retrouver par un calcul simple un ordre de grandeur du champ B_S à saturation d'un milieu ferromagnétique.*

I.3 Présentation de la sonde à effet Hall. La présentation d'une telle sonde est presque incontournable, et nécessite un traitement soigné [Rapport 2000,2005,2007]. Cette expérience a été bien présentée. Insistons sur la tension de décalage dont il faut tenir compte : lorsque les soudures donnant la tension de Hall ne sont pas symétriques de part et d'autre de l'échantillon, mais décalées d'une distance d, alors, à la tension de Hall mesurée s'ajoute un terme de décalage proportionnel à la distance d :

$$U = U_{Hall} + \left(\frac{i}{\sigma S}\right) d$$

ou σ désigne la conductivité du matériau, S la section de l'échantillon et i l'intensité du courant qui le traverse [2]. En faisant la demi-somme de deux mesures : d'une première puis d'une seconde en renversant la plaquette ou en inversant le sens du champ magnétique, plaquette fixe, on s'affranchit de cette tension de décalage. J'ai été très sensible à la démarche consistant à déduire l'étalonnage de la sonde à effet Hall à partir de l'expérience précédente. L'effort est louable, insister alors sur votre démarche, prenez bien le temps d'expliquer ce que vous faites.

II.1 "Aimantation rémanente". Si cette expérience a parfaitement sa place dans le montage, la présentation en a été un peu cavalière. Il est essentiel de savoir justifier le choix des différents éléments constituant le montage : *Comment puis-je obtenir l'image de H, et de B? Comment vais-je alors choisir le nombre de spires du primaire et du secondaire, et la valeur des composants de mon circuit?* Cette expérience intervient dans bon nombre de montages (MP16, MP21, MP31...), elle mérite donc un investissement en conséquence de votre part. Pour être au clair, faites une lecture des références : suivantes [3] (chapitre 10), et [4].

II.2 "Bobines de Helmoltz". Cette expérience n'a pas été présentée par manque de temps. C'est un expérience très académique, coûteuse en temps de préparation dont je ne suis pas sûr qu'on puisse tirer grand profit. Si vous tenez à la présenter, mentionnez ce qui est remarquable : le champ est uniforme à l'ordre trois et donnez-en une belle explication ([3], chapitre 1).

II.3 Obtention de champs intenses à l'aide d'un électro-aimant. Cette expérience n'a pas été présentée par manque de temps. Elle a sa place dans ce montage en tant que moyen de production de champs forts. Elle peut permettre de vérifier 2 choses : tout d'abord les dépendances du champ créé dans l'entrefer de l'électro-aimant avec la taille de l'entrefer e et le courant i circulant dans les bobines:

$$B = \frac{\mu_0 N i}{e + \frac{L}{\mu_r}\frac{s}{S}} \simeq \mu_0 \frac{N}{e} i \quad (\mu_r \gg 1)$$

où N désigne le nombre de spires mis en jeu, i le courant circulant dans les spires, et $S\,(resp.\,L)$ la section (resp. la longueur) du noyau magnétique ouvert sur un entrefer tronconique de section s. Tracer alors $1/B = f(e)$ puis $B = f(i)$. Ces courbes appellent un certain nombre de commentaires liés à la saturation du milieu à fort courant i ou encore à l'existence du champ rémanent. Noter au passage que vous avez ici une transition toute trouvée avec l'expérience **II.1**. Ensuite, ce montage peut être l'occasion de vérifier la direction du champ magnétique créé : **le champ reste une grandeur vectorielle dont il est important de donner la direction**, par exemple en utilisant la force de Laplace. Placer un câble traversé par un courant i, dont vous connaissez le sens de parcours, dans l'entrefer de l'électro-aimant. Brancher l'électro-aimant, le fil est alors éjecté de l'entrefer dans la direction qu'indique la force de Laplace:

$$\delta\mathbf{F} = i\delta\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

En déduire la direction du champ $\mathbf{B}$.

III.1 "Production d'un champ tournant". Cette expérience n'a pas été présentée par manque de temps et peut avoir sa place dans ce montage. Elle ne nécessite pas le passage à une nouvelle partie: un **II.4** suffirait.

Prenons enfin le temps de lister les différentes expériences que vous pourriez présenter dans le cadre de ce montage:

- **Mesure du champ magnétique terrestre** : il existe au moins deux versions de cette expérience : la première figure dans votre polycopié de TP, et consiste à suspendre verticalement, au bout d'un fil, un aimant assimilé à un moment magnétique $\mathbf{M}$ pointant perpendiculairement à la direction du fil. Ce moment plongé dans le champ magnétique terrestre subit de la part de sa composante horizontal un couple $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{M} \times \mathbf{B}$ qui tend à l'orienter. La période des petites oscillations horizontales de l'aimant permet de remonter à la valeur de la composante horizontale du champ. La seconde méthode consiste à placer une boussole au centre d'une spire de courant orientée verticalement et qu'on aura pris soin d'orienter dans la direction du champ magnétique terrestre, direction fournie par la boussole lorsqu'aucun courant ne parcourt la spire. On alimente la spire par un courant i qui crée un champ magnétique suivant l'axe de la spire et donc perpendiculaire à la position initiale de la boussole qui subit maintenant deux champs : celui de la terre et celui de la spire. La boussole prend un angle α par rapport à sa position initiale qui suffit à mesurer la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Ces deux expériences ne donnent qu'un ordre de grandeur de la composante horizontale du champ terrestre vue la petitesse du champ mesuré devant les champs magnétiques parasites présents dans les salles de TP usuelles (pour mémoire $B_h \simeq 0.4$ G et $B_v \simeq 0.2$ G avec 1 G $= 10^{-4}$ T) [Rapport 2005].

- **Mesure de B à l'aide d'une magnétorésistance :** comme l'effet Hall, c'est un effet galvanométrique. L'idée consiste à utiliser la dépendance (non-linéaire) de la résistance des matériaux conducteurs avec le champ magnétique pour mesurer ce dernier. La résistence croît de façon quadratique avec B; l'effet est faible mais utilisé [5].

- **Mesure d'un champ magnétique à l'aide de l'effet Zeeman** [6, 7]. Cette méthode est largement utilisée en astrophysique pour la mesure des champs magnétiques dans les étoiles lointaines, notamment les étoiles à neutrons où les champ peuvent atteindre des valeurs extrêmement intenses de l'ordre de 10^5 G [8] [Rapport 2006]. Le principe de l'expérience est le suivant : une lampe à vapeur de Cadmium, dont nous utilisons la raie rouge ($\lambda = 643,8$ nm), placée dans l'entrefer d'un électro-aimant, éclaire un interféromètre de Fabry-Pérot. Une caméra placée à la sortie du Fabry-Pérot permet de filmer la figure d'interférence ; cette dernière consiste en une collection d'anneaux concentriques correspondant aux différents ordres (notés p) d'interférence. Lorqu'on branche le champ magnétique, alors perpendiculaire à la direction d'observation, les anneaux d'égale inclinaison sont triplés: à un ordre d'interférence correspond 3 anneaux de rayons R_{λ_1}, R_λ et R_{λ_2} avec $\lambda_2 < \lambda < \lambda_1$. On montre que:

$$\frac{R^2}{R^2_{\lambda_2} - R^2_{\lambda_1}} = \frac{\lambda^2}{4\,e\,\Delta\lambda}\,p$$

où e désigne l'écartement du Fabry-Pérot, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_2 = \lambda_1 - \lambda$ et p l'ordre d'un triplet d'anneaux. En traçant le membre de gauche de l'expression précédente en fonction de l'ordre p des anneaux, on en déduit $\Delta\lambda$. Enfin, sachant que:

$$B = \frac{4\pi\,m\,c}{e}\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

on remonte au champ magnétique que subit la lampe et qu'on peut comparer à une mesure directe à l'aide d'une sonde à effet Hall.

Pour terminer, voici un plan possible, qui respecte celui qui nous a été présenté en classe complète ; **il comporte moins d'expériences** (pensez à creuser le mieux possible les expérience restantes) et essaie de faire passer le message suivant : en ce qui concerne la

production de champs, aimants et bobines permettent de produire des champs de différents ordres de grandeur. Ces deux moyens de production sont **indissociables** (à relier à l'hypothèse d'Ampère de 1821 qui nous dit que les champs dans la matière sont dus à des boucles de courant microscopiques). En ce qui concerne la mesure, on se propose de mesurer des champs dans la matière de manière directe (fluxmètre) ou indirecte (cycle d'hystéresis). On présente aussi un capteur très répandu : la sonde à effet Hall.

Introduction Expérience du réseau de petites boussoles permettant d'introduire la notion de production et de mesure.

I) Production de champ magnétique

I.1) Production de champ tournant (Qualitatif)
I.2) Production de champs forts : l'électro-aimant (*Mesure de B dans l'entrefer avec la sonde de Hall que vous étudiez ensuite*)

II) Mesure de champ magnétique

II.1) Mesure de champs dans la matière à l'aide d'un fluxmètre (*à faire sur l'électro-aimant que vous venez de caractériser*)
II.2) Une mesure extrêmement répandue actuellement : la sonde à effet Hall
II.3) Une mesure indirecte du champ dans la matière: en utilisant les cycles d'hystéresis (*ordre de grandeur à comparer à ce que vous avez obtenu au II.1*)

Conclusion Les points importants.

[1] R. Kaiser, **Petits problèmes de physique, deuxième partie**, collection Scopos éditions Springer. *Merveilleux recueil de problèmes que je tenais absolument à vous signaler. Il permet de compléter vos leçons d'excellents exemples et de préparer les écrits.*

[2] Epreuve Capes interne 1994, in R. Laverrière, **CAPES de sciences physiques 1990-1997: Concours externe et concours interne**, éditions Bréal.

[3] C. Garing, **Magnétisme: statique, induction et milieux**, éditions Ellipses. *Ouvrage incontournable pour votre année de préparation.*

[4] Collectif sous la direction de J.-M. Brébec, **Electromagnétisme PSI*/PSI** collection Hprépa, édition Hachette Supérieur.

[5] D. Mauras, **Electromagnétisme, 2eme année** collection prépa Physique et Chimie, éditions PUF.

[6] F. Moulin, **Polycopié de TP Phytem niveau L3**, disponible à l'adresse suivante: `http://www.phytem.ens-cachan.fr/telechargement/TP_ModuleL1/2007%202008%20zeeman.pdf`

[7] Sextant, **Optique expérimentale** collection enseignement des sciences, éditions Hermann. *Chapitre V pour être au clair sur l'interféromètre de Fabry-Pérot.*

[8] `http://www2.cnrs.fr/presse/communique/224.htm`

[9] E. Verrier, **750 questions d'oral**, éditions Ellipses. *Chapitre 12. Expériences portant sur le champ magnétique. Ce livre peut être intéressant pour la partie chimie.*

[10] Le titre du montage était alors un peu différent de son titre actuel: *Production et mesure de champs magnétiques de divers ordres de grandeur.*