

Production et mesure de champs magnétiques

MP 15

Romain Rescanières et Corentin Logé



FIGURE 1 – Un grand penseur

Sommaire

I Objectifs disciplinaires	2
II Introduction	2
III Étalonnage d'un électro-aimant	2
III.1 Protocole	2
III.2 Exploitation	2
III.3 Matériel	4
IV Principe d'un capteur à effet Hall	4
IV.1 Théorie	4
IV.2 Protocole	4
IV.3 Exploitation	5
IV.4 Matériel	5
V Création d'un champ tournant et utilisation d'un flux-mètre	6
V.1 Théorie	6
V.2 Protocole	6
V.3 Exploitation	7
V.4 Protocole 2	7
V.5 Matériel	7
VI Conclusion	8
VII Bonus : étalonnage du flux-mètre	8
VII.1 Protocole	8

VII Critique des choix pédagogiques	8
IX Remarques des correcteurs	8
X Questions des correcteurs	8

I Objectifs disciplinaires

Les principaux enjeux de la production d'un champ magnétique sont les suivants :

- création d'un champ intense ;
- directionnalité du champ créé ;
- localisation spatiale et uniformité.

Les techniques de mesure des champs magnétiques doivent, dans la mesure du possible, respecter les principales caractéristiques attendues d'un capteur, à savoir :

- une plage de linéarité la plus grande possible ;
- une sensibilité élevée ;
- une grande résolution ;
- une réponse fréquentielle adaptée ;
- une perturbation du système la plus faible possible.

L'objectif du montage est de critiquer un mode de production et un capteur (minimum) sur ces différents points.

II Introduction

L'utilisation des champs magnétiques est particulièrement répandue dans les domaines industriels (machines tournantes, application de force à distance) et de la recherche avancée (accélérateurs de particules). Au laboratoire, des solutions simples s'offrent au chercheur pour produire un champ magnétique de faible intensité, et pour mesurer ces derniers. C'est ce que nous allons voir dans ce montage.

III Étalonnage d'un électro-aimant

III.1 Protocole

On cherche à caractériser un premier dispositif de création de champ magnétique : **l'électro-aimant PHYWE**. On va le voir, celui-ci va nous permettre de générer un champ relativement intense, très localisé spatialement et directionnel.

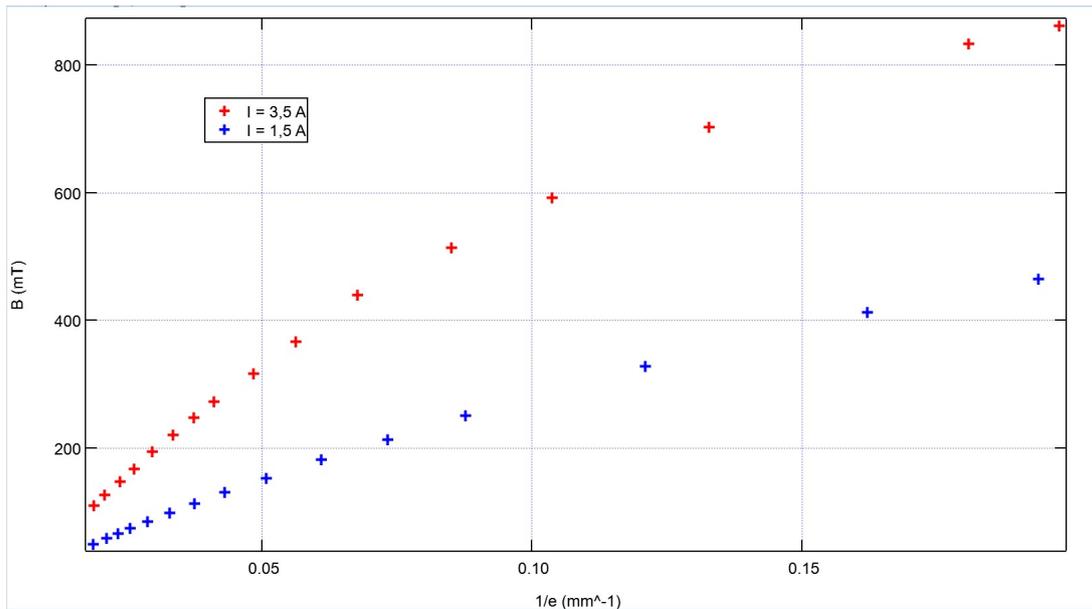
On alimente l'électroaimant à l'aide d'un générateur de courant continu (Réf QJ3005X, PhE4.F.A13005.2). Attention, max 4A. On utilise une sonde à effet Hall (dont le fonctionnement sera détaillé plus loin...) pour mesurer le champ créé par l'électro-aimant dans l'entrefer. On peut déjà vérifier que ce champ est très stable selon la direction de l'entrefer, et également assez stable dans le plan orthogonal à cette direction. Penser à faire le zéro du capteur dans la chambre à zéro de champ : Menu > Utility (faire Next) > Null > Reset.

Mesure de l'entrefer e :

- Coller les deux noyaux de fer, et mesurer, au pied à coulisse, la distance entre le bout du noyau de fer et la monture fixe.
- Pour chaque e : mesurer la distance bout du ferro-monture.

III.2 Exploitation

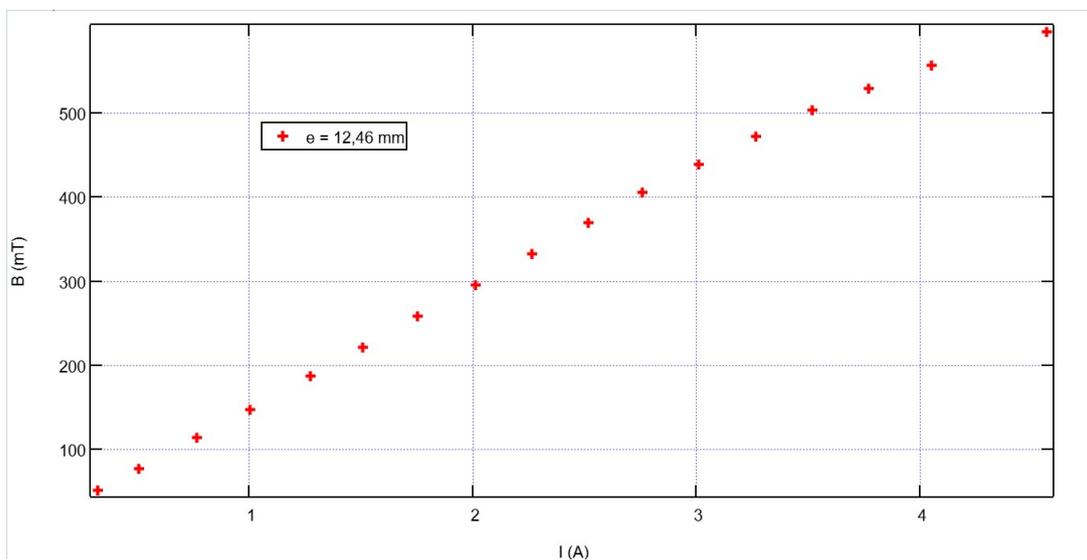
On peut ensuite s'intéresser aux variations de B avec la taille de l'entrefer à I fixée. On peut alors tracer $B = f\left(\frac{1}{e}\right)$.



On distingue alors deux domaines principaux :

- pour les valeurs intermédiaires de $\frac{1}{e}$, on retrouve que B est une fonction linéaire de $\frac{1}{e}$. On peut vérifier qu'on retrouve $B = \frac{\mu_0 N I}{e}$.
- pour les faibles valeurs de $\frac{1}{e}$, c'est-à-dire les grandes valeurs de e , les lignes de champ magnétique ne sont plus parfaitement canalisées. On a une rupture de pente.

On trace alors la courbe $B = f(I)$ pour une valeur d'entrefer fixée ($e = 12,46$ mm ici, assez grand pour faire passer la plaquette, cf. ensuite).



Plusieurs remarques :

- le champ créé est relativement intense (0.1 à 0.5 T environ), ce qui est surtout dû à la canalisation des lignes de champ par le matériau ferromagnétique ;
- le courant en entrée étant continu, le champ créé est statique (on ne peut pas faire de variable sur cet électroaimant, car il y a des diodes de protection dans le circuit !)
- la zone de champ intense est restreinte spatialement (conséquence : on ne pourra pas utiliser cette méthode pour soumettre un échantillon plus grand que la volume de l'entrefer au champ créé par l'électro-aimant) ;
- le champ est très directionnel : les lignes de champ sont alignées dans la direction de l'entrefer, et le

champ transverse est nul (peut être vérifié en direct !);

- le champ sature aux courants les plus élevés. Ceci est dû à la saturation du matériau ferromagnétique lui-même, ie au fait que μ_r est une fonction de \vec{B} lorsque $\|\vec{B}\|$ devient trop grand...

Dans les zones où B est une fonction linéaire de I , on doit retrouver :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{e}$$

On fait un ajustement linéaire pour le vérifier. Bon, euh... Ça ne marche pas pour nous...

III.3 Matériel

- Électro-aimant PHYWE avec entrefer à bords droits !
- Alimentation stabilisée Réf QJ3005X, PhE4.F.A13005.2
- Sonde à effet Hall "industrielle" HIRST MAGNETIC INSTRUMENT LTD + cage à zéro de champ
- Multimètre
- Pied à coulisse
- Potence, noix et pince 3 doigts

Transition On a tout mesuré avec un capteur à effet Hall... C'est quoi ?

IV Principe d'un capteur à effet Hall

IV.1 Théorie

La sonde que l'on a utilisée pour étalonner l'électro-aimant est un capteur de champ magnétique reposant sur l'effet Hall. On va chercher à caractériser le fonctionnement de ce capteur à l'aide de la plaquette.

L'effet Hall repose sur l'apparition d'une tension (dite tension Hall et notée U_H) aux bornes d'un matériau semi-conducteur lorsqu'on expose ce matériau à un champ magnétique, et qu'on impose un courant dans la direction transverse à celle où on mesure U_H . On peut alors montrer que dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque dopé, on a, aux faibles températures :

$$U_H = \frac{BI}{nqd}$$

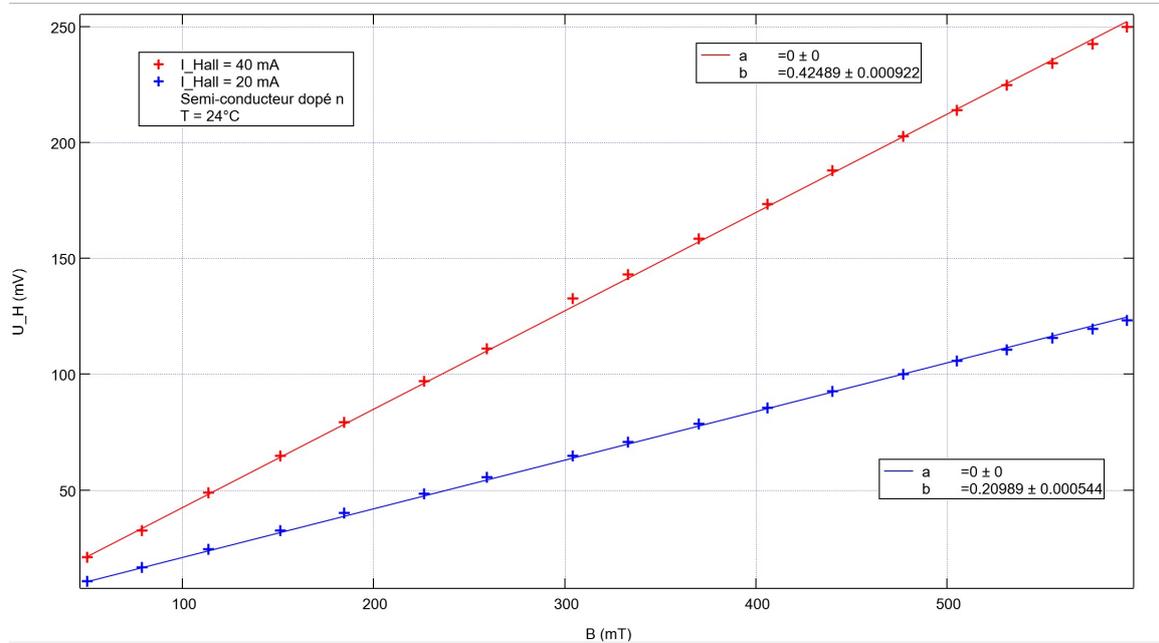
où n est la densité de porteurs de charge, q leur charge, et d l'épaisseur de la plaquette (troisième dimension : pas celle selon laquelle on applique I , ni celle selon laquelle on mesure U_H ; elle vaut 1 mm sur les plaquettes en pratique).

On peut, grâce à la plaquette, retrouver cette loi, en déduire n et étudier la variation de U_H avec la température T de la plaquette.

IV.2 Protocole

On repart d'un entrefer e où on a étalonné pour différents courants I , et on y met la plaquette semi-conductrice. Attention à régler le zéro de U_H dans un champ nul avec le potentiomètre de droite ! (Ce décalage au zéro est lié à une chute ohmique dans le matériau, car les contacts électriques pour lire la tension de Hall ne sont pas exactement en face à face. Ce décalage induit une part de chute ohmique dans U_H , qui dépend de la résistivité du semi-conducteur, et donc de sa température par exemple. Il faut donc refaire une série de mesure de la tension de chute si on change la température.).

Attention : le semi-conducteur est très sensible aux chocs ! Faire attention quand on le met dans l'entrefer !



IV.3 Exploitation

On trace donc $U_H = f(B)$ pour différents courants de Hall appliqués à la plaquette (on nous a conseillé $I_H = 40$ mA, mais ils savent pas pourquoi...):

L'ajustement par une équation de droite linéaire est satisfaisant. On retrouve bien que les pentes des deux droites obtenues sont dans un rapport 1/2 quand les courants Hall sont dans un rapport 1/2. De plus, avec $b \approx 1$ mm, on peut trouver un ordre de grandeur de la densité de porteurs. Ceci nous permet de confirmer l'utilisation d'un semi-conducteur ici : si la densité de porteurs est trop élevée, la tension Hall est nulle¹. Ici : $n \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Le capteur à effet Hall est donc linéaire dans la plage de valeurs de B que l'on a au laboratoire classiquement, ce qui en fait un capteur de choix.

On note toutefois quelques inconvénients :

- il est nécessaire d'alimenter le capteur pour mesurer une tension de Hall (si $I = 0$, alors $U_H = 0$ et ce quelque soit B);
- il est nécessaire d'étalonner le capteur avant de l'utiliser en imposant une valeur nulle de tension Hall pour $B = 0$ (on utilise en pratique une cage à zéro de champ : la montrer!!!);
- les semi-conducteurs dopés sont des matériaux plus coûteux que le cuivre en pratique...

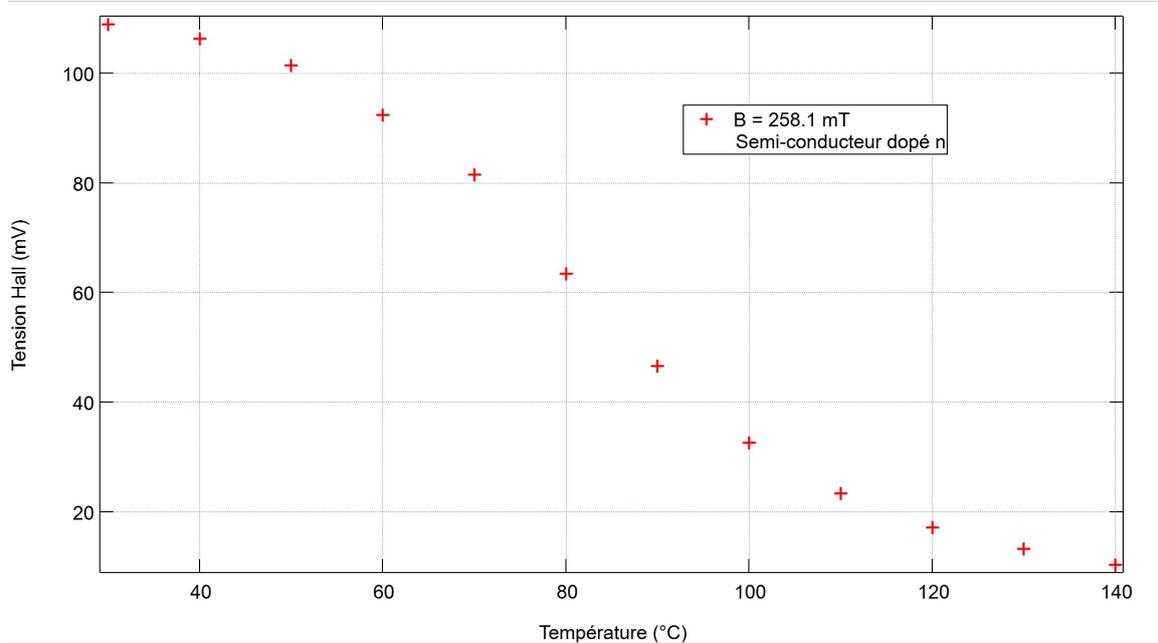
On peut caractériser un peu plus en profondeur le principe physique de l'effet Hall grâce à cette plaquette. On a déjà vu qu'on pouvait modifier le courant de Hall qui parcourt le semi-conducteur. Ceci permet l'adaptation du gain du capteur, ce qui peut s'avérer très utile en pratique (si le capteur se trouve dans une chaîne de rétroaction par exemple, avec une valeur de tension à ne pas dépasser). On peut également caractériser les variations de U_H avec la température. Celles-ci sont dues aux variations de la densité de porteurs, ainsi que de leur mobilité avec la température :

Ceci montre que le capteur à effet Hall devra être étalonné en fonction de la température pour donner des valeurs de champ magnétique correctes.

IV.4 Matériel

- Le même que l'électroaimant

1. Il faut tout de même que la densité de porteurs soit suffisamment élevée pour que le courant de Hall I ait une valeur significative. Si on prend un isolant, ce sera plus dur... De plus, pas de semi-conducteur intrinsèque, car forte dépendance du porteur avec la température (à température ambiante), donc bof bof...



- Plaquette semi-conductrice de L3 (dopée n (celle choisie ici) ou dopée p) + son support de lecture "maison" + alimentation 12 V de lampe blanche (on alimente le support avec ça...)
- Multimètre

Transition : On a vu comment générer un champ intense, unidirectionnel et statique avec un électro-aimant, ainsi que le principe de la mesure d'un tel champ à l'aide d'une sonde à effet Hall. Mais le champ magnétique est un champ **vectoriel**. On peut donc se demander comment exploiter cette propriété, en générant par exemple des champs tournants, variables dans le temps.

V Création d'un champ tournant et utilisation d'un flux-mètre

V.1 Théorie

On souhaite créer un champ magnétique tournant, à l'aide de deux bobines parcourues par un courant variable. Pour obtenir suffisamment de courant à l'entrée, on utilise les amplis de puissance à gain variable. Si l'on déphase les tensions d'excitation des bobines² de $\frac{\pi}{2}$, on va obtenir des courants³ parcourant les bobines déphasés de $\frac{\pi}{2}$ entre eux. On peut alors choisir la même amplitude pour les deux courants, et disposer les bobines à 90° l'une de l'autre. Alors, le champ dans le plan contenant l'axe des deux bobines⁴ est :

$$\vec{B}_{tot}(t) = \vec{B}_1(t) + \vec{B}_2(t) = B_0 \underbrace{(\cos(\omega t)\vec{e}_x + \sin(\omega t)\vec{e}_y)}_{\equiv \vec{u}(t)} = B_0 \vec{u}(t)$$

où $\vec{u}(t)$ est bien un vecteur tournant à la pulsation d'excitation des bobines.

V.2 Protocole

Pour vérifier la forme du champ créé par une bobine seule sur son axe, on utilise un capteur capable de détecter un champ variable : un flux-mètre⁵. Il s'agit d'un bobinage de cuivre de section S fonctionnant sur le principe de l'induction, dont on mesure la tension. Cette tension est proportionnelle d'après la loi de Faraday, à la

2. Que l'on choisit sinusoïdales.

3. Attention, le courant parcourant une bobine étant proportionnel à l'intégrale de la tension à ses bornes, le courant est lui-même déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension...

4. On a choisi une bonne origine des temps et aligné la bobine 1 avec \vec{e}_x et la bobine 2 avec \vec{e}_y .

5. Pas la plaquette à effet Hall, car son temps de réponse est trop grand... Mais personne ne sait pourquoi... En tout cas, elle donne zéro dans notre manip' avec les bobines... Ou alors le champ B est vraiment ridicule...

variation du flux du champ magnétique traversant le bobinage. Ici, on ne cherche pas à étalonner le flux-mètre⁶, mais seulement à vérifier l'allure du champ créé par les bobines⁷, qui, on le souhaite, est sinusoïdale lorsque la tension aux bornes de la bobine est sinusoïdale. On peut même utiliser un intégrateur avec un circuit RC en sortie sur C (on prend $C \approx 4.7\mu F$ et $R = 50k\Omega$: $f_c \sim 1$ Hz) pour visualiser un signal proportionnel au flux du champ magnétique : on prend $f_{GBF} = 100$ Hz pour effectivement intégrer.

V.3 Exploitation

Ceci nous permet de discuter des avantages et inconvénients du flux-mètre :

- Il s'agit d'un capteur de champ variable, et la fréquence maximale admissible est celle permettant d'assurer que le bobinage de cuivre ne subit pas d'effets capacitifs (typiquement 1 à 10 kHz).
- On n'a pas besoin d'alimenter le flux-mètre, ce qui est un avantage par rapport à la sonde à effet Hall ! On a juste besoin d'un oscilloscope⁸ pour mesurer la force électromotrice.
- La surface sur laquelle le flux est moyennée est assez grande en pratique... Ceci peut être gênant pour détecter des variations fines du champ.⁹
- Le flux-mètre ne fonctionne pas en régime permanent.
- Contrairement au capteur à effet Hall, il n'y a pas de "zéro" à faire : on a un lien de proportionnalité entre le flux et la tension ici.
- Du cuivre, ça coûte pas cher.

V.4 Protocole 2

Une fois la vérification de l'allure du champ créé par chacune des bobines réalisée, on place les bobines à 90° l'une de l'autre, et on crée ainsi un champ tournant. Pour vérifier la présence de ce champ, on peut placer une boussole au centre : celle-ci se met alors à tourner sur elle-même après l'avoir lancée. Attention, l'inertie de la boussole ne permet de l'utiliser que pour des fréquences allant jusqu'à 20 Hz. Au-delà, elle ne suit plus. On choisit ici $f_{GBF} = 10$ Hz¹⁰.

Une dernière manip pour être de « mesurer » la vitesse angulaire de rotation de la boussole à l'aide d'un stroboscope : on trouve une très bonne concordance avec la pulsation de la tension.

Autre idée : mesurer la pulsation de rotation de la boussole en mettant un bout de stock fluo et en utilisant un tachymètre optique (attention, en choisir un avec une tache laser suffisamment fine...).

V.5 Matériel

- 2 bobines de taille suffisante pour accueillir deux noyaux de fer doux
- 2 amplificateurs de puissance
- 1 oscillo + 1 GBF 2 voies
- Carte mère et potentiomètre d'élec'
- Flux-mètre (attention, la plupart sont à moitié pétés : vérifier les contacts)
- Boussole et son pic
- Stroboscope ou tachymètre optique faible diamètre de tache et skotch fluo

6. On pourrait le faire. Cf. partie VII

7. Et on a intérêt à le faire ! En pratique, si la fréquence est trop faible, ce sont les effets résistifs qui prennent le dessus dans les bobines, et le courant appelé devient gigantesque. Les amplis de puissance ne suivent plus, le courant est déformé et le champ n'est pas du tout sinusoïdal ! Il faut travailler à des fréquences de l'ordre de 20-30 Hz pour que ce soient les effets inductifs qui prédominent ! Pour être plus précis, on a $i = \frac{u}{R+jL\omega}$, donc i augmente si ω diminue, ou si L diminue (soit par exemple, si on enlève le ferro...).

8. A 4000€..

9. On peut réaliser des micro bobines !!! Celles-ci peuvent avoir une surface d'intégration du champ de 1 mm² ! Mais ceci signifie un gain très faible du capteur, et donc une tension difficile à détecter.

10. Ce qui signifie que si on regardait au fluxmètre, le champ créé par les bobines serait distordu... Mais on peut pas faire autrement...

VI Conclusion

On peut ainsi ouvrir ce montage sur les machines tournantes. En l'occurrence, on a ici le fonctionnement de base d'une machine synchrone.

(Il ne s'agit pas à 100 % d'une machine synchrone, car le matériau de la boussole est conducteur ! On peut avoir création de courants de Foucault et la boussole tourne un peu moins vite que le synchronisme...)

VII Bonus : étalonnage du flux-mètre

VII.1 Protocole

Idée 1 : On fait un champ variable et on utilise le capteur à effet Hall étalonné. Ne marche pas, car il faudrait mettre le capteur Hall et le flux-mètre exactement au même endroit en sortie de la bobine, vu la tronche des lignes de champ... Et ils n'ont pas la même surface d'intégration...

Donc, il suffirait de mettre le flux-mètre dans un champ constant, et de le retirer brusquement. On pourrait alors relier la tension à ses bornes qui, intégrée, donnerait une valeur proportionnelle à la variation du champ. En connaissant le champ (avec un électro-aimant étalonné par exemple...) on connaît le coefficient de proportionnalité : c'est gagné. Merveilleux.

VIII Critique des choix pédagogiques

- On a montré un mode de production de B constant et B tournant (pleiiiiin d'applications!). On peut aussi faire les lignes de champ dans un solénoïde, mais c'est long et chiant.
- Pas d'étalonnage du flux-mètre, parce que ça n'a aucun intérêt ici, on ne remonte pas au champ B : c'est pas le but.
- On ne peut pas prouver que le champ tourne avec un seul capteur, parce qu'on ne mesure que la projection de B sur sa normale... Donc avec une seule bobine, c'est déjà sinusoïdal... Idée : le tester avec un capteur à effet Hall 2 axes, sans étalonnage à nouveau, mais il faudrait que les deux capteurs soient assez proches l'un de l'autre...
- Seul endroit où faire des incertitudes a un sens : l'étalonnage du capteur à effet Hall. On aurait pu mesurer l'épaisseur du semi-conducteur au pied à coulisse en fait, c'est sans danger. Ou alors, sur les courbes de l'électro-aimant, mais il faudrait que le coefficient directeur soit le bon... Et c'est pas forcément indispensable dans l'idée de ce montage.

IX Remarques des correcteurs

- Mesurer l'épaisseur du semi-conducteur au pied à coulisse est sans danger : il est surtout fragile par rapport à I_H et à T .
- Ne pas faire les bobines de Helmholtz : le champ B est vraiment pas uniforme (je crois juste qu'il est bien unidirectionnel).
- $U_H = f(T)$: il serait intéressant de regarder si I_H varie (la résistivité change) ou si c'est n qui change (cf. formules de matière condensée pour calculer la variation théorique de n ou l'expérimental). En fait, ici, la température varie pas des masses non plus : de 300 K à 420 K...
- Commenter n et dire qu'avec du Ge, la dépendance en température est bien plus forte qu'avec du Si!

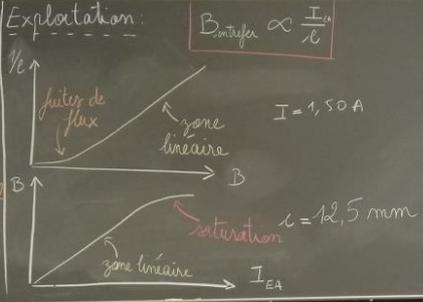
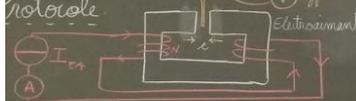
X Questions des correcteurs

- Intérêt de produire \vec{B} ? *Matière condensée : caractérisation d'un matériau, machines tournantes, ...*
- Avantage/inconvénient d'un électroaimant sur une bobine? *Cf. avant*
- Pourquoi il y a saturation dans un ferro? *Alignement de tous les moments magnétiques dans le même sens*

- Comment visualiser des lignes de champ? *Limaille de fer*
- Pourquoi dopé n? Dopé p marche aussi? *Oui, ça marche aussi! Seul objectif : S-C extrinsèque*
- Champ \vec{B} parasite dans la salle? *Rayonnement des câbles à 50 Hz, champ terrestre* Ordre de grandeur de $B_{\text{terrestre}}$?
- Autre application des champs tournants? *RMN*
- C'est quoi un flux-mètre?
- Mobilité des électrons et des trous différentes? Inversion de U_H avec T dans un S-C dopé p?
- Fuites des lignes de champ de l'électroaimant à e grand? *C'est pas vraiment des fuites : la majorité des lignes passent par les deux noyaux, mais les lignes s'écartent vachement sur les bords de l'entrefer.*
- Cage de Faraday? *Protège des champs \vec{B} hautes fréquences, car réflexion sur un métal. Ici, on veut plutôt se protéger d'un champ statique. Donc, c'est une boîte faite avec un matériau avec μ_r très grand (μ -métal) : les lignes de champs sont canalisées dedans, et au milieu : B nul!*
- Pourquoi diodes sur l'électroaimant? *Si on débranche d'un coup : boucles pour que le courant circule, type hâcheur.*
- $B = f(I_{EA})$ si e plus grand? *Attention : la saturation du matériau ferro se produit pour le même B ! Odg de B atteignable dans l'air à saturation? $2 T$*
- Ordre de grandeur de n dans un semi-conducteur dopé, à basse température? $n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à 10^{18} cm^{-3} . *$n_{\text{intrinsèque}} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ Odg de n_{Si} à température ambiante? $n_{Si} \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$*
- Pourquoi avoir choisi $f_{c,RC} \sim 1 \text{ Hz}$? *2 décades avant la fréquence à intégrer.*

MP 15 | Production et mesure de champs magnétiques

I - Etalonnage d'un électroaimant :



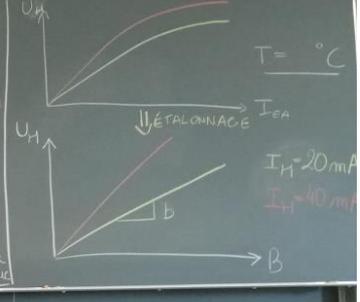
II - Principe d'une sonde à effet Hall :



Exploitation:

$$U_H = \frac{B I_H}{n q d}$$

n : densité de porteurs
 d : épaisseur de la plaque



Densité de porteurs n :

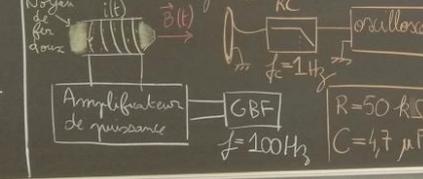
$$n = \frac{I_H}{b q d} \approx$$

Influence de la température :



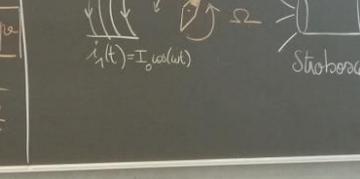
III - Création d'un champ tournant

1) Mesure de champs variables :



2) Champ tournant :

Protocole: $i_1(t) = I_0 \cos(\omega t + \pi/2)$



Ne pas effacer mp!

Joyeux anniversaire
Nicolas Perronnéras!