

PRODUCTION ET MESURE DE CHAMPS MAGNETIQUES

INTRODUCTION

Le champ magnétique étant une grandeur vectorielle, sa mesure se fait en deux étapes :

- détermination de la direction et du sens du champ \rightarrow avec boussole
- mesure de son intensité

Pour la mesure de l'intensité, deux cas de figure sont envisageables suivant le champ qu'on étudie :

- \vec{B} uniforme, d'extension infinie, de faible intensité \Rightarrow sa mesure relative est basée sur $\vec{\tau} = \vec{M} \wedge \vec{B}$ (boussole \rightarrow cf. § 2.1).

- \vec{B} localisé, d'intensité plus forte \Rightarrow on a alors deux types de capteurs :

- ceux utilisant $d\vec{F} = I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$: balance de Cotton (mesure F), sonde de Hall (mesure ddp).

- ceux utilisant $e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$: fluxmètre électronique (mesure d'une ddp).

I APPAREILS DE MESURE DE CHAMPS

Quaranta IV p 90 – 98

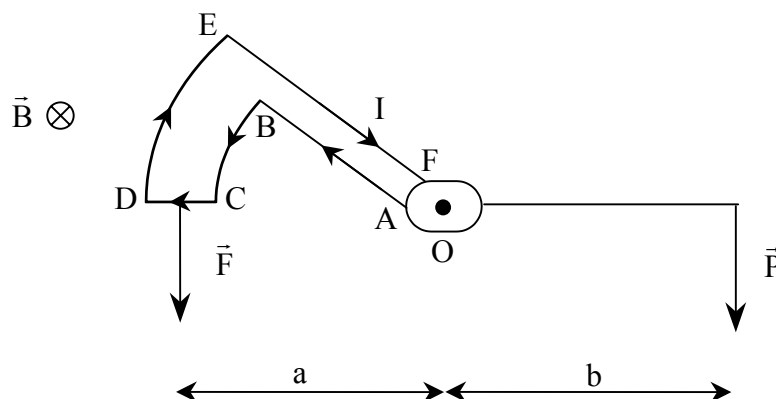
1.1 Balance de Cotton

Berty Fagot I p 217 Quaranta IV p 93

Cette méthode ne présente plus qu'un intérêt pédagogique bien que ce soit le seul dispositif qui permette une mesure absolue du champ magnétique (par la force de Laplace qu'il engendre). Elle ne sert plus en pratique pour les mesures de champ.

1.1.1 Principe de la balance

On fait circuler un courant dans un circuit filiforme que l'on met en présence d'un champ magnétique. Ce circuit a l'allure suivante :



Chaque branche est soumise à une force de Laplace $d\vec{F} = I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$. Les branches BC et DE sont des secteurs circulaires centrés en O \rightarrow avec l'orientation de \vec{B} , la force magnétique agissant sur ces branches sera dirigé vers O \rightarrow leur moment / à O sera nul.

A l'équilibre de la balance $\Sigma M_{\vec{a}O} = 0$

$$\begin{aligned} F_{\text{mag sur DC}} \times a &= m g b \\ BI \ell a &= m g b \quad \text{avec } DC = \ell \end{aligned}$$

$BI \ell a = m g b$

1.1.2 Réglage de la balance

Prendre la balance Matlabo grise. Elle dispose d'un contrepoids constitué par une chaînette qui permet de rééquilibrer la balance en présence d'un champ. Une échelle, directement graduée en Newton, permet de simplifier la conversion.

Libérez le fléau de la balance puis ajustez le réglage des pieds de l'appareil pour que l'extrémité du fil à plomb coïncide avec le repère situé sur la base de la balance.

Sans \vec{B} : Equilibrez la balance avec le contrepoids à vis et en rajoutant des masses si nécessaire. On peut aussi jouer sur le curseur qui fixe l'origine de la lecture.

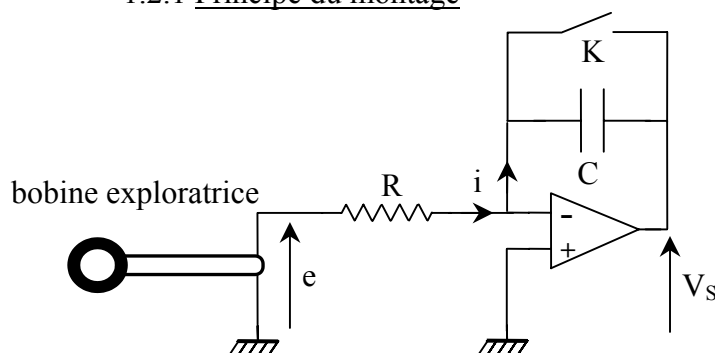
Avec \vec{B} : Réajustez l'équilibre en jouant sur la vis de positionnement de la chaînette.

$$\Rightarrow B = \frac{\Delta m(N)}{I \ell}$$

1.2 Fluxmètre électronique

Biblio : Quaranta IV p 192 ; Quaranta III p 232

1.2.1 Principe du montage



L'AO est en régime linéaire $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_- = 0$. On a alors $V_s = -V_c = -\frac{1}{C} \int i dt$

On commence avec l'interrupteur fermé : $V_c = 0 \Rightarrow V_s = 0$

On place la bobine dans le champ à mesurer. Dès qu'on ouvre l'interrupteur, on sort la bobine de la zone de champ magnétique. Il va apparaître une f.e.m. d'auto induction $e = -\frac{d\phi}{dt}$.

Comme $V_s = 0$, on a par conséquent $i = \frac{e}{R}$ (conversion $I \rightarrow U$ parfaite).

$$\Rightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int e \, dt = +\frac{1}{RC} \int_0^t d\phi \quad \text{d'où} \quad V_s = \frac{1}{RC} [\phi(t) - \phi(0)] \quad \text{On a donc un fluxmètre.}$$

$t = 0$: la bobine est dans le champ $B \rightarrow \phi(0) = NSB$

t : la bobine est dans un champ nul $\rightarrow \phi(t) = 0$

$$\Rightarrow \boxed{V_s = -\frac{NS}{RC} B} \quad \text{Champmètre}$$

Remarque :

Dès qu'on bouge la bobine, le montage intègre les variations de flux \Rightarrow ne pas la bouger dans les conditions initiales.

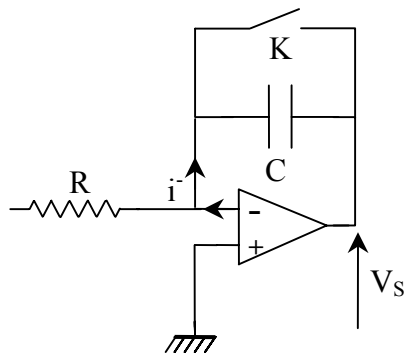
1.2.2 Problèmes de dérive

Les imperfections des amplificateurs

opérationnels font que ce montage dérive dans la pratique. En effet, il intègre aussi le courant de polarisation de l'AO ainsi que celui que génère la tension d'offset (quantités \approx constantes) \Rightarrow il est impératif de minimiser ces dérives.

Dérive due au courant de polarisation :

Un des écarts de l'ampli op réel au modèle idéal est la présence de courant aux entrées $+$ et $-$ du composant. La valeur et le sens de ces courants dépendent du type de transistor présent aux entrées de l'AO. On peut donner une limite supérieure de la dérive que va donner le courant de polarisation i_- en supposant la bobine exploratrice débranchée du circuit (on ouvre K à $t = 0$) :



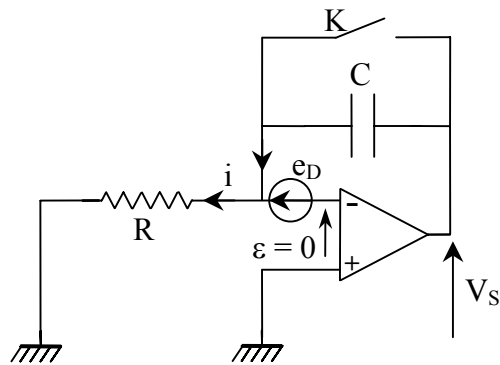
$$V_s = -\frac{1}{C} \int_0^t i_- \, dt = -\frac{i_-}{C} \int_0^t dt \quad \Rightarrow \quad \boxed{V_s = -\frac{i_-}{C} t}$$

Le courant de polarisation fait dériver le montage \rightarrow on a intérêt à prendre un AO ayant des courants de polarisation les plus faibles possibles. Les AO 071 ou 081 ayant typiquement des courants de polarisation de 100 pA (transistors d'entrée : JFET) contre typiquement 100 nA pour les 741 (transistors d'entrée : bipolaires), on prendra donc un AO 071 ou 081.

Dérive due à l'offset

Un autre écart de l'ampli op réel au modèle idéal est la présence d'une petite différence de potentiel (tension d'offset) entre les deux entrées de l'AO. Cette tension de décalage, positive ou négative, provient essentiellement d'une légère dissymétrie des transistors d'entrée de l'AO. Elle dépend des tensions d'alimentation ainsi que de la température \rightarrow elle fluctue légèrement en fonction du temps et des conditions expérimentales.

Pour donner une estimation de la dérive que l'offset cause, supposons que la bobine ne subisse aucune variation de flux. Si on ne tient compte que de la tension d'offset, le montage se modélise de la façon suivante :

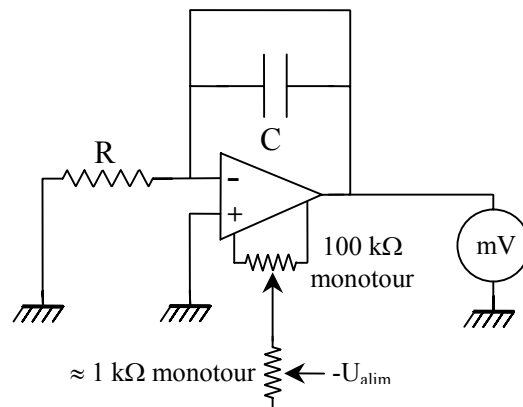
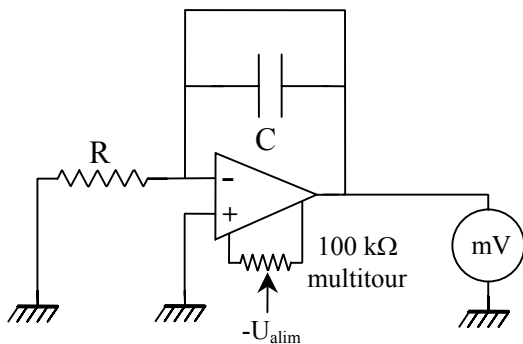


$$i = \frac{e_D}{R} \Rightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int e_D dt = -\frac{e_D}{RC} \int dt$$

$$\Rightarrow V_s = -\frac{e_D}{RC} t$$

La tension d'offset fait aussi dériver le montage
 \Rightarrow il faut l'annuler au mieux.

L'annulation de l'offset peut se faire de deux façons suivant le matériel dont on dispose :



L'interrupteur K étant fermé, le montage se comporte comme un suiveur et la tension de sortie que l'on mesure correspond à la tension d'offset. Pour l'annuler sur un AO 071 ou 081, le constructeur préconise l'emploi d'un potentiomètre de 100 kΩ (branchez ses extrémités sur les deux entrées OFF du composant). Pour que cette annulation soit la plus fine possible, on conseille de prendre un potentiomètre multitour (montage de gauche réalisable à Rennes). Si on n'en a pas, réalisez le montage de droite.

Quel que soit le montage réalisé, annulez au mieux l'offset (il est difficile de descendre en dessous du dixième de mV).

Remarque :

On peut exprimer le rapport de la tension due à la mesure du champ B sur les tensions dues aux dérives :

$$\frac{V_{sB}}{V_{sOFF} + V_{sIPOLA}} = \frac{NSB}{(e_D + Ri^-)t}$$

\Rightarrow Les dérives seront d'autant moins gênantes que NSB est grand \Rightarrow Ce système est mieux adapté à la mesure de champs forts.

\Rightarrow Pour un champ B donné, on a intérêt à prendre une bobine ayant la valeur NS la plus importante possible (inconvenient : la mesure est d'autant moins locale).

Enfin, seule la dérive due au courant de polarisation peut être atténuée vis à vis de la mesure de B en prenant une valeur de R faible. Ce choix diminuant la valeur de la tension à mesurer, on aura alors intérêt à prendre pour C une valeur importante.

Conclusion :

Prendre un AO 81 ou 071 ($i_{\text{pol}}a$ plus faibles) ; l'allumer longtemps à l'avance ($T \approx \text{cte}$).

Prendre une capacité de forte valeur (en pratique, il est difficile d'avoir des étalons supérieurs à $10 \mu\text{F}$) ; choisir R de façon à avoir une tension à mesurer pas trop petite par rapport au multimètre utilisé.

Annuler au mieux l'offset avant la mesure. Faire RAZ au départ et mesurer rapidement.

Ce montage est mieux adapté à la mesure des champs forts (dérives moins gênantes).

1.3 Sondes à effet Hall

C'est l'instrument le plus utilisé pour la mesure des champs magnétiques. Le principe de l'effet Hall est rappelé brièvement en annexe (on peut aussi se reporter au Quaranta IV p. 96).

On dispose à Rennes de plusieurs systèmes utilisant ce type de sonde :

Un teslamètre

d'enseignement permettant des mesures jusqu'à un Tesla.

Des capteurs intégrant

une sonde à effet Hall, un dispositif de linéarisation et de compensation en température. Ces capteurs doivent être alimentés par une tension continue U. En l'absence de champ magnétique, la sortie mesure est à $U/2$. En présence d'un champ B, la sortie évolue avec une pente mV/G fonction du capteur utilisé. Se reporter à leur documentation technique pour plus de précision sur leur emploi.

1.4 Manipulation

On se propose d'étudier quelques caractéristiques des différents systèmes de mesures en mesurant le champ créé par deux aimants permanents différents :

- un aimant en U avec une partie en ticonal (matériau ferro) permettant d'avoir un champ magnétique homogène (cf Berty Fagot, tome I p 225).

- un aimant en U classique possédant un champ magnétique inhomogène.

Manipulation :

Mesurez le champ magnétique de chaque aimant en utilisant successivement les appareils suivants :

la balance de Cotton

le fluxmètre électronique (à monter) avec la bobine blanche 566 cm^2 (prendre $C = 1 \mu\text{F}$ au minimum et choisir R).

le teslamètre d'enseignement ou un capteur simple (prendre l'un de ceux dont le coefficient de conversion à la dispersion la plus faible).

Conclusion :

Pour un champ homogène, les mesures se recourent.

Pour un champ inhomogène, les mesures diffèrent.

Explication :

La balance de Cotton et le fluxmètre mesurent \vec{B} dans un grand domaine alors que la sonde de Hall effectue une mesure locale.

Remarque :

La balance de Cotton permet une mesure absolue de B, mais son mode opératoire est long et la mesure n'est pas locale → on la présente juste à titre indicatif.

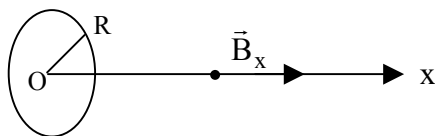
Le fluxmètre électronique effectue une mesure moyenne (grande surface). Son inconvénient majeur est d'être sensible à la dérive (intégration des courants de polarisation et de la tension d'offset de l'AO). Il est mieux adapté à la mesure de champ forts.

La sonde à effet Hall est un instrument fiable, elle permet une mesure ponctuelle (mais sensible à l'orientation de la sonde). Il faut savoir qu'en pratique, plus de 95 % des mesures de champs magnétiques sont effectués avec cet appareil → on n'utilisera pratiquement que lui.

II CHAMP MAGNETIQUE CONSTANT CREE PAR UNE BOBINE

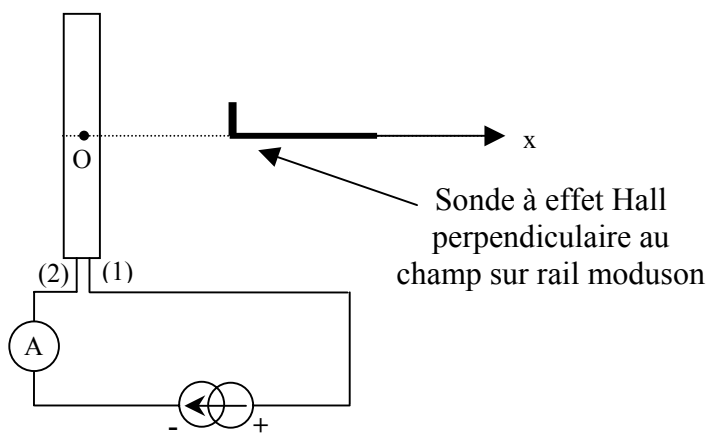
2.1 Rappel

Considérons une bobine circulaire de rayon R possédant N spires ; le champ B créé suivant l'axe perpendiculaire à sa surface a pour expression :



$$B(x) = \frac{\mu_0 N I}{2R} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2\right]^{3/2}} = B_0 \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2\right]^{3/2}}$$

2.2 Mesures



Vérifiez le branchement de la bobine pour avoir le champ magnétique \vec{B} dirigé vers les $x > 0$ (s'aider d'une boussole – la partie rouge indique le nord donc le sens de \vec{B}).

Ajustez avec les potences la position du rail en latéral et en hauteur pour qu'il soit au milieu de la bobine.

Ajustez l'alim de façon à avoir $I = 5$ A. Ne plus y toucher par la suite (éteindre pour arrêter le courant). On a alors :

$$\left. \begin{array}{l} \mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \\ R = 20 \text{ cm} \\ N = 154 \\ I = 5 \text{ A} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{B_0 = 2,42 \text{ mT}}$$

Sonde à effet Hall :

Eloignez la sonde de tout champ magnétique ; ajuster le 0 sur le calibre approprié.

Placez la sonde au milieu de la bobine. Ajustez son orientation pour avoir un signal maximum et mesurez le champ B pour différentes valeurs de x.

Voici à titre indicatif une série de mesures :

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B _{mes} (mT)	2,65	2,65	2,6	2,55	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9
B _{th} (mT)	2,41	2,41	2,38	2,34	2,28	2,21	2,13	2,03	1,94	1,83	1,73

x	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B _{mes} (mT)	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,15	1,05	1
B _{th} (mT)	1,63	1,52	1,43	1,33	1,24	1,15	1,07	0,99	0,92	0,86

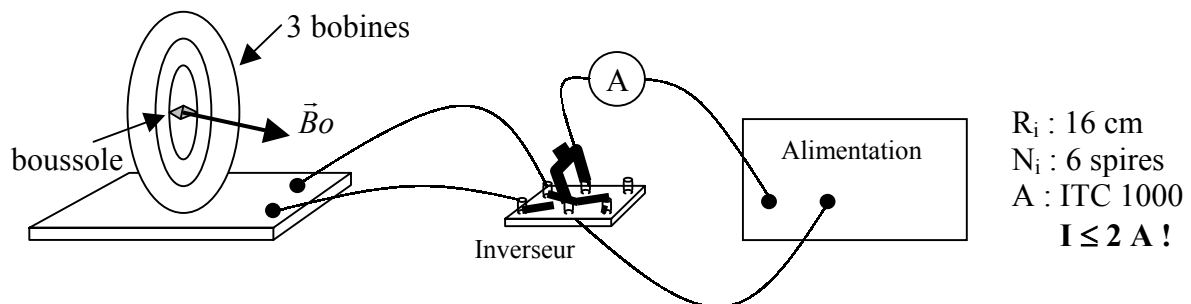
On constate une légère dérive en courant (2-3%) de l'alimentation en cours de manipulation. Pourquoi à votre avis ?

2.3 Application : mesure de la composante horizontale du champ terrestre

Quaranta IV p 68-266 et Berty Fagot Martin : tome I p 263.

Signalez que cette partie illustre la mesure d'un champ très faible ($B_{HT} = 2 \cdot 10^{-5}$ T) et qu'en plus, pour le mesurer, on produit un champ magnétique du même ordre de grandeur.

Manipulation :



Alimentation continue 30 V / 2,5 A (française d'instrumentation)

Mode opératoire :

Vérifiez que tous les autres circuits magnétiques sont ouverts ou éloignés sinon la mesure est faussée. En l'absence de courant, orientez le plan de la bobine dans la direction Nord-Sud (plan du méridien local du champ magnétique terrestre) \Rightarrow axe boussole // au plan de la bobine.

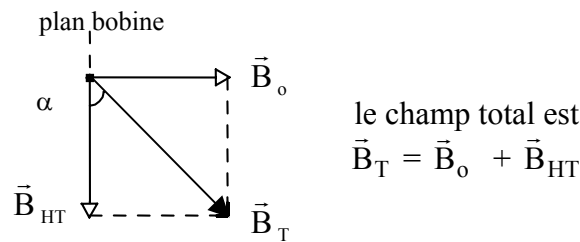
Le bouton de réglage de la tension de l'alimentation étant tourné à fond, ajustez le réglage de l'intensité I pour avoir une déviation notable de l'aiguille de la boussole.

Mesurez α , angle de déviation de la boussole par rapport au plan de la bobine. Ramenez V à zéro **sans toucher à I** (pour éviter des surtensions à l'ouverture), inverser le courant, remettre V à fond \rightarrow mesurer de nouveau α .

Analyse :

$$\text{Au centre de la bobine, on a } B_o = \frac{\mu_o N I}{2 R}$$

\vec{B}_o est perpendiculaire au plan de la bobine. Ce champ s'ajoute à \vec{B}_{HT} qui est parallèle au plan de la bobine.



L'aiguille aimantée subit un couple de torsion $\vec{\tau} = \vec{M} \wedge \vec{B}$ qui tend à l'orienter dans le sens \vec{B}_T . On a à l'équilibre :

$$\text{tg } \alpha = \frac{\text{co}}{\text{ca}} = \frac{B_0}{B_{HT}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{B_{HT} = \frac{B_0}{\text{tg } \alpha}}$$

Remarque :

En inversant le courant, on mesure 2α pour plus de précision.

Mesures :

Pour I donné, mesurez 2α ; calculez $B_0 = \frac{\mu_0 N I}{2R}$; en déduire $B_{HT} = \frac{B_0}{\text{tg } \alpha}$

Calcul d'incertitude :

On procède par la méthode des logarithmes : $\frac{d(B_{HT})}{B_{HT}} = \frac{dB_0}{B_0} - \frac{d(\text{tg } \alpha)}{\text{tg } \alpha}$

Pour l'incertitude sur B_0 , on a :
$$\boxed{\left(\frac{\Delta B_0}{B_0} \right) = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R}}$$

Pour l'incertitude sur la mesure du courant, se reporter à la documentation du multimètre utilisé. L'incertitude sur le rayon des bobines est à évaluer. Signaler qu'on commet aussi une erreur systématique puisque toutes les bobines n'ont pas le même rayon.

On calcule le deuxième terme de la façon suivante :

$$\left. \begin{array}{l} df = f' dx \Rightarrow d(\text{tg } \alpha) = (\text{tg } \alpha)' d\alpha \\ \text{or } (\text{tg } \alpha)' = \frac{1}{\cos^2 \alpha} = 1 + \text{tg}^2 \alpha \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d(\text{tg } \alpha)}{\text{tg } \alpha} = \frac{1}{\text{tg } \alpha} \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha} = \frac{d\alpha}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{2d\alpha}{\sin 2\alpha}$$

D'ou finalement :
$$\boxed{\frac{\Delta B_{HT}}{B_{HT}} = \frac{\Delta B_0}{B_0} + \frac{2\Delta \alpha}{\sin 2\alpha}}$$

Voici à titre indicatif une série de mesures :

$$\left. \begin{array}{l} R = 16 \text{ cm} \\ N = 6 \\ I = 1,004 \text{ A} \end{array} \right\} 2\alpha = 47 + 45 \Rightarrow \alpha = 46^\circ$$

$$B_{HT} = \frac{B_0}{\text{tg } \alpha} = \frac{\mu_0 N I}{2R \text{ tg } \alpha} = \frac{4\pi 10^{-7} \times 6 \times 1,004}{2 \times 16 \cdot 10^{-2} \text{ tg } 46} \quad \boxed{B_{HT} = 2,28 \cdot 10^{-5} \text{ T}}$$

On trouve dans la littérature la valeur suivante : $B_{HT} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$; Calcul d'incertitude à faire.

On peut se poser la question de savoir si l'incertitude sur l'appareillage est la cause principale d'erreur sur cette mesure ...

Application :

Magnétomètres à aimant mobile : ces instruments permettent la mesure de champs faibles et en particulier les anomalies du champ magnétique terrestre (cf. Quaranta IV p 72).

III ETUDE DES BOBINES DE HELMHOLTZ

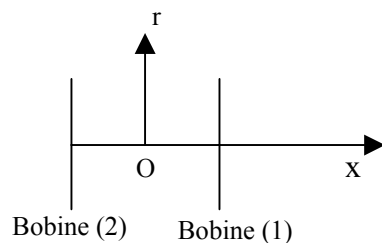
Quaranta IV p 268-269 et 273-275.

Berty Fagot Martin I p 227 à 235.

3.1 Rappel

On rappelle qu'on a des bobines de Helmholtz uniquement dans le cas où elles sont parallèles entre elles et distantes de R , R correspondant au rayon des bobines. Si ces deux bobines sont parcourues par le même courant (même intensité, même sens), leurs champs magnétiques s'ajoutent :

$$\Rightarrow B = B_1 + B_2$$

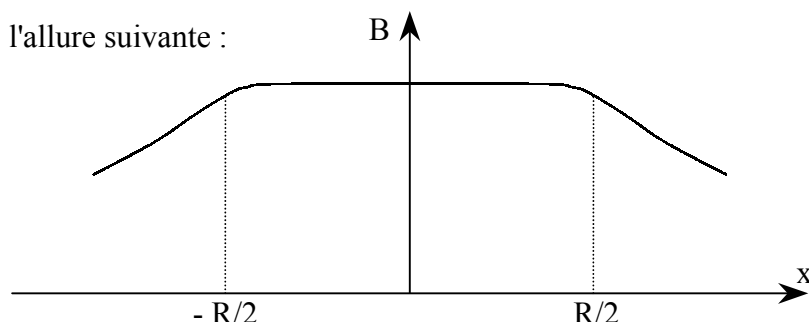


On peut reprendre pour chaque bobine l'expression de $B(x)$ donnée au § 2.1 en effectuant un changement de variable puisque l'origine n'est plus la même.

$$B_1 : x \text{ devient égal à } x - \frac{R}{2} \Rightarrow B_1 = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{\left[R^2 + \left(x - \frac{R}{2} \right)^2 \right]^{3/2}}$$

$$B_2 : x \text{ devient égal à } x + \frac{R}{2} \Rightarrow B_2 = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{\left[R^2 + \left(x + \frac{R}{2} \right)^2 \right]^{3/2}}$$

L'intensité du champ a alors l'allure suivante :



On peut calculer le champ en deux points particuliers :

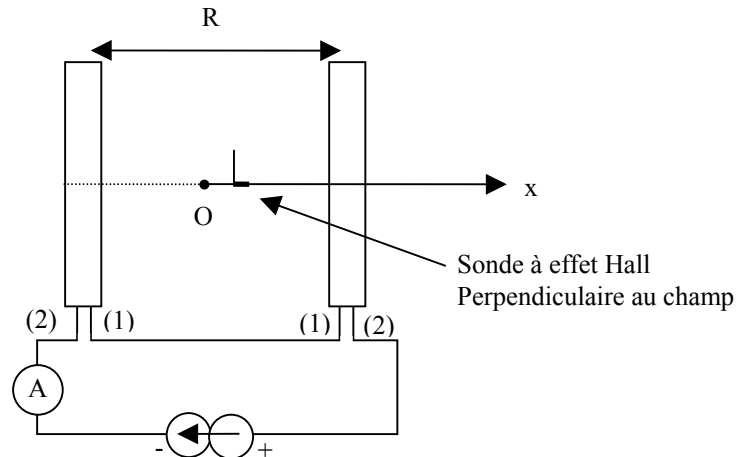
$$\text{- au milieu des bobines : } B(0) = B_1(0) + B_2(0) = \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N I}{R}$$

- au centre des bobines : $B\left(\frac{R}{2}\right) = B_1\left(\frac{R}{2}\right) + B_2\left(\frac{R}{2}\right) = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N I}{R}$

On se propose d'étudier l'évolution du champ magnétique au sein de ces bobines \Rightarrow prendre la sonde à effet Hall pour faire des mesures locales.

3.2 Mesures

Même intensité qu'avant !



Ajustez la distance entre les bobines à R (ce réglage se fait facilement avec le matériel dont on dispose à Rennes grâce aux 2 rails fournis avec les bobines).

Branchez les bobines en série. Branchez la deuxième de façon à ce que les champs s'ajoutent (cf. schéma). Voici à titre indicatif une série de mesures effectuées avec un courant de 5 ampères (attention, l'origine des x n'est plus la même !) :

x (cm)	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10
B _{mes} (mT)	1,6	1,7	1,8	1,95	2,05	2,2	2,35	2,5	2,65	2,8	2,95	3,1	3,2	3,3	3,4	3,55

x (cm)	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
B _{mes} (mT)	3,6	3,6	3,65	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,68	3,68	3,65	3,65	3,62

x (cm)	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
B _{mes} (mT)	3,6	3,6	3,52	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3	2,85	2,7	2,6	2,45	2,3

Il existe un programme sous Excel permettant de rentrer vos valeurs et de les comparer à un modèle \rightarrow le demander au professeur.

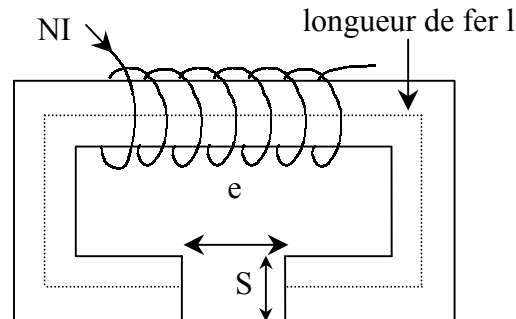
Intérêt des bobines de Helmholtz :

Cette disposition permet la production d'un champ magnétique \cong constant dans une région assez grande (application \rightarrow cf. montage "Constantes physiques fondamentales"). A cet égard, on peut avantageusement compléter cette étude par celle de l'évolution du champ magnétique dans la direction perpendiculaire à l'axe x car le système n'est pas à symétrie de révolution (cf. Quaranta IV p. 273). On peut aussi faire des mesures en différents endroits et quantifier la zone spatiale dans laquelle on peut considérer que le champ est constant avec un % de variation admissible.

IV CHAMP CREE PAR UN ELECTRO-AIMANT

4.1 Théorie

On se propose d'étudier le champ dans l'entrefer. On considère un électro-aimant à pièces plates. On appelle I le courant circulant dans le bobinage, l la longueur du circuit magnétique et e celle de l'entrefer :



Théorème d'ampère $\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \Sigma I \rightarrow H_f \ell + H_e e = NI \Leftrightarrow$ hypothèse (1)

$$\left. \begin{array}{l} \text{Dans l'entrefer : } B_e = \mu_0 H_e \\ \text{Dans le fer : } B_f = \mu_0 \mu_r H_f \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{B_g}{\mu_0 \mu_r} \ell + \frac{B_e}{\mu_0} e = NI$$

$$\text{or } \phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = BS = \text{cte} \Leftrightarrow \text{hypothèse (2)} \Rightarrow B_f S_f = B_e S_e$$

Si l'épaisseur de l'entrefer est petite, la section de l'entrefer reste un tube de flux pour B . Cette surface étant ici la même que celle du circuit magnétique, on a par conséquent $B_f = B_e$

$$\Rightarrow \left(\frac{\ell}{\mu_0 \mu_r} + \frac{e}{\mu_0} \right) B = NI \Rightarrow B = \frac{NI}{\left(\frac{\ell}{\mu_0 \mu_r} + \frac{e}{\mu_0} \right)}$$

Remarques :

Le calcul est fait avec des hypothèses simplificatrices. L'hypothèse (1) suppose $\vec{H} \parallel \vec{\ell}$, $\vec{B} \parallel \vec{S}$ ce qui est discutable aux coudes de l'électroaimant. L'hypothèse (2) $\phi = \text{cte}$ n'est valable que si les fuites magnétiques sont négligeables. On suppose aussi que la section de l'entrefer reste un tube de flux pour B ce qui est discutable si l'épaisseur est trop grande.

Il faut remarquer que dans l'expression $B_f = \mu_0 \mu_r H_f$, μ_r n'est pas constant mais dépend de l'excitation H .

Application numérique :

Fleury Mathieu p. 325

Supposons $l = 1 \text{ m}$, $e = 3 \text{ mm}$, $\mu_r = 1000$ et calculons la force magnétomotrice NI nécessaire pour réaliser dans l'entrefer un champ magnétique égale à un Tesla :

$$NI = \frac{B}{\mu_0} \left(\frac{\ell}{\mu_r} + \frac{e}{\mu_0} \right) = \frac{1}{4\pi 10^{-7}} \left(\frac{1}{1000} + 3 \cdot 10^{-3} \right) \approx 3200 \text{ A.tours}$$

S'il n'y avait pas d'entrefer, le terme en e disparaissant de la formule, il suffirait de $NI = 795$ A.tours \Rightarrow un entrefer, même peu large, entraîne un accroissement très important de la force magnétomotrice nécessaire pour réaliser un champ magnétique donné.

4.2 Manipulation

On se propose de vérifier la relation $B = \mu_0 NI / e$ si e

$\gg \ell / \mu_r$

Cette vérification peut se faire sur le gros électroaimant gris ($N \cong 1200$) ou sur un électroaimant réalisé à l'aide d'une carcasse de transformateur Leybold avec deux bobines de 500 spires en série (attention aux courants qu'elles peuvent supporter !). La deuxième solution est préférable car on peut alors comparer la valeur de la pente mesurée au facteur $\mu_0 N / e$. Une fois l'électroaimant choisi, on peut vérifier la relation à e ou I variable ; la première solution est plus longue (il faut monter et démonter l'entrefer) et risquée pour la sonde de mesure de B (on peut lui dire adieu si les pièces polaires sont mal fixées !). La deuxième est plus rapide mais c'est l'ampèremètre qu'il faut surveiller (ne pas dépasser le courant maximal admissible par l'appareil). On conseille plutôt la deuxième solution ; on trace alors la courbe $B = f(I)$ à e fixé. Réalisez une série de mesures avec un entrefer de 1,5 - 2 cm. Pour mesurer B , utilisez une sonde à effet Hall. On peut aussi utiliser le fluxmètre électronique car comme ici les champs sont forts, on peut utiliser un produit RC assez grand ($R = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ par exemple) \rightarrow les dérives du montage ne sont pas très gênantes.

I (A)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6	7	8	9	10	11
B																		

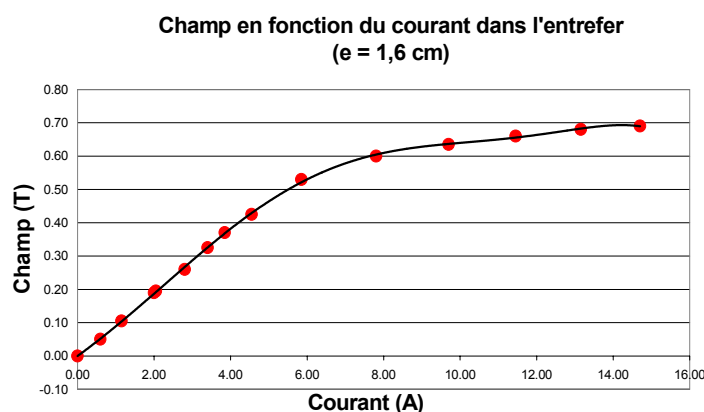
La pente de la droite donne une estimation de N .

Mesure de I :

Pour les faibles courants ($< 5\text{-}6 \text{ A}$), on peut utiliser un ampèremètre qu'on insère au point milieu du bobinage (demandez au professeur). Attention alors à **ne pas dépasser 10 A** ! Au-delà, il est préférable d'utiliser une pince ampèremétrique \rightarrow prendre la pince F 25 Chauvin Arnoux (réglez le zéro au préalable). Une autre solution consiste à mesurer avec un ohmmètre la résistance du bobinage global et mesurer la ddp à ses bornes lorsqu'il est alimenté. On a alors $I = U/R$. Cette solution n'est viable que si le bobinage ne chauffe pas.

Résultats :

Vous devez obtenir une courbe ayant l'allure suivante (à faire sous Excel)



Analyse :

Lorsque le courant n'est pas trop fort, μ_r est grand (cf. courbe de première aimantation M 19) et l'hypothèse $e \ll \ell / \mu_r$ est assez bien vérifiée ; on a donc une droite. Pour des intensités plus fortes, la valeur de μ_r diminue et l'hypothèse est de moins en moins bien vérifiée. En admettant qu'on puisse atteindre la saturation complète du matériaux ferromagnétique, la courbe $B = f(H)$ évoluerait avec une pente $\mu_0 \rightarrow$ pour vérifier $B = \mu_0 NI / e$, il faut une épaisseur e pas trop petite ($> \ell / \mu_r$) et pas trop grande (ϕ ct) !

Exploitation :

Faire une régression linéaire sur la première partie de la courbe ; en déduire une estimation du nombre de spires N du bobinage de l'électroaimant.

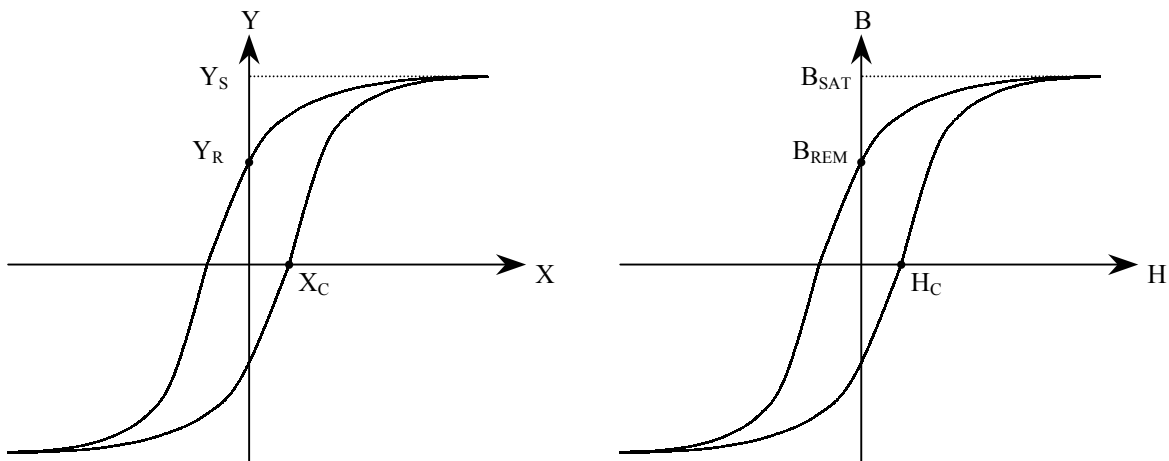
V MESURE D'UN CHAMP ALTERNATIF AU SEIN D'UN MATERIAU FERROMAGNETIQUE

5.1 Montage

cf. § 3.3.1 du montage M 18 (Milieux Magnétiques)

5.2 Manipulation

Augmentez progressivement la tension aux bornes du primaire ; visualisez les courbes d'hystérésis sur oscillo. Passez ensuite à $N_1 = 250$ spires (point milieu de la bobine). Comment évolue la courbe d'hystérésis pour une même valeur de V_1 ? Mesurez le champ B à saturation, le champ rémanent et l'excitation coercitive (cf. schéma et relations ci dessous).



$$\left. \begin{array}{l} \text{Champ B à saturation : } B_{\text{SAT}} \leftrightarrow Y_S \\ V_s = \frac{N_2 S}{R_2 C} B \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{B_{\text{SAT}} = \frac{R_2 C}{N_2 S} Y_S}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Champ rémanent : } B_{\text{REM}} \leftrightarrow Y_R \\ V_s = \frac{N_2 S}{R_2 C} B \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{B_{\text{REM}} = \frac{R_2 C}{N_2 S} Y_{\text{REM}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Excitation coercitive : } H_C \leftrightarrow X_C \\ V_1 = \frac{R_1 \ell}{N_1} H \end{array} \right\} \Rightarrow H_C = \frac{N_1}{R_1 \ell} X_C$$

Remarque :

Les tôles de transformateur sont faites avec des aciers au silicium (voir «Handbook» à «transformer steels permeability» ou BFR 4 p 183). Comparez B_{SAT} et H_C aux valeurs données pour des aciers moyens. Il ne faut pas s'attendre à des valeurs proches car on ne connaît pas la composition exacte des tôles de transformateur.

VI PRODUCTION DE CHAMPS TOURNANTS

Ce type de champ est largement mis à profit dans la réalisation des moteurs ; il semble donc important d'en présenter un bien que des mesures ne puissent être comparées à des valeurs théoriques.

Deux solutions sont possibles :

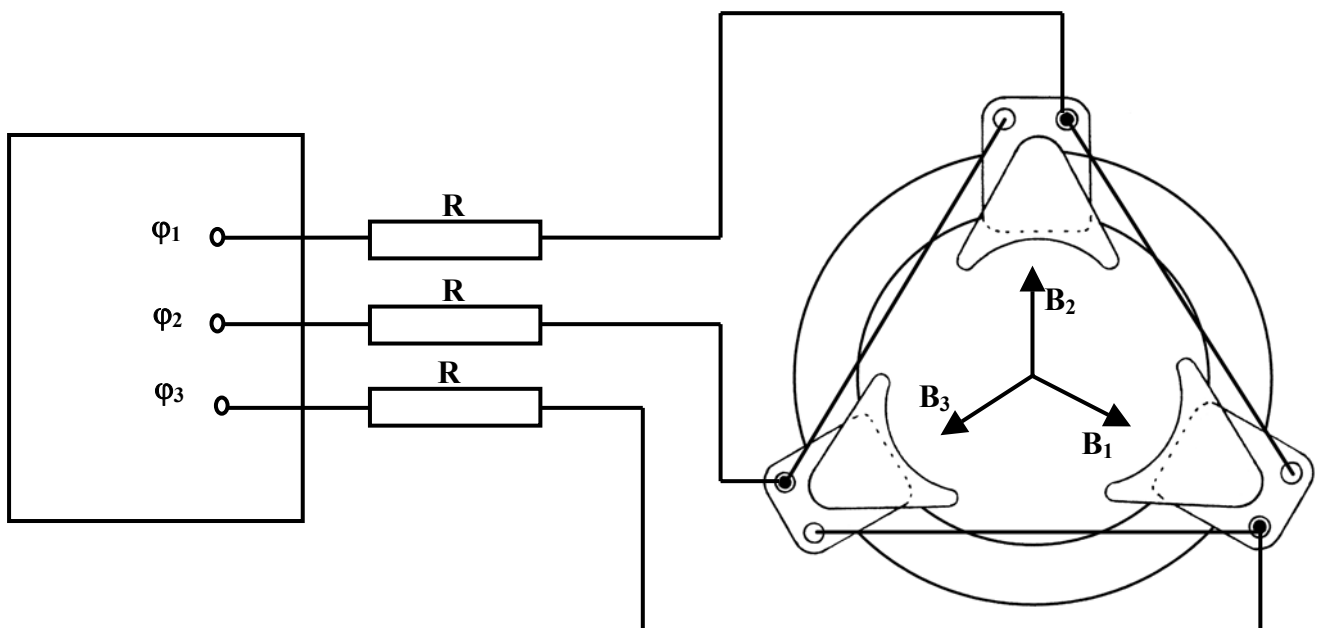
la mise en évidence d'un champ tournant et sa mesure. C'est la manipulation que l'on propose. On le produit à l'aide de la maquette de moteur Leybold que l'on démonte de son équerre support.

la production d'un tel champ avec le même moteur non démonté et son application à la réalisation de moteurs synchrones → se reporter au montage M 22 manips 3.1.3 ou 3.2 ou 4.2 ou 4.3 (la dernière est pour ceux qui n'ont pas peur !).

Manipulation :

Quaranta IV p. 100 et 102 (expérience 2) et 287.

Le mode d'alimentation est limité au niveau sécurité → **faire obligatoirement le montage avec le professeur !**



φ_1 , φ_2 , φ_3 : alimentation triphasée grise 50 V entre phases

R : rhéostat Supreix 11,5 Ω / 8,5 A. Ajustez leur valeur à 8 Ω exactement. **Ne pas les toucher** par la suite lorsqu'ils sont alimentés !

Moteur d'enseignement Leybold : le démonter de son équerre support ; monter les pièces polaires sur l'arrière de la couronne ferromagnétique.

Remarque :

Les bobines du stator ne peuvent supporter plus de 1,5 A \rightarrow les rhéostats servent à limiter ce courant (l'idéal serait d'avoir une alimentation triphasée variable !) . Vérifiez à l'ampèremètre sur une bobine qu'on ne dépasse pas le courant maximum (l'enlever par la suite car son impédance n'est pas négligeable).

Mise en évidence du champ créé :

Placez une boussole au centre de la couronne ferromagnétique ; alimentez le moteur \rightarrow l'aiguille de la boussole entre en rotation. Mesurez sa fréquence de rotation \rightarrow si la boussole tourne sans problèmes, cette fréquence vaut 50 Hz (si ce n'est pas le cas, changer de boussole). L'addition de trois champs de même amplitude à 120° les uns des autres donne donc un champ tournant à la fréquence du secteur.

Permutez le branchement entre deux phases \rightarrow la rotation s'effectue en sens inverse.

Cette expérience illustre le principe de fonctionnement des moteurs synchrones (se reporter à l'annexe sur les moteurs dans le montage sur les transducteurs pour plus d'explication).

Mesure :

Placez une sonde à effet Hall au centre du moteur à la place de la boussole ; envoyez le signal donné par le capteur sur un oscilloscope.

ANNEXE : PRINCIPE DE LA SONDE A EFFET HALL

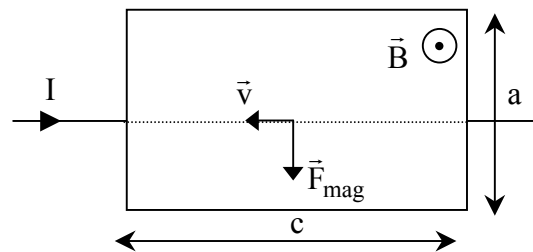
INTRODUCTION

On fait passer un courant constant dans un barreau contenant des porteurs de charge (e^- ou trou), lequel est soumis à un champ magnétique. Il apparaît alors une d.d.p. sur les côtés latéraux que l'on mesure par un voltmètre de très haute impédance d'entrée.

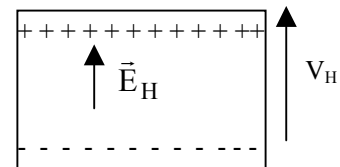
EFFET DU CHAMP MAGNETIQUE

On considère ici une conduction par e^- dans un barreau de dimensions a , b et c . Les électrons circulant dans le barreau sont soumis à la force :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{\text{mag}} &= q \vec{v} \wedge \vec{B} \\ &= -|e| \vec{v} \wedge \vec{B} \\ &= I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}\end{aligned}$$



Elle tend à dévier les porteurs qui s'accumulent sur la face latérale du barreau. Il se crée alors un champ électrique donc une force à laquelle vont être soumis tous les porteurs de charge du barreau :



$$\vec{F}_{e\ell} = q \vec{E}_H = N|e| \vec{E}_H$$

En régime permanent, les 2 forces se compensent : $\|\vec{F}_{\text{mag}}\| = \|\vec{F}_{e\ell}\|$

$$\|I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}\| = N|e| \|\vec{E}_H\| \Rightarrow I.c.B = N|e|. \frac{V_H}{a}$$

V_H se mesure avec un voltmètre à très haute impédance d'entrée pour qu'aucun courant latéral ne soit admis à circuler (à Rennes, prendre le Keithley 199).

Remarque :

S'il n'existe qu'un type de porteurs, N = concentration en porteurs de charges. On peut l'exprimer à partir de la densité de porteur n (nombre d' e^- / unité de volume). Si c est l'épaisseur du barreau, on a :

$$N = n abc$$

$$\Rightarrow I.c.B = n.a.B.c.|e| \frac{V_H}{a} \quad \text{d'où} \quad \boxed{V_H = \frac{IB}{nb|e|}}$$

Remarque :

S'il existe deux types de porteurs, la formule est plus compliquée car la mobilité des différents porteurs intervient (cf. montage semi-conducteur), mais les sondes utilisent des semi-conducteurs judicieusement dopés pour qu'à température ambiante, on n'ait à considérer qu'un seul type de porteurs.

De plus, comme V_H est inversement proportionnel à la concentration, l'effet Hall est plus grand dans le semi-conducteur que dans les métaux.