

H6. Effet Hall

1 But de l'expérience

Observation de l'effet Hall et mesure de la constante de Hall de quelques échantillons métalliques et semi-conducteurs.

2 Bases théoriques

Lorsqu'une densité de courant $j = I/S$ traverse un échantillon (métal ou semi-conducteur) immergé dans un champ magnétique homogène \vec{B} , perpendiculaire à l'échantillon (figure 1), une tension de Hall $V_H \propto j_x \cdot B_z \cdot b$ est générée et peut être mesurée entre les deux bords de l'échantillon. Nous définissons la constante de proportionnalité R_H comme $V_H = R_H j_x B_z b$. Ce phénomène est appelé l'effet Hall et R_H est la constante de Hall.

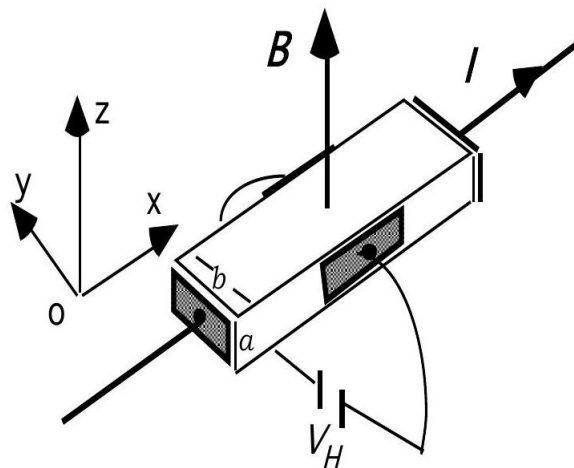


FIGURE 1 – Conducteur électrique de section $S = a \cdot b$ dans un champ d'induction \vec{B} .

Les phénomènes cinétiques qui apparaissent dans les solides sous l'action commune des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} sont dits galvanomagnétiques. L'effet Hall est l'un de ces phénomènes le plus connu. Les mesures effectuées par E.H. Hall en 1879 ont permis pour la première fois de déterminer le signe des porteurs de charge. Ce phénomène est aujourd'hui à la base de nombreuses applications pratiques, allant des mesures de champ magnétique aux capteurs de position et de mouvement.

2.1 La loi d'Ohm :

Considérons un conducteur avec des porteurs de charge de charge q , une densité de porteurs de charge N (nombre de charges par unité de volume) et une vitesse de dérive des charges v_x pour un courant I_x le long de la direction x positive. Il convient de noter que la vitesse de dérive est une vitesse moyenne de tous les porteurs de charge dans le volume du conducteur. Les charges individuelles peuvent se déplacer plus ou moins vite et dans des directions apparemment aléatoires, de sorte que la vitesse v_x représente le transport net des charges sur la longueur du conducteur sous l'effet d'une différence de tension appliquée.

Le courant total I_x est la densité de courant j_x multipliée par la section transversale du conducteur (ab) et j_x est aussi la vitesse de dérive multipliée par la densité de charge :

$$I_x = j_x ab = Nqv_x ab.$$

Lorsque le matériau obéit à la loi d'Ohm, le courant est directement proportionnel au champ appliqué sur la longueur du conducteur, ce qui peut s'écrire comme suit

$$j_x = \sigma E_x$$

où σ est la conductivité du matériau, qui est l'inverse de la résistivité ρ .

2.2 Effet Hall

Le conducteur est maintenant placé dans un champ magnétique le long de la direction z . Les charges constituant le courant subissent une force de Lorentz $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$. Pour la géométrie de la figure 1 avec v_x et B_z , la force de Lorentz s'exerce le long de la direction y et les charges sont donc déviées vers l'une ou l'autre des faces du matériau en fonction de leur signe. Cette accumulation de charges sur le côté du matériau entraînera un champ électrique transversal E_y , qui, en exercera à son tour une force $q\vec{E}$ sur les charges du courant dans la direction opposée à F_L . Un équilibre s'établit rapidement entre ces forces et, dans ces conditions, il s'ensuit que

$$E_y = v_x B_z.$$

Dans l'expérience, on mesure la différence de potentiel entre les deux faces de l'échantillon due à E_y , qui est appelée tension de Hall V_H :

$$V_H = -E_y b$$

avec b la largeur de l'échantillon. Avec les relations entre le courant et la vitesse, et entre E_y et B_z nous obtenons que

$$V_H = -\frac{1}{Nq} \frac{I_x B_z}{a}.$$

Le premier terme à droite est appelé coefficient de Hall :

$$R_H = \frac{1}{Nq}.$$

Pour les porteurs de charge positifs (négatifs), R_H est positif (négatif) et le signe de V_H détermine donc le signe des porteurs de charge.

Dans l'interprétation la plus simple, les porteurs de charge sont soit des électrons, soit l'absence d'électrons (trous). En supposant qu'il n'existe qu'un seul type de porteur de charge, et si la conductivité σ étant connue, la valeur de R_H peut être utilisée pour déterminer la mobilité μ des charges dans le conducteur :

$$\mu = R_H \sigma.$$

2.3 Au-delà de l'image du porteur de charge unique

Dans la plupart des matériaux réalistes, le courant est formé par une combinaison d'électrons et de trous. Dans ce cas, une relation plus complexe entre le coefficient de Hall et la densité de charge peut être trouvée, ce qui dépasse le cadre de cette expérience. Une explication approfondie nécessitera une description mécanique quantique utilisant la nature ondulatoire de l'électron dans le solide. Ceci sera développé dans les cours de physique du solide en troisième année. Il s'ensuivra également que les trous ne sont pas l'absence d'électrons, mais des électrons réels qui se déplaceront dans la direction opposée sous l'effet d'un champ appliqué, en raison de l'influence du réseau cristallin périodique. De même, les électrons peuvent se comporter comme s'ils avaient une masse négative, ou même comme des particules sans masse, dans les solides.

La distinction entre les métaux et les semi-conducteurs se fait ici sur la base de leur conductivité, les métaux étant beaucoup plus conducteurs. À très basse température ($\ll 100$ K) la conductivité d'un métal augmente, tandis que celle d'un semi-conducteur diminue rapidement et finit par devenir isolante. Une description plus formelle nécessite à nouveau l'inclusion de la nature ondulatoire de l'électron et le concept de bandes électroniques dans un cristal, qui seront discutés dans les cours de physique du solide.

Quelques valeurs numériques du coefficient de Hall R_H de quelques métaux et semi-conducteurs sont données dans Tab. 1.

Matériau	R_H [10^{-10} m ³ /C]	Nombre de porteurs de charge [10^{29} m ⁻³]	Densité atomique [10^{29} m ⁻³]
Ag	-0.85	0.75	0.59
Au	-0.72	0.87	0.48
Bi	-5400.0	1.210^{-4}	0.28
Cu	-0.540	1.1	0.85
Fe	+0.228	0.06	0.84
Zn	+0.33	1.9	0.64
Si dopé au As typiquement	à temp. ambiante $6 \cdot 10^7$ à $6 \cdot 10^4(*)$	10^{-8} à 10^{-5}	0.50

TABLE 1 – Coefficient de de Hall R_H , nombre de porteurs de charge et densité atomique pour quelques matériaux. (*) Dans les semi-conducteurs, la valeur et le signe de R_H dépendent fortement de la densité des dopants (“impuretés”), R_H peut même être nul si $N_p \mu_p^2 = N_e \mu_e^2$

3 Montage expérimental

3.1 Circuit d'alimentation de l'électroaimant

Le poste de travail est équipé d'un électroaimant alimenté selon le schéma de la Figure 2. L'induction magnétique B qui règne dans l'entrefer de l'électroaimant peut être mesurée à l'aide d'un Teslamètre (étalonnage).

Ferromagnétisme (rappel, cf TP hystérèse magnétique) : Lors du passage d'un courant I dans une bobine (solénoïde) de longueur L ayant un nombre de spires N , il prend naissance à l'intérieur un champ magnétique homogène d'intensité $H = (N \cdot I)/L$ correspondant au champ d'induction $B_0 = \mu_0 H$. Si l'on introduit dans la bobine un noyau de fer, on constate une forte augmentation du champ d'induction magnétique. Au champ H de la bobine s'est ajouté un champ supplémentaire H' dû à la magnétisation du barreau de fer.

L'induction magnétique totale est alors donnée par $B = \mu_0 (H + H')$. En supposant une proportionnalité entre H et H' , on peut réécrire $B = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu H = \mu B_0$ avec $\mu = (1 + \chi)$, où μ est la perméabilité magnétique relative au vide du matériaux et χ la susceptibilité magnétique de la substance. Pour les substances ferromagnétiques, on constate de valeurs de μ très élevées (jusqu'à 10^4) mais le champ H' n'est plus proportionnel au champ H qui le produit. Pour des grandes valeurs de H , H' atteint une valeur limite (saturation). D'autre part, lorsqu'on diminue l'intensité de H à zéro, il reste un champ $H' \neq 0$ (rémanence). Il est nécessaire d'appliquer un champ H de sens contraire (champ coercitif) pour faire disparaître la rémanence (phénomène d'hystérèse).

Mesure de la tension de Hall : La tension de Hall $V_H = E_H \cdot b$, avec b = largeur de la plaquette, devrait en toute rigueur se mesurer par une méthode d'opposition. Toutefois, pour des raisons de commodité, nous utiliserons un microvoltmètre de très grande résistance, ce qui conduit à des résultats tout à fait satisfaisants (erreurs supplémentaires commises inférieures à 0.1%). Le schéma de la Figure 3 montre la disposition des appareils utilisés.

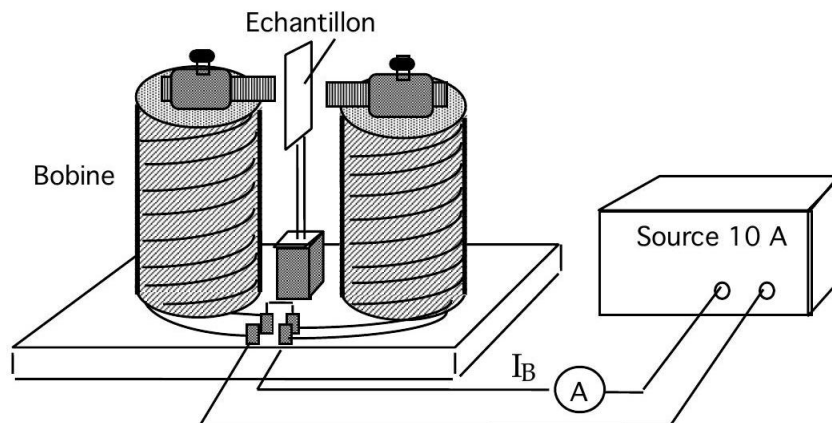


FIGURE 2 – Dispositif expérimental.

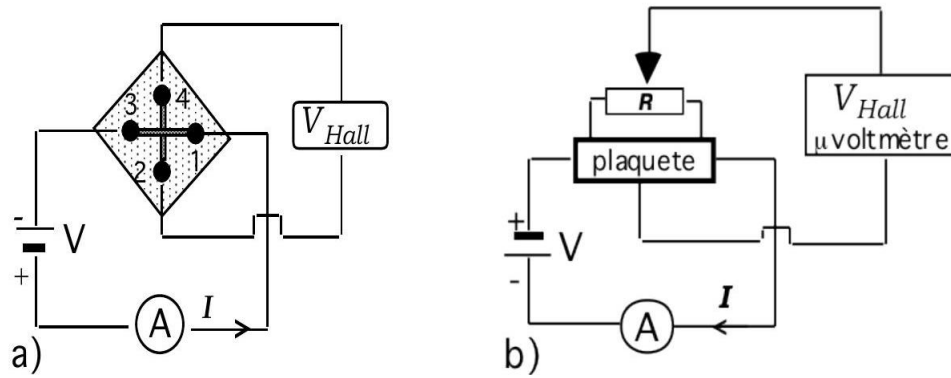


FIGURE 3 – Schémas des montages électriques : en a) des échantillons semi-conducteurs à 4 contacts et en b) des plaquettes à 5 contacts.

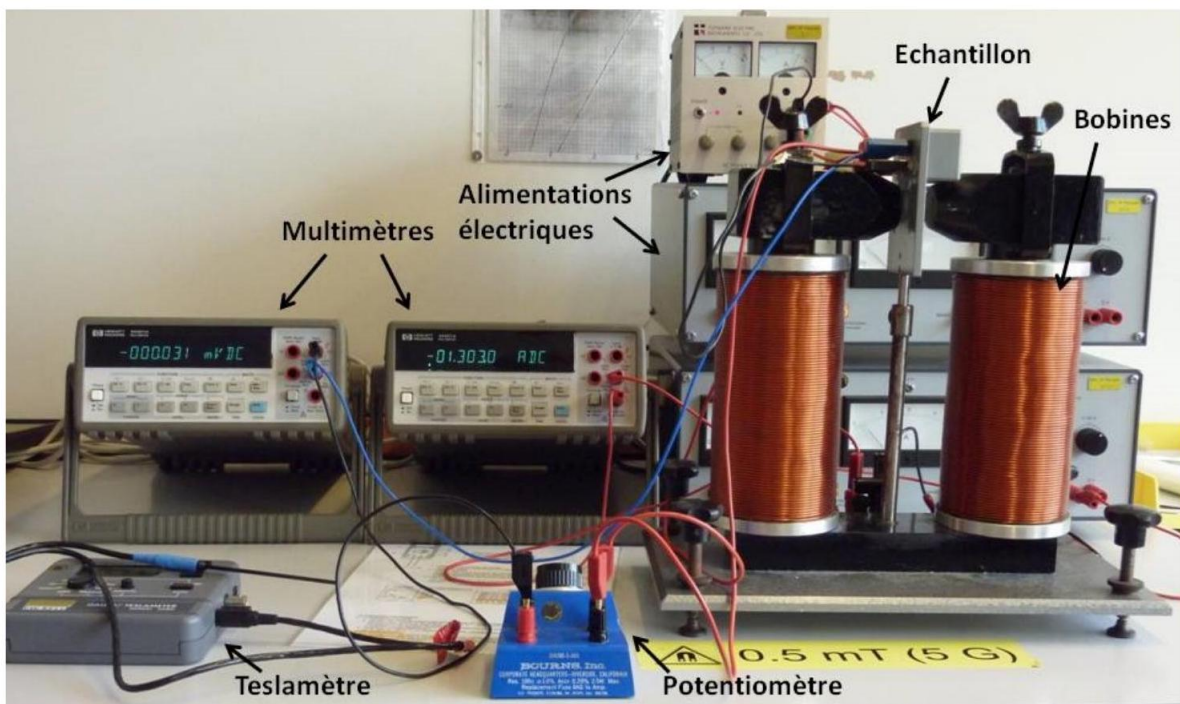


FIGURE 4 – Image du montage expérimental.

4 Travail suggéré

4.1 Échantillon à 4 contacts (semi-conducteurs)

Pour ces mesures, on emploie des échantillons de InP fortement dopés. Les échantillons sont préparés en couche mince (1-2 microns) et présentent une géométrie en forme de croix idéale pour ce type des mesures (voir Fig. 3b). En effet, vu la configuration symétrique de l'échantillon, à champ B^+ fixe, on peut effectuer 4 mesures différentes de V_H obtenues par simple permutation cyclique sur les contacts 1234. Si on inverse le champ B (champ B^-), on obtient 4 mesures en plus. Une image du montage est donnée à la Figure 4.

1. Mesures de Hall sur InP dopé au Si (type n). Réaliser le montage de la Figure 3a, par exemple avec I entre 1 et 3 et la tension de Hall entre 2 et 4 (configuration $I_{13}V_{24}$) et

Échantillon	Épaisseur a	Courant de travail	Courant maximal
InP : Si	$1\mu\text{m}$	1 mA	1 mA
ln P : Si	$2\mu\text{m}$	1 mA	1 mA
Ag	$1.9\mu\text{m}$	2 A	3 A
Cu	$1.6\mu\text{m}$	2 A	3 A
Bi	3 mm	2 A	3 A
W	$0.6\mu\text{m}$	200 mA	300 mA
ln ₂ O ₃ : SnO ₂	$0.15\mu\text{m}$	100 mA	150 mA
Bi	$0.55\mu\text{m}$	30 mA	40 mA

TABLE 2 – Épaisseurs et courants admis pour chacun des échantillons.

fixer le courant à 1 mA.

- Pour $B = 0$, mesurer les tensions résiduelles V_{ij} pour les 4 configurations possibles. Déterminer l'origine de la tension résiduelle.
 - Pour une configuration fixe, mesurez la tension V_H en fonction du champ B^+ .
 - Inversez le champ et faites les mesures de V_H en fonction du champ B^- .
2. Fixer maintenant un champ magnétique fixe (environ 400mT, ceci correspond à environ 4 A dans les bobines) et mesurer V_H en fonction du courant I dans l'échantillon. Faites varier le courant entre -1 et 1 mA.
 3. Calculer R_H et la densité de porteurs de charge N pour chacun des cas.
 4. Comment se comporte la tension de Hall vis-à-vis de l'épaisseur de l'échantillon a ?

4.2 Échantillons à 5 contacts (métalliques)

Les échantillons montés dans une configuration à 5 contacts permettent de s'affranchir de la tension résiduelle qui est mesurée à B nul quand un courant parcourt l'échantillon. Pour cela, on règle le potentiomètre qui est branché en parallèle avec la plaquette (voir Fig.3b). Cela permet entre-autres de mesurer avec la même installation des échantillons délivrant une tension de Hall plus ou moins importante.

Vous disposez actuellement de six échantillons avec cette configuration. La marche à suivre des mesures est la suivante :

1. Choisir un échantillon. Effectuer le montage de la Figure 3b). Établir le courant de travail dans l'échantillon (voir Tab.2). En l'absence d'induction B , régler le potentiomètre pour se débarrasser de la tension résiduelle. Déterminer comment ce système fonctionne et l'origine de cette tension. Pour tous échantillons sauf celui de W :
 - Fixer le courant de travail dans l'échantillon et mesurer V_H en fonction du champ d'induction B . Faites varier B de B^- à B^+ .
 - Fixer le champ d'induction B et mesurez V_H en fonction du courant I dans l'échantillon. Vous pouvez augmenter le courant jusqu'à la valeur maximale admise dans le Tab.1. ATTENTION : Ne pas laisser l'échantillon avec le courant maximal plus que le temps de prendre la mesure, i.e. quelques secondes !

2. Choisir un nouvel échantillon et répéter 1). Mesurer le plus grand nombre d'échantillons.
3. Calculer R_H et N pour chacune des mesures effectuées, à partir de régressions linéaires.
4. Conclure sur la spécificité de chacun des matériaux.

Quelques remarques concernant la bonne exécution des mesures :

- Dans ce TP, il nous faut repérer des grandeurs vectorielles avec des instruments de mesure qui ne peuvent mesurer que la norme de ladite grandeur. Il convient pour cela d'établir un repère cartésien au début de l'expérience (voir Fig.1) et de s'y conformer tout au long de l'expérience. Par exemple, on appellera $B > 0$ la norme du vecteur de champ B orienté suivant z et $-B < 0$ celle du vecteur de même norme mais orienté à l'opposé de z . Définir les mêmes quantités pour le vecteur densité de courant, ainsi que le vecteur du champ électrique de Hall.
- Ne pas dépasser le courant maximal admis pour un échantillon, au risque de le brûler ! Par ailleurs, ne pas laisser de courant circulant dans les bobines, ni dans l'échantillon si vous n'êtes pas en période de mesure !

4.3 Étalonnage du champ d'induction B (bonus)

A l'aide de la sonde Hall (Teslamètre), effectuer une série de mesures de $B = f(I_B)$ pour $0 \leq I_B \leq 6$ A. Relevez la courbe suivant le chemin suivant : $I_B^{\text{Max}} \rightarrow 0 \rightarrow -I_B^{\text{Max}} \rightarrow 0 \rightarrow I_B^{\text{Max}}$. Observer les effets de saturation et rémanence (hystérèse). En déduire le domaine "utile" de B . La courbe de calibration $B = f(I_B)$ obtenue, que pouvez-vous conclure concernant l'incertitude sur B à un courant I_B donné ?

Utilisation du Teslamètre :

Le teslamètre se trouve dans la boîte noire située à côté de l'installation. Il doit être mis à zéro avant de commencer les mesures. Pour ce faire, il faut isoler la sonde de tout champ magnétique. Placer l'extrémité de la sonde dans le cylindre métallique prévu à cet effet. Puis, mettre le commutateur sur *Zero*, et maintenir le bouton *Hold Reset* appuyé, jusqu'à ce que l'affichage indique 0. Remettre ensuite le commutateur sur *Measure*. Lors de la mesure d'un champ magnétique, s'assurer que la sonde est perpendiculaire au champ. Attention, le teslamètre est un appareil de mesure fragile.