

# TP : Physique du Solide - Effet Hall

Boris Alexandre Baudel - Master de Physique - Université du Maine

Decembre 2023

## 1 Introduction

L'effet Hall est un phénomène fondamental dans les matériaux conducteurs et semi-conducteurs, où la présence d'un champ magnétique perpendiculaire au courant entraîne une force transverse qui dévie les porteurs de charge. Cette déviation crée une tension, connue sous le nom de tension de Hall, et la compréhension de cet effet est cruciale pour le développement des technologies de semi-conducteurs, en particulier pour déterminer les propriétés telles que la concentration des porteurs de charge et le type de dopage dans un matériau.

## 2 Phénomène physique

Dans un matériau parcouru par un courant  $I$  et soumis à un champ magnétique  $B$  perpendiculaire au plan de conduction électrique, les porteurs de charge subissent une force de Lorentz transverse. Cette force dévie les électrons ou trous, conduisant à l'accumulation de charges sur les faces latérales du solide, illustrée par l'apparition d'une tension  $U_H$  appelée tension Hall. La résolution des équations de transport nous conduit à la relation suivante :

$$U_H = \frac{IB_z}{nt} \quad (1)$$

où  $I$  est le courant,  $B_z$  le champ magnétique perpendiculaire,  $n$  la concentration des porteurs libres et  $t = 1 \text{ mm}$  l'épaisseur du matériau.

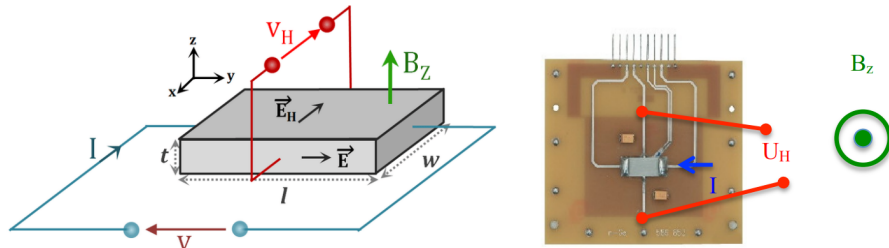


FIGURE 1 – Principe du montage Hall et photo de l'échantillon de Ge avec ses contacts.

Nous voyons que si  $U_H$ ,  $B_z$ ,  $I$  et  $t$  sont connus (ou mesurés), nous pouvons déduire la concentration de porteurs libres  $n$ . Cette méthode est donc très puissante pour connaître par l'exemple le niveau de dopage d'un semiconducteur. Cette technique est très répandue dans l'industrie des semiconducteurs. Dans ce TP, nous nous donnons donc comme objectif de déterminer cette concentration pour un semiconducteur au Germanium dopé n.

## 3 Expérimentation

### 3.1 Matériel et Méthodes

Recommandations : vous allez utiliser des générateurs pouvant délivrer de forts courants (5A). Aussi, avant toute manipulation, et une fois les montages réalisés, vous devez consulter l'enseignant Forts courants (5 A)

Vous disposez d'un ensemble de bobine (électro-aimant) qui alimenté vous permettent de générer un champ magnétique variable perpendiculaire à la plaquette de germanium.

### 3.2 Procédure Expérimentale

1. Réglage du courant transversal  $I$  et compensation de la tension de Hall.
2. Variation de  $I$ ,  $B$ , et  $\theta$  pour mesurer les changements correspondants dans  $U_H$ .

## 4 L'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall

Description détaillée de l'appareil utilisé pour l'étude de l'effet Hall, y compris les spécifications techniques et les dispositions pour les mesures.

Nous avons utilisé un ensemble de bobine pour générer un champ magnétique variable perpendiculaire à la plaquette de germanium. La tension de Hall a été mesurée en fonction de différents paramètres tels que la densité de flux magnétique  $B$ , la température  $\theta$  et le courant transversal  $I$ .

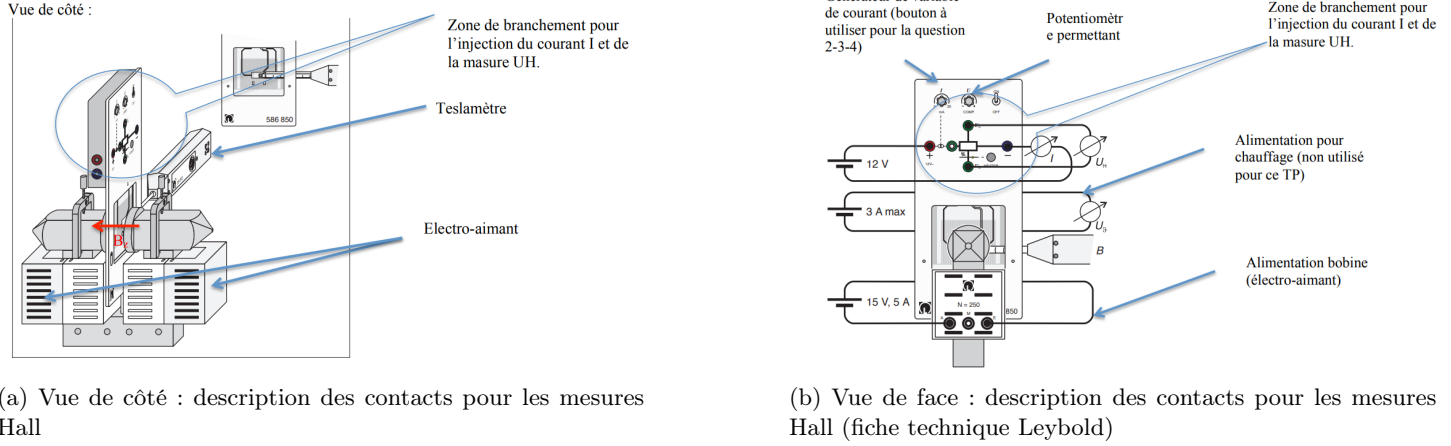
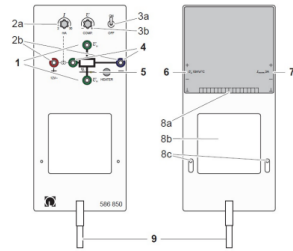


FIGURE 2 – Figure 2 : Schéma du montage avec l'électro-aimant. (a) Vue de côté. (b) Vue de face

### Fiche technique Leybold

1. Sortie pour la tension de Hall
2. Source de courant  
(2a) Bouton de réglage du courant transversal, (2b) entrée pour la tension d'alimentation
3. Compensation  
(3a) Interrupteur Marche/Arrêt, (3b) bouton de réglage de la compensation
4. Sortie pour la chute de tension sur le cristal de germanium
5. Bouton-poussoir pour le chauffage, avec LED
6. Sortie de mesure de la température
7. Entrée du courant pour le chauffage et l'électronique
8. Logement pour les plaques à circuit imprimé (8a) Douille multiple, (8b) fenêtre, (8c) perçages
9. Tige, avec butée



(a) Fiche technique



(b) Capteurs du champ magnétique

FIGURE 3 – Figure 2 : Schéma du montage avec l'électro-aimant et capteur

## 5 Travail à réaliser

Faire un rappel théorique de l'effet Hall. Vous démontrerez notamment la relation (1) présentée précédemment. Montrer que la mesure Hall ne peut a priori distinguer la nature « p » ou « n » du dopage.

Nous considérons un conducteur plat de largeur  $w$  et d'épaisseur  $t$ , parcouru par un courant  $I$  et placé dans un champ magnétique perpendiculaire  $B_z$ .

### 5.1 Démonstration

La force de Lorentz sur un porteur de charge dans un champ magnétique est donnée par :

$$F = q(E + v \times B) \quad (2)$$

où  $q$  est la charge du porteur,  $E$  est le champ électrique,  $v$  est la vitesse des porteurs de charge et  $B$  est le champ magnétique.

Le courant électrique  $I$  peut être exprimé comme :

$$I = nqv_d A \quad (3)$$

où  $n$  est la densité des porteurs de charge,  $q$  est la charge du porteur,  $v_d$  est la vitesse de dérive et  $A$  est la section transversale du conducteur.

En régime stationnaire, la force électrique due au champ électrique de Hall  $E_H$  s'équilibre avec la force magnétique sur les porteurs de charge :

$$qE_H = qv_d B_z \quad (4)$$

D'où, en isolant  $E_H$  :

$$E_H = v_d B_z \quad (5)$$

La tension Hall  $U_H$  est le produit du champ électrique de Hall et de la distance entre les côtés du conducteur où la tension est mesurée :

$$U_H = E_H w \quad (6)$$

En remplaçant  $v_d$  par  $\frac{I}{nqA}$  dans l'expression de  $U_H$ , nous obtenons :

$$U_H = \frac{I}{nqA} B_z t \quad (7)$$

Si nous considérons que  $A = t^2$ , alors :

$$U_H = \frac{I}{nqt^2} B_z t \quad (8)$$

En simplifiant par  $t$ , nous obtenons finalement :

$$U_H = \frac{IB_z}{nqt} \quad (9)$$

En introduisant la constante de Hall  $R_H = \frac{1}{nq}$ , l'équation finale peut être écrite comme :

$$U_H = R_H \frac{IB_z}{t} \quad (10)$$

Cette relation montre que la tension Hall  $U_H$  est directement proportionnelle au produit du courant  $I$  et du champ magnétique  $B_z$ , et inversement proportionnelle au produit de la concentration des porteurs de charge  $n$ , de la charge élémentaire  $q$ , et de l'épaisseur du matériau  $t$ .

## 5.2 Etallonnage

A l'aide de la sonde magnétique (Teslamètre) mise à votre disposition, tracer l'amplitude du champ magnétique  $B_z$  en fonction du courant injecté dans les bobines. Vous ferez un rappel du fonctionnement d'un teslamètre.

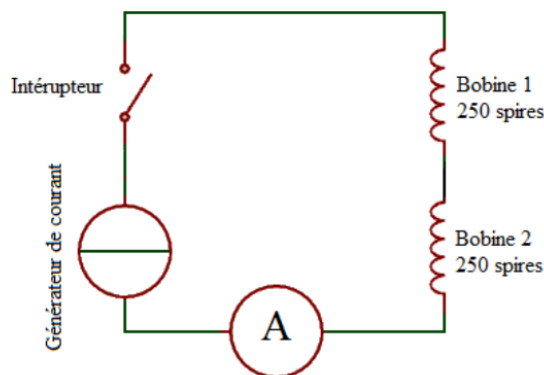


FIGURE 4 – Schéma électrique

2-3-1) Sur le dispositif Leybold, alimenter la plaquette de germanium avec le générateur de tension continue avec une tension de 6V. Respectez les polarités. Vous disposerez un ampèremètre pour la mesure de  $I$

2-3-2) Ajuster la tension de compensation Hall pour que la mesure  $U_H$  donne une valeur nulle quand le champ  $B_z$  est nul (correction de tension de contact). Remarque : merci de discuter l'origine possible des tensions parasites de contact.

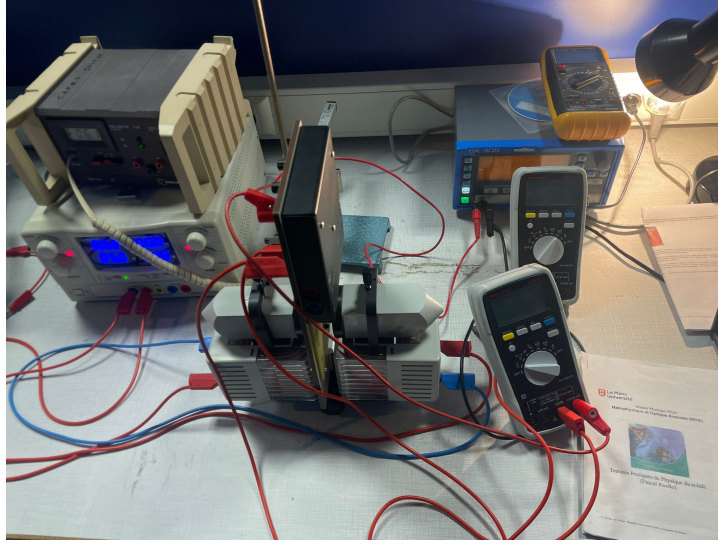


FIGURE 5 – Principe du montage Hall

2-3-3) Tracer en fonction du champ  $B_z$  la valeur de la tension. Attention de ne pas dépasser 5A dans les bobines. Vérifier la linéarité de la relation Eq. 1. En déduire la constante Hall et la concentration en porteur  $n$ .

Basé sur les graphiques fournis, nous allons mener une analyse pour vérifier la linéarité de la relation de l'effet Hall donnée par l'Équation 1, qui est

$$U_H = R_H \frac{IB_z}{t} \quad (11)$$

où  $U_H$  est la tension de Hall,  $R_H$  est le coefficient de Hall,  $I$  est le courant traversant l'échantillon,  $B_z$  est le champ magnétique perpendiculaire au courant, et  $t$  est l'épaisseur de l'échantillon. Pour vérifier la linéarité de cette relation et déterminer la constante de Hall  $R_H$  et la concentration en porteurs  $n$ , nous allons effectuer les étapes suivantes :

1. Tracer la tension de Hall  $U_H$  en fonction du champ magnétique  $B_z$  :
  - Veiller à ce que le courant à travers les bobines ne dépasse pas 5A.
  - Le comportement attendu est une relation linéaire entre  $U_H$  et  $B_z$  lorsque le courant  $I$  est maintenu constant.
2. Tracer la tension de Hall  $U_H$  en fonction du courant  $I$  :
  - Utiliser la source de courant interne (référéncée comme bouton 2a dans la Figure 3b).
  - Assurer que le courant à travers l'échantillon ne dépasse pas 50mA.
  - Le comportement attendu est une relation linéaire entre  $U_H$  et  $I$  lorsque le champ magnétique  $B_z$  est maintenu constant.

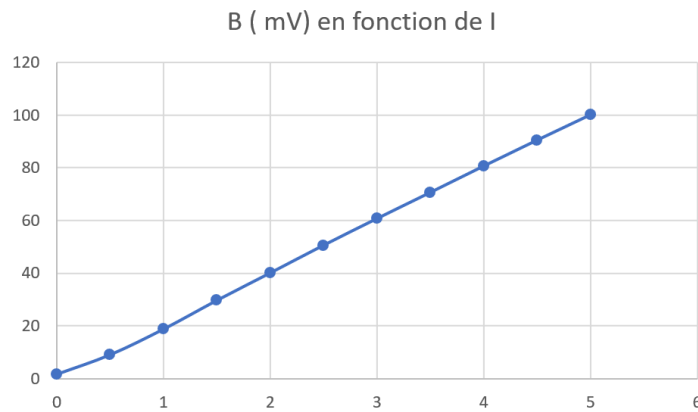


FIGURE 6 – Calibrage entre le champs magnétique et le courant

Pour la première courbe de paramétrage, on obtient une constante de Hall de 0,00522 m<sup>3</sup>/C À partir de la pente de la droite ajustée, nous avons calculé la constante de Hall de 0,00802 m<sup>3</sup>/C. En utilisant cette constante de Hall, nous avons déterminé la concentration des porteurs de charge  $n$ , qui est de l'ordre de  $7.79 \times 10^{19}$  porteurs.

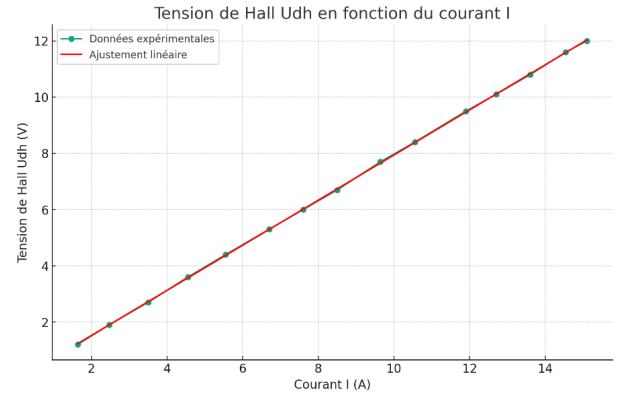
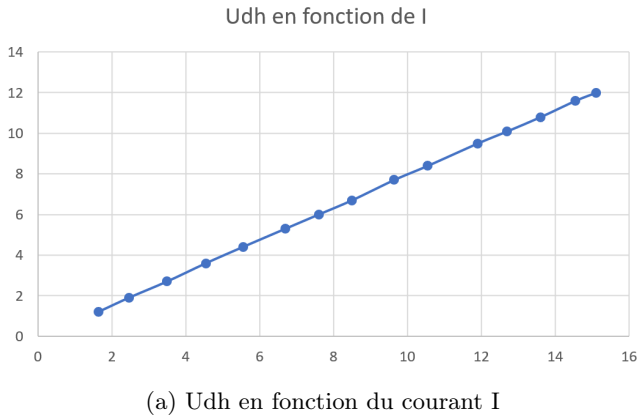


FIGURE 7 – Tension de Hall en fonction du courant et linéarisation

Si l'on compare avec les deux méthodes, on obtient les deux courbes suivantes pour les porteurs de charges. On observe un écart de 3-4 entre les deux valeurs. En effet, il y a des problèmes sur l'offset dans le matériel et dans le système de mesure. On peut observer dans la figure 8, le nombre de porteurs avec les deux méthodes. Il s'agit du bon ordre de grandeur mais il y a un écart de mesure.

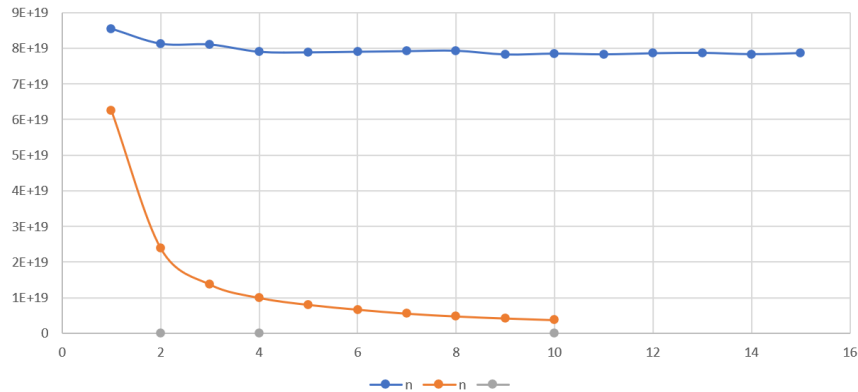


FIGURE 8 – Résultats du nombre de porteurs avec les deux méthodes

## 6 Conclusion

L'expérience a confirmé la linéarité de la relation de l'effet Hall, permettant de calculer avec précision la constante de Hall et, par conséquent, la concentration des porteurs de charge. Malgré certaines erreurs entre les méthodes utilisées pour déterminer la concentration des porteurs, la méthode avec le champ magnétique constant s'est révélée la plus fiable. Cette analyse a permis de mieux comprendre les caractéristiques du germanium dopé et a souligné l'importance de techniques de mesure précises pour l'industrie des semi-conducteurs.

## 7 Annexe

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from scipy.stats import linregress
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
6 # Données fournies
7 data_Udh_I = pd.DataFrame({
8     'I': [1.64, 2.47, 3.5, 4.55, 5.55, 6.7, 7.6, 8.5, 9.64, 10.55, 11.9, 12.7, 13.6, 14.54, 15.1],
9     'Udh': [1.2, 1.9, 2.7, 3.6, 4.4, 5.3, 6, 6.7, 7.7, 8.4, 9.5, 10.1, 10.8, 11.6, 12],
10     'Bz_mT': 100, # champ magnétique constant en milliTesla
11 })
12
```

```

13 # Conversion de Bz en Tesla
14 data_Udh_I['Bz'] = data_Udh_I['Bz_mT'] * 1e-3
15
16 # Calculer la pente (constante de Hall RH) et l'ordonnée l'origine (intercept)
17 slope, intercept, r_value, p_value, std_err = linregress(data_Udh_I['I'], data_Udh_I['Udh'])
18
19 # Calcul de RH partir de la pente, et de n partir de RH
20 # On sait que  $RH = Udh / (I * Bz * t)$ 
21 # Donc  $RH = \text{pente} / (Bz * t)$ 
22 # et  $n = 1 / (q * RH)$ 
23 # avec  $q = \text{charge de l'électron} = 1.6e-19 \text{ C}$  et  $t = \text{paisseur du matériau} = 1e-3 \text{ m}$ 
24
25 q = 1.6e-19 # Charge de l'électron en Coulombs
26 t = 1e-3 # paisseur du matériau en mètres
27 Bz = data_Udh_I['Bz'].iloc[0] # Champ magnétique constant en Tesla
28
29 # Calcul de la constante de Hall RH
30 RH = slope / (Bz * t)
31
32 # Calcul de la concentration en porteurs n
33 n = 1 / (q * RH)
34
35 # Afficher les résultats
36 results = {
37     'RH (m3/C)': RH,
38     'n (porteurs/m3)': n,
39     'Coefficient de corrélation R2': r_value**2
40 }
41
42 # Tracer la tension de Hall UH en fonction du courant I
43 plt.figure(figsize=(10, 6))
44 plt.plot(data_Udh_I['I'], data_Udh_I['Udh'], 'o-', label='Données expérimentales')
45 plt.plot(data_Udh_I['I'], intercept + slope * data_Udh_I['I'], 'r', label='Ajustement linéaire')
46 plt.xlabel('Courant I (A)')
47 plt.ylabel('Tension de Hall Udh (V)')
48 plt.title('Tension de Hall Udh en fonction du courant I')
49 plt.legend()
50 plt.grid(True)
51 plt.show()
52
53 results

```