



ÉCOLE CENTRALE CASABLANCA

RAPPORT DE FORMATION EXPERIMENTALE

EFFET HALL



Réalisé par :
OUAHCHI FIRDAWS
OUAZZANI CHAHDI NADA
SORHO ZANA LACINA
TOURE NAGNAN ABRAHAM KARIM

Encadrant :
M. SIBARI ANASS

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement tous ceux qui ont joué un rôle clé dans la réalisation de notre projet expérimental. Nous tenons à remercier chaleureusement M. DAHI Khalid pour son rôle crucial en tant que responsable de ce projet. Sa contribution a enrichi notre compréhension théorique et nous a offert l'opportunité de mettre ces connaissances en pratique de manière concrète.

Notre gratitude s'étend à M. SIBARI Anass, pour son encadrement constant et ses conseils, et à M. BELHBOUB Anouar, pour son accompagnement et son analyse perspicace tout au long du projet. Leur expertise a été essentielle à notre réussite.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à M. DAGHOURI Abdelaziz, technicien du Fablab, pour son aide inestimable, son expertise et le temps qu'il nous a consacré. Grâce à son soutien, nous avons réussi à surmonter de nombreuses difficultés et à mener à terme notre projet expérimental avec succès.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'École Centrale Casablanca, incluant ses dirigeants, son personnel et ses enseignants, pour avoir enrichi notre formation avec des expériences pratiques significatives. Leur engagement constant en faveur de la qualité de l'enseignement a été essentiel à notre épanouissement académique et professionnel.

Sommaire

1 Résumé	4
2 Introduction	5
3 Motivation	5
4 Méthodologie et organisation du travail	6
5 Partie théorique	7
5.1 Théorie de l'effet Hall	7
5.2 Modèle de Drude	7
5.2.1 Hypothèses du modèle	8
5.2.2 Expression de la constante et de la tension de Hall	8
5.2.3 Limites du Modèle de Drude	10
5.3 Modèle de bande éléctronique	11
5.3.1 Hypothèses du modèle	11
5.3.2 Expression de la constante et de la tension de Hall	11
6 Partie expérimentale	13
6.1 Description du matériel utilisé	13
6.2 Première approche expérimentale	13
6.2.1 Description du montage	13
6.2.2 Limitations	14
6.3 Deuxième approche expérimentale	15
6.3.1 Description du montage	15
6.3.2 Mesure de la tension de Hall U_H en variant le courant d'entrée I_p avec un champ magnétique B fixé	16
6.3.2.1 Problème : Discordance entre les valeurs de courant affichées sur l'Unité de Hall et l'Ampèremètre	16
6.3.2.2 Difficulté : Calcul du champ magnétique B	17
6.3.2.3 Résultats expérimentaux	19
6.3.3 Mesure de la tension de Hall U_H en variant le champ magnétique B avec une intensité d'entrée I fixée	22
6.3.3.1 Difficulté : Calcul du champ magnétique B	22
6.3.3.2 Résultats expérimentaux	23
6.3.4 Synthèse des résultats expérimentaux obtenus	25

7 Discussion	26
7.1 Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux	26
7.2 Sources principales d'erreur et propositions d'amélioration	28
8 Applications de l'effet Hall	29
8.1 Introduction au capteur à effet Hall	29
8.2 Domaines d'utilisation des capteurs à effet Hall	29
8.3 Application dans le domaine de sécurité	30
8.3.1 Description du montage	30
8.3.1.1 Premier montage : Test de fonctionnement du capteur	30
8.3.1.2 Deuxième montage :	32
8.3.1.3 Résultats et interprétations :	35
9 Conclusion et perspectives futures	36
10 Annexe	37
11 Références bibliographiques	39

1 Résumé

Au cours de notre projet de formation expérimentale, nous avons étudié l'effet Hall et ses applications. Nos séances, alternant entre théorie et pratique, nous ont permis d'examiner la tension de Hall et la constante de Hall à travers le prisme de deux cadres théoriques majeurs : le modèle de Drude et le modèle de bande électronique. Ce dernier est certes complexe mais particulièrement utile pour analyser les contributions des trous et les interactions entre les électrons et les trous dans les matériaux.

L'objectif de notre projet était de mesurer de façon pratique la tension de Hall et la constante de Hall, en utilisant un ensemble d'équipements standardisés au Fablab. Après avoir réalisé les mesures nécessaires, nous avons comparé les valeurs obtenues avec les prédictions du modèle théorique de Drude afin d'évaluer sa précision.

Durant notre expérience sur l'effet Hall, nous avons rencontré plusieurs défis, notamment lors de la mesure du champ magnétique B . La précision de cette mesure est souvent limitée par de nombreux facteurs incontrôlables, ce qui rend difficile l'obtention de résultats parfaitement cohérents. Malgré cela, nous nous sommes efforcés de produire des données aussi précises que possible, bien que les résultats expérimentaux tendent à demeurer approximatifs dans de telles conditions pratiques.

Au début de notre étude, nous avons maintenu le courant constant tout en variant le champ magnétique pour mesurer la tension de Hall U_H en fonction du type de germanium utilisé, qu'il soit dopé n ou p. Par la suite, en fixant le champ magnétique, nous avons modifié le courant pour observer son effet sur U_H . Les courbes obtenues nous ont permis d'estimer la constante de Hall. Grâce à ces mesures et en appliquant les prédictions théoriques, nous avons réalisé une comparaison entre les valeurs expérimentales et les prédictions des modèles de Drude et de bande électronique.

Enfin, nous avons exploré une application pratique de l'effet Hall dans le domaine de la sécurité, en testant un capteur à effet Hall sensible au champ magnétique. Cette partie de notre projet a illustré l'importance et l'utilité concrète de l'effet Hall dans des applications réelles, renforçant ainsi notre compréhension de son potentiel dans des contextes pratiques variés.

2 Introduction

L'effet Hall fut découvert en 1879 par Edwin Herbert Hall, alors qu'il réalisait des recherches doctorales à l'Université Johns Hopkins. Hall cherchait à comprendre si les champs magnétiques influençaient le flux des courants électriques dans les conducteurs. Au cours de ses expérimentations, il a observé qu'un champ magnétique appliqué perpendiculairement à la direction d'un courant électrique dans une fine feuille de métal générerait une tension transversale, nommée aujourd'hui tension de Hall. Cette découverte a été fondamentale non seulement pour la physique du solide, en offrant un nouvel outil pour mesurer la densité et la nature des porteurs de charge dans les matériaux, mais elle a également pavé la voie à de multiples applications technologiques, notamment dans les capteurs magnétiques et les dispositifs de contrôle électromagnétique.

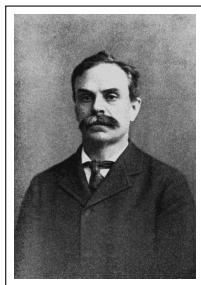


FIGURE 1 – Illustration d'Edwin Hall

3 Motivation

Notre intérêt pour l'effet Hall s'ancre dans une volonté d'approfondir notre compréhension des dynamiques électromagnétiques, éléments clés de nombreux processus naturels et industriels. Les interactions entre l'électricité et le magnétisme, pivotales dans le domaine de la physique moderne, offrent un terrain fertile pour explorer la manière dont les forces invisibles façonnent le monde matériel. L'étude de l'effet Hall représente ainsi une opportunité unique de connecter des théories électromagnétiques fondamentales à des applications pratiques.

En réalisant cette expérience, nous cherchons non seulement à vérifier des concepts théoriques par l'observation et la mesure directes mais aussi à illustrer le potentiel de l'effet Hall dans l'avancement des technologies actuelles et futures. Cet engagement expérimental renforce notre compréhension des mécanismes sous-jacents à l'effet Hall et met en lumière son importance vitale dans le développement de solutions innovantes pour l'industrie et la recherche scientifique.

4 Méthodologie et organisation du travail

Pour structurer notre exploration de l'effet Hall et de ses applications pratiques, nous avons méticuleusement organisé notre projet en plusieurs étapes clés, réparties entre théorie et expérimentation.

Nous avons débuté par des recherches approfondies sur les principes de base de l'effet Hall, suivies d'une étude détaillée sur le modèle de Drude et le modèle de bande électronique et leurs limites, pour établir une fondation théorique solide. La transition vers la pratique a été amorcée par la réalisation d'un circuit manuel de l'effet Hall, permettant de comprendre le phénomène.

Ensuite, nous avons procédé au montage de l'unité de Hall pour recueillir des données expérimentales, essentielles à la validation des hypothèses théoriques. Cette phase a été complétée par l'intégration des notions sur les capteurs à effet Hall, aboutissant finalement à la finalisation et aux tests de ces dispositifs.

Ce projet a été mené comme un effort collaboratif, capitalisant sur la diversité des perspectives et des expertises de chaque membre de l'équipe. Ce qui a permis une fusion productive des idées face aux multiples défis rencontrés. Chaque membre du groupe a apporté sa propre interprétation et ses solutions, rendant notre démarche expérimentale et théorique plus robuste.

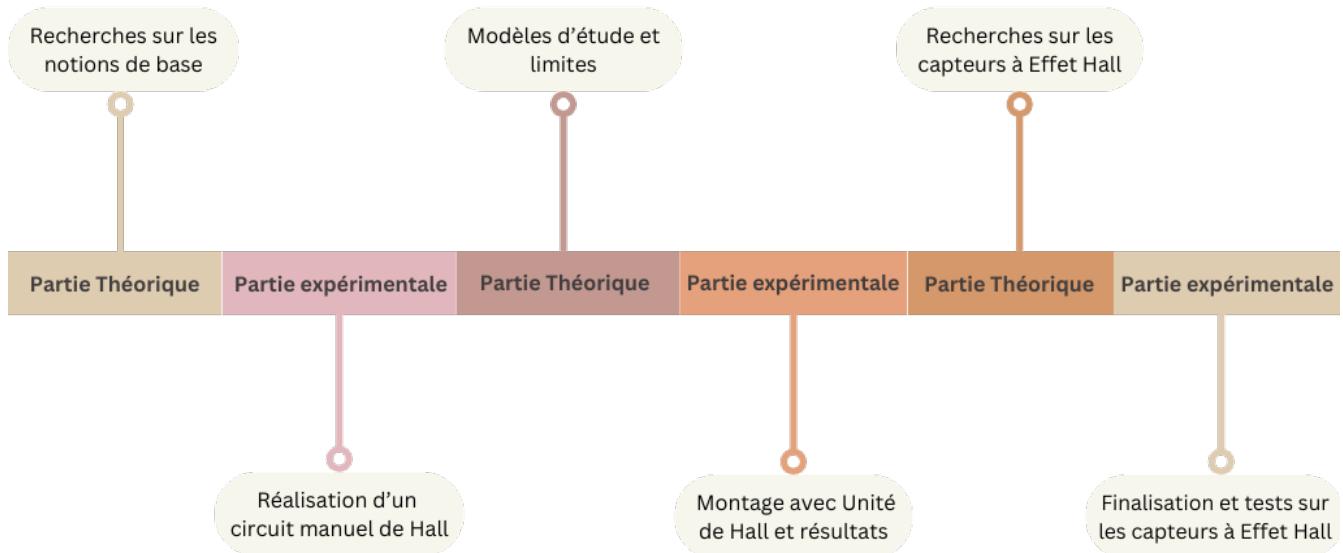


FIGURE 2 – Répartition du travail

5 Partie théorique

5.1 Théorie de l'effet Hall

L'effet Hall se manifeste par la génération d'un champ électrique transversal lorsqu'un courant électrique traverse un matériau conducteur soumis à un champ magnétique perpendiculaire. Cette interaction produit une différence de potentiel, connue sous le nom de tension de Hall, observable principalement dans les métaux et les semi-conducteurs. En pratique, l'application de cet effet dans les semi-conducteurs dopés, tels que le germanium, permet d'évaluer précisément la densité des porteurs de charge. Cette propriété fait de l'effet Hall un outil indispensable pour l'étude des caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs.

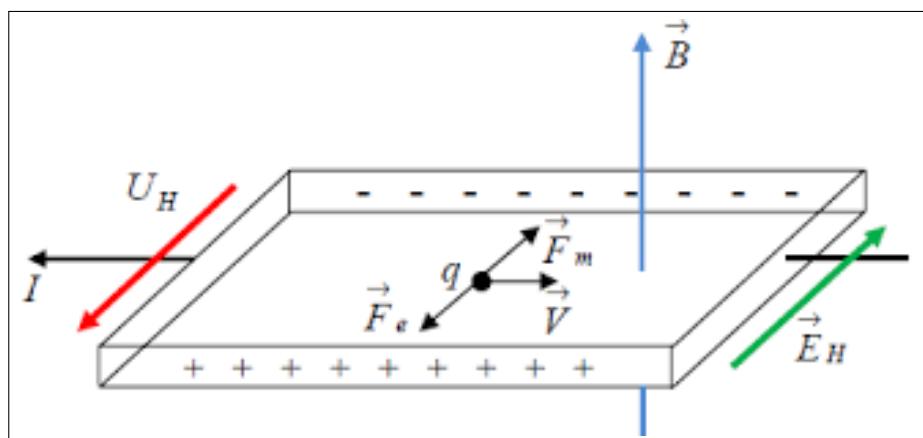


FIGURE 3 – Géométrie de l'effet Hall

5.2 Modèle de Drude

Le modèle de Drude, nommé d'après le physicien allemand Paul Drude qui l'a proposé en 1900, est un modèle classique qui décrit la conduction électrique dans les métaux. Drude a appliqué la théorie cinétique des gaz, initialement développée pour expliquer les propriétés thermodynamiques des gaz, aux électrons dans un métal.



FIGURE 4 – Paul Drude

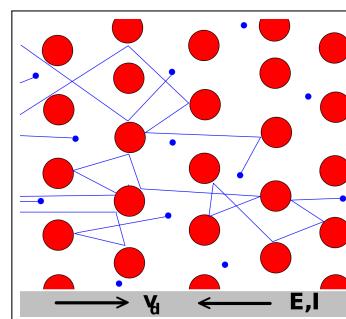


FIGURE 5 – Mobilité des porteurs de charge

5.2.1 Hypothèses du modèle

Le modèle de Drude repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices pour décrire le comportement des électrons dans un métal :

- **Comportement classique des électrons** : Les électrons sont traités comme des particules libres classiques, obéissant à la mécanique newtonienne, sans tenir compte des effets quantiques, se comportant de manière similaire à un gaz idéal dans le métal.
- **Densité électronique uniforme** : Les électrons sont distribués uniformément dans le métal, et leur densité ne varie pas avec la position.
- **Collisions avec le réseau cristallin** : Les électrons subissent des collisions élastiques avec les phonons du réseau cristallin. Ces collisions sont caractérisées par un temps de relaxation τ , après lequel un électron repart avec une nouvelle vitesse, sans mémoire de son mouvement précédent.
- **Indépendance des collisions** : Les collisions d'un électron avec le réseau cristallin sont traitées comme indépendantes, avec une réinitialisation immédiate de la vitesse à chaque collision, sans aucune corrélation entre les trajectoires pré et post-collision.
- **Absence d'interactions électron-électron** : Les électrons sont considérés comme ne s'influencant pas mutuellement

5.2.2 Expression de la constante et de la tension de Hall

En utilisant le modèle de Drude, retrouvons la formule de la constante de Hall R_H et puis celle de U_H :

- Équation de mouvement

L'équation de mouvement pour un électron dans un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} est donnée par la force de Lorentz :

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

où v est la vitesse des électrons et e est la charge élémentaire.

- Régime stationnaire

En régime stationnaire, l'équilibre des forces sur les électrons implique que la somme des forces électrique et magnétique est nulle, en considérant le temps de relaxation τ . Cela résulte en une accélération nette nulle pour les électrons :

$$m\vec{a} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

où m est la masse de l'électron, a son accélération

D'où, l'équation se simplifie en :

$$\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$$

- Composante de la vitesse due à \vec{B}

Sachant que le champ magnétique B est appliqué perpendiculairement au courant électrique, et en choisissant $B = B_z$ et $v = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$ (dans un cadre simplifié où nous ignorons la composante z pour les vecteurs vitesse et champ électrique),

la force de Lorentz s'écrit alors :

$$E_y = -v_x B$$

Ici, v_x est la composante de la vitesse des électrons le long de la direction du courant, et E_y est le champ électrique Hall induit perpendiculairement à cette direction.

- Densité de courant et champ de Hall

La densité de courant est donnée par $\vec{j} = -ne\vec{v}$, où n est la densité des porteurs de charge. Pour la composante longitudinale :

$$j_x = -nev_x$$

- Expression de la constante de Hall R_H

La constante de Hall R_H est un paramètre qui caractérise la relation entre le champ électrique induit (champ de Hall) et le produit du champ magnétique et de la densité de courant qui génère cet effet.

Avec ces définitions, la constante de Hall se calcule en utilisant :

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B}$$

En substituant les expressions pour E_y et j_x , on obtient :

$$R_H = \frac{-v_x B}{-nev_x B}$$

Ainsi,

$$R_H = \frac{1}{ne}$$

- Expression de la tension de Hall U_H

La tension de Hall est liée au champ électrique transverse E_y par la largeur b de la plaque

$$U_H = E_y \cdot b$$

Le courant transversal I_p est relié à la densité de courant J_y par la relation :

$$I_p = J_y \cdot b \cdot t$$

où t est l'épaisseur de l'échantillon.

En utilisant la relation de la densité de courant $J_y = -nev_y$, et sachant que $v_y = \frac{E_y}{B}$, on obtient :

$$J_y = -ne \left(\frac{E_y}{B} \right)$$

En substituant $E_y = \frac{U_H}{b}$ dans l'expression de J_y , on obtient :

$$J_y = -ne \left(\frac{U_H}{bB} \right)$$

En remplaçant J_y dans l'expression du courant transversal I_p , on obtient :

$$I_p = -ne \left(\frac{U_H}{bB} \right) bt = -ne \left(\frac{U_H}{B} \right) t$$

Ainsi, la tension de Hall U_H est donnée par :

$$U_H = \frac{I_p B}{net}$$

La tension de Hall dépend donc du champ magnétique, du courant transversal et des propriétés matérielles de l'échantillon.

Le signe de la charge e dans les expressions ci-dessus doit être choisi en fonction du type de porteurs de charge dans le matériau. Pour les électrons, qui possèdent une charge négative, e est négatif, ce qui est conforme à la direction opposée du courant par rapport au mouvement des électrons. En revanche, pour les trous, porteurs de charge positive, e serait positif.

5.2.3 Limites du Modèle de Drude

Bien que le modèle de Drude explique correctement certaines propriétés des métaux, il présente des limitations significatives :

- **Basses températures** : Contrairement aux métaux, les semi-conducteurs à température nulle (0 K) se comportent comme des isolants. Leur conductivité augmente avec la température, une propriété que le modèle de Drude ne peut pas expliquer, car il ne prend pas en compte la formation de paires électron-trou induite par l'énergie thermique.
- **Effets quantiques** : Le modèle de Drude, qui repose sur des principes classiques, ne prend pas en compte les effets quantiques essentiels pour comprendre le comportement des électrons dans les matériaux à l'échelle atomique, notamment la quantification des niveaux d'énergie et les effets de la mécanique quantique sur la mobilité électronique.
- **Interactions complexes** : Le modèle simplifie excessivement les interactions en traitant les électrons comme des particules libres qui ne subissent que des collisions élastiques avec un réseau immobile d'ions. Il ignore ainsi les interactions électron-électron et les couplages entre électrons et phonons (vibrations du réseau).

Pour surmonter ces limitations, un autre modèle est utilisé : **le modèle de bande électronique**.

5.3 Modèle de bande électronique

Développé par plusieurs physiciens au début du 20 ème siècle, avec des contributions notables de Felix Bloch, le modèle de bande électronique est utilisé pour comprendre les propriétés des matériaux en termes de leur structure de bande. En effet , Dans les semi-conducteurs, il prend en compte les contributions des électrons et des trous. Ce modèle permet de considérer les mobilités et densités des deux types de porteurs.

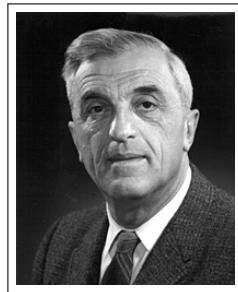


FIGURE 6 – Felix Bloch

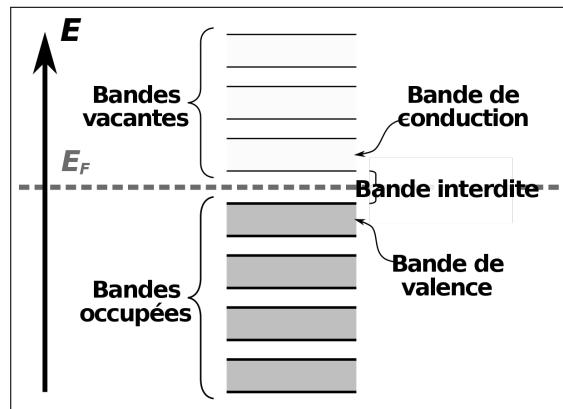


FIGURE 7 – Théorie de bandes

5.3.1 Hypothèses du modèle

- **Structure de bande** : Les électrons occupent des bandes d'énergie discrètes dans un cristal.
- **Théorème de Bloch** : Les fonctions d'onde des électrons dans un cristal périodique sont des fonctions de Bloch.
- **Bandes de Valence et de Conduction** : Les électrons dans la bande de conduction sont responsables de la conduction électrique.
- **Électrons et trous** : Les porteurs de charge dans les semi-conducteurs sont des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence.

5.3.2 Expression de la constante et de la tension de Hall

Le modèle de bande électronique prend en compte les interactions complexes entre les électrons et le réseau cristallin ainsi que les interactions entre les électrons eux-mêmes. En utilisant ce modèle, retrouvons la formule de la constante de Hall R_H et puis celle de U_H :

- e : charge élémentaire.
- v_t, v_e : vitesses des trous et des électrons.
- B : intensité du champ magnétique.
- b : largeur de l'échantillon.
- L : longueur du chemin du courant dans l'échantillon.
- μ_t, μ_e : mobilités des trous et des électrons.
- n_t, n_e : densités des trous et des électrons.

- F_t, F_e : forces totales subies par les trous et les électrons.
- v_H : vitesse induite par la tension de Hall.
- I_p : courant total dans le matériau.
- R_H : résistance de Hall.
- Forces totales subies par les trous et les électrons dans un champ magnétique

$$F_t = e(v_t B - \frac{v_H}{b})$$

$$F_e = e(v_e B + \frac{v_H}{b})$$

- Condition d'équilibre

À l'équilibre, le courant de Hall I_H est nul, ce qui signifie qu'il n'y a pas de transfert net de charge à travers la largeur du matériau :

$$n_t \mu_t F_t = n_e \mu_e F_e$$

- Expression de la constante de Hall R_H En utilisant les relations pour les forces, on peut écrire :

$$n_t \mu_t e \left(v_t B - \frac{v_H}{b} \right) = n_e \mu_e e \left(v_e B + \frac{v_H}{b} \right)$$

En réarrangeant pour isoler v_H , on obtient :

$$v_H = \frac{(n_t \mu_t^2 - n_e \mu_e^2) B}{e(n_t \mu_t^2 + n_e \mu_e^2)}$$

La constante de Hall R_H est alors donnée par :

$$R_H = \frac{n_t \mu_t^2 - n_e \mu_e^2}{e(n_t \mu_t^2 + n_e \mu_e^2)}$$

- Expression de la tension de Hall U_H

La tension de Hall U_H est liée au champ électrique transverse E_y par l'expression :

$$U_H = E_y \cdot b$$

En utilisant la relation $E_y = R_H \cdot J_x \cdot B$, on obtient :

$$U_H = \left(\frac{1}{e} \frac{p - n}{np} \right) J_x B b$$

Ainsi :

$$U_H = \frac{(n_t \mu_t^2 - n_e \mu_e^2) I_p B}{e(n_t \mu_t^2 + n_e \mu_e^2)}$$

6 Partie expérimentale

Le but de cette section est de mesurer la tension de Hall U_H et la constante de Hall R_H pour les comparer avec les prédictions théoriques du modèle de Drude. Nous avons réalisé ces mesures en variant deux paramètres clés :

- 1. Champ magnétique fixe (B) :** Nous avons mesuré la tension de Hall U_H en fonction du courant d'entrée I_p , $U_H = f(I_p)$.
- 2. Courant d'entrée fixe (I_p) :** Nous avons varié le champ magnétique B pour observer son effet sur U_H , $U_H = f(B)$.

Ces expérimentations permettent d'isoler les effets de chaque variable sur la tension de Hall.

6.1 Description du matériel utilisé

Matériel utilisé	Quantité	Fonction
Unité de Hall	1	Mesurer l'effet Hall
Aimant permanent	1	Générer un champ magnétique
Sonde effet Hall	1	Détecter l'effet Hall
Multimètre	2	Mesurer la tension et le courant
Alimentations électriques	1	Fournir une tension constante
Câbles de connexion	Plusieurs	Connecter les composants
Plaque Ge-n	1	Echantillons pour réaliser l'expérience
Plaque Ge-p	1	Echantillons pour réaliser l'expérience
Logiciel LatisPro	1	Trouver les mesures de B
Elévateur	1	Ajuster la hauteur de l'aimant
Carte d'acquisition	1	Mesurer et calculer le champ magnétique B
Plaque métallique mince	1	Conduite du courant électrique
Aimant à écart	1	Générer un champ magnétique

TABLE 1 – Matériel utilisé pour l'expérience de l'effet Hall

6.2 Première approche expérimentale

6.2.1 Description du montage

Le montage initial pour l'étude de l'effet Hall utilisait une plaque métallique mince. Le dispositif était configuré comme suit :

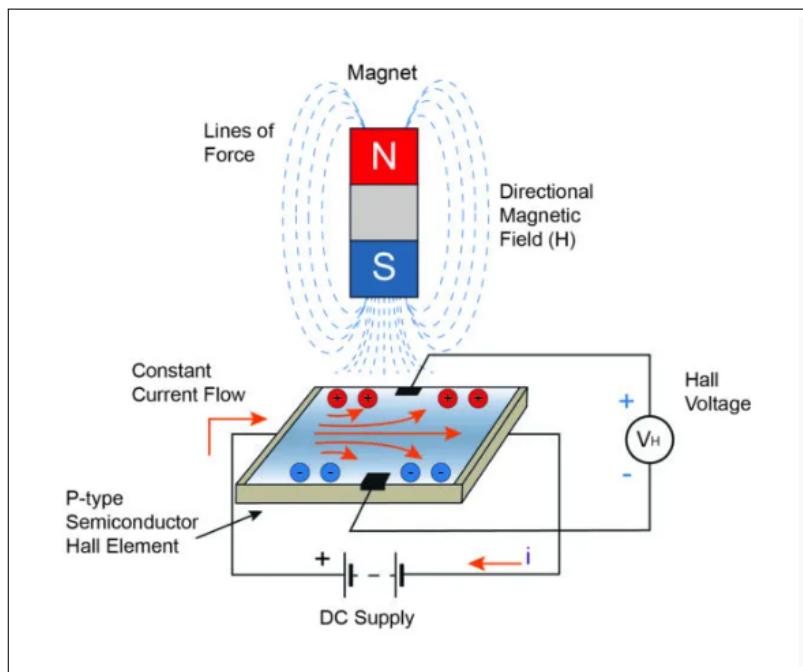


FIGURE 8 – Schéma de l'expérience

La plaque était directement connectée à une source de courant ajustable pour permettre de contrôler l'intensité du courant traversant la plaque. Un aimant était placé de manière à ce que le champ magnétique B soit perpendiculaire au courant dans la plaque. Un voltmètre était connecté aux extrémités de la plaque, aligné perpendiculairement au courant et au champ magnétique.

6.2.2 Limitations

Cette méthode n'a pas fonctionné pour plusieurs raisons éventuelles :

- **Précision de l'installation :** Une telle installation approximative peut générer du bruit électrique qui submergerait les mesures de la tension de Hall.
- **Non-uniformité du champ magnétique :** Les mesures de la tension de Hall sont incohérentes et erronées fort probablement à cause de la non-uniformité du champ magnétique généré par l'aimant à travers toute la surface de la plaque.
- **Effet de bord :** Dans les plaques minces, les effets de bord peuvent être significatifs. Ces effets conduisent à des distributions non uniformes du champ électrique et du courant à l'intérieur du matériau. Les résultats seraient donc fortement dépendants de la géométrie du matériau et de la distribution du courant.
- **Orientation approximative :** La précision dans l'alignement du voltmètre et de la configuration de la plaque est cruciale pour capter correctement la tension de Hall. Tout écart dans cette orientation entraîne la capture de composantes électriques non désirées, qui interfèrent avec la mesure propre de la tension de Hall.

Bien que la méthode utilisant une simple plaque métallique puisse paraître attrayante et la plus évidente pour sa simplicité, elle est insuffisante pour obtenir des données fiables nécessaires dans notre étude. L'utilisation d'une unité à effet Hall spécialisée est donc non seulement préférable mais souvent indispensable pour arriver à des résultats valides.

6.3 Deuxième approche expérimentale

6.3.1 Description du montage

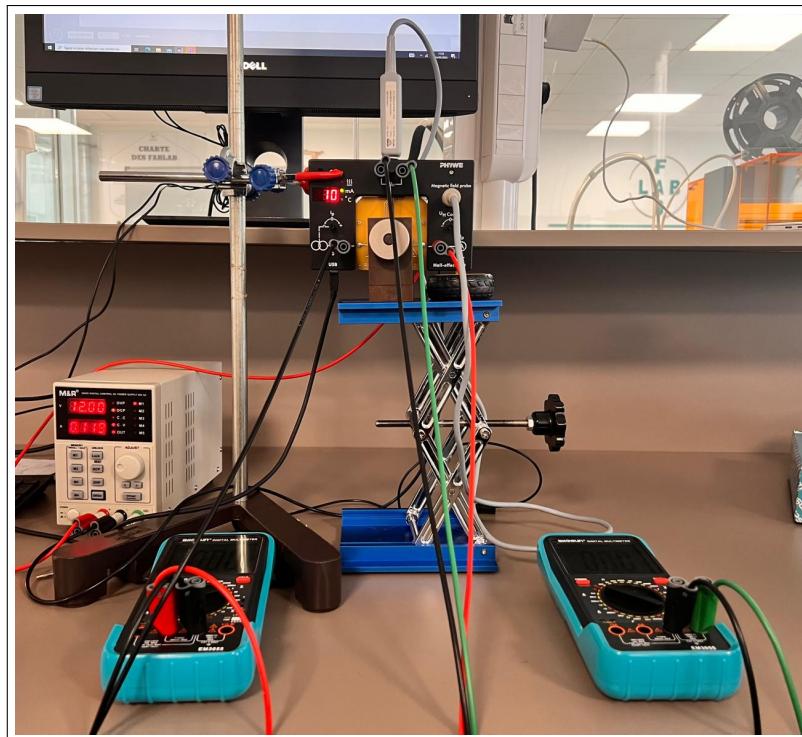


FIGURE 9 – Montage expérimental

Nous utilisons un GBF qui fournit à notre échantillon de semi-conducteur une tension de 12 V. Ce générateur est connecté à l'Unité de HALL dans laquelle on fait glisser la plaque de Germanium.

Le champ magnétique est appliqué à l'aide d'un aimant à écart responsable de générer un champ magnétique uniforme et contrôlé perpendiculairement à la direction du courant dans l'échantillon.

Toute la configuration est supportée par une structure métallique robuste, permettant un alignement stable des différents éléments. Cela est crucial pour assurer que les champs électriques et magnétiques soient correctement orientés par rapport à l'échantillon pour des mesures valides.

Nous avons placé deux multimètres, qui sont utilisés pour mesurer la tension de Hall et l'intensité d'entrée. Ces appareils sont essentiels pour capturer les variations de tension générées par l'effet Hall lors de l'application du champ magnétique.

6.3.2 Mesure de la tension de Hall U_H en variant le courant d'entrée I_p avec un champ magnétique B fixé

Avant d'atteindre des résultats expérimentaux cohérents, nous avons été confrontés à plusieurs défis que nous avons minutieusement analysés et essayé au mieux de les surmonter.

6.3.2.1 Problème : Discordance entre les valeurs de courant affichées sur l'Unité de Hall et l'Ampèremètre

Après l'installation du montage, la première chose qui nous a intriguée était la discordance entre les valeurs de I_p affichées sur l'Unité de Hall et celles affichées sur l'Ampèremètre.

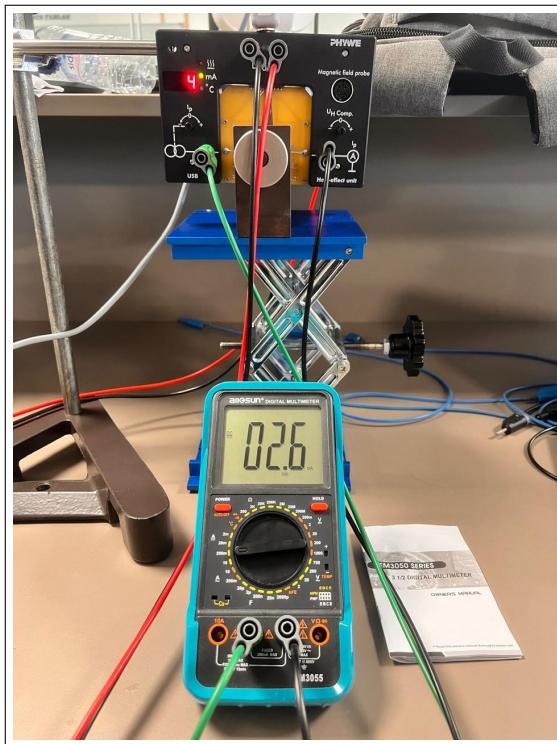


FIGURE 10 – Valeurs de courant différentes

EXEMPLE : 4 mA affichée sur l'Unité Hall et 2,6 mA affichée sur l'Ampèremètre)

Analysons de l'erreur de mesure

Les spécifications de précision de notre multimètre, selon le manuel d'utilisation, sont :

- Plage de mesure : 200 mA
- Précision : $\pm(1.2\% + 5)$, ce qui signifie que la mesure du courant peut avoir une erreur de $\pm 1.2\%$ de la lecture plus 5 unités sur l'échelle de mesure.

Pour une mesure affichée de 2.6 mA sur le multimètre :

Erreur proportionnelle : 1.2% de 2.6 mA donne $0.012 \times 2.6 \text{ mA} = 0.0312 \text{ mA}$

Erreur additionnelle : Sur une échelle de 200 mA, 5 unités correspondent à 5 mA.

Erreur totale : L'erreur totale est la somme des erreurs proportionnelle et additionnelle :

$$\text{Erreur totale} = 0.0312 \text{ mA} + 5 \text{ mA} \approx 5.0312 \text{ mA}$$

Analyse des valeurs mesurées : La valeur affichée sur le multimètre est de 2.6 mA avec une erreur maximale possible de ± 5.0312 mA, ce qui signifie que la lecture réelle pourrait être entre -2.4312 mA et 7.6312 mA.

Étant donné que la valeur exacte de I est de 4 mA, celle-ci se trouve bien à l'intérieur de l'intervalle $[-2.4312 \text{ mA}, 7.6312 \text{ mA}]$, validant ainsi les mesures malgré les erreurs possibles.

6.3.2.2 Difficulté : Calcul du champ magnétique B

Dans une continuité logique de notre projet, il était nécessaire de fixer précisément une valeur pour le champ magnétique B , une tâche qui, en apparence simple, a nécessité un investissement considérable en termes de temps et d'efforts. En raison de limitations techniques liées à la configuration de notre équipement, il s'est avéré impraticable de réaliser ces mesures directement via le logiciel standard de l'unité de Hall PHYWE ou avec le teslamètre numérique.

Nous avons donc dû adopter **une approche alternative** pour quantifier ce paramètre crucial :

La première chose qu'on a faite était de fixer une fente d'air de 1,8 cm dans l'aimant à écart pour calculer le champ magnétique B circulant dans cette fente.

Installation initiale : Le capteur à champ magnétique (tube gris) est connecté à la carte d'acquisition Sysam, elle-même reliée à un ordinateur sur lequel le logiciel LatisPro est opérationnel.

Première mesure : Le capteur est placé à la position x_0 et maintenu **statique**. L'enregistrement du champ magnétique est démarré pendant un court intervalle de temps, typiquement 4 secondes, pour capturer la valeur de B à cette position.

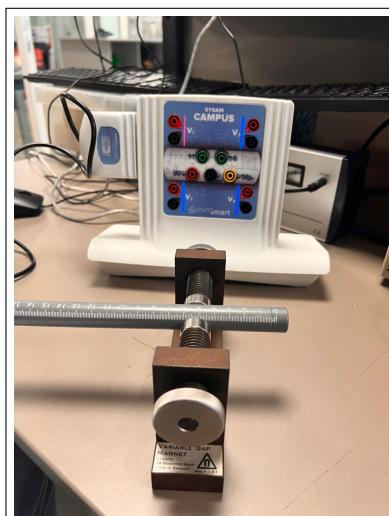
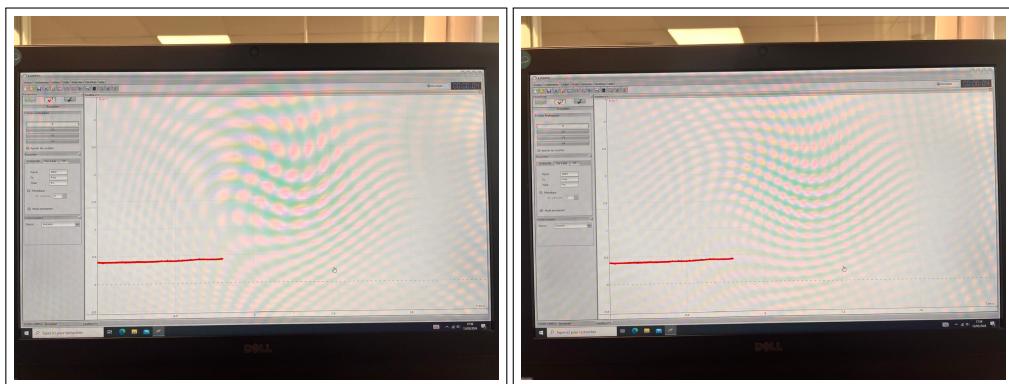


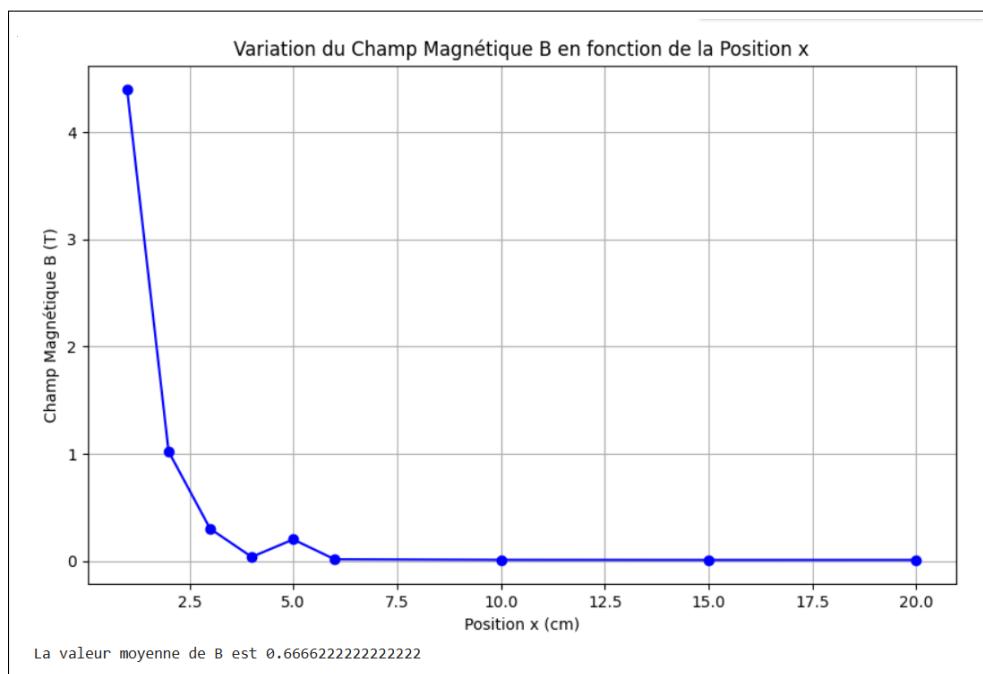
FIGURE 11 – Position du capteur égale $x = 5\text{cm}$

FIGURE 12 – $B = 0,2 \text{ T}$ pour la position $x = 5\text{cm}$

Déplacement et enregistrement successifs : Le capteur est ensuite déplacé successivement vers de nouvelles positions x_1, x_2, \dots . À chaque nouvelle position, la valeur de B est enregistrée.

FIGURE 13 – Enregistrements de B pour d'autres positions

Compilation et visualisation des données : Les valeurs de B et les positions x correspondantes sont systématiquement compilées. Ensuite, un graphique de $B(x)$ est tracé pour illustrer la variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur.

FIGURE 14 – Graphe $B = f(x)$

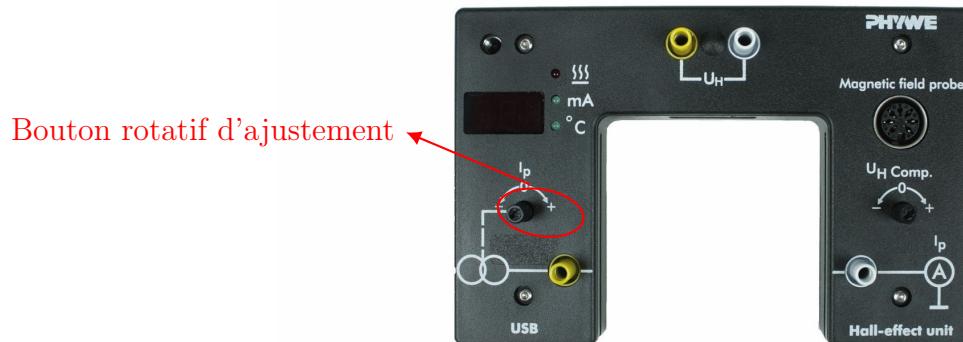
Calcul de la valeur moyenne : Pour cet ensemble de données, $B_{\text{moy}} = 667 \text{ mT}$. Pour la fente 1,8 cm, on va considérer que $B = 667 \text{ mT}$.

Ce résultat reste toujours approximatif, vu qu'il y a toujours des interférences environnementales qui affectent les calculs.

6.3.2.3 Résultats expérimentaux

Le champ magnétique est désormais fixé à $B = 667 \text{ mT}$. Reste à déterminer pour le Germanium dopé p et le Germanium dopé n la tension de Hall U_H en faisant varier le courant I_p sous le champ magnétique fixe B.

Le courant I_p est varié en utilisant le bouton rotatif sur l'unité de Hall. Pour chaque variation de I_p , la tension de Hall U_H est mesurée. Ce processus est répété pour les plaques de Germanium dopées p et n.

FIGURE 15 – Ajustement du courant I_p

Les mesures expérimentales de la tension de Hall pour différentes valeurs de courant sous un champ magnétique constant sont présentées dans les tableaux et les graphes correspondants ci-dessous :

Pour le semi-conducteur p-Ge :

I (mA)	U_H (V)
-20	-0.09
-18	-0.082
-16	-0.076
-14	-0.065
-12	-0.059
-10	-0.053
-8	-0.041
-6	-0.032
-4	-0.032
0	0.009
4	0.018
6	0.02
8	0.025
10	0.029
12	0.033
14	0.036
16	0.039
18	0.04
20	0.043

FIGURE 16 – Valeurs de la tension de Hall U_H en variant I_p pour le Ge-p

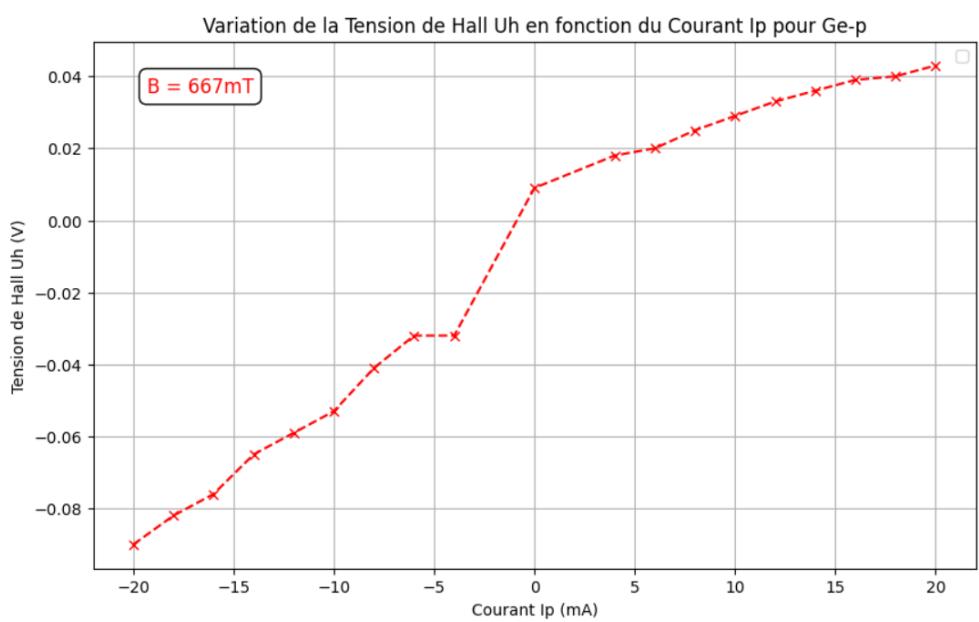


FIGURE 17 – Courbe de U_H en fonction de I_p pour le Germanium dopé p

On constate que la tension de Hall U_H augmente presque linéairement avec le courant I_p , indiquant un comportement typique où les trous (porteurs majoritaires) sont déviés, ce qui permet d'exprimer cette relation sous la forme :

$$U_H = k' \cdot I_p$$

où k' est la pente de la courbe obtenue .

La pente approximative de la courbe obtenue est $k' = 3.60$ V/A.

La constante de Hall R_H est ensuite calculée à partir de la pente k' en utilisant la formule :

$$R_H = \frac{k' \cdot d}{B}$$

où d est l'épaisseur de la plaque de germanium ($d = 1$ mm) et B est le champ magnétique appliqué ($B = 667$ mT).

Donc

$$R_H = 5.40 \times 10^{-3} V \cdot m \cdot A^{-1} \cdot T^{-1}$$

La constante de Hall R_H est positive, caractéristique des porteurs de charge positive.

Pour le semi-conducteur n-Ge :

I_p (mA)	U_H (V)
-20	0.05
-15	0.03
-13	0.02
-10	0.01
-5	-0.003
0	-0.022
5	-0.038
10	-0.06
15	-0.08
20	-0.099

FIGURE 18 – Valeurs de la tension de Hall U_H en variant I_p pour le Ge-n

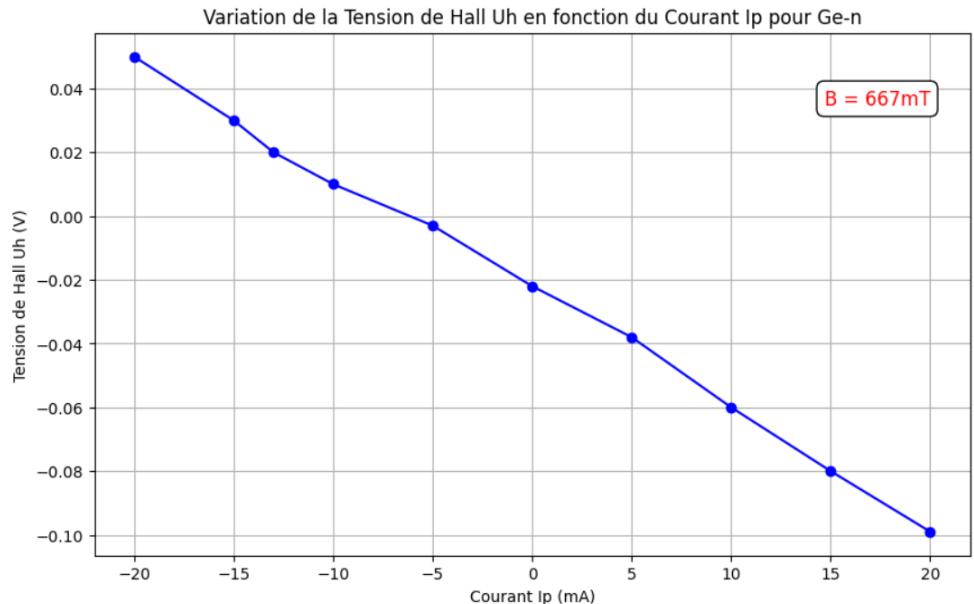


FIGURE 19 – Courbe de U_H en fonction de I_p pour le Germanium dopé n

On constate que pour le germanium dopé n, la tension de Hall U_H est négative et son amplitude augmente en valeur absolue avec le courant I_p . Cela indique un comportement où les électrons (porteurs majoritaires) sont déviés par le champ magnétique. La relation peut être ainsi exprimée sous la forme :

$$U_H = k' \cdot I_p$$

où k' est la pente de la courbe obtenue.

La pente approximative de la courbe obtenue est $k' = -3.64 \text{ V/A}$.

Ainsi en utilisant la même expression qu'auparavant, et pour les mêmes valeurs de B et d, on obtient :

$$R_H = -5.46 \times 10^{-3} V \cdot m \cdot A^{-1} \cdot T^{-1}$$

La constante de Hall R_H est négative, caractéristique des porteurs de charge négative.

6.3.3 Mesure de la tension de Hall U_H en variant le champ magnétique B avec une intensité d'entrée I fixée

On fixe maintenant le courant d'entrée $I_p = 10$ mA. Et on cherche la tension de Hall U_H en fonction du champ magnétique B.

6.3.3.1 Difficulté : Calcul du champ magnétique B

Pour la détermination du champ magnétique B en le variant à chaque fois, avec I_p fixé, nous avons dû reconsidérer notre méthode de mesure initiale en raison de son caractère chronophage. Après une consultation du manuel d'utilisation de notre dispositif aimant à écart de pôles variable (U10370), nous avons opté pour une méthode alternative s'appuyant sur une formule dépendant de l'écart entre les pôles de l'aimant. La relation mathématique figurant sur le manuel d'utilisation utilisée est :

$$B(x) = B_r \left(\frac{2L + x}{\sqrt{D^2 + (2L + x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{D^2 + x^2}} \right)$$

où L représente la longueur totale des aimants (2×10 mm = 20 mm) et D le diamètre (20 mm).

La rémanence magnétique B_r doit toujours être déterminée par une mesure, car les tolérances de fabrication ne sont pas négligeables. Pour les aimants utilisés dans notre expérience, cette valeur doit s'élever environ à 1 000 - 1 300 mT.

Détermination de B_r

Dans notre quête initiale pour déterminer la valeur de B , en utilisant un écartement de 1,8 cm entre les pôles de l'aimant, on a trouvé que $B = 667$ mT. Lors de l'application de la relation théorique, nous avons obtenu une valeur aberrante de B_r équivalant à 2413 mT, un chiffre significativement éloigné des 1000 à 1300 mT généralement admis d'après le manuel de l'aimant utilisé.

Cette incohérence pourrait être expliquée par plusieurs facteurs affectant la précision de nos mesures :

- Variations de fabrication : Les aimants peuvent présenter des différences matérielles ou de fabrication, influençant leur intensité magnétique.
- Déterioration ou démagnétisation : Une altération due à l'âge, à des conditions thermiques, ou à des chocs physiques pourrait réduire la puissance de l'aimant.
- Interférences environnementales : Des champs magnétiques externes ou des objets ferromagnétiques situés près de notre site expérimental peuvent fausser nos mesures.

Pour standardiser notre procédure et l'aligner sur les valeurs attendues, nous avons ajusté la rémanence magnétique B_r à 1300 mT. En ajustant progressivement l'écartement des pôles de l'aimant, nous avons ensuite calculé le champ magnétique $B(x)$ pour divers écarts x grâce à la formule établie. On trouve :

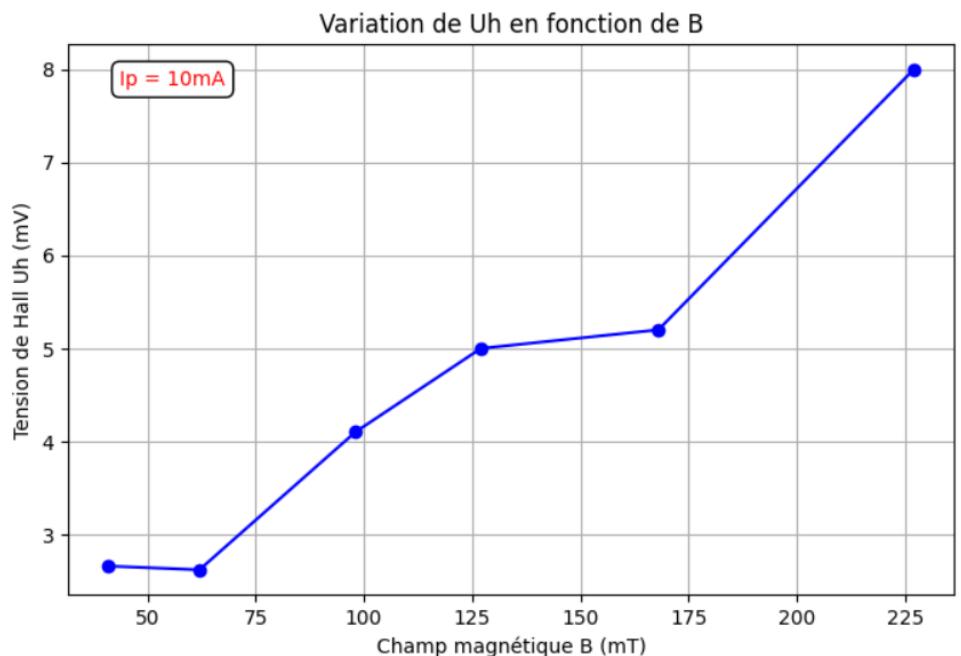
x (cm)	$B(x)$ (mT)
2.5	227
3.0	168
3.5	127
4.0	95
5.0	62
6.0	41

TABLE 2 – Valeurs calculées de $B(x)$ pour différents x

6.3.3.2 Résultats expérimentaux

Pour le Germanium dopé p

B (mT)	U_H (mV)
227	8.11
168	5.12
127	5.2
95	4.17
62	2.62
41	2.66

FIGURE 20 – Valeurs de la tension de Hall U_H en variant B pour le Ge-pFIGURE 21 – Courbe de U_H en fonction de B pour le Germanium dopé p

On constate que la tension de Hall U_H augmente presque linéairement avec l'augmentation du champ magnétique B , indiquant un comportement typique où les trous (porteurs majoritaires) sont déviés. Ecrivons :

$$U_H = k' \cdot B$$

où k' est la pente de la courbe obtenue.

La pente approximative de la courbe après ajustement est $k' = 0.03$ V/T.

La constante de Hall R_H est ensuite calculée à partir de la pente k' en utilisant la formule :

$$R_H = \frac{k' \cdot d}{I_p}$$

où d est l'épaisseur de la plaque de germanium ($d = 1$ mm) et I_p est le courant appliqué ($I_p = 10$ mA).

On obtient :

$$R_H = 3 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

La constante de Hall R_H est positive, caractéristique des porteurs de charge positive.

Pour le Germanium dopé n

B (mT)	U_H (mV)
227	-6.81
168	-4.08
127	-3.21
95	-2.91
62	-1.66
41	-1.10

FIGURE 22 – Valeurs de la tension de Hall U_H en variant B pour le Ge-n

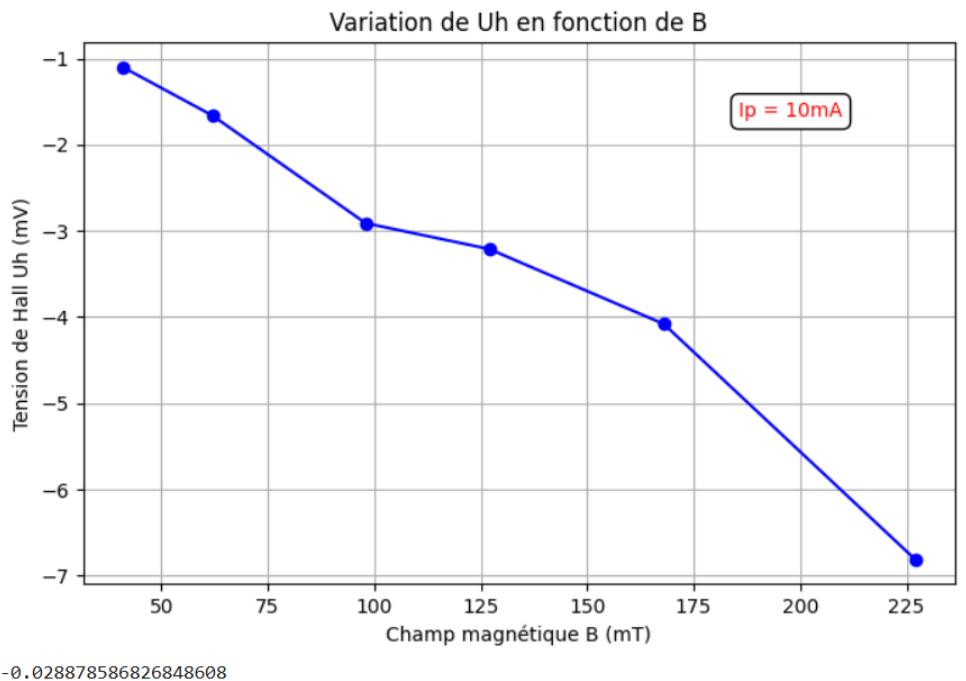


FIGURE 23 – Courbe de U_H en fonction de B pour le Germanium dopé n

On constate que la tension de Hall U_H diminue presque linéairement avec l'augmentation du champ magnétique B . Ce qui indique un comportement où les électrons (porteurs majoritaires) sont déviés par le champ magnétique.

La relation peut être ainsi exprimée sous la forme :

$$U_H = k' \cdot B$$

où k' est la pente de la courbe obtenue

La pente approximative de la courbe après ajustement est $k' = -0.03$ V/T.

Ainsi, en utilisant la même expression qu'auparavant, et pour les mêmes valeurs de B et d , on obtient :

$$R_H = -3 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

La constante de Hall R_H est négative, caractéristique des porteurs de charge négative.

6.3.4 Synthèse des résultats expérimentaux obtenus

Les résultats expérimentaux de notre étude sur l'effet Hall utilisant des échantillons de germanium dopé (p et n) ont montré des comportements distincts en fonction du type de dopage.

- $U_H = f(I_p)$, $B = 667\text{mT}$

Paramètre	p-Ge	n-Ge
Tension de Hall (U_H)	Augmente presque linéairement avec I_p	Diminue presque linéairement avec I_P
Pente approximative (k')	$+3.60 \times 10^{-3} \text{ V/A}$	$-3.64 \times 10^{-3} \text{ V/A}$
Constante de Hall (R_H)	$+5.40 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$	$-5.46 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$
Porteurs de Charge	Trous (positifs)	Électrons (négatifs)

- $U_H = f(B)$, $I_p = 10mA$

Paramètre	p-Ge	n-Ge
Tension de Hall (U_H)	Augmente presque linéairement avec B	Diminue presque linéairement avec B
Pente (k')	$+0.03 \text{ V/T}$	-0.03 V/T
Constante de Hall (R_H)	$+3 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$	$-3 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$
Porteurs de Charge	Trous (positifs)	Électrons (négatifs)

TABLE 3 – Tableaux récapitulatifs des résultats expérimentaux

7 Discussion

7.1 Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux

Faisant le point sur la différence entre les résultats théoriques auquels on s'attendait, et les résultats réels de nos expériences.

On se contentera d'étudier cet écart pour le Germanium dopé p.

Rappelons que théoriquement d'après le modèle de Drude, la tension de Hall s'écrit :

$$U_H = \frac{I_p B}{net}$$

où la densité de porteurs de charge $n = 1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

la charge élémentaire $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

l'épaisseur du matériau $t = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$

- Pour la variation de U_H en fonction de I_p en fixant B à 667 mT.

En superposant la théorie aux résultats pratiques, on obtient :

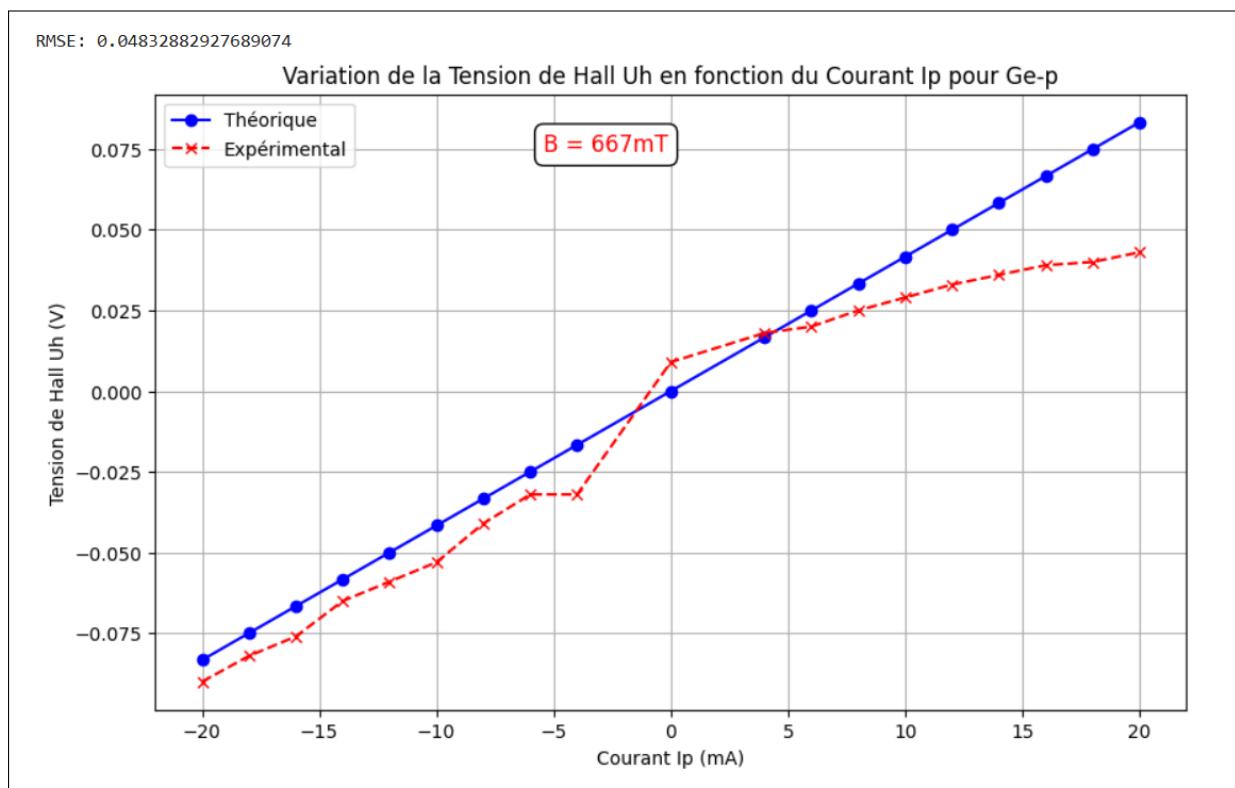


FIGURE 24 – Représentation de U_H théorique et expérimentale en fonction de I_p

Pour évaluer les différences entre les valeurs théoriques de U_H (Modèle de Drude) et les valeurs réellement calculées, calculons le RMSE (Root Mean Squared Error, ou Erreur Quadratique Moyenne Racine).

RMSE : 0.0483 volts, l'erreur moyenne est donc inférieure à 50 mV, ce qui est considérable compte tenu des valeurs de tension de Hall mesurées.

- Pour la variation de U_H en fonction de B en fixant I_p à 10 mA.

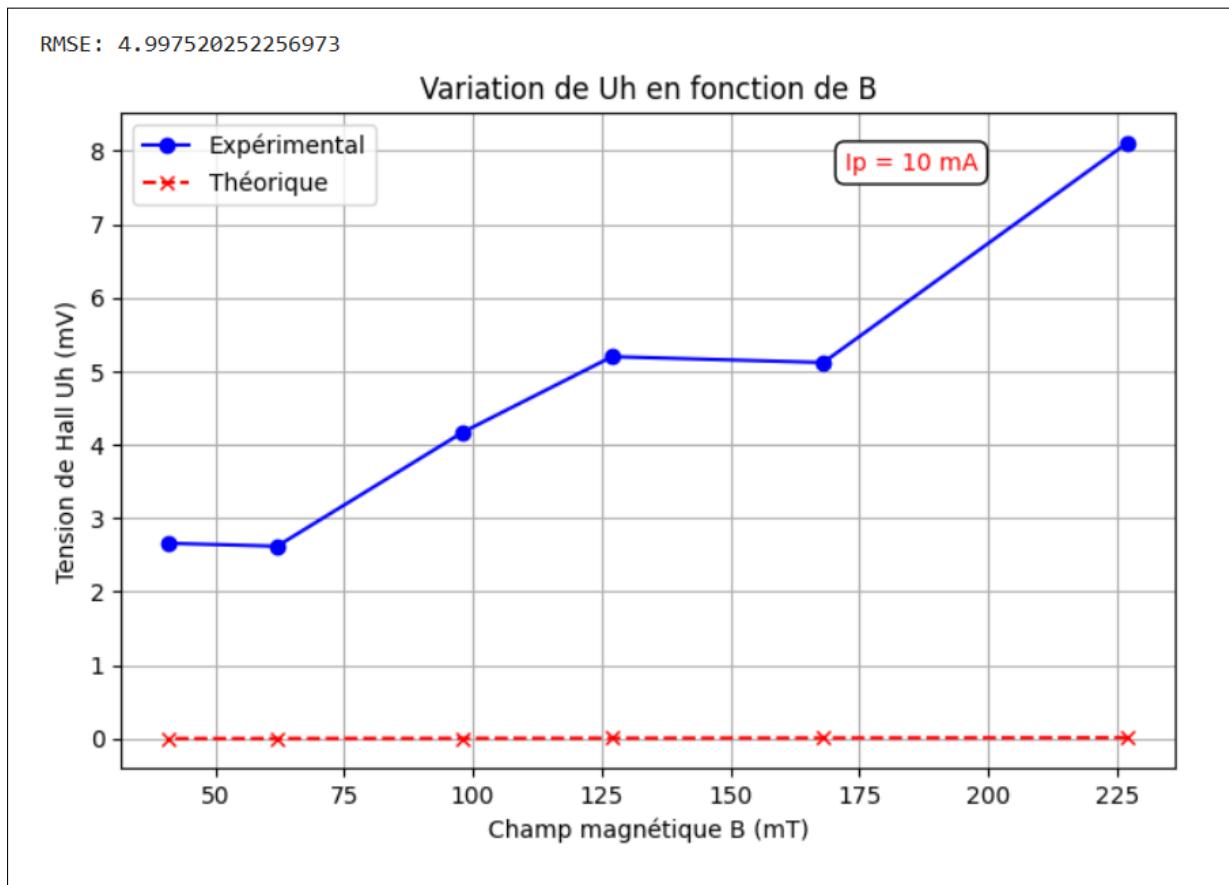


FIGURE 25 – Représentation de U_H théorique et expérimentale en fonction de B

RMSE : 4.9975 milivolts, ce qui indique qu'en moyenne, les prédictions du modèle théorique s'écartent des valeurs mesurées d'environ 4.9975 mV.

Cette valeur de RMSE est relativement élevée, surtout compte tenu de la plage des valeurs de U_H qui varie de 2.62 mV à 8.11 mV. Une erreur moyenne de près de 5 mV indique une discordance significative entre les prédictions du modèle et les mesures expérimentales.

- Conclusion

L'analyse des résultats obtenus lors de nos expériences sur l'effet Hall en comparaison avec les prédictions théoriques du modèle de Drude met en évidence plusieurs points importants. L'erreur quantifiée par le RMSE entre les valeurs expérimentales et théoriques suggère des écarts notables qui nécessitent une interprétation approfondie pour comprendre les limitations de notre approche expérimentale.

7.2 Sources principales d'erreur et propositions d'amélioration

Malgré tous nos efforts pour fournir les résultats les plus précis possible, notre approche reste loin d'être parfaite. Ceci est dû à plusieurs causes :

- **Mesures du champ magnétique B :** Aboutir à une mesure précise du B est très difficile vu que les champs magnétiques provenant d'autres équipements ou installations électriques à proximité interfèrent, en particulier dans un environnement, comme celui du Fablab, dense en équipements électroniques.
- **Qualité et propriétés du matériau :** Les impuretés et défauts dans la plaque de germanium peuvent altérer les mesures. De plus, les variations de dopage et de densité des porteurs de charge au sein de l'échantillon peuvent entraîner des comportements non uniformes.
- **Précision et stabilité :** La précision du multimètre, qui dépend de sa capacité à fournir des lectures proches de la valeur réelle sans erreur systématique, ainsi que sa stabilité sur le temps, influencent directement la fiabilité des résultats obtenus.

Afin d'améliorer les correspondances entre théorie et pratique, il est essentiel de :

- Réduire les erreurs expérimentales citées ci-dessus par l'utilisation d'appareils de mesure plus précis et la réalisation de l'expérience dans un environnement plus adéquat.
- Utiliser d'un modèle théorique plus précis, notamment celui de la bande électronique.

8 Applications de l'effet Hall

8.1 Introduction au capteur à effet Hall

Les capteurs à effet Hall jouent un rôle crucial dans les technologies modernes en exploitant l'effet Hall pour détecter et mesurer des champs magnétiques. Lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique, ils génèrent une tension proportionnelle à la densité du flux magnétique. Cette tension est ensuite analysée par des circuits électroniques pour fournir des informations précises sur la présence, la force, ou le mouvement d'objets magnétiques. Leur robustesse, faible coût et capacité à fonctionner dans des environnements difficiles en font des outils indispensables dans diverses applications.



FIGURE 26 – Capteur à effet Hall A3144

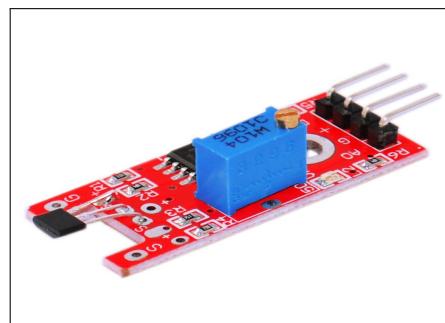


FIGURE 27 – Capteur à effet Hall KY-024

8.2 Domaines d'utilisation des capteurs à effet Hall

Automobile

- Détection de position et de vitesse des composants rotatifs (roues, vilebrequin, arbres à cames).
- Systèmes de freinage (ABS, TCS).

Électronique et Informatique

- Interrupteurs sans contact (claviers, souris).
- Détection de position des têtes de lecture/écriture dans les disques durs.

Appareils ménagers

- Détection de position des moteurs (machines à laver, lave-vaisselles).
- Détection d'ouverture et de fermeture des portes (réfrigérateurs, micro-ondes).

Industrie et Automation

- Positionnement précis des bras robotiques.
- Détection de mouvements et de positions dans les systèmes de sécurité des bâtiments.

8.3 Application dans le domaine de sécurité

Le domaine qu'on a choisi pour notre projet est celui **des systèmes de sécurité**. L'objectif principal est de démontrer l'utilisation de l'effet Hall dans des dispositifs de détection de mouvements, tels que la surveillance de l'ouverture et de la fermeture de portes ou de fenêtres, essentiels pour la prévention des intrusions et la sécurisation des locaux. Pour cela, nous avons réalisé un prototype utilisant un capteur à effet Hall pour vérifier sa capacité à détecter la présence d'un champ magnétique.

8.3.1 Description du montage

Matériel	Fonctionnement
Carte Arduino	Contrôle et gestion du capteur à effet Hall, traitement des données et activation de la LED
KY-024 Module Capteur Magnétique à Effet Hall	Détection du champ magnétique produit par l'aimant permanent, génération d'une tension proportionnelle à la densité du flux magnétique
Fils de connexion	Connexion des différents composants pour permettre le flux de courant et de données
LEDs	Indicateur visuel de détection de champ magnétique
Résistance pour la LED (100 Ω)	Limitation du courant à travers la LED pour éviter sa destruction
Multimètre	Mesure des valeurs de tension et de courant dans le circuit pour vérification et calibration
Aimant permanent	Génération d'un champ magnétique constant nécessaire pour l'effet Hall
Source de courant	Alimentation électrique du circuit
LCD	Afficher des valeurs du champ magnétique
Breadbord	Connexion entre les différentes composantes et l'Arduino

TABLE 4 – Matériel et fonctionnement

8.3.1.1 Premier montage : Test de fonctionnement du capteur

Pour tester le fonctionnement du capteur à effet Hall, nous avons réalisé un premier montage.

Nous avons branché en série avec notre capteur une résistance pour éviter de brûler la LED.

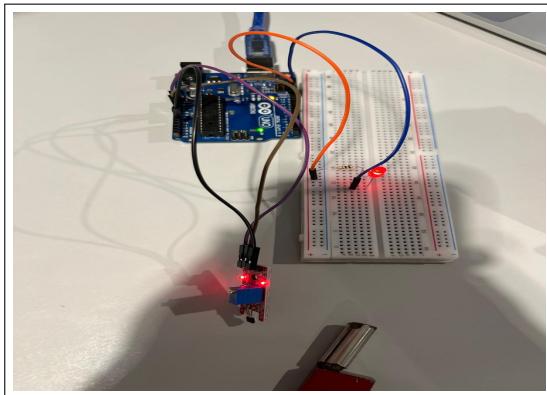


FIGURE 28 – Présence d'un champ
B

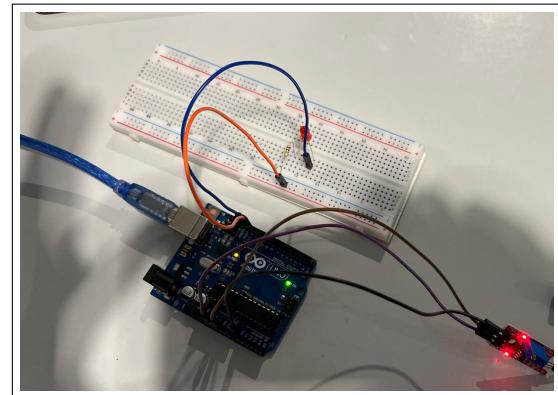


FIGURE 29 – Absence de tout
champ B

Observations :

- Lorsque le capteur détecte un champ magnétique, la LED rouge s'allume.
- Lorsque le capteur ne détecte aucun champ magnétique, la LED s'éteint.

Les résultats obtenus étaient prometteurs, confirmant la capacité du capteur à détecter la présence d'un champ magnétique.

Contraintes rencontrées

Lors de la réalisation de ce prototype nous avons rencontré plusieurs contraintes techniques et pratiques :

- Configuration correcte du capteur de Hall (KY-024) :

Le capteur de Hall doit être correctement aligné avec l'aimant pour déterminer efficacement le champ magnétique.

- Inversion des valeurs de sortie :

Initialement, la LED s'allumait en l'absence de l'aimant et s'éteignait lorsque l'aimant était proche, ce qui était contraire aux attentes.

- Précision de la mesure :

La mesure de la tension de Hall avec un multimètre ne fournit pas des valeurs minutieuses et précises, ce qui nous a amenés à rechercher une alternative pour déterminer la tension de Hall de manière plus fiable.

Résolution des contraintes

Pour surmonter les contraintes rencontrées, les solutions suivantes ont été mises en place :

- **Configuration correcte du capteur de Hall** : Un soin particulier a été apporté à l'alignement de l'aimant avec le capteur de Hall pour assurer une détection optimale du champ magnétique.

- **Ajustement du seuil de détection dans le code Arduino** : Le code Arduino a été modifié pour inverser le seuil de détection de la tension de Hall.

- **Mise en place d'un deuxième montage** :

Pour résoudre cette contrainte, nous avons mis en place un deuxième montage plus détaillé, prenant en considération la valeur du champ magnétique B détecté lors de l'intervention de l'aimant. Cela nous permis de fournir des mesures plus précises et cohérentes de la tension de Hall, en se basant sur le code d'Arduino qui la calcule directement .

8.3.1.2 Deuxième montage :

Le deuxième montage diffère du premier par l'ajout d'un écran LCD approprié à la carte Arduino, qui affiche la valeur du champ magnétique B détecté, en millitesla (mT) et en microtesla (μ T). Nous nous sommes concentrés sur les valeurs en millitesla. Et, nous avons ajouté une LED verte. Le montage comprend toujours une résistance pour protéger les LED.

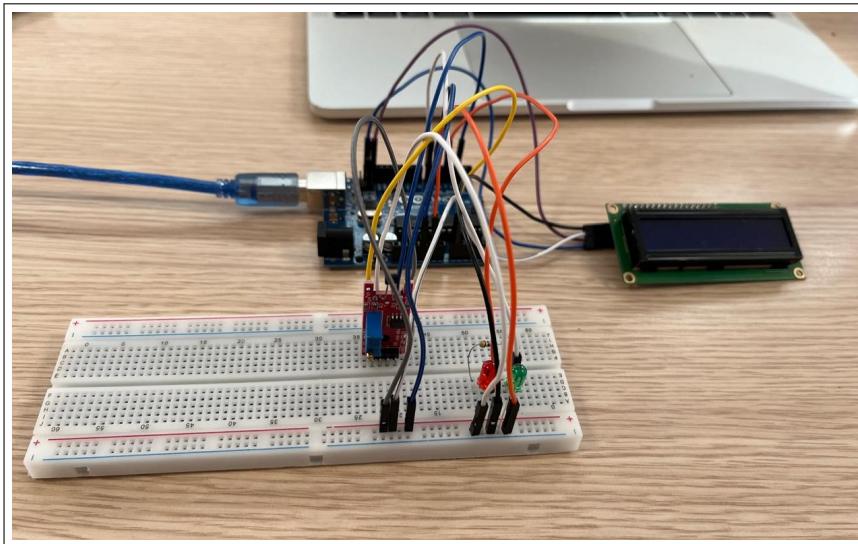


FIGURE 30 – Montage de l'application de l'effet hall

Grâce au code Arduino mis en place et en s'assurant que le montage est en série, nous avons pu obtenir des résultats prometteurs.

- **Détection d'un champ magnétique négatif**

Lorsque le capteur détecte un champ magnétique négatif (généré par le pôle négatif de l'aimant), la LED rouge s'allume.

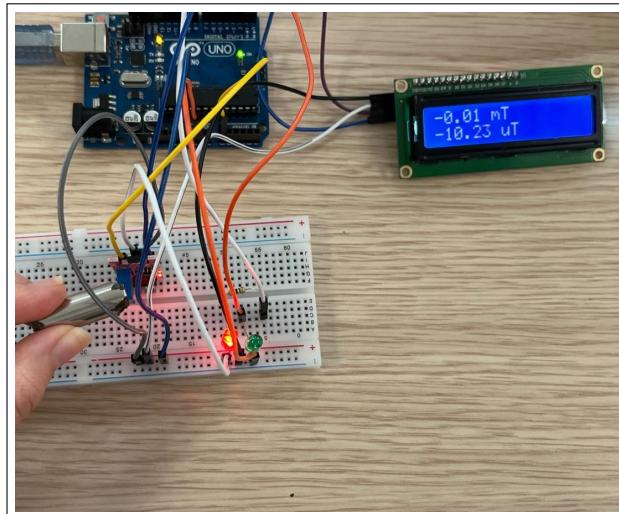


FIGURE 31 – Allumage de la LED ROUGE

Une valeur négative du champ B , de l'ordre de -0,01 millitesla (mT), s'affiche sur le LCD lorsqu'un champ magnétique négatif est détecté par le capteur.



FIGURE 32 – Affichage de la valeur du B

Pour cette valeur du champ B , l'exécution du code Arduino nous affiche des valeurs de tension de Hall variant entre 1,72 V et 1,74 V.

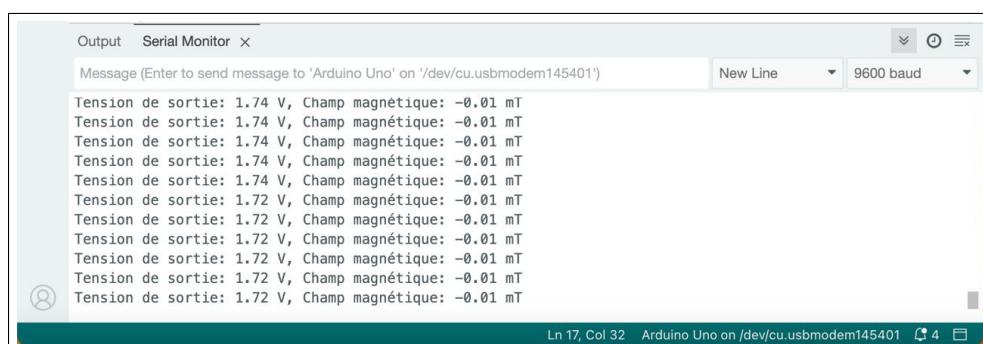


FIGURE 33 – Affichage de la tension de Hall

- **Détection d'un champ magnétique positif**

Lorsque le capteur détecte un champ magnétique positif (généré par le pôle positif de l'aimant), une valeur positive du champ s'affiche sur le LCD, la LED verte s'allume, et la LED rouge reste éteinte.

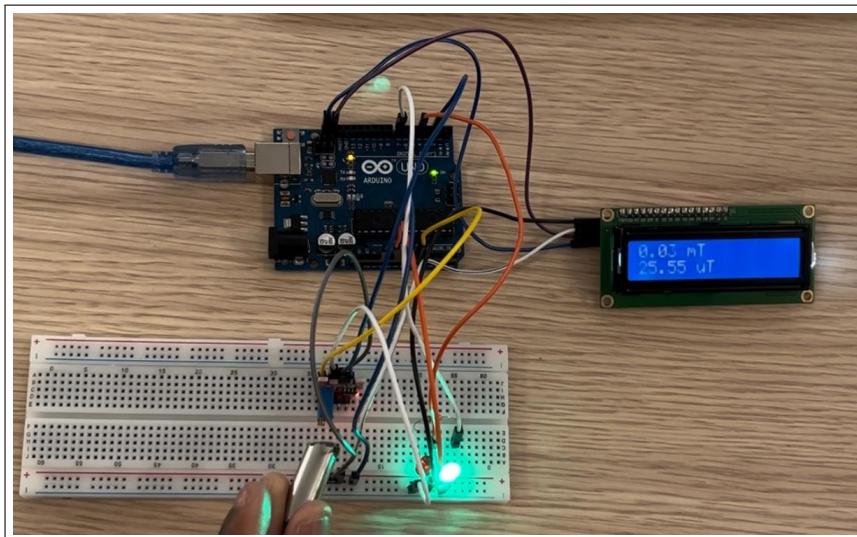


FIGURE 34 – Allumage de la LED VERTE

Une valeur positive du champ B , de l'ordre de 0,03 millitesla (mT), s'affiche sur le LCD lorsqu'un champ magnétique positif est détecté par le capteur.



FIGURE 35 – Affichage de la valeur du B

Pour cette valeur du champ B , l'exécution du code Arduino nous affiche des valeurs de tension de Hall variant entre 4,18 V et 4,19 V.



FIGURE 36 – Affichage de la tension de Hall

- **Absence d'un champ magnétique**

Lorsque le capteur ne détecte aucun champ magnétique, nous remarquons que la valeur affichée en millitesla (mT) est de 0,00, mais la valeur affichée en microtesla (μ T) est de 0,18. Cela est dû à l'existence d'un champ magnétique de faible amplitude autour de nous.



FIGURE 37 – Affichage de la tension de Hall

8.3.1.3 Résultats et interprétations :

Les résultats de l'expérience ont montré que l'effet Hall pouvait être utilisé efficacement pour détecter la présence d'un champ magnétique et, par conséquent, l'ouverture ou la fermeture d'une porte ou d'une fenêtre. Les mesures de tension trouvées ont confirmé les variations attendues :

.Sans aimant : La tension mesurée était de 0 V.

.Avec aimant : La tension mesurée était significativement plus élevée.

Cette différence de tension a été utilisée pour allumer ou éteindre les LEDs, démontrant ainsi le principe de détection de mouvement basé sur l'effet Hall.

Le système de sécurité développé peut être facilement intégré dans des applications domestiques et industrielles pour renforcer la sécurité.

Voici un aperçu des résultats observés :

Précision : Les mesures obtenues avec le capteur de Hall sont précises et la réponse est rapide, permettant une détection efficace et fiable des champs magnétiques.

Simplicité : Le système est facile à mettre en œuvre grâce à l'utilisation de composants courants comme l'Arduino et les capteurs de Hall, ce qui permet une adaptation simple à diverses applications de sécurité.

Rentabilité : L'utilisation de composants disponibles et économiques en fait une solution rentable pour de nombreuses applications.

9 Conclusion et perspectives futures

Cette expérience sur l'effet Hall nous a permis d'appliquer une démarche expérimentale rigoureuse et une approche scientifique méthodique. Nous avons été confrontés à diverses difficultés techniques et méthodologiques, mais grâce à la persévérance et au travail d'équipe, nous avons réussi à surmonter ces obstacles.

Ce projet nous a également appris l'importance de l'adaptation et de la flexibilité. Lors de la confrontation aux problèmes imprévus, il est crucial de revoir les manipulations et d'explorer d'autres voies alternatives pour atteindre nos objectifs. Cette attitude proactive nous a permis de mener à bien notre expérience malgré les défis rencontrés.

Au terme de ce projet, nous comprenons mieux l'effet Hall et son application dans les dispositifs de détection de mouvements et de champs magnétiques. Nous avons pu vérifier plusieurs propriétés des semi-conducteurs dopés n et p, et interpréter les résultats obtenus à la lumière de nos connaissances théoriques. L'utilisation d'outils comme l'Arduino et la mise en place de systèmes de mesure nous ont également permis de renforcer nos compétences pratiques en électronique.

En conclusion, ce projet a été une expérience enrichissante qui a développé notre culture scientifique et notre capacité à travailler en équipe face à des problèmes réels. Nous remercions chaleureusement l'Ecole Centrale Casablanca pour cette opportunité, ainsi que tous les encadrants pour leur aide précieuse et leur soutien tout au long de cette formation.

Pour les promotions futures, nous recommandons de rester toujours ouverts à l'exploration et à l'adaptation. Les projets expérimentaux peuvent souvent dévier des plans initiaux, et il est essentiel de rester ouvert à la recherche. Souvenez-vous qu'après chaque échec vient une réussite.

10 Annexe

Codes des différentes courbes :

https://colab.research.google.com/drive/1EAzxIfVyEFiX_CGVy26JeTQbEulZbBascrollTo=ox9hDsCQtgt

Le code Arduino utilisé a été crucial dans le fonctionnement du système de détection. Voici le code final utilisé pour contrôler le capteur de Hall et la LED dans le premier montage :

```
sketch_jun6a.ino
1 int hallSensorPin = A0; // Sortie analogique du capteur KY-024
2 int ledPin = 13; // Broche de la LED
3 int threshold = 271; // Seuil calculé
4
5 void setup() {
6     pinMode(ledPin, OUTPUT); // Définir la broche de la LED comme sortie
7     Serial.begin(9600); // Initialiser la communication série
8 }
9
10 void loop() {
11     int sensorValue = analogRead(hallSensorPin); // Lire la valeur du capteur
12     Serial.println(sensorValue); // Afficher la valeur lue
13
14     if (sensorValue > 271) { // Utiliser le seuil pour détecter le champ magnétique
15         digitalWrite(ledPin, HIGH); // Allumer la LED
16     } else {
17         digitalWrite(ledPin, LOW); // Éteindre la LED
18     }
19
20     delay(100); // Petite pause pour éviter des lectures trop rapides
21 }
22
```

FIGURE 38 – Code Arduino pour le premier montage

Le deuxième code Arduino mis en place pour trouver les valeurs de tension de hall est le suivant :

```

1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3
4 int ledPin = 7;           // Pin pour la LED
5 int hall_analog = A0;    // Pin analogique du capteur KY-024
6 int hall_digital = 2;    // Pin numérique du capteur KY-024
7
8 const float OFFSET_VOLTAGE = 2.447; // Offset mesuré du capteur
9
10 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Adresse de l'écran LCD
11
12 void setup() {
13     lcd.init();           // Initialiser l'écran LCD
14     lcd.backlight();
15     lcd.setCursor(0, 0);
16     pinMode(ledPin, OUTPUT);
17     pinMode(hall_digital, INPUT);
18
19     Serial.begin(9600);   // Initialiser la communication série à 9600 bps
20 }
21
22 void loop() {
23     // Lire la valeur analogique du capteur KY-024
24     int analogValue = analogRead(hall_analog);
25     float voltage = analogValue * 5.0 / 1023.0;
26
27     // Convertir la valeur en microTesla et milliTesla en utilisant la valeur d'offset
28     float uTesla = (voltage - OFFSET_VOLTAGE) * 15.0; // Conversion en microTesla
29     float mTesla = uTesla / 1000.0;                      // Conversion en milliTesla
30
31     // Afficher les valeurs sur l'écran LCD
32     lcd.setCursor(0, 0);
33     lcd.print(mTesla);
34     lcd.print(" mT ");
35     lcd.setCursor(0, 1);
36     lcd.print(uTesla);
37     lcd.print(" uT ");
38
39     // Afficher les valeurs sur le moniteur série
40     Serial.print("Tension de sortie: ");
41     Serial.print(voltage);
42     Serial.print(" V, Champ magnétique: ");
43     Serial.print(mTesla);
44     Serial.println(" mT");
45
46     // Vérifier l'état du capteur Hall numérique
47     int hallState = digitalRead(hall_digital);
48     if (hallState == HIGH) {
49         digitalWrite(ledPin, HIGH); // Allumer la LED
50     } else {
51         digitalWrite(ledPin, LOW); // Éteindre la LED
52     }
53
54     delay(500); // Attendre 500 ms avant de relire le capteur
55 }
56

```

Output Serial Monitor ×

Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on '/dev/cu.usbmodem145401') New Line 9600 baud

Ln 17, Col 32 Arduino Uno on /dev/cu.usbmodem145401 4

(a) Code Arduino pour le deuxième montage

11 Références bibliographiques

- [1] https://courses.washington.edu/phys431/hall_effect/hall_effect.pdf
- [2] <https://fr.scribd.com/document/612233690/Application-Effet-Hall>
- [3] <https://www.mit.edu/aryag/pdfs/drude.pdf>
- [4] <https://theses.hal.science/tel-01939713/document>
- [5] https://www.phywe.com/fr/experiences-et-ensembles/experiences-universitaires/effet-hall-dans-du-germanium-dope-n-et-p_1052_12085/
- [6] https://www.epfl.ch/schools/sb/sph/wp-content/uploads/H6_Effet_hall.pdf
- [7] https://users.polytech.unice.fr/lorenz/TP_Elec3_2015_totaL.pdf
- [8] https://www.3bscientific.fr/product-manual/U10370_F.R.pdf
- [9] <https://standexelectronics.com/magnetic-sensing/magnetic-sensing-technologies-reed-switches-vs-hall-effect-switches/>
- [10] <https://www.teachmemicro.com/arduino-magnetic-sensor-using-hall-effect/>
- [11] <https://www.moussasoft.com/ky-035capteur-a-effet-hall-magnetic-avec-arduino/>
- [12] <https://robdomo.com/arduino/exemples-montage-schemas-et-codes/uno/intermediaire/detecteur-magnetique-a-effet-hall-avec-module-ky-024-code-basique-avec-un-arduino/>
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=B2I6vgl-SJw>

