

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
X•⊙V•EX •K||E C:K:IA :||K•X - X:⊙EO÷t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Physique

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Polycopié de TP

En : Physique du solide



Travaux pratiques de Physique du Solide

Par Dr Bouhdjer Lazhar

Année : 2017/2018

AVANT-PROPOS

Ce polycopié est destiné aux étudiants en 3^{ème} année licence spécialité: Physique fondamentale. L'objectif de cet ouvrage est d'aborder la physique du solide afin de comprendre les notions de base à travers des expériences simples et réalisables. La connaissance des principes de base de physique du solide, qui incluent entre autres la cristallographie, les propriétés mécaniques, et la physique des semi-conducteurs, constituent un atout et une nécessité pour le niveau licence. Dans ce contexte, les travaux pratiques de physique du solide traitant les propriétés: structurale, mécanique, thermique, et électrique permettent de mieux appréhender les divers phénomènes physiques.

Le programme ministériel

Unité d'Enseignement	VHS	V.H hebdomadaire				Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
	14-16 sem	C	TD	TP	Autres			Continu	Examen
TP Physique du Solide	22h30	-	-	1h30		2	4	50%	50%

Semestre : 6

UE : Méthodologie

Matière : Travaux Pratiques de Physique du solide

Objectifs de l'enseignement

L'objectif de ces travaux pratiques est d'introduire quelques principes essentiels de la physique de la matière condensée.

Contenu de la matière :

TP 1: Cristallographie

TP 2: Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

TP 3: Effet Hall

TP 4: Emission thermo-électronique

TP 5: Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension d'une photopile solaire

Mode d'évaluation : Continu : 50% Examen : 50%

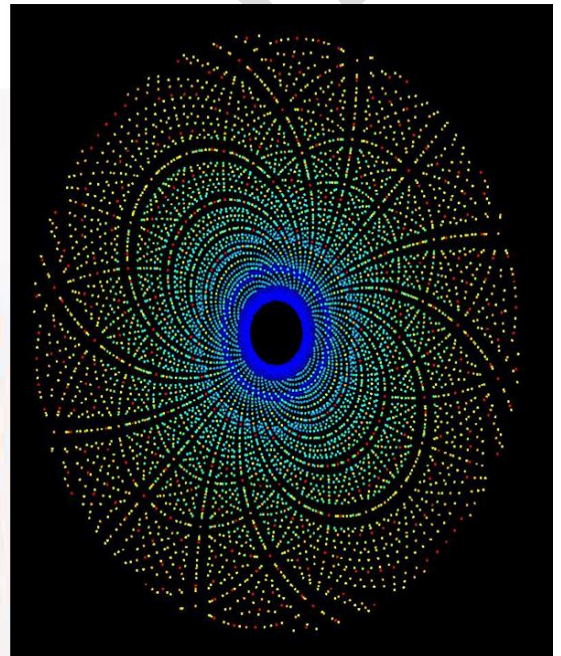
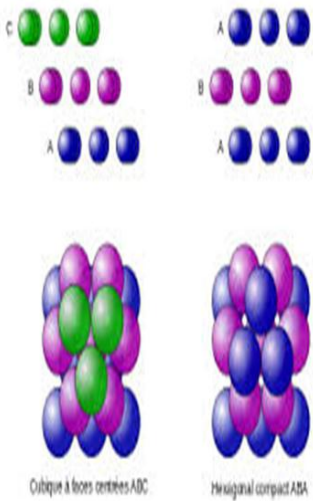
SOMMAIRE

TP N°1 : Le modèle des empilements compacts	P 1-3
TP N°2 : Détermination des structures cristallines par diffraction des rayons X	P 4-6
TP N°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal »	P 7-14
TP N°4 : Diffraction d'électrons	P 15-18
TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion	P 19-26
TP N°6: Effet Hall	P 27-32
TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN	P 33-38
Références	P 42

Dr.L.

TP N°1 : Cristallographie Partie A : Le modèle des empilements compacts

Crystallography



Dr 1

TP N°1 : Le modèle des empilements compacts

1- Objectifs :

Introduire quelques notions de base de cristallographie : empilement compact, les plans réticulaires, le motif, la maille, la coordinence et la capacité.

2- Notions sur les empilements de sphères dures

Introduction : Plus de 95% des solides existent à l'état cristallisé. D'autres substances comme les verres, ainsi que les liquides, les gaz et les plasmas ont une structure amorphe.

Les matériaux peuvent être classés selon qu'ils présentent :

- une structure parfaitement désordonnée comme les gaz monoatomiques,
- un ordre à courte distance tel que les gaz multi-atomiques, les verres et les substances amorphes,
- une structure bien ordonnée, c'est à dire les substances cristallisées.

Certains solides peuvent passer d'un état cristallisé à un état amorphe ou l'inverse, sous des conditions externe, par exemple : par fusion ou sublimation. Initialement, le domaine de la cristallographie était limité à l'étude géométrique des cristaux. On considère le cas des matériaux cristallins unaires, où les atomes sont assimilés à des sphères identiques, strictement régulières et infiniment rigides de rayon R.

Le problème se ramène alors à examiner comment des sphères toutes identiques peuvent s'empiler ?

Deux arrangements sont possibles :

1. Un arrangement « **carré** » représenté en figure 1.
2. Un arrangement « **hexagonal** » représenté en figure 2.

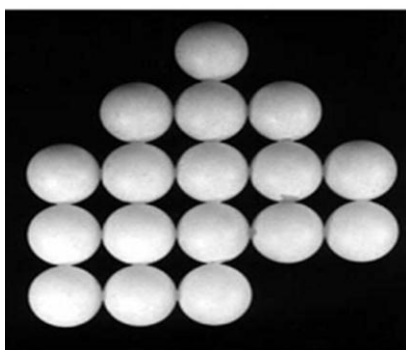


Figure 1 : Photo prise au-dessus d'un arrangement carré

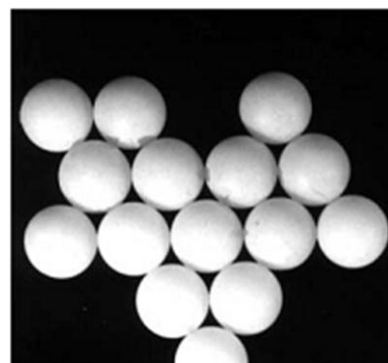


Figure 2 : Photo prise au-dessus d'un arrangement hexagonal

L'arrangement carré laisse beaucoup de « vide » que l'arrangement hexagonal. Il est donc moins compact et moins **stable** que l'arrangement hexagonal (voir le cours de physique du solide). Pour édifier un ensemble tridimensionnel il faut placer un second plan sur le premier. Plusieurs possibilités se présentent dans les deux cas précédant :

TP N°1 : Le modèle des empilements compacts

a) Cas de l'arrangement carré

a.1. Soit le second plan **A** vient de se superposer exactement sur le premier, le cristal s'obtient en poursuivant les empilements **A A A....** C'est la structure **cubique simple C.S.** (Figure 3)

a.2. Soit le second plan **B** est décalé par rapport au premier de telle sorte que chaque sphère de **B** soit à la verticale du centre d'un interstice de **A'**. Le cristal s'obtient en poursuivant les empilements **A B A B A B....** C'est la structure **cubique centrée (CC)** (figure 4).

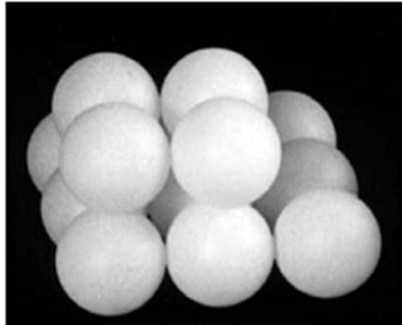


Figure 3 : Structure CS



Figure 4 : Structure CC

Remarque

L'introduction d'une sphère de rayon équivalent au centre de la maille **C.S** n'est possible conserver la symétrie cubique que si l'on dilate le paramètre de maille **a**. D'où pour la maille **C.S** : $a=2R$, et pour la maille **C.C** : $a > 2R$.

b) Cas de l'arrangement hexagonal

Le deuxième plan hexagonal se place de telle sorte que le centre des sphères du deuxième plan vient de se superposer exactement sur le premier **A** on a alors une **alternance AAAA** qui donne naissance au réseau **hexagonal simple (H.S)** (figure 5). Soit à la verticale des interstices du plan **A** et on a une couche notée **B**; pour la troisième plan, Il existe deux possibilités :

b.1. Soient à la verticale des interstices qui n'ont pas été occupés par les sphères du deuxième plan : on a alors une **alternance du type ABCABC** qui donne naissance au réseau **cubique face centré (CFC)** (figure 6).

b.2. Soient à la verticale des sphères du premier plan **A** : on a alors une **alternance du type ABABAB** qui donne naissance au réseau **hexagonal compact (H.C)** (figure 7).

TP N°1 : Le modèle des empilements compacts

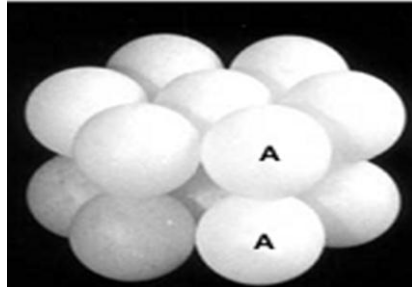


Figure 5 : Structure **HS**

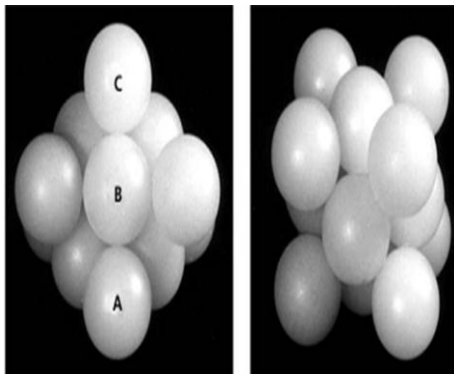


Figure 6: Structure **CFC**

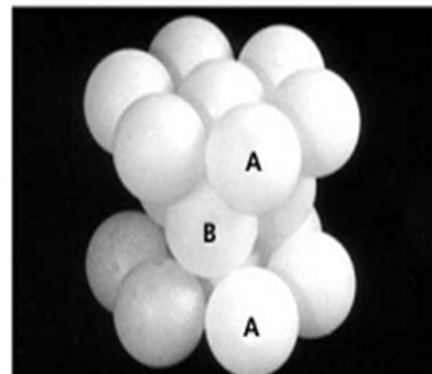


Figure 7 : Structure **HC**

3- Partie pratique

3.1. L'arrangement carré :

- Faire l'arrangement carré de type **AA**.
- Déterminer le plan réticulaire de densité maximale et calculer sa densité.
- Calculer : le nombre de motifs par maille, la coordinence et la capacité.
- Déterminer : le motif, les vecteurs de translations et le réseau de Bravais.
- Même questions pour l'arrangement **ABABA**.

3.2. L'arrangement hexagonal :

- Faire l'arrangement hexagonal de type **ABABA**.
- Déterminer le plan réticulaire de densité maximale et calculer sa densité.
- Calculer : le nombre de motifs par maille, la coordinence et la capacité.
- Déterminer : le motif, les vecteurs de translations et le réseau de Bravais.
- Mêmes questions pour l'arrangement **ABCA**.

TP N°2: Détermination des structures cristallines par diffraction des rayons X

1- Objectifs

- *Enregistrement d'un spectre de diffraction des rayons X.*
- *Indexation d'un spectre de DRX.*
- *Déterminer les paramètres de maille des cristaux de type NaCl.*

2- Introduction :

La mesure de la réflexion de Bragg est une méthode d'analyse importante réalisée avec des rayons X sur des échantillons sous forme des monocristaux ou bien des poudres. Le rayonnement X est réfléchi sur les plans réticulaires du cristal et les ondes partielles réfléchies aux différents plans interfèrent d'une façon constructive entre elles si la condition de Bragg est remplie. En connaissant la longueur d'onde du rayonnement X, on peut calculer les distances inter-réticulaires. L'expérience est dédiée pour étudier et comparer la structure des cristaux de type NaCl.

3- Rappel sur la loi de Bragg :

Il existe deux manières équivalentes de voir la diffraction des rayons X par une structure parfaitement périodique, due aux principes de **Bragg** et à **Von Laue**. Les deux points de vue sont encore largement utilisés. L'approche de Von Laue qui exploite le réseau réciproque, est plus proche de l'esprit de la théorie moderne de l'état solide, mais celle de Bragg est toujours d'un usage courant. Dans des matériaux cristallins, pour certaines longueurs d'ondes et certaines directions incidentes définies avec précision, W. L. Bragg observa des pics intenses de rayonnements diffractés appelés pics de Bragg. Il les expliqua en considérant un cristal comme étant composé de plans réticulaires, séparés d'une distance d_{hkl} (les plans réticulaires décrits au premier partie de T.P N°1). Les conditions d'obtention d'un pic aigu de rayonnement diffracté étaient :

- ✓ Les rayons X devraient être réfléchis comme le cas d'un miroir par les ions de chaque plan.
- ✓ Les rayons réfléchis par des plans successifs doivent interférer de manière constructive.

Si on appelle δ la différence de marche entre deux rayons réflecteurs par deux plans réticulaires séparés par une distance d_{hkl} , on aura une interférence constructive pour δ un multiple de la longueur d'onde λ . A l'aide de la de la figure 1 ci-dessus on montre que la relation de diffraction de Bragg s'écrit :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

TP N°2: Détermination des structures cristallines par diffraction des rayons X

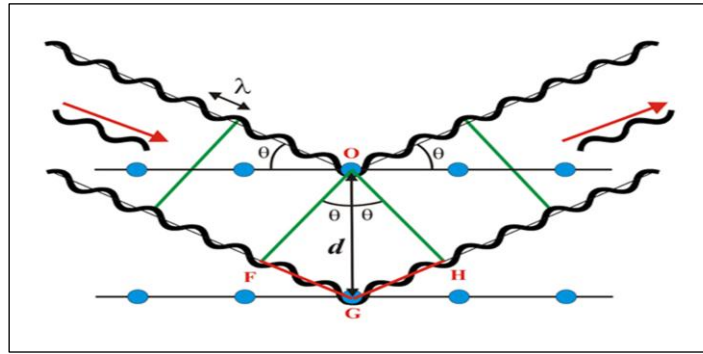


Figure 1. Schéma descriptif de la condition de diffraction de Bragg

L'expérience utilise le rayonnement X caractéristique d'un tube à rayons X équipé d'une anode en cuivre. En font partie le rayonnement K_α de longueur d'onde $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ et le rayonnement K_β de longueur d'onde $\lambda = 1.38 \text{ \AA}$. Un filtre nickel (Ni) permet de masquer largement le rayonnement K_β par absorption, le nickel se situe juste avant le cuivre dans le tableau périodique. En plus du rayonnement caractéristique, le tube à rayons X émet toujours un rayonnement de freinage d'une répartition spectrale continue. On l'observe dans les courbes de mesure comme un «arrière-plan » sous les pics du rayonnement caractéristique.

4- Dispositifs nécessaires

L'équipement utilisé contient :

- 1- L'appareil de Debye Scherrer (Figure 2).
- 2- Des échantillons de NaCl et LiF sous forme de poudre et monocristalline.

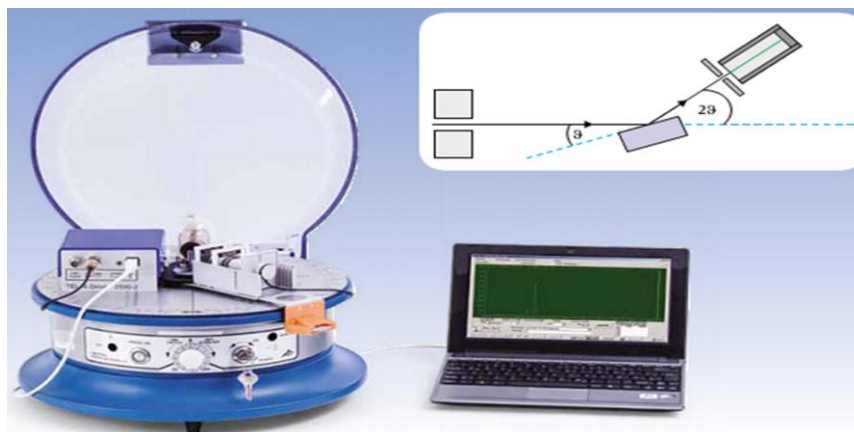


Figure. 2 :L'appareil de Debye Scherrer et le principe de mesure.

TP N°2: Détermination des structures cristallines par diffraction des rayons X

5- Manipulation :

- 1- Enregistrer le spectre de diffraction du rayonnement X d'une anode de cuivre sur la poudre de NaCl et LiF et sur l'échantillon monocristallin de NaCl et LiF.
- 2- Compléter le tableau suivant :

$2\theta(^{\circ})$	I (C /s)
20 ($^{\circ}$)-90($^{\circ}$) avec une vitesse angulaire de 0.5 $^{\circ}$ /min	

Tableau 1 : Les data de diffraction des rayons X sur les échantillons de NaCl et LiF

- 3- Tracer le diffractogramme $I_{rel} = f(2\theta)$, et compléter le tableau suivant.

N° de Raies	$2\theta(^{\circ})$	$\sin \theta$	$\sin^2 \theta$	$h^2 + k^2 + l^2$	a

Tableau. 2 : Les indices de Miller (hkl) et le paramètre de maille **a**.

- 4- Calculer l'incertitude relative de **a**.
- 5- Conclusion.

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

1- Objectifs

- Evaluation des diagrammes de Laue des cristaux de NaCl et de LiF.
- Etude de la symétrie et de la cristalline des cristaux de NaCl et de LiF.

2- Introduction

En 1912, Max Von Laue proposa de prouver la supposée nature ondulatoire des rayons X par sa diffraction sur des cristaux. Friedrich et Knipping prirent cette proposition et introduisirent un cristal sur le trajet des rayons après le collimateur d'un tube à rayons X. Sur un écran après le cristal, ils observèrent, comme prévu, des réflexions discrètes (Figure 1). A l'aide de cette expérience, ils prouvaient pour la première fois la structure de réseau spatiale des cristaux.

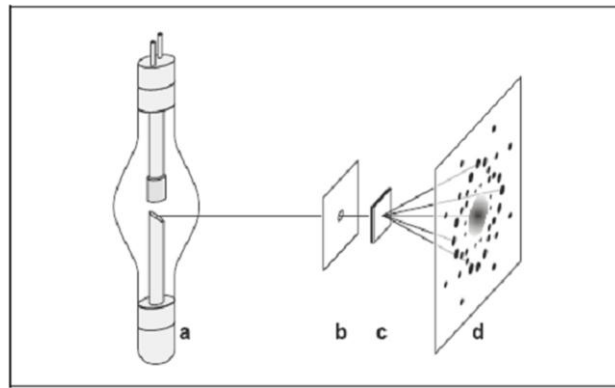


Fig. 1 Montage expérimental d'enregistrement de diagrammes de Laue d'un monocrystal (a) tube à rayons X (b) collimateur (c) cristal et (d) film radiographique.

3- Formulation de von Laue de la diffraction des rayons X:

Dans cette formulation on considère le cristal comme composé d'objets microscopiques identiques placés sur les sites \vec{R} d'un réseau de Bravais chacun pouvant réémettre le rayonnement incident dans toutes les directions. Des pics aigus sont observés seulement dans des directions et pour des longueurs d'ondes pour lesquelles les rayons diffusés par tous les points du réseau interfèrent de manière constructive. La figure 2 présente la méthode d'évaluation de la différence de marche entre deux rayons diffusés.

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

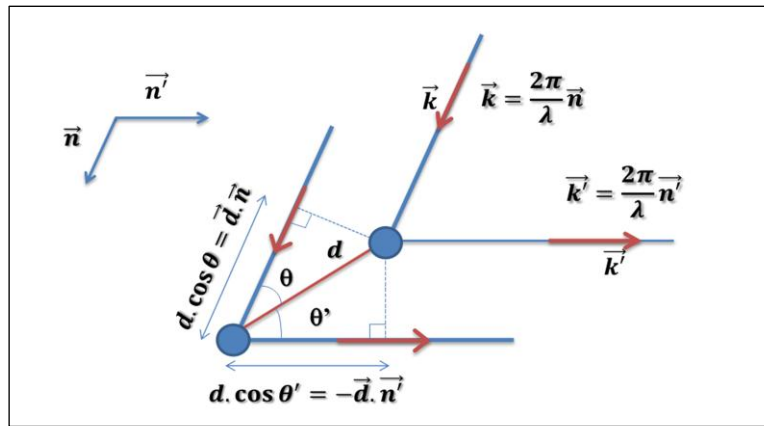


Figure.2 :Illustration de la différence de marche entre deux rayons diffusés par deux points séparés par une distance d_{hkl} .

D'après la figure précédente, la différence de marche totale entre les deux rayons est:

$$\delta = d_{hkl} \cos \theta + d_{hkl} \cos \theta' = \vec{d}_{hkl} \cdot (\vec{n} - \vec{n}') \quad (1)$$

La condition d'interférence constructive est que d soit un multiple entier de la longueur d'onde, il existe un entier naturel $n \in \mathbb{N}$ tel que:

$$\vec{d}_{hkl} \cdot (\vec{n} - \vec{n}') = n\lambda \Rightarrow \vec{d}_{hkl} \cdot \left(\frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} - \frac{\vec{k}'}{|\vec{k}'|} \right) = n\lambda \quad (2)$$

$$\text{Si la diffusion cohérent donc } |\vec{k}| = |\vec{k}'| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

$$\vec{d}_{hkl} \cdot (\vec{k} - \vec{k}') = n2\pi \quad (4)$$

La condition doit être valable pour tous les vecteurs \vec{d}_{hkl} , c'est-à-dire pour les nœuds du réseau de Bravais, donc pour tout vecteur de translation \vec{R} du réseau, d'où:

$$\vec{R} \cdot (\vec{k} - \vec{k}') = n2\pi \Rightarrow e^{i\vec{R} \cdot (\vec{k} - \vec{k}')} = 1 \quad (5)$$

Donc le vecteur $(\vec{k} - \vec{k}') = \vec{R}^*$ est un vecteur du réseau réciproque. Supposons que les vecteurs d'onde incident et diffusé, \vec{k} et \vec{k}' , satisfont à la condition de Laue:

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

$$\Delta \vec{k} = \vec{R}^* (h, k, l) \quad (6)$$

et comme : $\vec{R}^* (h, k, l)$ est \perp au plan (hkl)

$$\text{D'après l'équation (4) on a } \left| \vec{R}^* (h, k, l) \right| = n \frac{2\pi}{d_{hkl}} \quad (7)$$

D'où la construction (figure.3) :

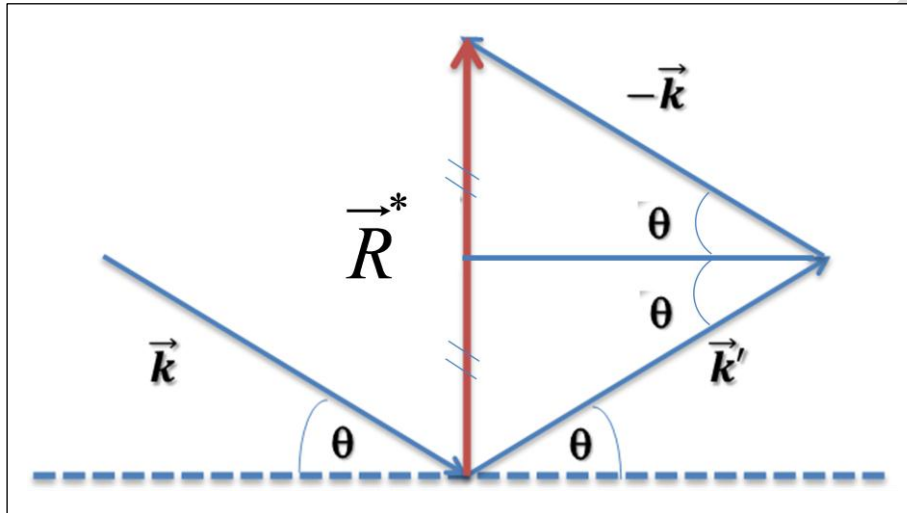


Figure. 3 : Equivalence des formulations de Bragg et von Laue.

$$\text{De plus: } \left| \vec{R}^* \right| = 2 \left| \vec{k} \right| \sin \theta = n \frac{2\pi}{d_{hkl}} \Rightarrow 2 \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta = n \frac{2\pi}{d_{hkl}} \quad (8)$$

On en déduit:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (9)$$

Qui est la condition de Bragg.

4- Exploitation d'un enregistrement de Laue

Le but de l'exploitation d'un enregistrement de Laue est de savoir à quoi correspond la diffraction causant la rangée de plans réticulaires par rapport au réflexe observé sur un film radiographique. A cet effet, on choisit le système des coordonnées de façon à ce que son origine correspond à l'origine du rayon incident sur le film radiographique. Le film radiographique est perpendiculaire au rayon, c'est-à-dire qu'il se situe dans le plan x-y (voir la figure. 4). L'axe z indique la direction de propagation du rayon X. Le rayonnement X traverse la surface plane du cristal au point K ; sa partie non diffracté rencontre le film de rayons X au point O .

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

La partie du rayonnement X qui est diffractée en K et respectant la condition de Laue sort du cristal avec un angle 2θ par rapport à la raie et rencontre le film radiographique au point $P = (x_P, y_P, 0)$, c'est-à-dire :

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\sqrt{X_P^2 + Y_P^2}}{L} \quad (10)$$

Où L : distance entre le cristal et le film de rayons X.

La direction de l'ensemble des plans du réseau $(h\ k\ l)$, qui conduit à la réflexion, est donnée par la bissectrice de l'angle 2θ (Voir la figure 4). L'angle entre la perpendiculaire sur la bissectrice qui passe par le point O et la ligne droite OP est θ . Cette perpendiculaire croise un parallèle à l'axe z par P dans le point Q . Le vecteur \overline{OQ} a les coordonnées (x_Q, y_Q, z_Q) est parallèle au vecteur \vec{G} du réseau réciproque. En raison de $x_P = x_Q$, $y_P = y_Q$ et de l'équation (10) :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Z_Q}{\sqrt{X_Q^2 + Y_Q^2}} \quad (11)$$

$$Z_Q = \sqrt{X_Q^2 + Y_Q^2 + L^2} - L \quad (12)$$

Les cristaux utilisés dans cette expérience sont coupés parallèlement au plan $(1\ 0\ 0)$. Leurs axes du cristal coïncident ainsi avec le système de coordonnées du laboratoire. Du fait que les vecteurs \vec{G} et \overline{OQ} sont parallèles, il s'ensuit que :

$$h:k:l = X_Q : Y_Q : Z_Q \quad (13)$$

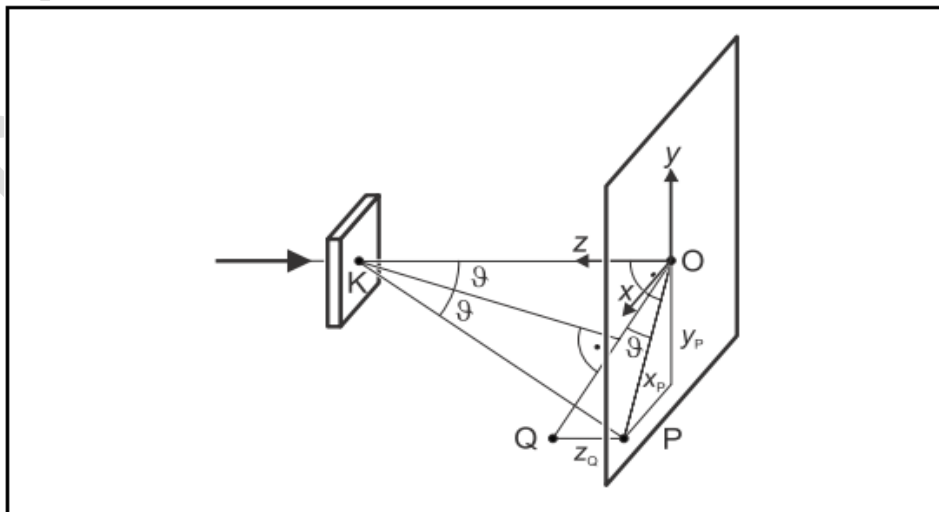


Figure. 4 : Description géométrique d'un rayon X qui est diffracté à un point K du cristal et qui pénètre dans le plan de film au point P .

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

Les indices h , k , et l recherchés sont donc le plus petit (numéro) triple non mixé (les règles d'extinction systématiques) d'entiers qui remplissent l'équation précédent. Ils permettent de calculer tous les paramètres de la diffraction qui conduit à la réflexion: la distance inter-réticulaire des plans de réseau est obtenue à partir de l'équation suivante pour le système cubique :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (14)$$

La longueur d'onde de l'équation :

$$\lambda = 2 \sin \theta \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (15)$$

et l'angle de Bragg :

$$\theta^\circ = \arctg \left(\frac{l}{\sqrt{h^2 + k^2}} \right) \quad (16)$$

5- Montage et réalisation

a) Le montage expérimental est représenté par la figure. 5.

- Monter le goniomètre ou le condensateur plan de rayons X. Indication: Les cristaux NaCl et LiF sont hygroscopiques et cassables : Garder les cristaux dans un endroit sec et éviter de les faire supporter dans des tensions mécaniques et ne les transporter que par leurs bouts.

5.1. Enregistrement de Laue pour un cristal de NaCl

- Pour les enregistrements de Laue (b), coller prudemment le cristal NaCl sur le trou sténopéique (a) avec un adhésif transparent (voir livraison du film radiographique de l'appareil à rayons X)

- Fixer le trou sténopéique sur le collimateur et le tourner prudemment afin d'avoir les axes extérieurs du cristal en horizontal ou en vertical.

- Fixer le cadre support du film sur le chemin expérimental et monter le chemin expérimental dans l'espace expérimental de l'appareil à rayons X.

- A l'aide d'un carton ; réaliser une distance de 15 mm et déplacer le cadre support du film de façon à ce qu'une distance de 15 mm sépare le cristal du film (en changeant cette distance, en obtient une image différente).

- Régler la tension (haute) tubes $U = 35$ kV, le courant d'émission $I = 1,0$ mA et $\Delta\beta = 0,0^\circ$.

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

- Choisir l'intervalle de mesure $\Delta t = 1800$ s et enclencher le compteur d'exposition en appuyant sur SCAN. A la suite d'une exposition prolongée les réflexes situés non loin du centre sont couverts par la brillance des rayons X non diffractés alors que ceux éloignés du centre sont visibles.
- Enlever le cadre support du film ainsi que le chemin expérimental de l'appareil à rayons X après la phase d'exposition.
- Retirer également le film radiographique et développer le comme indiqué dans la notice d'utilisation.

5.2. Enregistrement de Laue pour un cristal de LiF

- Echanger maintenant le cristal NaCl contre le cristal LiF et ajuster le.
- Fixer un nouveau film radiographique dans le cadre support du film et monter à nouveau le chemin expérimental ainsi que le cadre support du film.
- Déplacer le cadre support du film à condition de respecter la distance $L = 11$ mm entre le monocristal et le film radiographique.
- Choisir l'intervalle de mesure $\Delta t = 1800$ s et enclencher le compteur d'exposition à l'aide de SCAN.
- Après la phase d'exposition, retirer également le film radiographique et développer-le comme indiqué dans la notice d'utilisation.

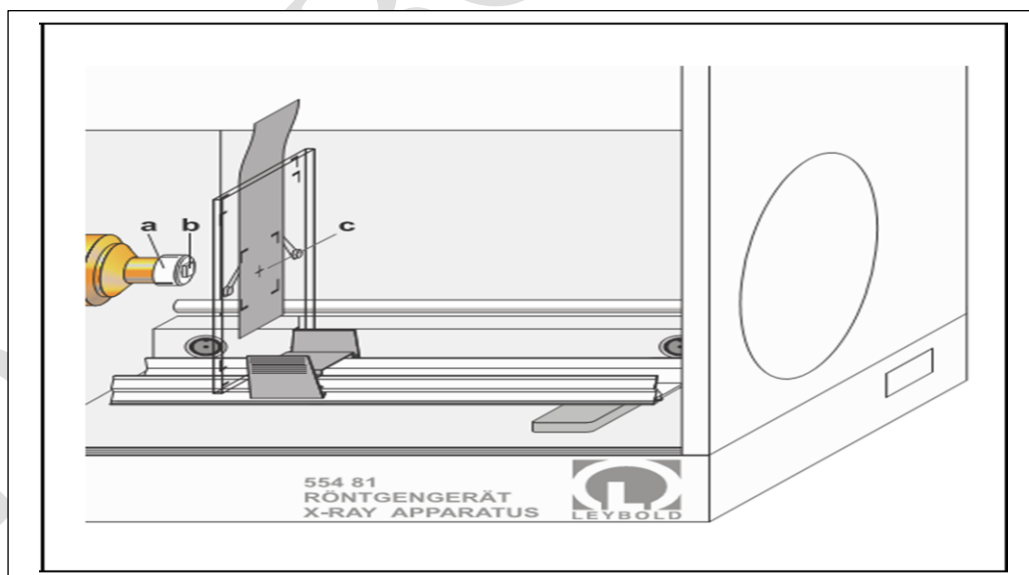


Figure. 5 : Montage expérimental pour l'enregistrement de Laue (a) goniomètre, (b) échantillon monocristalline (NaCl ou LiF) et (c) le film radiographique.

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

6. Exploitation des résultats

- 1- Installer le programme orientex.
- 2- Prenez des photos du film radiographique.
- 3- À l'aide de programme orientex déterminer les coordonnées X_Q et Y_Q .
- 4- Compléter les tableaux suivants :

a) Cas d'un cristal de NaCl.

	$X_Q [mm]$	$Y_Q [mm]$	$Z_Q [mm]$	h	k	l
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Tableau 1 : Coordonnées et indices de Miller des réflexes pour l'enregistrement de Laue sur un cristal de NaCl.

h	k	l	$d_{hkl} [pm]$	θ°	$\lambda [pm]$

Tableau 2 : Distance interatomique d_{hkl} , angle de Bragg θ° et longueur d'onde λ des rangées de plans réticulaires de NaCl, $a_0 = 5.6402 \text{ \AA}$.

b) Cas d'un cristal de LiF

	$X_Q [mm]$	$Y_Q [mm]$	$Z_Q [mm]$	h	k	l
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Tableau 3 : Coordonnées et indices de Miller des réflexes pour l'enregistrement de Laue sur un cristal de LiF.

TPN°3 : Diagramme de Laue « Etude de la structure de réseau d'un cristal de type NaCl »

h	k	l	$d_{hkl} [pm]$	θ°	$\lambda [pm]$

Tableau 6 : Distance inter atomique d_{hkl} , angle de Bragg θ° et longueur d'onde λ des rangées de plans réticulaires de LiF, $a_0 = 4.0280 \text{ \AA}$.

5- Indexer le diagramme de Laue pour les deux échantillons de NaCl et de LiF.

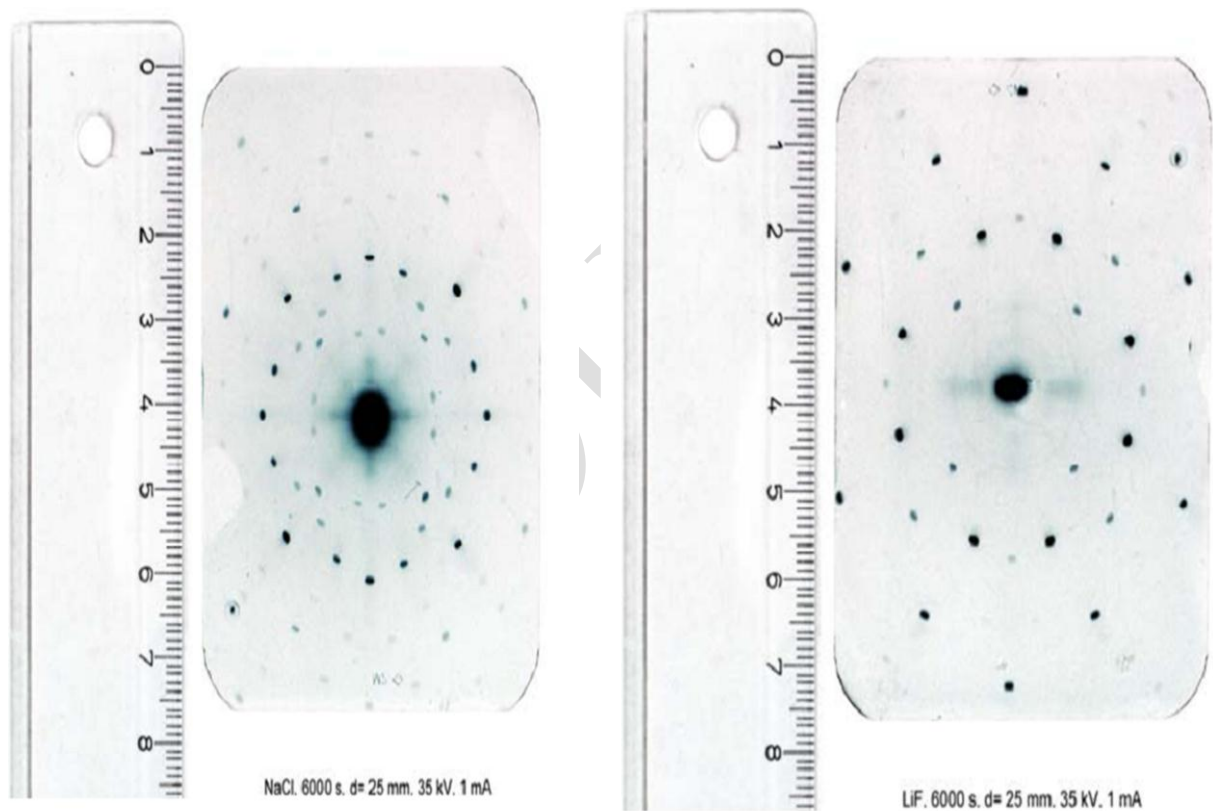


Figure.14 : Diagramme de Laue pour les deux cristaux NaCl et LiF.

7- Conclusion.

Diffraction d'électrons

I- Objectifs

- 1- Détermination des espacements entre les plans du réseau de graphite.
- 2- Détermination de la longueur d'onde des électrons.
- 3- Vérification de l'équation de de-Broglie.

II- Notions de base

En 1924, Louis de Broglie émet l'hypothèse que les particules possèdent fondamentalement des caractéristiques ondulatoires où la longueur d'onde dépend de l'impulsion. Ses réflexions ont été confirmées par C. Davisson et L. Germer par le biais de la diffraction d'électrons sur du nickel cristallin. Pour expliquer le rapport entre la longueur d'onde λ d'une particule et son impulsion p , de Broglie pose l'équation :

$$\lambda = \frac{h}{P} \quad (1)$$

h : Constante de Planck.

L'équation (1) peut être transformée, pour les électrons qui ont subi une tension d'accélération U_A en l'équation :

$$eU_A = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{P^2}{2m_e} \Rightarrow P = \sqrt{2em_e U_A} \quad (2)$$

$$\lambda_{th} = \frac{h}{\sqrt{2em_e U_A}} \quad (3)$$

Dans l'expérience, la nature ondulatoire des électrons dans un tube de verre sous vide est démontrée par diffraction sur graphite poly-cristallin. Sur l'écran fluorescent du tube en verre, l'on observe des anneaux de diffraction autour d'une tâche centrale dans la direction du faisceau et dont le diamètre D dépend de la tension d'accélération (fig. 1). Ces anneaux sont générés par diffraction d'électrons sur les plans réticulaires de microcristaux qui satisfont à la condition de Bragg (fig. 2).

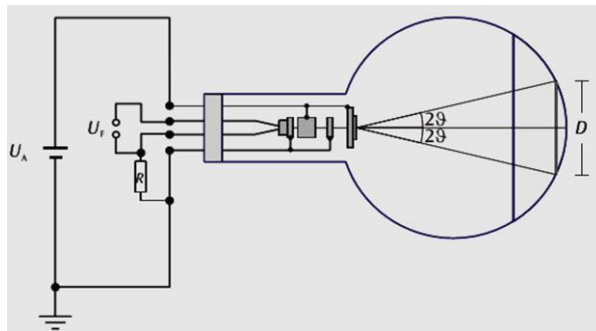


Fig. 1 : Représentation schématique des tubes de diffraction d'électrons.

TPN°4 : Diffraction d'électrons

La condition de Bragg

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

θ : Angle de Bragg, n: ordre de diffraction, d: écart entre les plans réticulaires.

Le diamètre de l'anneau de diffraction attribué à l'angle de Bragg-Winkel θ est de

$$D = 2L \tan 2\theta \quad (5)$$

L: écart entre le film graphite et l'écran fluorescent ($L = 13.5\text{cm}$).

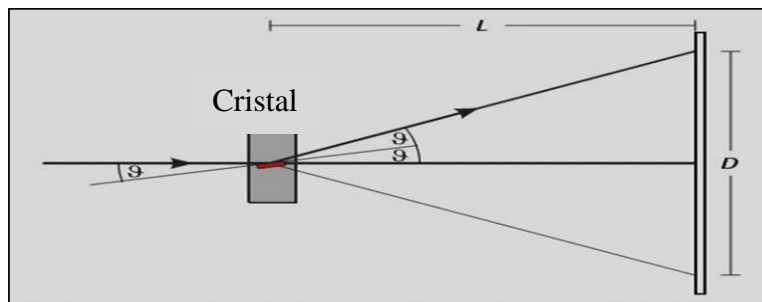


Fig. 2 : Réflexion de Bragg sur un ensemble « adapté » de plans réticulaires d'un cristal sélectionné sur un film graphite

Dans cette expérience, un matériau poly cristallin est utilisé comme un objet de diffraction. Ceci correspond à un grand nombre de petites cristallites simples disposées irrégulièrement dans l'échantillon. Il en résulte qu'il y a toujours des cristaux dans lesquels la condition de Bragg est satisfaite pour une direction d'incidence donnée et une longueur d'onde. Les réflexions produites par ces cristallites reposent sur des cônes dont l'axe commun est donné par la direction d'incidence. Des cercles concentriques apparaissent donc sur un écran situé perpendiculairement à cet axe. Les plans en treillis qui sont importants pour le diagramme de diffraction d'électrons obtenus avec cette configuration possèdent les espacements de plan du réseau (fig 3).

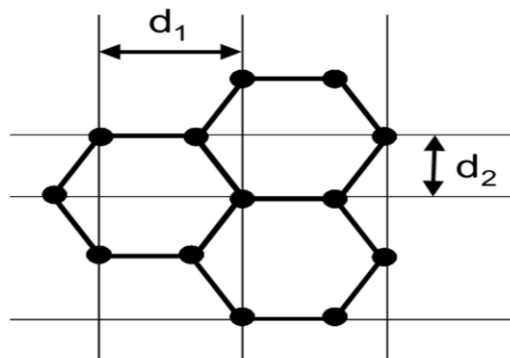


Fig. 3 : Structure cristalline du graphite avec les deux constantes réticulaires $d_1 = 213 \text{ pm}$ et $d_2 = 123 \text{ pm}$.

TPN°4 : Diffraction d'électrons

Si nous approchons :

$$\tan 2\theta = \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} \approx 2 \sin \theta \quad (\text{Pour des faibles angles : } \cos 2\theta \approx 1, \sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta \approx 2 \sin \theta)$$

$$\text{On obtient : } 2 \sin \theta = \frac{D}{2L} \Rightarrow \lambda_{\text{exp}} = d \frac{D}{2L} \quad (\text{nous prenons: } n=1) \quad (6)$$

A partir de l'équation (3), la longueur d'onde λ est déterminée par la tension d'accélération U_A . La combinaison de l'équation (3) et de l'équation (6) montre que les diamètres D_1 et D_2 des anneaux concentriques changent avec la tension d'accélération U_A :

$$D_i = k \frac{1}{\sqrt{U_A}} \quad \text{où: } k = \frac{2Lh}{d_i \sqrt{2m_e e}} \quad (i=1 \text{ ou } 2) \quad (7)$$

III- Découlement de l'expérience

Varié la tension d'accélération U_A entre 3 kV et 5 kV (avec un écart de 0,5 kV) et mesurer le diamètre D_1 et D_2 des anneaux de diffraction sur l'écran.

1- Compléter les tableaux suivants :

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{D_1}{\text{cm}}$	$\frac{D_2}{\text{cm}}$
3.0		
3.5		
4.0		
4.5		
5.0		

Tableau 1

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{D_1}{\text{cm}}$	$\frac{\lambda}{\text{pm}} \text{ exp}$	$\frac{\lambda_{1,\text{theory}}}{\text{pm}}$
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			

Tableau 2

TPN°4 : Diffraction d'électrons

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{D_2}{\text{cm}}$	$\frac{\lambda}{\text{pm}}$ exp	$\frac{\lambda_{2,\text{theory}}}{\text{pm}}$
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			

Tableau 3

- 2- Comparer entre λ_{exp} , λ_{th} et vérifier l'équation de « de Broglie ».
- 3- Tracer les courbes $D_i = f\left(\frac{1}{\sqrt{U_A}}\right)$ et déduire les valeurs de $d_{1\text{exp}}$ et $d_{2\text{exp}}$.
- 4- Fait la comparaison entre $d_{i\text{exp}}$ et $d_{i\text{th}}$. Conclure.
- 5- Conclusion.

Données :

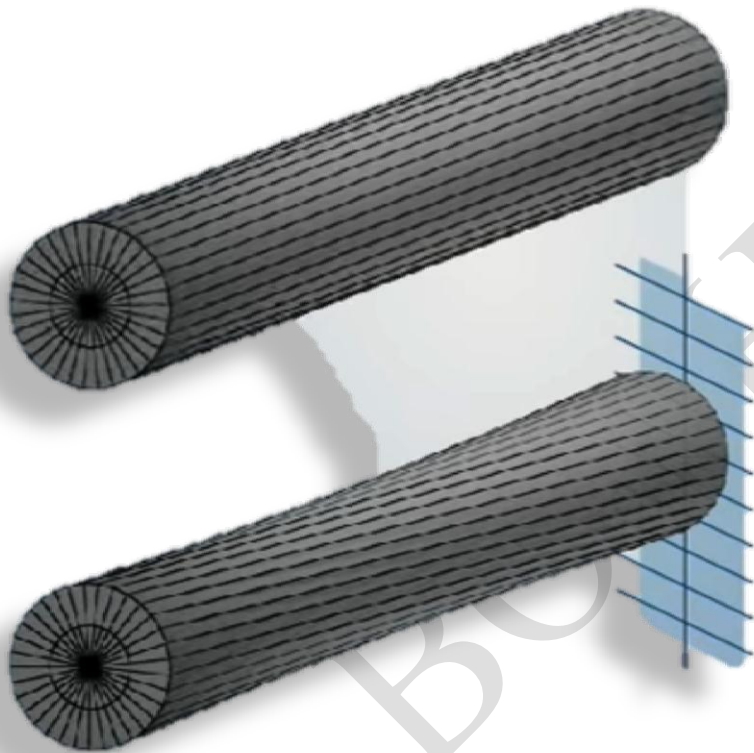
$$e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

Torsional pendulum



Dr L. BOUHDJER

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

1- Objectifs :

- ✓ Introduire les notions de propriétés mécanique (constante de torsion C , module de cisaillement G)
- ✓ Mesure de la constante de torsion de divers matériaux par les méthodes statique et dynamique.
- ✓ Mesure du module de cisaillement G de divers matériaux par méthodes statique et dynamique.

2- Définition et formalisme

Le pendule de torsion est composé d'un corps rigide suspendu en son centre de masse à l'aide d'un fil métallique. Le corps de masse M peut tourner autour d'un axe confondu avec le fil, une fois ce dernier est tordu (figure.1). La constante de torsion C dépend de la matière du fil et est proportionnelle à son diamètre d et inversement proportionnelle à sa longueur L .

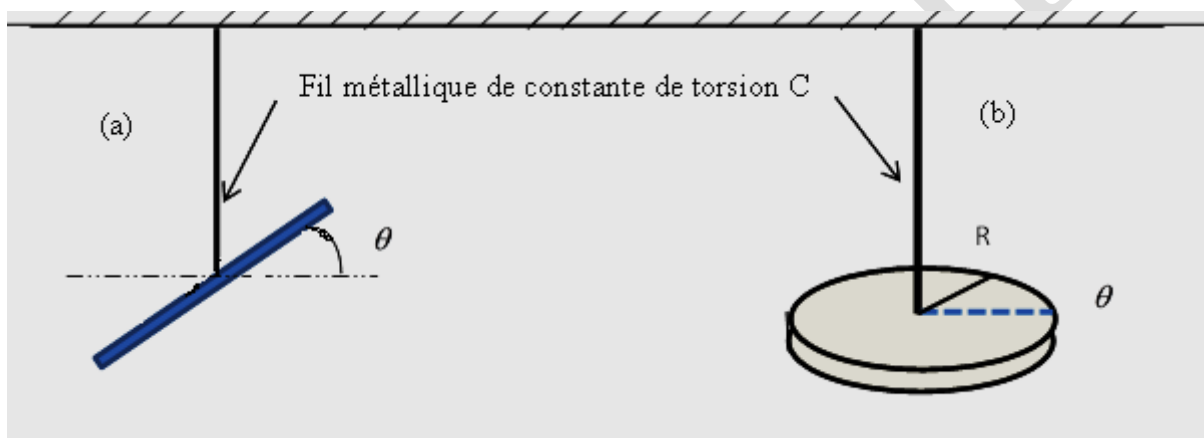


Figure. 1 : Pendule de torsion (a) Barre de masse M et de longueur L (b) disque de masse M et de rayon R

2-1. Etude statique :

Si on écarte le disque d'un angle θ par rapport à sa position au repos, le fil de torsion va, en réaction, imposer une force de rappel perpendiculaire au disque pour le ramener à sa position d'équilibre. Afin de maintenir le disque en cette position hors de son équilibre, on doit donc maintenir une force sur le disque, qu'on peut la mesurer à l'aide d'un dynamomètre, égale à la force de rappel créée par le fil et qui tend à ramener la tige en sa position d'équilibre (Figure.2). La quantité qui nous intéresse est donc **le couple de rappel** appliqué par le fil métallique sur le disque pour le ramener à sa position d'équilibre. L'expérience montre que ce couple de rappel est proportionnel à l'angle de rotation :

$$M_{rap} = -C\theta \quad (1)$$

Avec $[C] = [\text{Nm/rad}]$

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

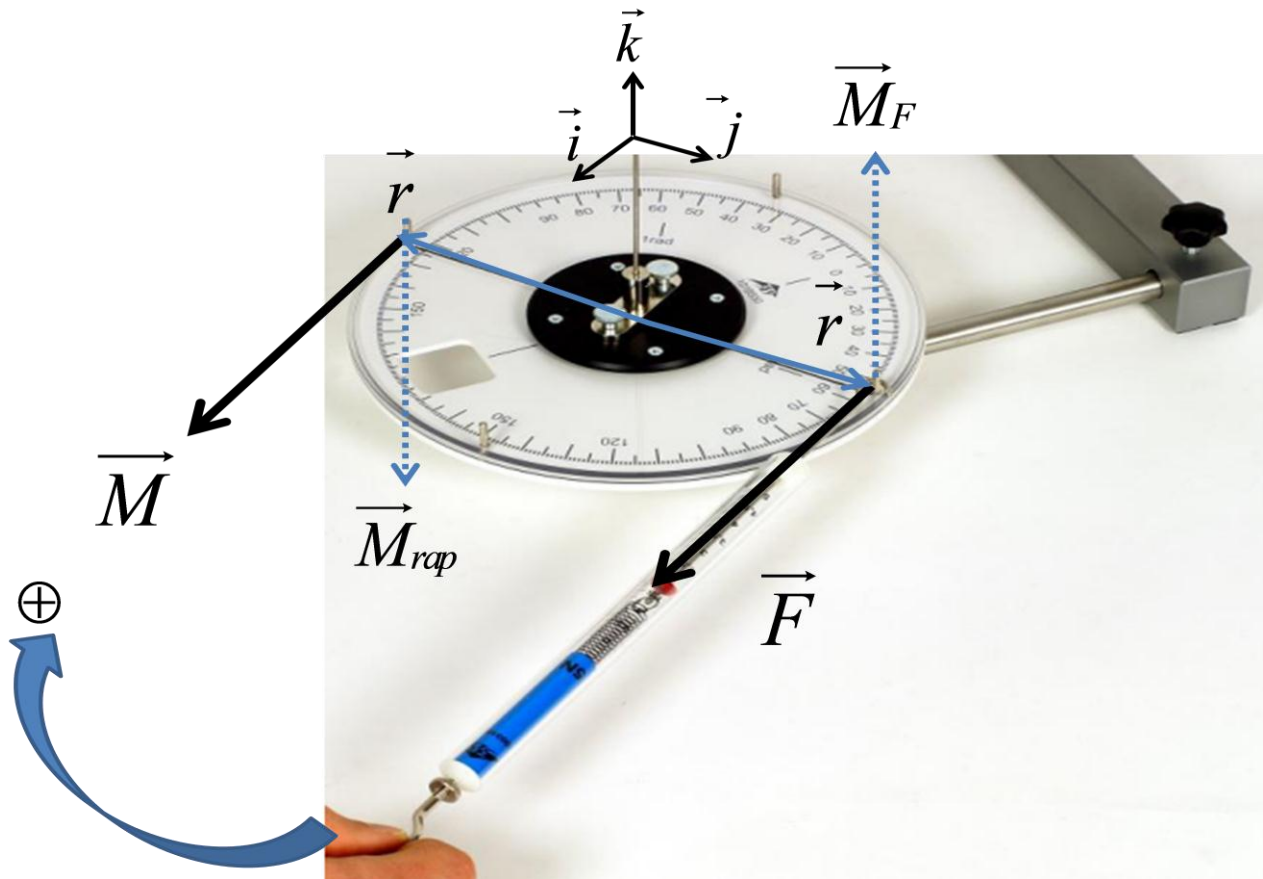


Figure. 2 : Méthode statique

A l'équilibre, Le disque est soumis à deux moments de forces :

Couple de rappel :

$$\vec{M}_{rap} = -C\theta\vec{k} \quad (2)$$

Force appliquée par le dynamomètre :

$$\vec{M}_{/\Delta} = \vec{r} \times \vec{F} = rF \sin \alpha \vec{k} \quad (3)$$

Où α est l'angle entre \vec{F} et \vec{r}

A l'équilibre, la somme des moments des forces est égale à zéro : $\sum \vec{M}_{/\Delta} = \vec{0}$

$$\vec{M}_{rap} + \vec{M}_{/\Delta} = \vec{0} \Rightarrow F.r.\sin \alpha - C\theta = 0 \quad (4)$$

$$F = \frac{C\theta}{r \sin \alpha} \text{ La force à appliquer pour maintenir le disque à un angle } \theta$$

Cette force est minimale si la longueur du bras r et $\sin \alpha$ sont maximales, c'est-à-dire

$$r = \frac{D}{2} \text{ et } \sin \alpha = 1 \quad (5)$$

Donc la constant de torsion:

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

$$F_{\min} = \frac{2}{D} C\theta = RC\theta \Rightarrow C = \frac{F_{\min}}{R\theta} \quad (6)$$

Le module de cisaillement G est une constante de matériau qui décrit de façon quantitative la déformation élastique et linéaire d'un matériau due à une force ou une tension de cisaillement. Pour une baguette ronde de longueur L et de diamètre D (Figure.3), il est donné de la manière suivante :

$$G = \frac{2LC}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^4} = \frac{32LC}{\pi D^4} [N/m^2] \quad (7)$$

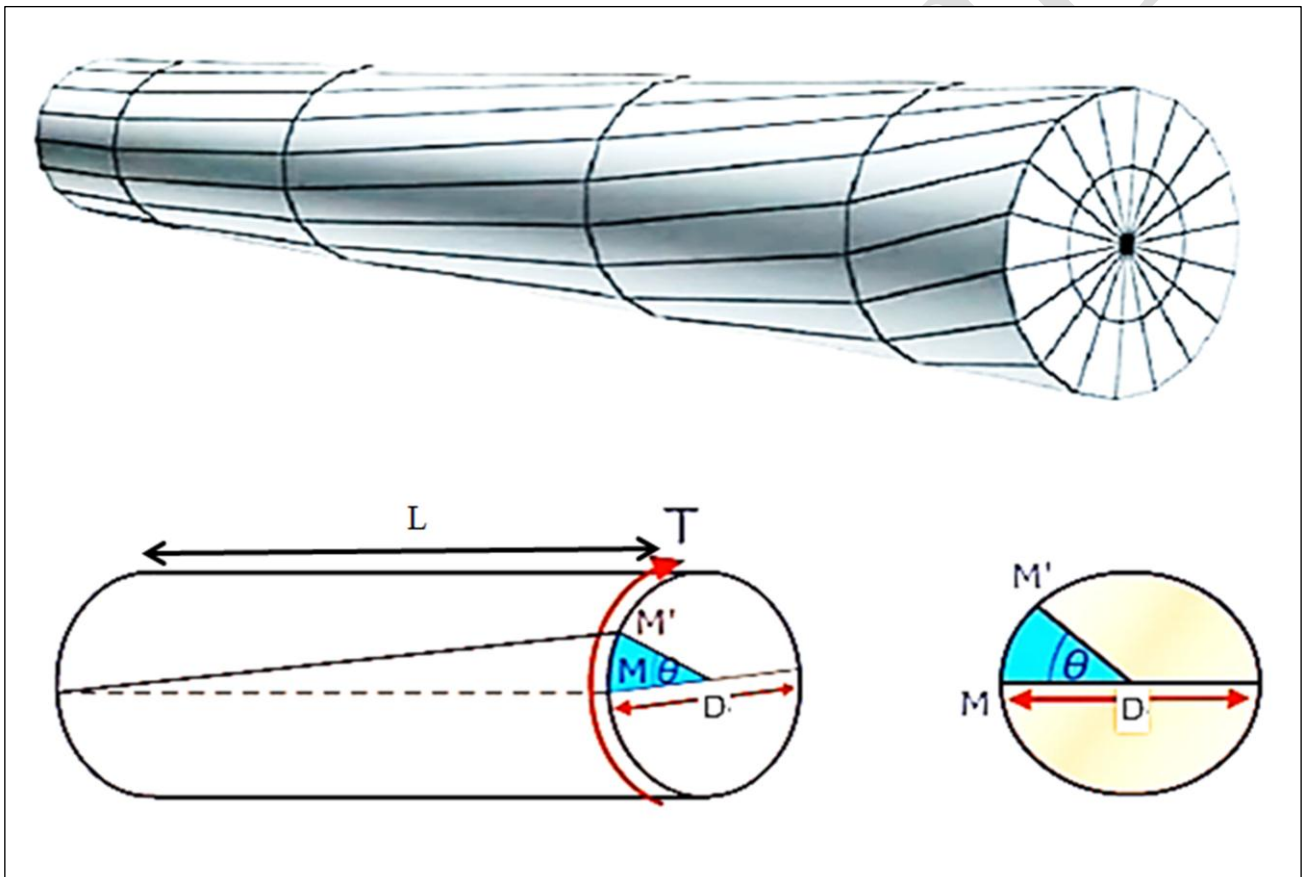


Figure.3 : Une baguette ronde de longueur L et de diamètre D subit une déformation due à une force ou une tension de cisaillement

D'autre part le module de cisaillement (ou Coulomb) est une caractéristique propre à chaque matériau. Il s'exprime en fonction de module de Young E du matériau et ν coefficient de Poisson et il se calcule par :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

Les valeurs correspondantes sont données dans le tableau suivant :

Matériau	E en MPa	ν
Acier	210 000	0,30
Acier inox 18-8	189 000	0,30
Aluminium	70 000	0,33
Argent	70 000	0,37
Cadmium	70 000	0,44
Chrome	252 000	0,30
Cuivre	112 000	0,34
Fer	210 000	0,30
Fonte	126 000	0,25
Laiton	112 000	0,33
Magnésium	42 000	0,25
Molybdène	329 000	0,31
Monel	170 000	0,28
Nickel	210 000	0,41
Or	70 000	0,42
Plomb	15 400	0,41
Platine	168 000	0,39
Titane	110 000	0,34
Tungstène	357 000	0,19
Zinc	91 000	0,28
Verre	46 200	0,24
Caoutchouc	1 500	0,50
Acétal	2 800	0,35
Plexiglas	3 160	0,40
Polycarbonate	2 320	0,38
Téflon	400	0,48
Nylon	1 100	0,34
Polyéthylène	760	0,46

Tableau 1 : Valeurs du module de Young E et ν coefficient de Poisson.

2-2. Etude dynamique :

Si on écarte le disque de son position d'équilibre et qu'on le lâche sans vitesse initiale, le disque se met à osciller autour de sa position d'équilibre, sous l'effet d'un couple de rappel :

$$\sum \vec{M}_{/\Delta} = \frac{d\vec{J}_{/\Delta}}{dt} \quad (9)$$

$\vec{J}_{/\Delta}$ est le moment cinétique du disque par rapport à l'axe de rotation Δ :

$$\vec{J}_{/\Delta} = I_{/\Delta} \vec{\omega} \quad (10)$$

$I_{/\Delta}$ est le moment d'inertie du disque par rapport à l'axe de rotation Δ .

$\vec{\omega}$ est le vecteur vitesse angulaire du disque, confondu avec l'axe de rotation Δ .

$$\vec{\omega} = \omega \vec{k} = \dot{\theta} \vec{k} \quad (11)$$

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion



Figure.4 : Méthode dynamique

Si en négligeant la force du frottement, le couple de rappel qui tente de ramener le disque à sa position d'équilibre :

$$\Sigma \vec{M}_{/\Delta} = -C\theta\vec{k} \quad (13)$$

$$\frac{d\vec{J}_{/\Delta}}{dt} = \frac{dI_{/\Delta}\vec{\omega}}{dt} = I_{/\Delta}\ddot{\theta}\vec{k} \quad (14)$$

L'équation différentielle du mouvement du disque est donnée par :

$$-C\theta = I_{/\Delta}\ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{\theta} + \frac{C}{I_{/\Delta}}\theta = 0 \quad (16)$$

$$\text{La solution : } \theta(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (17)$$

$$\text{La pulsation propre du mouvement } \omega_0 = \sqrt{\frac{C}{I_{/\Delta}}} \quad (18)$$

$$\text{Le période du mouvement : } T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{I_{/\Delta}}{C}}$$

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

Mais le moment d'inertie du disque est inconnu. Si le période T_0 du pendule de torsion sans les masses, et le période T_{02m} du pendule de torsion avec les masses (voir la figure. 4). Les masses peuvent être considérées dans une très bonne approximation comme cylindres pleins, car les perforations pour les broches de fixation sont négligeables. Le moment d'inertie J d'un cylindre plein est donné par :

$$J = \frac{1}{2}mr^2; m: \text{masse du cylindre plein et } r: \text{rayon du cylindre plein.}$$

Les moments d'inerties J_m des masses résultent due au théorème de Steiner, car les masses oscillent dans un écart $R = 10$ cm autour de l'axe du pendule :

$$J_m = J + mR^2 = \frac{1}{2}mr^2 + mR^2 = \frac{1}{2}m(r^2 + 2R^2) \quad (19)$$

Le moment d'inertie J_{2m} des deux masses réunies est deux fois plus grand :

$$J_{2m} = 2J_m = m(r^2 + 2R^2) \quad (20)$$

la caonstante de torsion C est déterminée à partir de la mesure des durées de période T_0 et T_{02m} sans et avec les masses, le moment d'inertie des masses J_{2m} étant connu. De l'équation précédente, il résulte :

$$T_{02m}^2 = 4\pi^2 \frac{J_{disque} + J_{2m}}{C} \text{ et } T_0^2 = 4\pi^2 \frac{J_{disque}}{C} \quad (21)$$

$$T_{02m}^2 - T_0^2 = 4\pi^2 \frac{J_{2m}}{C} \quad (22)$$

$$C = 4\pi^2 \frac{J_{2m}}{T_{02m}^2 - T_0^2} = 4\pi^2 \frac{m(r^2 + 2R^2)}{T_{02m}^2 - T_0^2} \quad (23)$$

J_{2m} : moment d'inertie des masses

T_{02m} : durée de période avec masses

T_0 : durée de période sans masses

Le module de cisaillement G résulte de l'équation (8) :

$$G = \frac{32LC}{\pi D^4}$$

3- Manipulation

3-1- Cas statique

- ✓ retirer les masses m_1 et m_2 du disque, placer le fil bien verticalement
- ✓ à l'aide de la vis située sous le cadran, ajuster sa position pour lire $\theta_{ref} = 0$
- ✓ faire passer la boucle d'un dynamomètre dans l'une des pointes du disque.
- ✓ tirer sur le dynamomètre de la quantité voulue en le maintenant perpendiculaire à (b) pour écarter la barre de sa position d'équilibre et relever l'angle obtenu θ_{mes} .
- ✓ calculer la déviation angulaire correspondante $\Delta\theta = |\theta_{ref} - \theta_{mes}|$

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

Les intensités des forces utilisées sont à votre appréciation. Attention cependant de ne pas trop déformer les fils pour ne pas les endommager.

Fil en :			
$l =$			
$\varphi =$			
$F_1 =$	N	$\Delta\theta =$	rad
$F_2 =$	N	$\Delta\theta =$	rad
$F_3 =$	N	$\Delta\theta =$	rad
C [N.m/rad]		$C_1 =$	$C_2 =$ $C_3 =$
G [N/m ² ou Pa]		$G_1 =$	$G_2 =$ $G_3 =$

Tableau 1 : Les grandeurs mesurées pour le cas statique.

En déduire la valeur moyenne C_{moy} de la constante de torsion ainsi que Le module de cisaillement G_{moy} .

On reprendra la même étude pour les autres fils de longueur $l = 500 \text{ mm}$ et de diamètre $\varphi = 2 \text{ mm}$ (4 matériaux disponibles : acier, aluminium, cuivre, laiton). A chaque changement de fil, on aura soin de vérifier que celui-ci est bien vertical (parallèle à la potence) et de faire pivoter le cadran de lecture pour que l'aiguille soit sur 0 au repos.

3-2- Cas dynamique

Pour cette étude, on utilise tout d'abord le fil en Aluminium de caractéristiques $l = 500 \text{ mm}$ et $\varphi = 2 \text{ mm}$

Ecarter le disque de sa position d'équilibre d'un angle $\Delta\theta$ (à noter), déclencher le chronomètre au moment de lâcher le disque sans vitesse initiale et mesurer la durée Δt qui met ce pendule pour décrire 6 périodes. Effectuer la même mesure 3 fois sans et avec les masses. Reprendre les mêmes mesures en changeant la position de départ du pendule.

	Δt_0	Δt_{0moy}	T_0	T_{0moy}	$\Delta t_{avec m}$	$\Delta t_{avec mmoy}$	T_{02m}	T_{02mmoy}	C	G
$\Delta\theta = 20^\circ$										
$\Delta\theta = 35^\circ$										
$\Delta\theta = 50^\circ$										

Tableau 2 : Les grandeurs mesurées pour le cas dynamique.

En déduire la valeur moyenne C_{moy} de la constante de torsion ainsi que le module de cisaillement G_{moy} et comparer aux valeurs de deux méthodes.

Maintenant on souhaite à étudier le comportement de l'Aluminium en utilisant des fils de différentes longueurs et différents diamètres réalisés dans ce même métal. Pour cela on utilisera la méthode dynamique. On reprendra donc la méthode précédente, en positionnant les masses dans le même endroit.

TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope: Pendule de torsion

On déterminera ainsi la valeur moyenne du module de cisaillement de ce matériau.

Aluminium	<i>l = 500 mm φ = 2 mm Δθ = 35°</i>	<i>l = 500 mm φ = 3 mm Δθ = 30°</i>	<i>l = 500 mm φ = 4 mm Δθ = 20°</i>	<i>l = 400 mm φ = 2 mm Δθ = 50°</i>	<i>l = 300 mm φ = 2 mm Δθ = 60°</i>
$\Delta t_1 [s]$					
$\Delta t_2 [s]$					
$\Delta t_3 [s]$					
$T_{0moy} [s]$					
$T_{02mmoy} [s]$					
$C [Nm/rad]$					
$G [N/m^2]$					

Tableau 3 : La valeur moyenne du module de cisaillement G.

Calculer la valeur de la constante **G** pour les différents matériaux utilisés .Comparer aux valeurs théoriques et conclure (expliquer les différences).

Matériau	E [Mpa]	ν	$G_{The} [N/m^2]$	$G_{Mes} [N/m^2]$

Tableau : 4. Comparaison entre les valeurs théoriques et mesurées du module de cisaillement G.

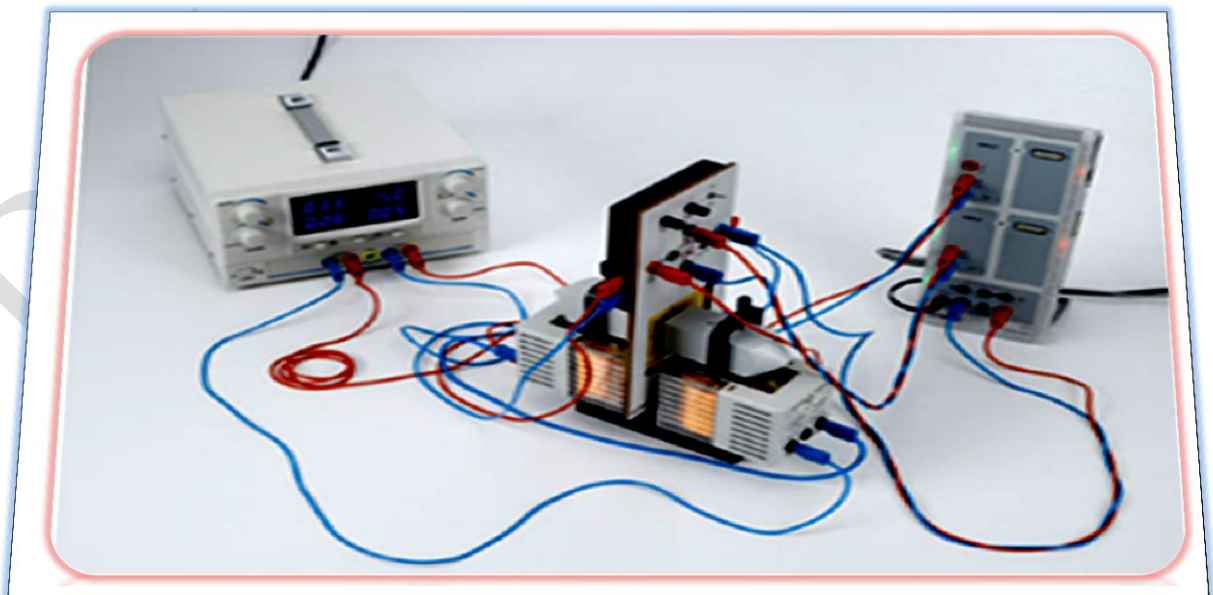
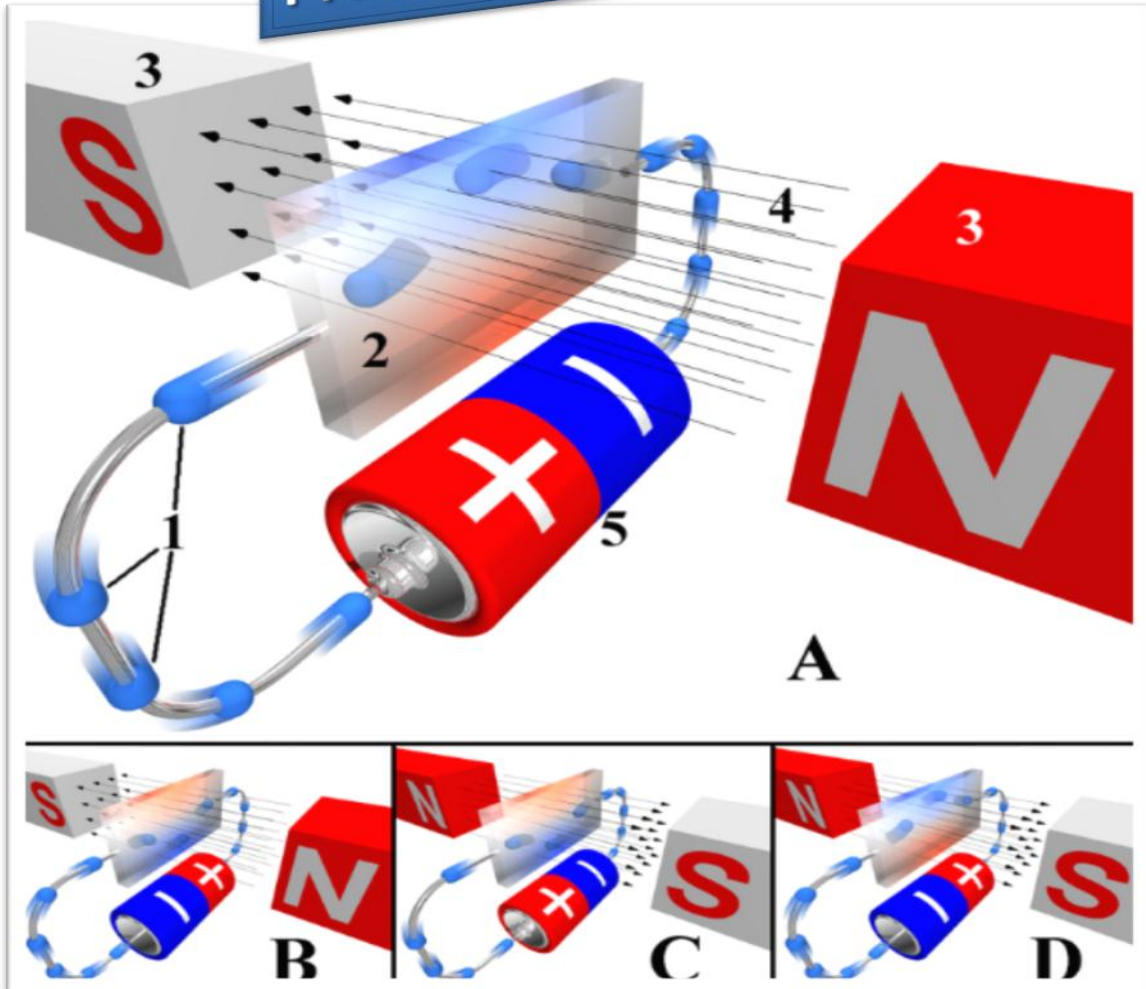
Données :

R = 10cm (rayon de disque), r = 12mm (rayon de masse) et m = 100g

4- Conclusion.

TP N°6 : Effet Hall

Hall Effect



TP N°6 : Effet Hall

1- Les objectifs :

- ✓ *Mesure de la tension Hall en fonction du champ magnétique, et en fonction du courant.*
- ✓ *détermination : le coefficient Hall, la densité, et la mobilité des porteurs de charges d'un cristal de germanium type n et de dimension: 10 mm×20 mm×1mm.*

2- Définition :

L'effet Hall « classique » a été découvert en 1879 par Edwin Herbert Hall, qui l'a énoncé comme suit: « un courant électrique traversant un matériau conducteur baignant dans un champ magnétique, engendre une tension perpendiculaire à ce dernier » (Figure.1).

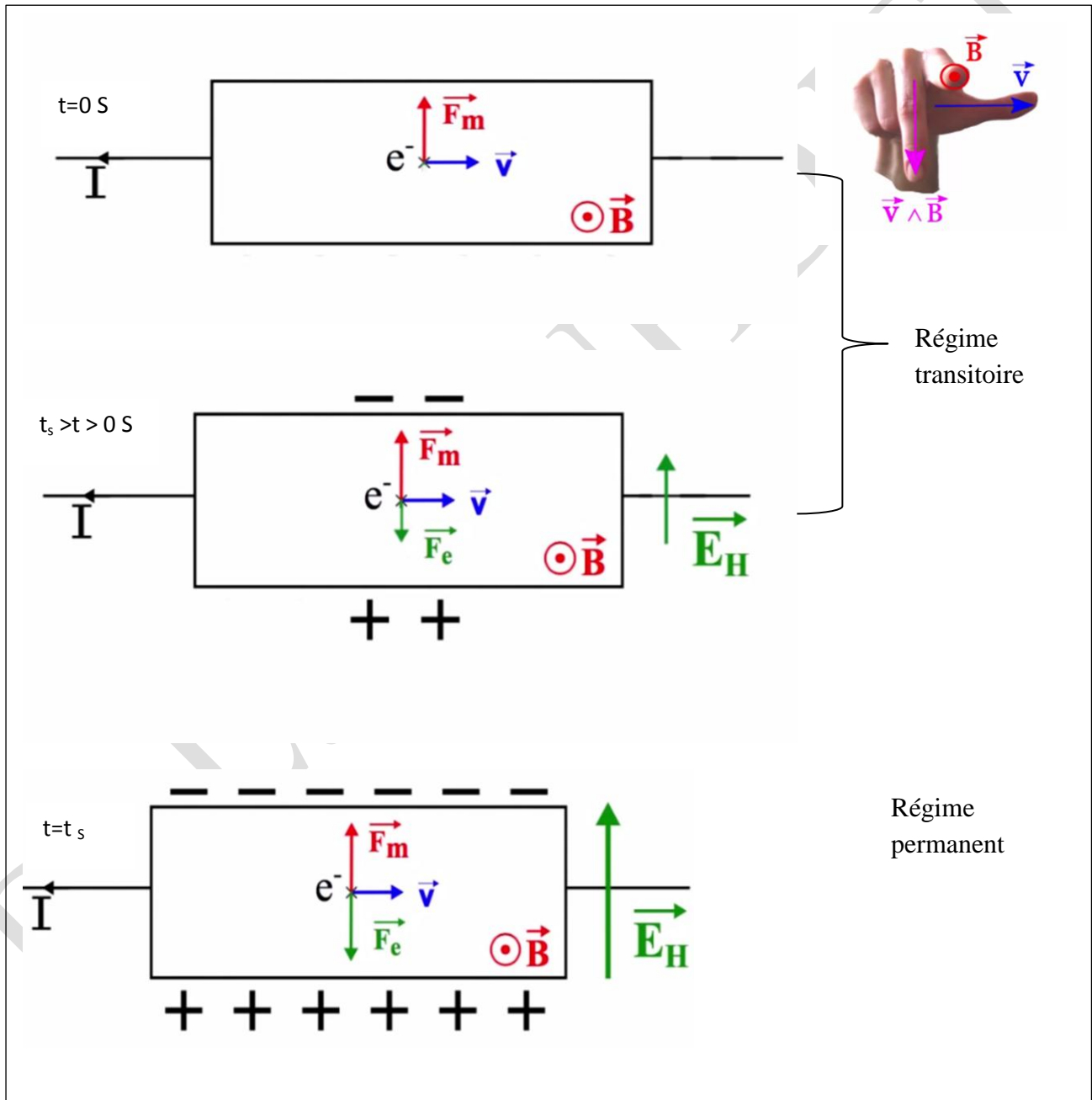


Figure.1 : Le principe d'effet hall.

TP N°6 : Effet Hall

3- Formalisme :

L'effet Hall est une méthode d'étude expérimentale importante pour déterminer les paramètres microscopiques du transport de charge dans les métaux ou les semi-conducteurs dopés.

Pour étudier l'effet Hall dans cette expérience, une bande rectangulaire de germanium n-dopé est placée dans un champ magnétique uniforme \mathbf{B} selon la figure 2. Si le courant \mathbf{I} traverse le cristal de germanium n-dopé une tension électrique rectangulaire (la tension Hall) est stimulée perpendiculairement à l'aimant magnétique (le champ \mathbf{B}) et le courant (\mathbf{I}) en raison de l'effet Hall:

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (1)$$

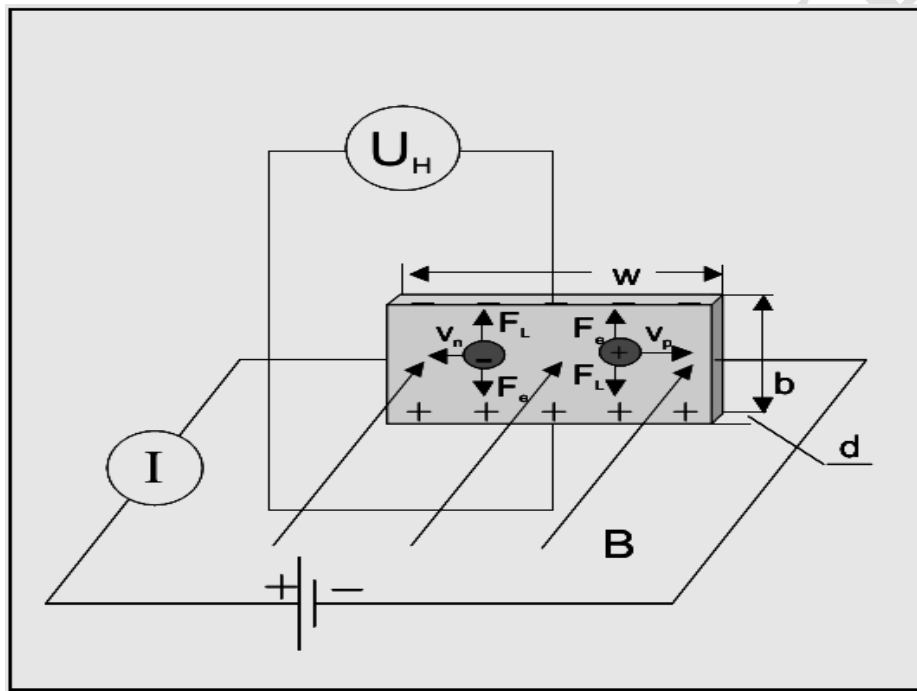


Figure.2 : Effet Hall dans un échantillon rectangulaire d'épaisseur d , hauteur b et longueur w sous des conditions d'équilibre

R_H est le coefficient de Hall qui dépend du matériau et de la température. Dans les conditions d'équilibre (figure 2) pour les champs magnétiques faibles, le coefficient R_H ; on peut l'exprimer en fonction de la densité de charge (concentration de porteur) et de la mobilité des électrons et des trous:

$$R_H = \frac{1}{e_0} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (2)$$

- Charge élémentaire $1.602 \cdot 10^{-19}$ C.
- $n = n_i + N_d^+$ (La densité totale des électrons).
- N_d^+ Densité des électrons de dopage.
- $n_i = p_i$ densité intrinsèque.
- $p = p_i$ la densité des trous.
- μ_p : mobilité des trous.
- μ_n : mobilité des électrons.

TP N°6 : Effet Hall

De l'équation (2): La polarité des porteurs de charge prédominants peut être déterminée à partir du coefficient de Hall R_H si les directions du courant I et du champ magnétique B sont connues. Plus la bande conductrice est mince, plus la tension de Hall est élevée.

Le dopage des éléments du groupe V par exemple P ou Sb dans le réseau cristallin du germanium crée des électrons supplémentaires dans la bande de conduction (Figure 3).

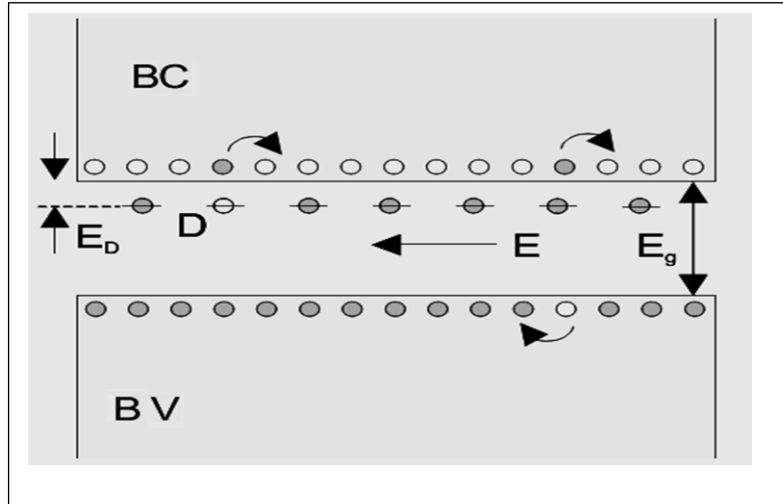


Figure. 3: Schéma simplifié de la conductivité extrinsèque (gauche) et intrinsèque (droite) sous l'influence d'un champ électrique E : L'incorporation des dopants (donneurs N_d) dans le réseau cristallin crée des porteurs de charge négatifs (électrons) dans la bande de conduction (BC).

Leur énergie d'activation (ou ionisation) E_D d'environ 0,01 eV est significativement plus petite que l'énergie d'activation E_g (l'énergie de gap) pour générer des électrons et des trous par activation thermique (les porteurs de charge intrinsèques). À température ambiante dans le germanium n-dopé, la densité des électrons $n \approx N_d^+$ peut prédominer la densité des porteurs de charges intrinsèques (n_i et p_i). Dans ce cas, les charges de conduction sont principalement dû aux électrons des dopants ($n_i = p_i \cong 0$).

La densité de dopage N_d^+ peut être déterminée en mesurant la tension de Hall U_H en fonction du courant I . Suivant l'équation (1) et (2) on a:

$$N_d^+ = \frac{B}{e_0 d} \frac{I}{U_H} \quad (3)$$

La mobilité est une mesure de l'interaction entre les porteurs de charge et le réseau cristallin et la mobilité est définie comme suite :

$$\mu_n = \frac{V_n}{E} \quad (4)$$

Où : V_n : vitesse des porteurs des charges majoritaires (dopage de type n)

E : champ électrique appliquée.

Le champ électrique E peut être déterminé par la chute de tension U et la longueur w de l'échantillon de germanium de type n.

TP N°6 : Effet Hall

$$E = \frac{U}{W} \quad (5)$$

La vitesse est déterminée à partir du condition d'équilibre :

$$e_0 V_n \cdot B = e_0 E_H \quad (6)$$

Avec :

$$E_H = b \cdot U_H \quad (7)$$

On trouvera :

$$V_n = \frac{U_H}{bB} \quad (8)$$

En remplaçant l'équation (5) et (8) dans l'équation (4), la mobilité μ_n des électrons est estimée à la température ambiante comme suit :

$$\mu_n = \frac{U_H \cdot w}{b \cdot B \cdot U} \quad (9)$$

On suppose que la mobilité des électrons et des trous est différente. K exprime le ratio de mobilité :

$$K = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (10)$$

Pour ce-là, l'équation (2) peut être réécrit comme suit :

$$R_H = \frac{1}{e_0} \cdot \frac{P - nK^2}{(P + nK)^2} \quad (11)$$

4- Réalisation de l'expérience

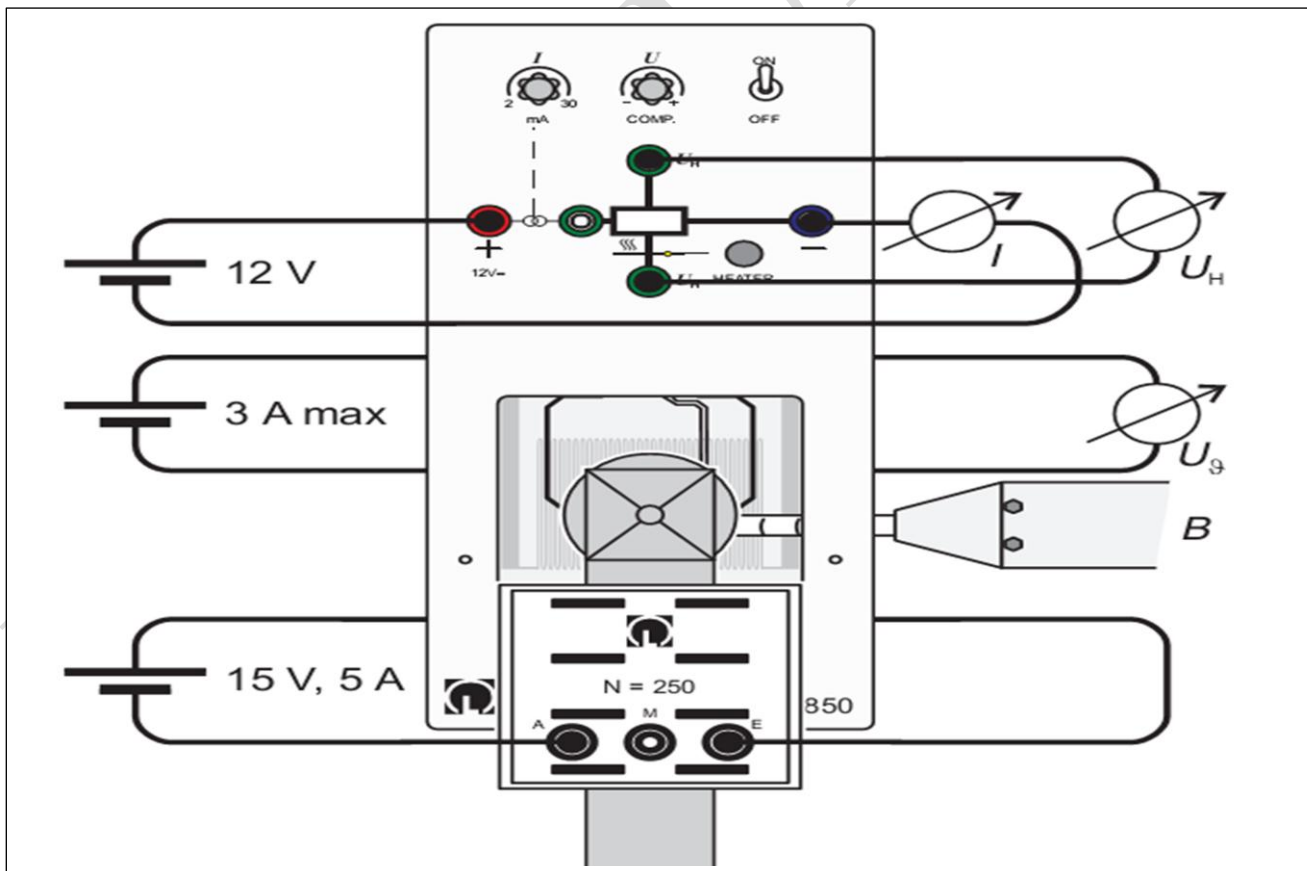






Figure.4 : Configuration expérimentale pour mesurer la tension Hall U_H en fonction du courant I .

TP N°6 : Effet Hall

a) Mesure de tension U_H en fonction du courant I :

- 1- Tout d'abord compenser la tension U_H .
- 2- Réglez le champ magnétique B à une valeur souhaitée et mesure la densité de flux magnétique.
- 3- Réglez le courant I à la valeur maximale I_{\max} (33mA) et mesurez la tension U
- 4- Mesurer la tension U_H (Entrée B sur Sensor CASSY) en fonction du courant I
- 5- Après avoir connecté les câbles, définissez les paramètres avec le programme CASSY lab .
- 6- Pour mesurer, utilisez le bouton  ou F9 pour le mode manuel.
- 7- Enregistrer votre mesure.

b) Mesure de la tension U_H en fonction du champ magnétique B :

- 1- Tout d'abord compenser la tension U_H
- 2- Réglez le courant I sur une valeur souhaitée ($I < I_{\max}$ (33mA)).
- 3- Mesurez la tension Hall U_H (Entrée B sur Sensor CASSY) en fonction du champ magnétique B (Entrée A sur Sensor CASSY)
- 4- Après avoir connecté les câbles, définissez les paramètres avec le programme CASSY lab .
- 5- Pour mesurer, utilisez le bouton  ou F9 pour le mode manuel.
- 6- Enregistrer votre mesure.

5- Remarques de sécurité :

Le cristal de Ge est très fragile, il se casse facilement:

- 1- Manipuler la carte à circuit imprimé soigneusement et ne la soumettre à aucune sollicitation mécanique.

Du fait de sa résistance spécifique élevée, le cristal de Ge est chauffé par la simple application d'un courant transversal:

- 2- Ne pas dépasser le courant transversal maximal $I=33mA$.

6- Manipulation

3-a- Expérience A : Mesure la tension de Hall U_H en fonction de courant I

A l'aide de bouton de courant I de l'alimenteur, très doucement ajuster le courant en bobines jusqu'à une valeur d'induction B qui reste constante pendant une série de mesure. En changeant la valeur du courant transversal I_{tr} noter la tension de U_H (avec le signe). La série doit contenir 10-15 mesures. On peut refaire les manipulations pour diverses valeurs de B (0.1T ; 0.2T et 0.35T)

Les résultats présenter dans le tableau de mesure N°1

TP N°6 : Effet Hall

Tableau 1 : la tension de Hall U_H en fonction de courant I

B=0.1T		B=0.2T		B=0.35T	
I_{tr} [...]	U_H [..]	I_{tr} [...]	U_H [..]	I_{tr} [...]	U_H [..]

3-b- Expérience B : Mesure la tension de Hall U_H en fonction de B

Établir le sens du courant en échantillon et sa valeur I_{tr} (voir l'expérience A) .Cette valeur doit rester stable pendant une série de mesure. A l'aide de bouton de courant I d'alimenteur , très doucement ajuster le courant en bobines jusqu'à l'induction initiale B (demander l'enseignant) .En changeant l'induction B noter la tension de U_H affichée. La série doit contenir 10-15 mesures.

Refaire les manipulations pour diverses valeurs du courant I_{tr} , les résultats présenter dans le tableau de mesure N°2.

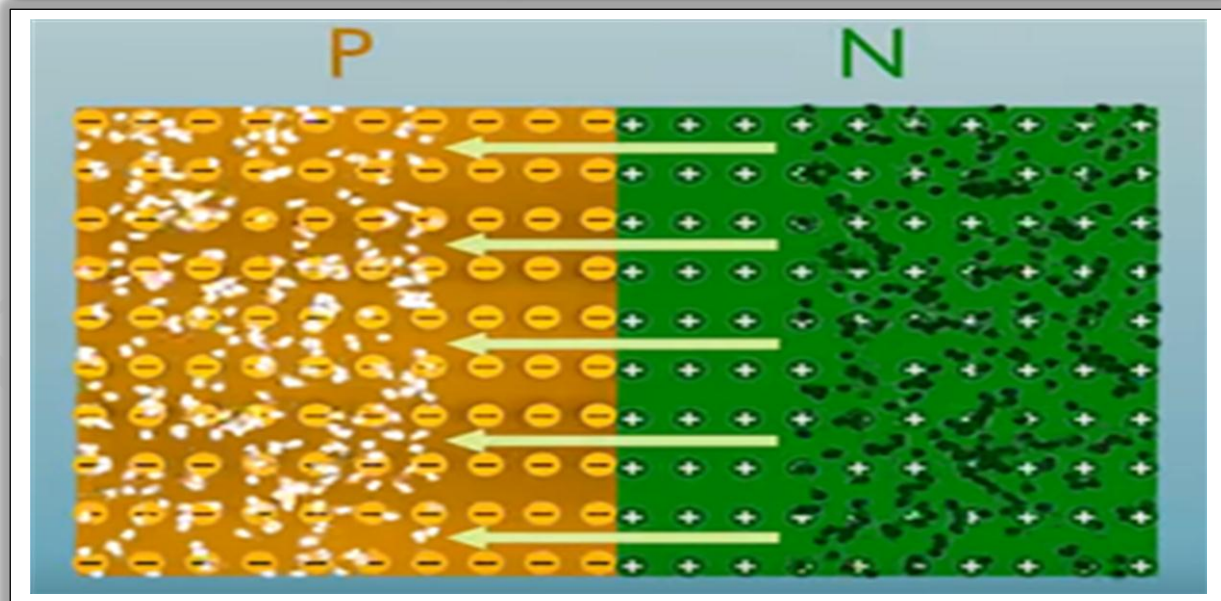
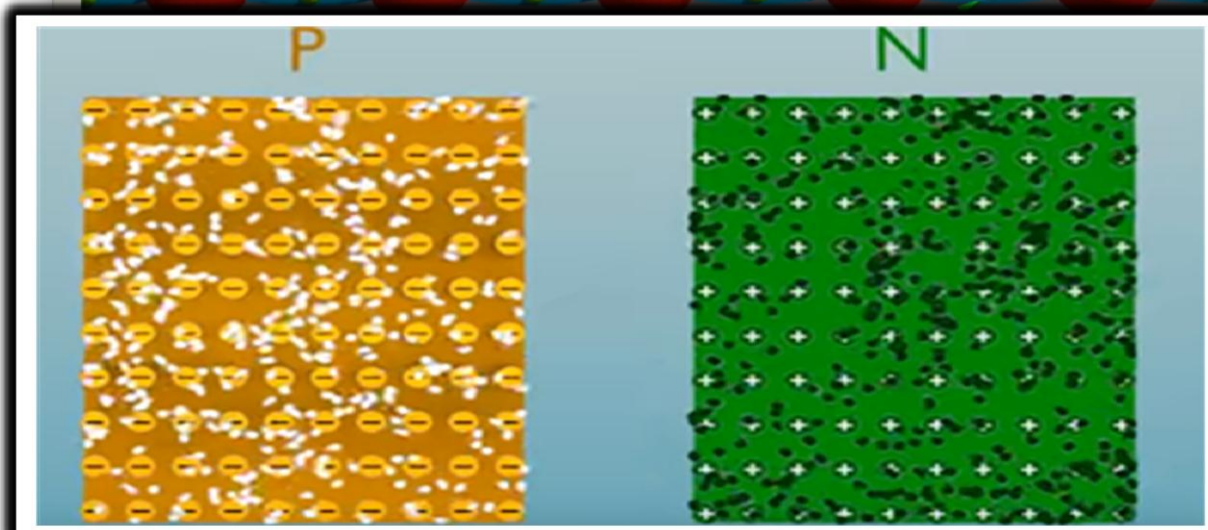
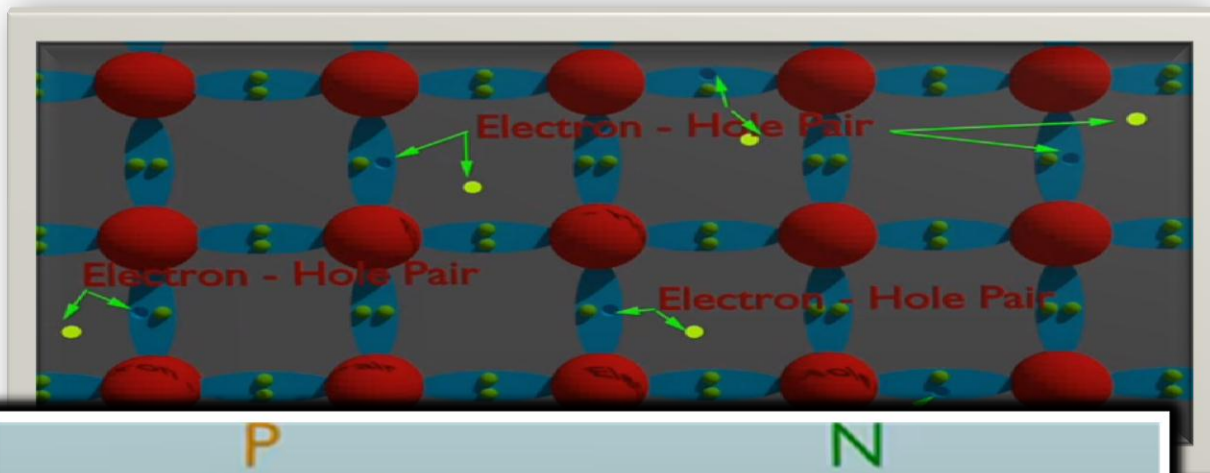
Tableau 2 : la tension de Hall U_H en fonction de B

$I_{tr1}= 20\text{mA}$		$I_{tr2}= 25\text{mA}$		$I_{tr3}= 30\text{mA}$	
B [...]	U_H	B [...]	U_H	B [...]	U_H

1. Tracer la droite $U_H = f(B)$ pour $I_{tr} = \text{const}$.
2. Trouver l'équation de sorte $y = a x + b$ telle : $U_H = a B + b$ voir la formule (1).
3. A partir de la pente calculer le coefficient de Hall R_H .
4. Trouver la pente A partir de la droite $U_H = f(I_{tr})$ pour $B = \text{const}$. et calculer R_H .
5. Comparer les résultats calculés à partir de deux graphes.
6. Déduire les signes de porteurs en barreau de Ge.
7. A partir de R_H calculer la densité n des porteurs de charge.
8. A partir de R_H calculer la mobilité μ_n, μ_p des porteurs (trous et électrons).
9. Évaluer des erreurs $\Delta R_H, \Delta n, \Delta \mu_n$ et $\Delta \mu_p$.
10. Conclusion.

TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

PN junction



TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

1- Les objectifs

- ✓ Mesure la tension Hall en fonction de la température: étude la transition de la conductivité extrinsèque à intrinsèque.
- ✓ Décrire la jonction PN de manière quantitative et étudier la variation $I=f(V)$.

2- Introduction

La conductivité électrique du semi-conducteur dépend plusieurs facteurs comme la structure, la pureté, et l'environnement du semi-conducteur surtout la température. Dans le but de suivre la variation de la conductivité électrique σ en fonction de la température on propose de mesurer la tension d'un cristal de germanium de type n et de dimension $10\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ on utilise l'appareille de Hall (TPN°3). D'autre part, la jonction PN joue un rôle indispensable dans les circuits intégrés, donc la caractérisation de la jonction PN mise en place importante, dans ce sens la dixième partie de ce TP est consacrée d'étudier les caractéristiques courant-tension d'une diode classique.

3- Notions de base et formalisme

3-1- Classement des semi-conducteurs

On peut classer les semi-conducteurs selon les quatre critères suivants:

- ✓ la structure: semi-conducteurs cristallins (Silicium cristallin) ou amorphes (Silicium amorphe),
- ✓ la pureté: semi-conducteurs purs (intrinsèques) ou dopées (extrinsèques),
- ✓ la structure des bandes d'énergie: gap direct (GaAs) ou indirect (Si),
- ✓ la composition : simples (Ge, Si) ou composites (GaAs, CdTe, HgZnTe).

3-2- Semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que par l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence.

$$n = N_c e^{-\frac{E_g}{2K_B T}} = P = N_v e^{-\frac{E_g}{2K_B T}} = n_i \quad (1)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* K T}{h^2} \right); N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_i^* K T}{h^2} \right) [cm^{-3}]$$

$k_B = 1.36 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ constante de Boltzmann, m_e^* la masse effective d'électron et m_i^* la masse effective de trou.

Sous les conditions d'équilibre thermodynamique la densité de porteurs intrinsèques s'écrit :

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{-\frac{E_g}{2KT}} \quad (2)$$

Cette densité de porteurs intrinsèques est une fonction exponentielle du gap E_g du matériau et de la température T .

TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

Semi-conducteur extrinsèque : Le silicium utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs a un niveau de pureté de 99.9999999%. Afin d'obtenir un semi-conducteur extrinsèque, on peut introduire volontairement des quantités de traces des éléments proches du silicium dans le tableau périodique, telles que celles situées dans les colonnes III (bore) pour les semi-conducteurs de type *p* ou V (phosphore, arsenic) pour les semi-conducteurs de type *n* (*notre cas*).

La densité des porteurs de charge dépend de la concentration du dopant N_d^+ et de la température T . Trois régions différentes peuvent être distinguées pour le Ge type n (et pour les semi-conducteurs extrinsèques d'une façon générale): À des températures très basses, l'excitation des électrons des niveaux de donneurs dans la bande de conduction est la seule source de porteurs de charge. La densité des "électrons du dopant" augmente avec la température. Il suit une région où la densité n_s est indépendante de la température car tous les niveaux des donneurs sont inoccupés (*conductivité extrinsèque*). Dans ce régime, les porteurs de charges intrinsèques n_i sont négligeables. Une augmentation supplémentaire de la température conduit à une excitation thermique directe des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Les charges de transport augmentent en raison de la conductivité intrinsèque, et à la fin cette dernière prédomine (figure 1). La transition de la conductivité purement extrinsèque vers une conductivité purement intrinsèque peut-être observée en mesurant la tension Hall en fonction de la température.

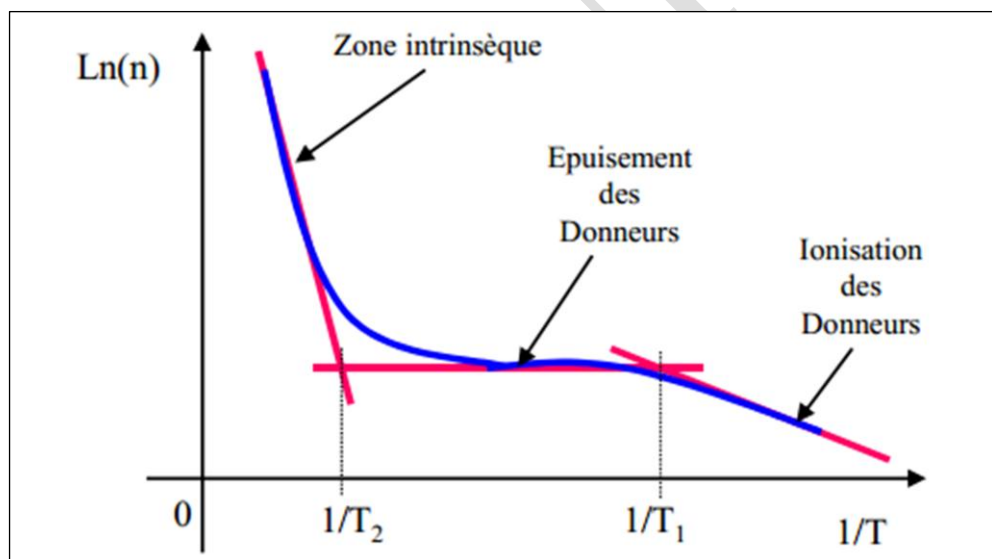


Figure. 2 : La variation de densité des porteurs de charge d'un semi-conducteur extrinsèque en fonction de température T .

Le produit des densités n et p dépendant de la température est donnée par la relation suivante :

$$np = (n_i + N_d^+) p_i = \eta^2 \quad (3)$$

Où la densité d'état effective η est approximative comme suite :

$$\eta^2 = N_0 e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad (4)$$

Dans le régime de conductivité extrinsèque, la densité N_d^+ peut être déterminée selon l'équation (5).

TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

$$N_d^+ = \frac{B}{e_0 d} \frac{I}{U_H} \quad (5)$$

Pour les porteurs de charge intrinsèques $p_i = n_i$ qui conduit à une équation quadratique pour N_d^+ avec la solution :

$$n_i = -\frac{N_d^+}{2} + \sqrt{\frac{N_d^+}{4} + \eta^2} \quad (6)$$

4- Mesure de la tension de Hall U_H sous induction magnétique constante en fonction de la température

- ✓ Maintenir le champ magnétique constant à 300mT et le courant à 30 mA.
- ✓ Sélectionner l'affichage de la température.
- ✓ Faire monter la température à l'aide du bouton de chauffage situé à l'arrière du module à effet Hall.
- ✓ Relever les valeurs de U_H en fonction de la température T (en Kelvin).
- ✓ Tracer la courbe $U_H = f(T)$.
- ✓ Analyser l'allure de la courbe en prenant en considération la nature de la conduction (conduction extrinsèque ou intrinsèque) à des températures proche de l'ambiante et à températures plus élevées, le nombre de porteurs de charge.

5- La jonction PN

En juxtaposant une zone dopée P et une zone dopée N à l'intérieur d'un cristal de semi-conducteur, comme sur la figure 3, on obtient une jonction PN.

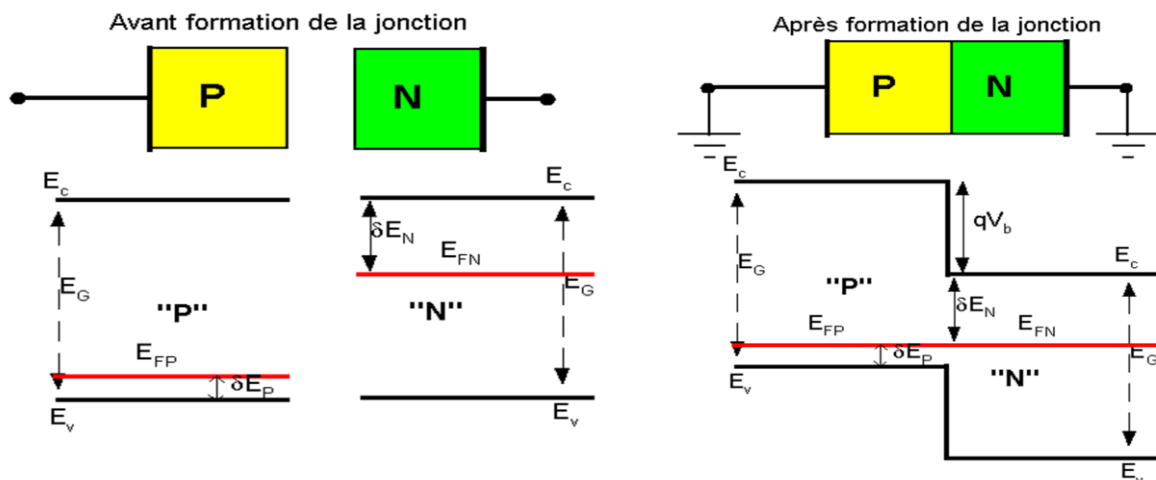


Figure. 3 : Principe de formation d'une jonction PN.

TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

5-1- La zone de transition

De part et d'autre de la jonction les porteurs majoritaires (électrons et trous) s'attirent et se recombinent; leurs charges s'annulant il y a raréfaction des porteurs donc fortes diminutions de la conductibilité dans une zone (la zone de transition) de très faible épaisseur (de l'ordre du micron). Entre les deux zones habitées par des ions de polarités contraires s'établit une différence du potentiel.

La jonction PN s'apparente à un condensateur dont le diélectrique serait la zone de transition et les zones P et N les armatures. Sur la figure (4) les porteurs minoritaires n'ont pas été représentés bien que leur rôle ne soit pas négligeable dans la zone de transition.

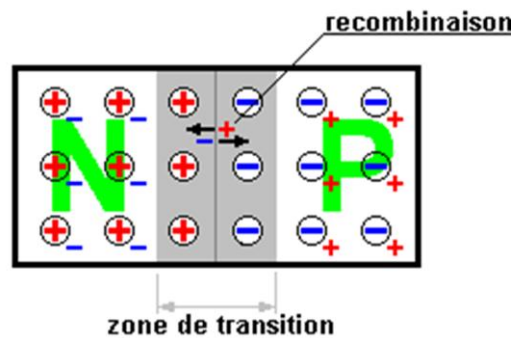


Figure. 4 : Jonction PN à l'équilibre thermodynamique

5-2- La jonction PN polarisée en sens inverse

Le dipôle constitué par le cristal de semi-conducteur divisé par la jonction PN est une diode dont l'anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N. En reliant la zone P à la borne (-) d'une source de tension continue et la zone N à la borne (+), les porteurs de charges s'éloignent de la jonction et la jonction devient quasiment isolante. La diode est dite polarisée en sens inverse, le courant qui la parcourt est très faible, il est dû aux porteurs minoritaires (Figure 5).

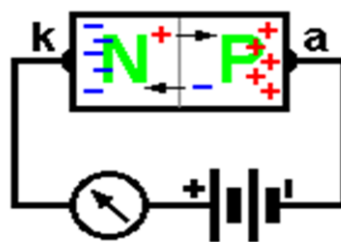


Figure. 5 : La jonction PN polarisée en sens inverse.

5-3- La jonction PN polarisée en sens direct

En reliant l'anode de la diode (zone P) au (+) de la pile et la cathode (zone N) au (-) les porteurs de charge traversent la jonction et un courant élevé parcourt le circuit. La différence de potentiel entre les zones P et N provoquée par la source de courant continu à la zone de transition doit être supérieure à la différence de potentiel (quelques dixièmes de volts) présente dans la jonction à l'état d'équilibre (Figure 6).

TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

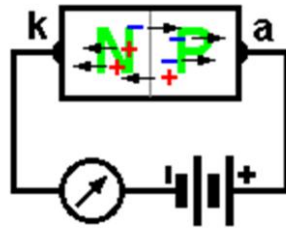


Figure. 6 : La jonction PN polarisée en sens direct.

5-4- Caractéristique- Résistance différentielle :

Que la diode soit court les densités de courant s'expriment toujours par le produit d'un terme exponentiel en $\exp(V_F / V_T) - 1$ et d'un terme pré-exponentiel, le courant de saturation, J_σ , asymptotique en régime inverse (Figure 7).

Ainsi, dans tous les cas, il est possible d'écrire :

$$|I| = I_\sigma \left(\exp\left(\frac{V_F}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (7)$$

Où : V_T potentiel thermodynamique ; $V_T = \frac{KT}{e_0}$, V_F : La tension directe appliquée.

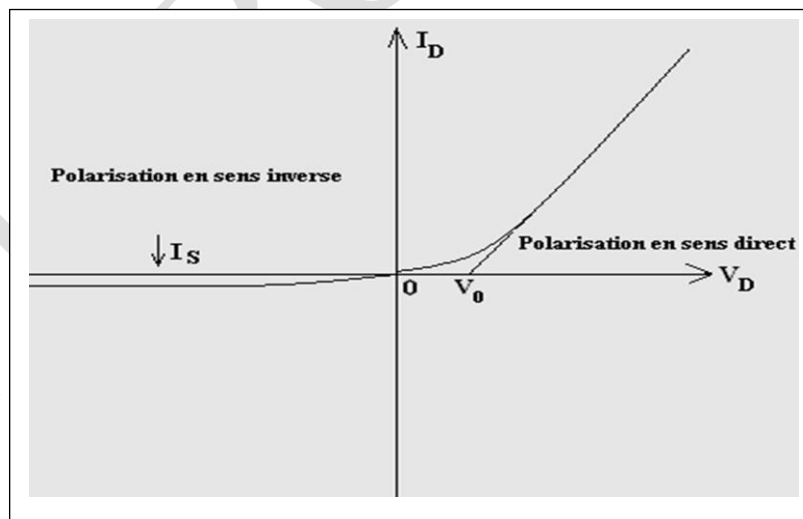


Figure.7 : Caractéristique exponentielle de la diode à jonction PN.

La pente est proportionnelle au courant et inversement proportionnelle à la résistance différentielle :

$$\frac{dI}{I} = \frac{dI_\sigma}{I_\sigma} + \frac{dV}{V_T} = \frac{dV}{V_T} \Rightarrow \frac{dI}{I} = \frac{dV}{V_T} \quad (8)$$

TP N°7 : Conduction électrique dans un semi-conducteur et caractéristique courant-tension de la jonction PN

La pente de la caractéristique $I=f(V)$ est l'inverse d'une résistance appelée résistance différentielle et qui ne dépend que de la polarisation de la jonction et de la potentielle thermodynamique

$$r_d = \frac{V_T}{I} \quad (9)$$

5-5- Caractéristique des diodes:

- ✓ Prenez une diode en Si, et mesurez la résistance à l'aide du multimètre, dans la direction normale et dans la direction inverse.
- ✓ Montez une résistance $R = 1k\Omega$ et une diode au silicium en série avec une source de courant continu V_{cc} . Notez les spécifications fournies par le fabricant quant au courant, tension et puissance maximaux que peut soutenir la diode (figure 8).

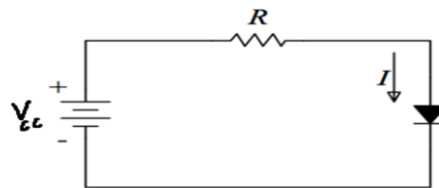


Figure.8 : Montage expérimentale

- ✓ Faites un graphique (V, I) du courant en fonction de la tension sur la diode V_D en variant V_{CC} . Commencez avec $V_{cc} = 0$, et prenez au moins 10 points lorsque V_D se situe entre 0.25 et 0.7 V, et prenez soin de ne pas excéder le courant maximal que peut accepter la diode (tableau 1).

V_{CC}	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	9	10
$I(\text{mA})$																			
V_D																			

- ✓ Exprimez la tension dans R et le courant I circulant dans le circuit en termes de V_{CC} et V_D en utilisant les lois de Kirchhoff.
- ✓ Déterminez la tension thermique V_T .
- ✓ Comment la courbe (V, I) se compare-t-elle avec celle d'une résistance seule ?
- ✓ Conclusion.

bibliographiques

- [1] David L. Sidebottom. "Fundamentals of Condensed Matter and Crystalline Physics". Cambridge university press (2012).
- [2] 3B SCIENTIFIC PHYSICS, Appareil de torsion 1018550. Jeu d'extension à l'appareil de torsion 1018787, <https://www.3bscientific.fr/>
- [3] LEYBOLD, Physics Experiments, P7.1.2.2, Laue diagrams: investigating the lattice structure of monocrystals, <http://www.ld-didactic.de/>.
- [4] LEYBOLD, Physics Experiments, P7.2.1.3, determining the density and mobility of charge carriers in n-germanium, P7.2.1.4 determining the density and mobility of charge carriers, <http://www.ld-didactic.de/>.
- [5] LEYBOLD, Physics Experiments, P7.2.1.3, Determining the density and mobility of charge carriers in n-germanium, <http://www.ld-didactic.de/>.
- [6] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, 2004

Résumé

Ce polycopié est un support pédagogique de travaux pratiques de la matière physique du solide réalisée dans le canevas de formation des étudiants de troisième année licence LMD, spécialité physique fondamentale. En effet, ce travail a accentué le point sur la cristallographie dans quatre TP: Le modèle des empilements compacts, détermination des structures cristallines par diffraction des rayons X, diagramme de Laue, et à la fin, diffraction d'électrons. De plus, les propriétés mécaniques ont été mises en évidence au TP N°5 : Elasticité d'un solide isotrope. En outre, le comportement des semi-conducteurs a fait l'objet des TP 6 et 7 : l'effet Hall ainsi que la caractéristique courant-tension d'une jonction PN