

MP 18 : Matériaux semi-conducteurs
Aurore, Albane (*Version corrigée*)

Bibliographie :

Expériences d'électronique, *Duffait*
Quaranta tome 3 L'électronique
Quaranta tome 4 L'électricité
Optique expérimentale, *Sextant*
Théorie : *Kittel, Ngô*

Commentaires extraits des rapports de jury

[2012, 2011, 2010] “La variété des matériaux semi-conducteurs fait qu’il est parfois difficile de savoir quel est le matériau utilisé dans un composant commercial, ou quel est le dopage dans certaines plaquettes. Les candidats mesurent alors des propriétés sans pouvoir les comparer à quoi que ce soit. Il vaut donc mieux utiliser des composants de caractéristiques connues.”

[2008] “Il est essentiel de savoir différencier les régimes de conduction intrinsèque et extrinsèque.”

[2000] “Il est important de distinguer matériaux dopés et semi-conducteurs intrinsèques.”

Plan :

Intro

- I) Influence de la température dans un semi-conducteur intrinsèque
- II) Mesure de la densité et mobilité de porteurs de charge dans un semi-conducteur extrinsèque
 - a) Mesure de la conductivité
 - b) Mesure de la densité des porteurs de charges
 - c) Détermination de la mobilité des porteurs de charge
- III) Application des semi-conducteurs : La cellule photovoltaïque
 - a) Mode de fonctionnement
 - b) Caractéristiques
 - c) Rendement maximum

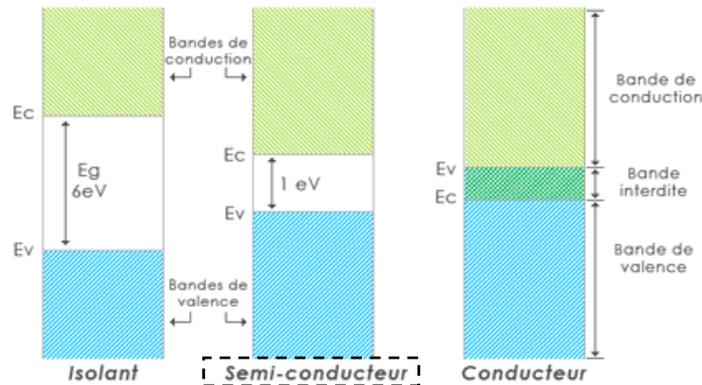
Conclusion

Introduction :

Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité électrique est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Effectivement à partir de la théorie des bandes nous avons vu qu'un semi-conducteur pouvait être décrit par la présence d'une bande interdite, appelée *gap*, séparant la bande de valence et la bande de conduction. Lorsque la température du SC tend vers le zéro absolu soit 0K, la bande de valence correspond à la dernière bande complètement remplie, et la bande d'énergie permise suivante n'est autre que la bande de conduction.

La différence avec un matériau isolant vient de la différence de largeur du gap, en effet pour un isolant cette énergie de gap est de l'ordre de 6eV de cette façon les électrons ne peuvent pas passer de la bande de valence à la bande de conduction, ils ne circulent pas dans le solide, ainsi la conductivité d'un isolant est nulle. Tandis que pour un SC, la valeur énergétique de ce gap est de l'ordre de 1eV, ainsi en apportant au moins cette même énergie aux électrons du matériau (par exemple : en le chauffant, en lui appliquant un champ EM, en l'illuminant) ces derniers pourront peupler la bande de conduction ce qui se traduit par une conductivité non nulle du matériau SC.



Depuis 1833, date à laquelle Michael Faraday a découvert que sous l'effet de l'augmentation de la température certains matériaux voyaient leur pouvoir de conductivité s'accroître, les propriétés des SC ont largement été étudiées et ces derniers sont à la base du fonctionnement de divers composants électroniques tels que : la diode, le transistor, les microprocesseurs, les cellules photovoltaïques, etc...

Lors de ce montage, nous allons nous intéresser à mettre en évidence quelques caractéristiques des SC à savoir l'énergie du gap pour un SC intrinsèque et la densité de porteurs de charges pour un SC extrinsèque. Puis nous étudierons un exemple pratique de l'utilisation des SC : la cellule photovoltaïque.

I) Influence de la température dans un semi-conducteur intrinsèque

On entend par SC intrinsèque, un matériau SC pur tel que le nombre d'électrons occupant la bande de conduction est égale au nombre de trous laissés dans la bande de valence ainsi le nombre de porteurs positifs p est égale au nombre de porteurs négatifs n .

La statistique de Fermi Dirac permet d'écrire (Pour la démo C. Kittel, Physique de l'état solide p197-200) :

$$n = p = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} = A \cdot T^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

Avec :

- N_c, N_v densités d'états effectives dans la bande de conduction et dans la bande de valence respectivement (dépendant de la température T et du SC utilisé dont les paramètres sont regroupés dans A qui est une constante)
- E_g : largeur de la bande interdite
- k : la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

Dans cette expérience nous allons nous intéresser à l'influence de la température sur la résistance d'un SC qui est inversement proportionnelle à la conductivité. La conductivité électrique ayant pour expression : $\sigma = (n \cdot e \cdot \mu_e + p \cdot e \cdot \mu_p)$, au vu de l'expression de n et p on s'attend alors à ce que la résistance diminue lorsque la température augmente.

Pour vérifier cela nous disposons d'une thermistance, il s'agit d'un dipôle passif (c'est-à-dire ne pouvant que consommer de l'énergie) constituée par des poudres semi-conductrices agglomérées (fritées). La caractéristique $U=f(I)$ d'une thermistance est non linéaire et dépend d'un paramètre extérieur, on parle alors de dipôle commandé. Ce paramètre extérieur est la température, lorsque celle-ci augmente, le nombre de porteurs de charge dans le SC augmente, ainsi la conductivité augmente et la résistance diminue.

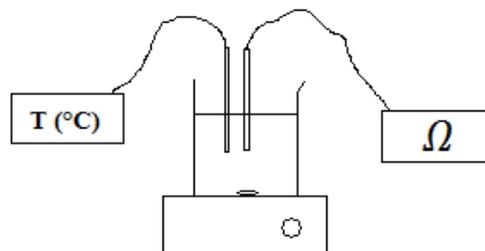
Aux températures envisagées pour l'expérience (entre 0°C et 100°C), c'est la variation exponentielle qui prédomine sur le terme en $T^{3/2}$, on peut alors écrire la loi de variation de R en fonction de T :

$$R(T) = R_0 e^{\frac{E_g}{2k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Avec :

- E_g : largeur de la bande interdite
- k : la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)
- T_0 : la température de référence (température ambiante) à laquelle $R=R_0$

Voici le montage qui va nous permettre de vérifier cette loi et ainsi par une mesure de température et de résistance de remonter à l'énergie du gap du SC employé :



Nous avons placé la thermistance CTN dans un mélange eau-glace, et le chauffage se poursuit jusqu'à atteindre une température proche de 100°C (ou par ajout d'eau bouillante pour aller plus vite).

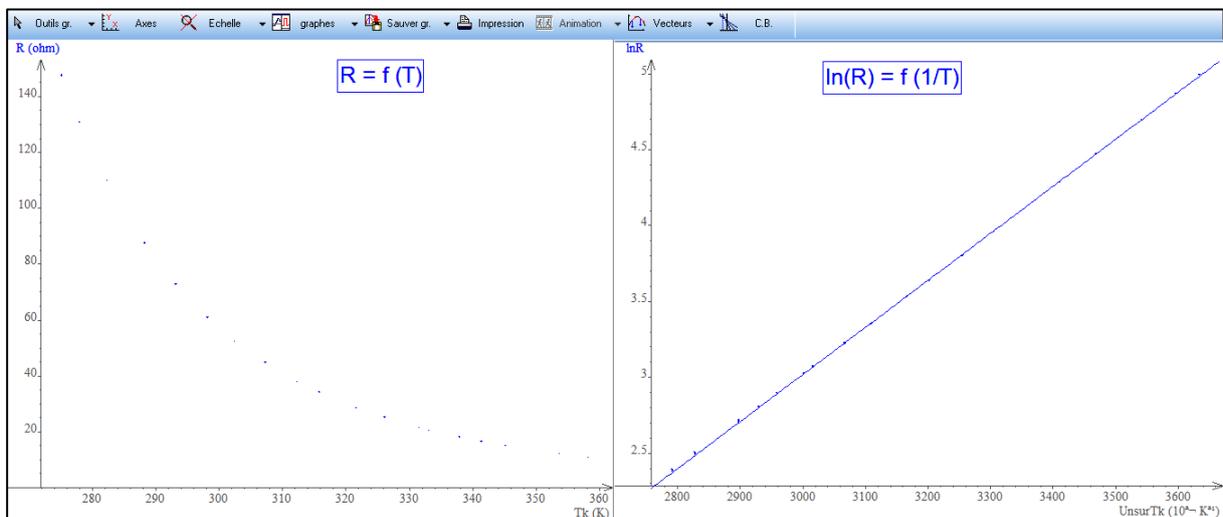
Incertitudes :

- Nous avons mesuré la température à l'aide d'un thermomètre de précision (CEM/Selectronic), la notice indique une incertitude de $\pm(0,3\% + 1^\circ\text{C})$ avec une résolution de $0,1^\circ\text{C}$.

- La mesure de R a été réalisée avec un Ohmmètre Fluke187, la notice nous indique une incertitude de $\pm(0,2\% + 2)$ avec une résolution de $0,1\Omega$. Soit par exemple pour une mesure de $R=147,6\ \Omega$ on a un $\Delta R=147,6 \times (0,2\%) + 2 \times 0,1=0,5\ \Omega$ donc $R=(147,6 \pm 0,5)\ \Omega$.

Remarque correcteurs : prendre la notice du thermomètre afin de connaître l'incertitude sur la mesure de la température.

Tout d'abord en traçant, $R=f(T)$ nous remarquons que le milieu est bien semi-conducteur, en effet, aux basses températures (pas assez basses dans notre cas, nous aurions pu faire la manip avec de l'azote liquide) il se comporte comme un isolant (R infini) tandis qu'aux hautes températures il se comporte comme un conducteur (R faible).



On trace ensuite la courbe donnant : **ln R = f (1/T)**

On obtient une droite, qu'on modélise par une droite affine. La loi de variation $R=f(T)$ est donc vérifiée, nous obtenons un coefficient directeur **a** égale à : \pm K.

D'après la loi précédente $a = \frac{E_g}{2k}$ soit une largeur E_g de gap égale à :

$$E_g = 2 \cdot k \cdot a = 2 \times \frac{1,381 \cdot 10^{-23}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \times a = \dots \pm \dots \text{ eV}$$

$$\Delta E_g = E_g \cdot \frac{\Delta a}{a} = \dots \text{ eV}$$

Théoriquement, en ordre de grandeur pour un semi-conducteur intrinsèque, $0,3\text{eV} < E_g < 1\text{eV}$. On obtient donc une valeur de E_g cohérente.

Voici quelques ordres de grandeur de E_g pour différents semi-conducteurs :

Ge	Si	GaAs
0,7eV	1,1eV	1,4eV

A température ambiante, la conduction est assurée par l'agitation thermique. Il est intéressant de comparer E_g ($=\dots\dots\dots eV$) à kT qui à 300K est égale à 0,025 eV.

Le gap est très important par rapport à l'énergie thermique, quasiment aucun électron ne peuple la bande de conduction : le matériau est donc peu conducteur.

Cependant la conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit.

Remarque correcteurs : trouver la notice de la thermistance CTN utilisée pour connaître le type de semi-conducteur qui la compose et ainsi pouvoir comparer notre valeur de E_g à une valeur constructeur. (Cependant la notice reste introuvable à ce jour..)

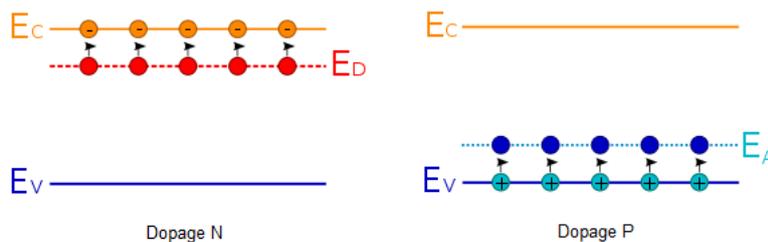
II) Mesure de la densité de porteur dans un semi-conducteur extrinsèque

Par opposition aux SC intrinsèques (SC pur), on appelle les SC qui contiennent des éléments étrangers (impuretés) dans son réseau cristallin : SC extrinsèques.

On en compte principalement deux types, suivant le type d'atomes insérés au sein du réseau cristallin.

Nous parlerons de dopage de type n, dès lors que les atomes introduits sont des atomes donneurs susceptibles de donner un électron libre. Les électrons sont alors majoritaires. Cette introduction d'atomes donneurs se traduit par l'insertion d'un niveau d'énergie accessible proche de la BC. Ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte que dans un semi-conducteur intrinsèque.

Nous parlerons de dopage de type p, dès lors que les atomes introduits sont des atomes accepteurs susceptibles de capter un électron laissant ainsi un trou derrière lui. Cette introduction d'atomes accepteurs se traduit par l'insertion d'un niveau d'énergie proche de la BV.



Ainsi on aura, une conduction liée aux trous pour les SC dopés p et aux électrons pour les SC dopés n, même dans le cas où la densité de porteurs dans le SC est faible.

De plus même une faible quantité d'impuretés modifie grandement le comportement du SC.

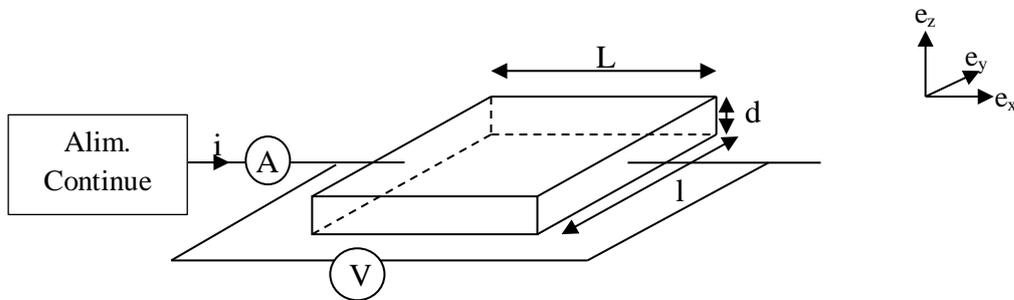
Dans cette seconde expérience nous allons dans un premier temps mesurer la conductivité d'un échantillon de Germanium extrinsèque dopé n puis déterminer la densité et la mobilité de porteurs dans ce même échantillon grâce à l'effet Hall.

a) Mesure de la conductivité :

Nous savons que les matériaux conducteurs, SC, et isolants différent par leur valeur de conductivité.

Mesurons la conductivité d'un échantillon SC de Ge extrinsèque dopé n.

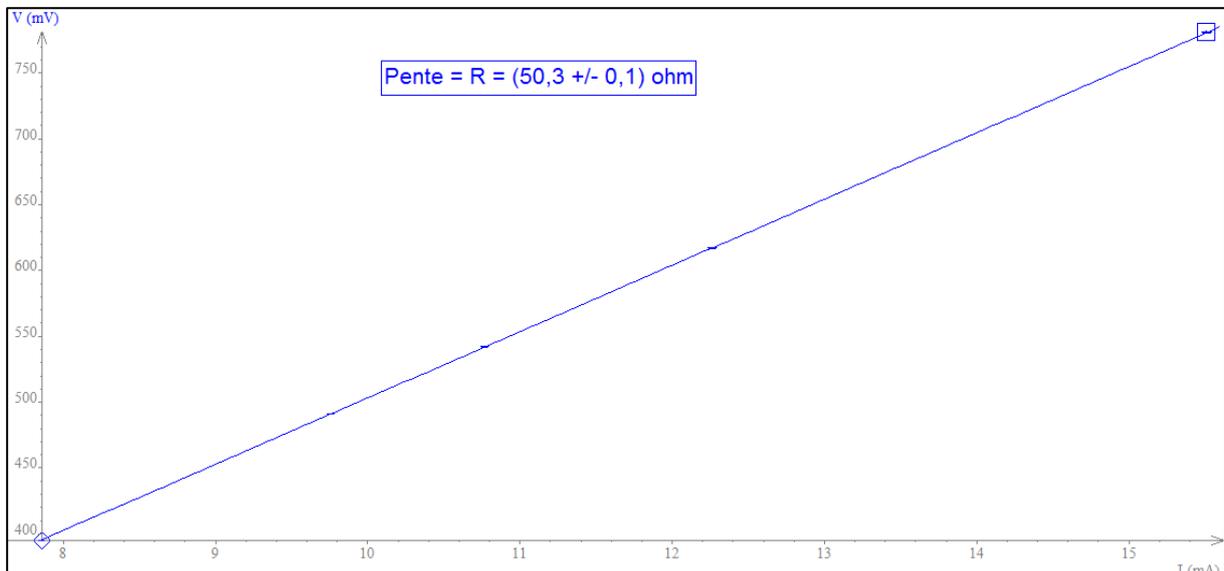
Pour cela voici le montage réalisé :



Remarques :

- Ne pas dépasser 30 mA (indication plaquette)
- Attention pour déterminer la résistance de l'échantillon bien lire la notice, la plaquette possède 2 sorties : 1 pour la mesure de la résistance et 1 pour stabiliser le courant lors de l'étude concernant la mesure de la densité de porteur où nous voulons que I soit constant.

A l'aide d'un ampèremètre on relève le courant appliqué et à l'aide d'un voltmètre on relève la tension V aux bornes de l'échantillon. On trace alors V en fonction de I, nous obtenons une droite et par régression linéaire nous obtenons une pente égale à R (la résistance ohmique) = $(50,3 \pm 0,1) \Omega$.



Incertitudes :

- Pour le courant I nous avons utilisé un Fluke 187 la notice nous indique alors pour le calibre mA une incertitude de $\pm (0,15\%+10)$ avec une résolution de 0,001mA.
- Pour la tension V nous avons utilisé un Fluke 187 la notice nous indique alors pour le calibre mV une incertitude de $\pm (0,03\%+2)$ avec une résolution de 0.01mV.
- Regressi nous indique une incertitude sur R de $\Delta R = 0,1 \Omega$

Cette même résistance est égale à : $R = \frac{1}{\sigma} \times \frac{L}{ld}$ où σ correspond à la conductivité du SC étudié.

De cette manière nous obtenons directement :

$$\sigma = \frac{1}{R} \times \frac{L}{ld} = (39,8 \pm 0,1) \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\Delta \sigma = \sigma \frac{\Delta R}{R} = 0,1 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Or la conductivité correspond à l'inverse de la résistivité soit :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = (2,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\Delta \rho = \rho \frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma^2} = 0,1 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$$

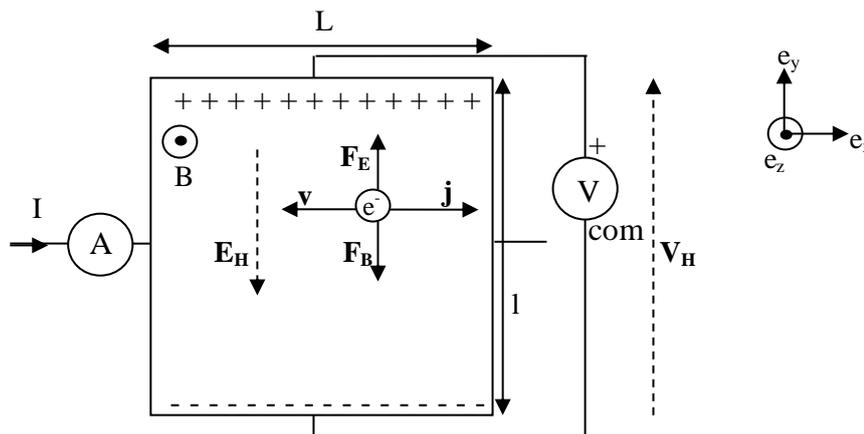
Nous pouvons comparer la valeur de la résistivité obtenue expérimentalement à la valeur de celle fournie par le constructeur ($\rho_{\text{constructeur}} = (2 \text{ à } 2,5) \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$), nous remarquons alors qu'aux incertitudes près les valeurs coïncident.

ODG: Résistivité : SC [10^{-3} , 10^9] $\Omega \cdot \text{m}$; métaux $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; isolants $10^{22} \Omega \cdot \text{m}$

Remarque : L'idéal aurait été d'effectuer cette mesure par la méthode des 4 points afin de pouvoir négliger la résistance des fils et afin de ne pas tenir compte de la déformation des lignes de courant au sein du SC. Cependant, cela n'engendre pas d'aberration sur nos mesures.

Nous allons maintenant tenter de remonter à la valeur de n (la densité de porteurs de charges) pour cela nous allons nous intéresser à l'effet Hall qui a été découvert en 1879.

b) Mesure de la densité des porteurs de charges :



L'échantillon de Ge dont les porteurs de charge majoritaire sont les électrons (Ge dopé n) est parcouru par un courant électrique I , on note \mathbf{j} la densité de courant dans la section ld dirigé suivant \mathbf{e}_x et \mathbf{v} le vecteur vitesse des électrons :

$$\mathbf{j} = nq\mathbf{v} = I/dl \mathbf{e}_x \text{ avec } q=-e$$

$$\text{soit } \mathbf{v} = -\frac{I}{ndle} \mathbf{e}_x$$

En plaçant ce même échantillon dans un champ magnétique \mathbf{B} perpendiculaire à la direction de propagation du courant soit $\mathbf{B} (0, 0, B_z)$, les porteurs de charge présents au sein de l'échantillon SC sont alors soumis à une force d'origine magnétique ($\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$) qui s'écrit finalement :

$$\mathbf{F}_B = -e \left(-\frac{I}{ndle} \mathbf{e}_x \wedge B \mathbf{e}_z \right) = -\frac{IB}{ndl} \mathbf{e}_y$$

Cette force tend à dévier les porteurs de charge et ainsi à les accumuler sur la face latérale du barreau. Il y a alors apparition d'une différence de potentiel V_H , et création d'un champ électrique à la fois perpendiculaire à I et à B noté E_H connu sous le nom de champ de Hall. Ce champ est à l'origine d'une force d'origine électrique que subissent les porteurs de charges :

$$\mathbf{F}_E = q\mathbf{E}_H = -e\mathbf{E}_H \text{ avec } E_H = -V_H/l$$

A l'équilibre, la somme des forces (2nd loi de Newton) : $\mathbf{F}_E + \mathbf{F}_B = \mathbf{0}$

$$-\frac{IB}{ndl} \mathbf{e}_y - e\mathbf{E}_H = \mathbf{0}$$

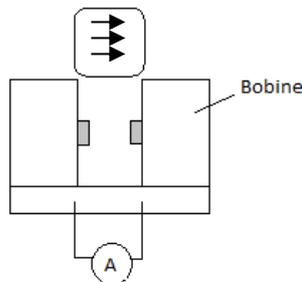
$$\mathbf{E}_H = -\frac{IB}{ndle} \mathbf{e}_y \text{ et } \boxed{V_H = \frac{IB}{ned} = (-R_H) \frac{IB}{d}}$$

avec $R_H = \frac{1}{nq}$ la constante de Hall (>0 si le matériau est dopé p et <0 si il est dopé n)

Remarque : d'après l'expression de R_H on comprend pourquoi l'effet Hall est difficilement mis en évidence pour les conducteurs métalliques dont la densité de porteurs est très élevée (10^6 fois plus que les SC).

Nous cherchons ici à déterminer la densité de porteurs de charge n dans l'échantillon de Ge dopé n, pour cela nous allons mesurer à I constant, les grandeurs V_H et B . Pour la mesure de V_H , nous disposons d'un voltmètre et pour la mesure de B nous allons utiliser un teslamètre dont le principe repose également sur l'effet Hall afin de tracer la courbe d'étalonnage $B=f(I_B)$ (avec I_B le courant d'alimentation des bobines).

Tout d'abord il est essentiel de connaître la direction du vecteur \mathbf{B} , pour cela, après avoir alimenté les bobines en continue nous positionnons sur les bobines une plaquette contenant une multitude de flèches dont l'orientation indique directement le sens de \mathbf{B} .



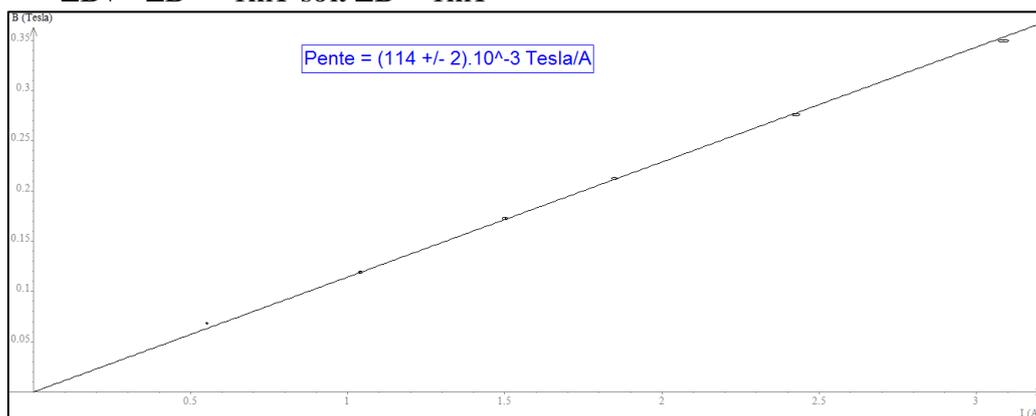
Remarque correcteur : ça ne montre pas vraiment le sens du champ B, pour être plus démonstratif soit utiliser un aimant (pôle sud et nord) soit simplement en se fiant au sens du courant d'alimentation des bobines (via l'ampère-mètre)

Maintenant que nous connaissons la direction du champ magnétique, traçons la courbe d'étalonnage $B=f(I_b)$. Utilisons alors un teslamètre (nous aurions pu également utiliser un fluxmètre). Cependant prenons garde à différentes choses :

- Afin d'avoir dans l'entrefer, un champ magnétique uniforme, nous plaçons des pièces plates.
- Il existe un offset lors de la mesure de B avec le teslamètre, simplement dû à des défauts d'alignement des capteurs lors de la construction de la sonde, ainsi pour ne pas tenir compte de cet offset, on mesure le champ B_+ et B_- en retournant la sonde au sein de l'entrefer et ainsi on obtient : $B = \frac{|B_+| + |B_-|}{2}$

Incertitudes :

- Nous mesurons I_b avec un Fluke 187, la notice nous indique alors une incertitude de $\pm (0.5\% + 10)$ avec une résolution de $0.0001A$.
- Nous mesurons B avec un teslamètre et nous considérons que l'incertitude $\Delta B_+ = \Delta B_- = 1mT$ soit $\Delta B = 1mT$



Nous obtenons alors un coefficient de proportionnalité entre B et I égale au coefficient directeur de la droite soit : $0.114 \pm 0.002 \text{ T.A}^{-1}$

Attention : prendre en préparation et en direct la même valeur de I et le même entrefer (écartement entre les bobines) afin de pouvoir intégrer les points pris en direct à la courbe obtenue en préparation.

La droite d'étalonnage tracée effectuons les mesures de V_H et B afin de remonter à la densité de porteurs de charge n.

Pour cela il est important de faire attention aux conventions de signes et ainsi se référer au schéma décrivant le principe de l'effet Hall, on place au sein de l'entrefer la plaquette de Ge dopé n parcourue par un courant I fixé = $(11,71 \pm 0.03) \text{ mA}$, FAIRE ATTENTION AU SENS D'INSERTION DE LA PLAQUETTE DANS L'ENTREFER, le champ de Hall est alors vertical, cela signifie qu'on mesure la tension V_H sur l'axe verticale, avec la borne + du voltmètre du côté où le potentiel sera le plus élevé et la borne COM à l'opposé.

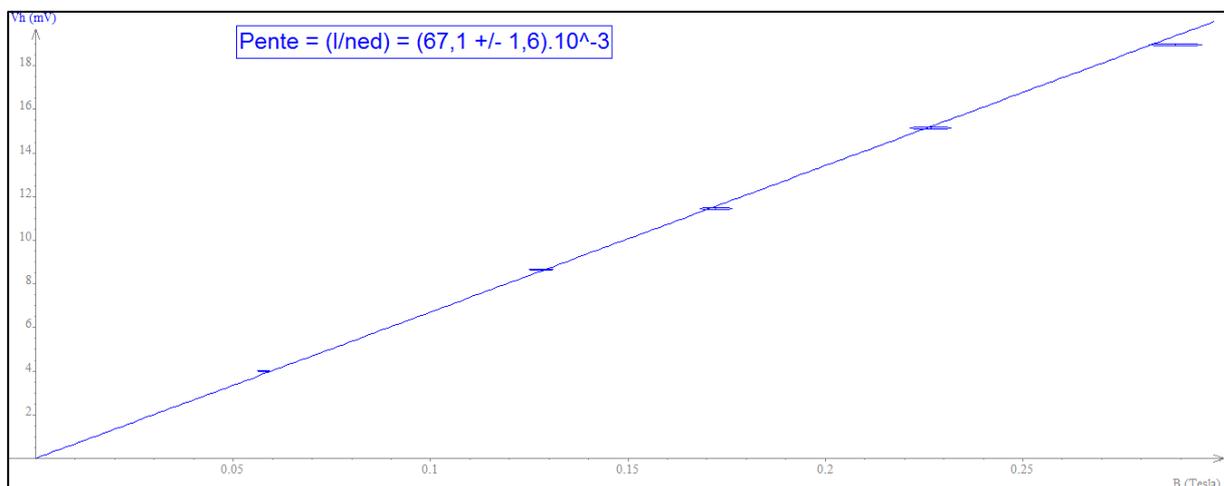
Remarque : Comme précédemment, il s'agit d'une sonde à effet hall, pour ne pas tenir compte de l'offset nous devons mesurer V_+ et V_- en retournant l'échantillon dans l'entrefer ainsi nous avons $V_H = \frac{|V_+| + |V_-|}{2}$.

Remarque correcteurs : pour ne pas tenir compte de cet offset, nous pouvons inverser les fils d'alimentation au niveau de l'électroaimant (ce qui va permettre d'inverser le sens du champ B et ainsi de passer de V_{H+} à V_{H-}), en prenant garde de revenir toujours à 0A au niveau de l'alim continu de l'électroaimant lorsqu'on inverse les fils pour éviter tout danger.

Incertitudes :

- La tension est mesurée avec un Fluke 187, la notice nous indique alors pour un calibre mV une incertitude de $\pm (0.1\% + 20)$ avec une résolution de 0.001mV.

En préparation nous avons pris d'avantage de points, en intégrant dans le tableur les mesures prises en direct, on trace $V_H=f(B)$ et en effectuant une régression linéaire nous obtenons une droite de pente : $(67,1 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$ S.I.



$$\text{Soit « pente »} = \frac{I}{ned}$$

$$n = \frac{I}{aed} = (1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$$

$$\Delta n = \frac{\Delta I}{aed} + \frac{I \Delta a}{a^2 ed} = 3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$R_H = \frac{-1}{ne} = -5,7 \cdot 10^{-3} \text{ S.I.}$$

Les porteurs de charge majoritaires étant des électrons nous avons bien une constante de Hall négative. Nous pouvons de plus comparer la valeur de la densité de porteurs expérimentale à celle fournie par le fabricant, $n_{\text{constructeur}} = 7 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$; aux incertitudes près les deux valeurs coïncident.

c) Détermination de la mobilité des porteurs de charge :

Nous avons obtenu précédemment la conductivité de cet échantillon de Germanium, celle-ci est directement liée à la densité n et à la mobilité de porteurs de charges μ au sein de

l'échantillon par la relation suivante, en bonne approximation la conduction étant assurée par les porteurs de charges majoritaires:

$$\sigma = n \times e \times \mu \text{ il est facile de remonter à } \mu :$$

$$\mu = 0.23 \pm \dots \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 2300 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta\mu = \frac{\Delta\sigma}{en} + \frac{\sigma\Delta n}{en^2} = \dots \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

ODG : $\mu(\text{Ge})=3900 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour les électrons

Nous avons pu grâce à l'effet Hall, remonter à des caractéristiques importantes des SC.

De plus nous avons remarqué que R_H , la constante de Hall, était élevée, or plus celle-ci est élevée plus l'effet Hall est marqué. C'est la raison pour laquelle, les teslamètres (basés sur le principe de l'effet Hall) sont constitués avec des SC et non avec des métaux pour lesquels la densité de porteurs de charge est très élevée donc R_H est faible.

Intéressons-nous dans cette dernière partie à une des applications importantes de ces matériaux : les cellules photovoltaïques appelées également photopile ou cellule solaire.

Remarque correcteurs : il serait intéressant de d'avantage comparer les valeurs obtenues expérimentalement à des valeurs théoriques de SC mais également d'isolants et de conducteurs pour bien montrer la différence entre les différents matériaux.

III) Application des semi-conducteurs : La cellule photovoltaïque

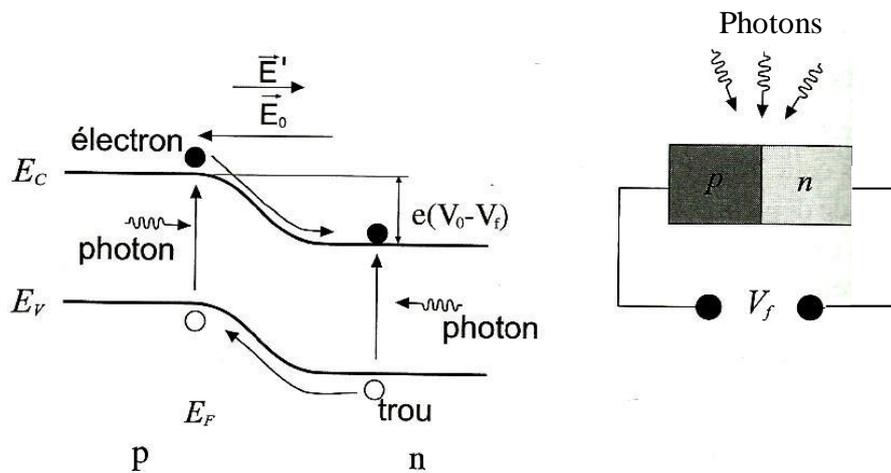
a) Mode de fonctionnement

Celles-ci permettent de convertir l'énergie solaire (issue du rayonnement solaire) en énergie électrique. Elles se présentent sous la forme de plaques de couleur sombre afin de favoriser l'absorption de la lumière. Les cellules photovoltaïques sont constituées d'une jonction semi-conductrices PN (une zone de SC dopé p en contact avec une zone de SC dopé n), elles sont optimisées pour fournir la puissance maximale pour un éclairement énergétique dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire.

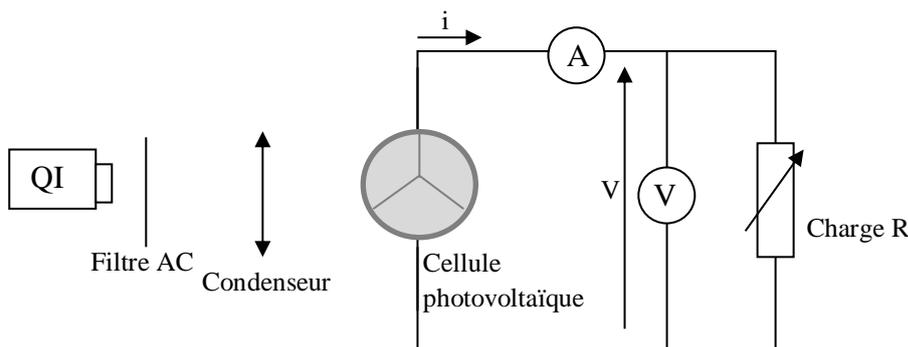
Son fonctionnement est le suivant :

Sur un diagramme d'énergie d'une jonction pn non polarisée, la hauteur de la barrière énergétique séparant la zone n de la zone p est égale à eV_0 , la différence de potentiel V_0 conduit à un champ électrique E_0 dirigé de n vers p. L'arrivée des photons issus du rayonnement solaire sur la photopile crée des porteurs de charges, électrons et trous, en effet l'énergie d'un photon absorbé (dans le cas où $h\nu > E_g$) est transférée à un électron excité de la bande de valence à la bande de conduction créant ainsi un trou. Le champ électrique E_0 a tendance à déplacer ces porteurs (Force électrique = qE_0) vers la zone n pour les électrons et vers la zone p pour les trous. Cette séparation des porteurs de charge créés se traduit par l'apparition d'un champ électrique E' , opposé à E_0 , et donc à une diminution de la hauteur de la barrière. Par conséquent il apparait une différence de potentiel V_{co} entre la zone p et n, aux bornes de la cellule en circuit ouvert égale à $E_g/2q$. Ainsi une grande valeur de E_g permet d'obtenir une tension élevée, mais une faible valeur de E_g permet une plus importante absorption de photon et donc un courant plus important. Un compromis est alors nécessaire pour optimiser la puissance conduisant à choisir E_g de l'ordre de 1 à 2 eV (le SC le plus utilisé actuellement est le silicium : $E_g(\text{Si}) = 1,1\text{eV}$).

On appelle effet photovoltaïque, l'apparition d'une différence de potentiel aux bornes d'une jonction éclairée.



b) Caractéristiques de la cellule photovoltaïque :



Dans un premier temps traçons la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule, cela va nous permettre de déterminer la valeur de la charge (appelée par la suite charge adaptée) pour laquelle la puissance électrique obtenue sera maximale.

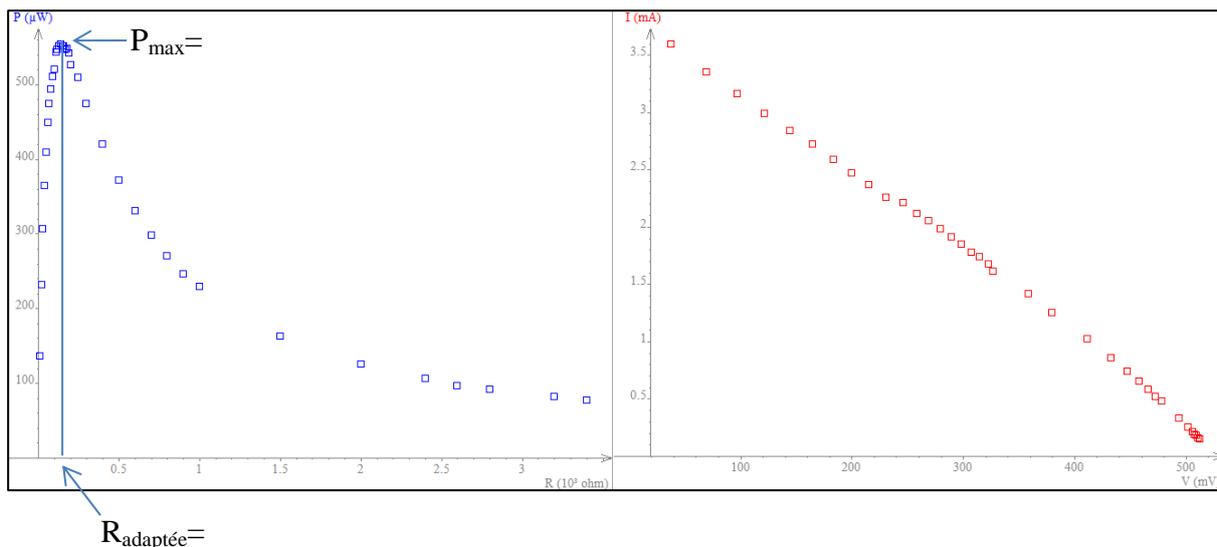
Une lampe QI, suivie d'un filtre anti-calorique pour éviter que les dispositifs qui suivent ne surchauffent et d'un condensateur afin de réaliser un éclairage intense et homogène de la surface sensible de la cellule.

On mesure dans un premier temps la tension en circuit ouvert (en prenant R infini) : $V_{co} = 527 \pm 5$ mV.

Puis on mesure le courant de court-circuit (en prenant $R=0$) : $I_{cc} = 4,0 \pm 0,2$ mA

Remarque : les valeurs de I_{cc} et V_{co} fluctuent, on n'a donc pas tenu compte des incertitudes données par le constructeur qui sont ici négligeables mais nous avons défini l'incertitude à partir du domaine de fluctuation.

En faisant varier la valeur de la charge, on relève différentes valeurs de I et V puis on trace la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.



On remarque que la caractéristique n'est pas linéaire, en traçant $P=f(R)$ on détermine la valeur de la charge pour laquelle la puissance électrique obtenue est maximale : $R_{adaptée}=140 \Omega$, $P_{max}= 554 \pm 6 \mu W$.

Par la suite nous allons déterminer le rendement maximum de la cellule, afin d'optimiser celui nous allons nous placer proche de la charge adaptée (nous pouvons remarquer que celle-ci est de l'ordre du rapport $V_{co}/I_{cc} = 132\Omega$ c'est pourquoi en préparation j'ai pris d'avantage de point autour de V_{co}/I_{cc}).

c) Rendement maximum

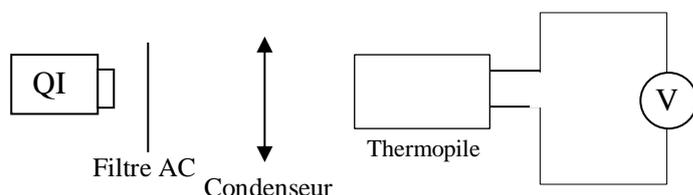
Le rendement maximum de la cellule photovoltaïque correspond au rapport de la puissance électrique maximale P_{max} dissipée dans la charge, par la puissance de rayonnement incident reçu par la photopile P_{inc} .

P_{max} a été déterminée précédemment : $P_{max}= 554 \pm 6 \mu W$

On mesure alors la puissance de rayonnement incident à l'aide d'une thermopile.

La thermopile est constitué par des thermoéléments montés en série et sous l'action d'un rayonnement thermique ils engendrent une tension thermo-électrique, que l'on va mesurer à l'aide d'un voltmètre Fluke 187.

Pour cela voici le montage réalisé (prendre soin de placer la thermopile au même endroit que la cellule photovoltaïque afin de ne pas trop fausser la mesure) :



Nous obtenons au voltmètre, une tension de $5.23 \pm 0.03 \text{ mV}$ (cf. notice fluke 187).

Sur la notice de la thermopile nous pouvons lire que sa sensibilité est de environ $0,16 \text{ mV/mW}$ ainsi une simple conversion nous permet de remonter à la puissance du rayonnement incident soit : $P_{inc} = 32,7 \pm 0,2 \text{ mW}$.

Ainsi nous pouvons remonter au rendement de la cellule photovoltaïque : $\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \times 100 = 1,7 \%$.

Comme nous pouvions nous y attendre le rendement est très mauvais. Malgré tout cette expérience met bien en évidence la conversion énergie solaire-énergie électrique ou plutôt ici énergie lumineuse-énergie électrique.

En effet pour la conversion de l'énergie solaire, le rendement mesuré est différent car la lampe utilisée n'a pas un maximum d'émission vers $0,5\mu\text{m}$ comme le rayonnement solaire mais plus proche de $1\mu\text{m}$.

De plus, nous avons réalisé l'expérience avec une seule photopile, en réalité les panneaux photovoltaïques sont constitués d'une association de photopiles en série et en parallèle, ce qui permet d'augmenter le rendement, cependant ce rendement n'excède pas les 10 à 20%.

Nous avons relevé plusieurs causes à ce faible rendement :

- Certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles
- Certains ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron
- Seuls les photons d'énergie suffisante sont absorbés et créent des paires électrons-trous
- Enfin de nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile

Remarques correcteurs :

- La cellule photovoltaïque utilisée pour le montage n'était pas constituée d'une jonction PN mais d'une jonction métal-SC, ce qui n'est pas hors sujet ici cependant dans ce cas il ne faut pas parler du fonctionnement de la jonction PN mais plutôt prendre la notice de la cellule photovoltaïque utilisée pour décrire son fonctionnement.
- Nous pouvons également pour cette manip utiliser une cellule photovoltaïque à jonction PN si on en trouve dans la réserve.
- Un des correcteurs semblait dire que le filtre AC n'était pas indispensable ici et avait tendance à diminuer le rendement... (à voir)

Conclusion

Nous avons pu au cours de ce montage remarquer la dépendance avec la température de la conductivité/résistivité des matériaux SC permettant alors leur usage dans le domaine de la thermométrie.

Nous avons pu remonter à différentes grandeurs microscopiques caractéristiques des SC comme l'énergie du gap, la densité et la mobilité de porteurs de charge. De plus nous avons mis en évidence une des applications des matériaux semi-conducteurs sous forme de jonction PN : l'effet photovoltaïque.

Enfin, il est important de remarquer que les SC sont des matériaux incontournables de nos jours, notamment au sein des dispositifs électroniques tels que les diodes, ou encore les transistors par exemple qu'on retrouve dans de nombreux objets modernes qui nous entourent et utilisent des microprocesseurs contenant un grand nombre de transistors : machine à café, réveil électrique, ascenseur, automobile (plus de 10 millions de transistors), carte de crédit (2 millions de transistors dans la puce), etc...

Questions correcteurs, et autres manip possibles :

- Fonctionnement thermopile ?
- Puissance/unité de surface émise par le rayonnement solaire ? ($1\text{Kw}/\text{m}^2$)
- Comment mesurer un champ magnétique autrement qu'avec une sonde à effet Hall ? (Fluxmètre qui mesure la variation temporelle du flux du champ magnétique)
- ODG de la résistivité des métaux ? (10^{-8} - $10^{-9}\Omega\cdot\text{m}$)

- Dopage n, dopage p des SC ? (prendre l'exemple du Silicium dopé n (produire un excès d'électrons) avec le Phosphore et dopé p (produire un déficit d'électrons) avec le Bore)
- Autres manip : Mesure du temps de recombinaison (cf Quaranta), diode électroluminescente,...