

MP 18 : Matériaux semi-conducteurs

Dihya Sadi et Elio Thellier

Session 2021

Contents

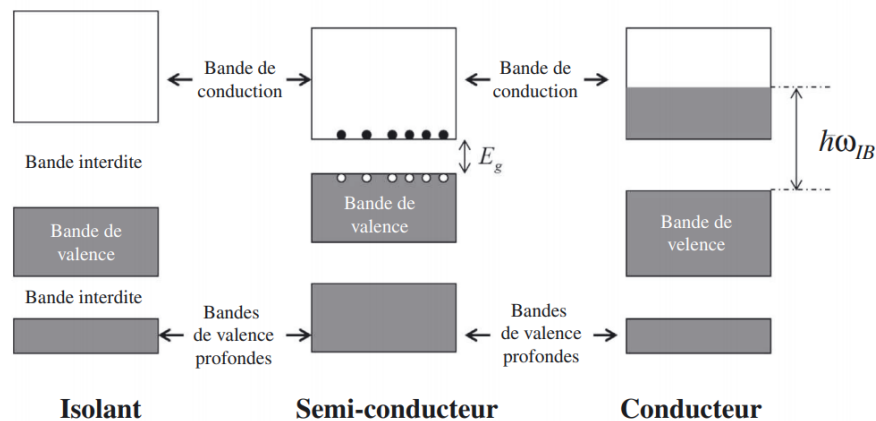
1 Manip 1 : Propriétés des matériaux semi-conducteurs : étude d'un SC intrinsèque Ge non dopé	3
1.1 Quelques petites explications théoriques	3
1.2 Matériel	3
1.3 Etapes	3
1.4 Questions et remarques	6
2 Manip 2 : Propriétés des matériaux semi-conducteurs : étude d'un SC extrinsèque Ge dopé P	7
2.1 Matériel	7
2.2 Etapes	8
2.3 Questions et remarques	10
3 Manip 3 : Rendement quantique d'une photodiode	12
3.1 Un peu de théorie sur les jonctions pn	12
3.2 Matériel	16
3.3 Montage	16
3.4 Etapes	17
3.5 Questions et Remarques	18
4 Manip 4 : réponse spectrale d'une photodiode	20
4.1 Matériel	20
4.2 Etapes	20
4.3 Questions et remarques	21
5 Manip surprise : Autocollimation avec les incertitudes	23

Introduction

Dans un atome isolé, l'énergie d'un électron ne peut prendre que des valeurs discrètes bien définies, alors qu'un électron libre peut prendre n'importe quelle valeur d'énergie. Dans un solide, la situation est intermédiaire : l'énergie d'un électron peut prendre n'importe quelle valeur mais à l'intérieur de certains intervalles bien définis, liés à l'interaction entre les atomes et leurs voisins dans un solide cristallin. Ces niveaux se regroupent en bande d'énergie : le diagramme d'énergie d'un solide se compose d'une succession de bandes d'énergies séparées par des bandes interdites. On distingue :

- Les bandes de valences profondes : occupées par des électrons des couches internes, entièrement pleines, fortement liés aux noyaux atomiques et donc considérés inertes
- La bande permise la plus haute : la bande de conduction, correspondant aux électrons des couches externes des atomes.
- La bande juste en dessous est appelée bande de valence, et contient AUSSI des électrons des couches externes

On appelle gap l'écart d'énergie qui sépare la bande de valence de la bande de conduction et selon sa valeur on peut distinguer 3 grands types de solides :



On va s'intéresser plus particulièrement aux semi-conducteurs pour lesquels la bande de conduction est totalement vide à basse température mais ont un gap (de l'ordre de eV) qui permet aux électrons de passer par simple agitation thermique dans la bande de conduction à température ambiante. La conductivité de ces matériaux augmente donc avec la température et c'est ce par quoi on va commencer en étudiant la dépendance en température de la conductivité d'un conducteur intrinsèque, le germanium.

1 Manip 1 : Propriétés des matériaux semi-conducteurs : étude d'un SC intrinsèque Ge non dopé

1.1 Quelques petites explications théoriques

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi conducteur pur c'est à dire qui ne contient que très peu d'impuretés ($10^{10}cm^{-3}$), et que leur contribution dans le cristal aux propriétés électroniques est négligeable. Avec par exemple du Silicium, qui contient environ 10^{22} atomes par cm^{-3} , à T=300K on trouve une densité d'électrons dans la bande de conduction de $10^{10}cm^{-3}$ ce qui est très faible comparé à la densité d'électrons libres dans les métaux ($10^{23}cm^{-3}$) donc processus tout de même très inefficace qui ne peut mener qu'à des courants ridiculement petits et inutilisables (ce qui permet transition vers la partie suivante : d'où l'intérêt de doper)

Principe général : Pour l'instant on cherche à retrouver la dépendance en température de la conductivité (en *Siemens.m*⁻¹) d'un semi-conducteur et remonter à l'énergie du gap

On a besoin des formules suivantes :

$$\sigma(T) = \frac{IL}{U(T)ab} \quad (1)$$

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) \quad (2)$$

1.2 Matériel

- Plaquette de Ge non dopé
- Alimentation lampe blanche
- Voltmètre
- Module de contrôle de la plaquette

1.3 Etapes

On commence déjà par mesurer au pied à coulisse les caractéristiques géométriques du semi-conducteur :

$$a = 10,02 \pm 0,02mm$$

$$b = 1,12 \pm 0,02mm$$

$$L = 20,0 \pm 0,1mm$$

- On impose un courant fixé aux bornes du semi-conducteur (2 ± 0.5 mA pour les croix rouges et 10 ± 0.5 mA pour les triangles verts) et on mesure la tension aux bornes en faisant varier la température avec le module Peltier intégré.
- On obtient σ en fonction de T avec les incertitudes grâce à (1)
- On trace $\ln(\sigma) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ et grace à la pente on remonte à l'énergie de gap d'après (2)

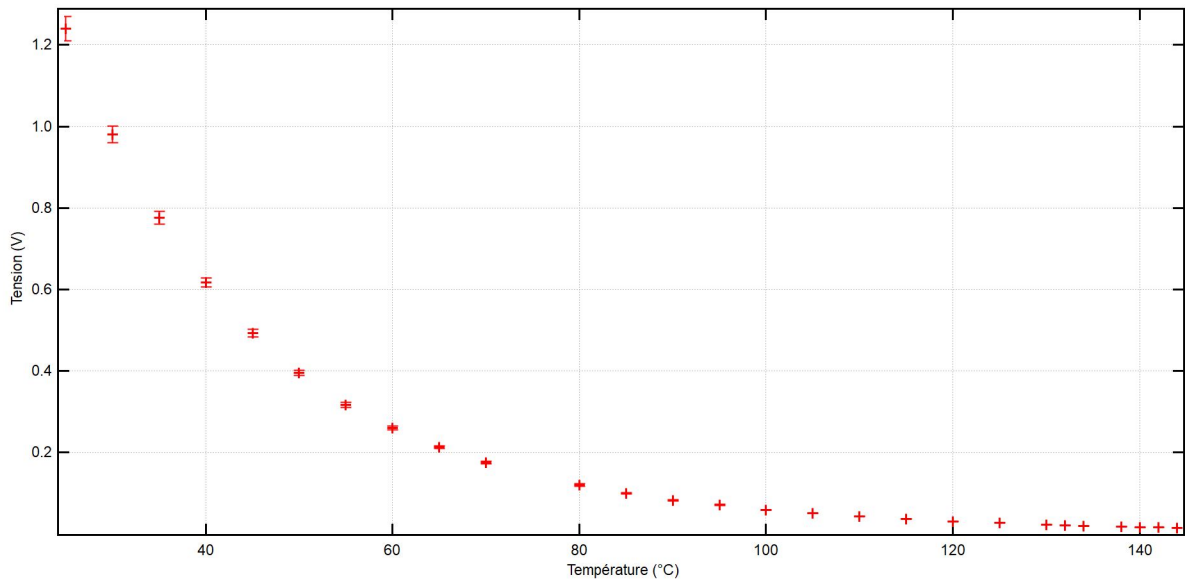


Figure 1: Tension aux bornes du Ge intrinsèque en fonction de la température.

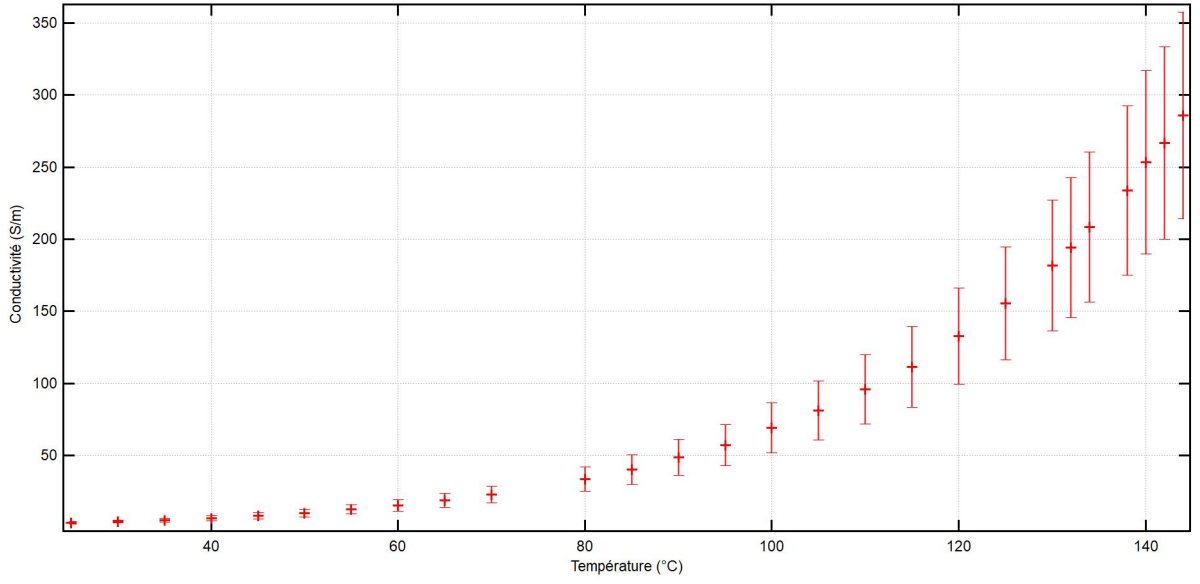


Figure 2: Conductivité en fonction de la température.

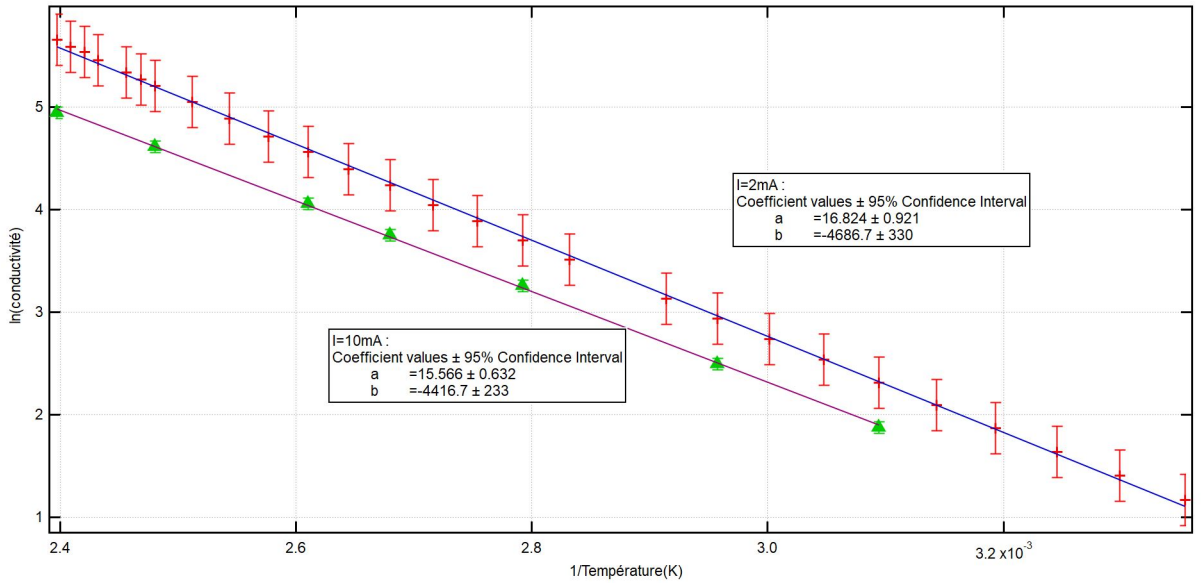


Figure 3: Logarithme Népérien de la conductivité en fonction de l'inverse de la température (en K)

$$E_g = -2k_B * (-4686 \pm 331) = 0.81 \pm 0.06 eV$$

C'est éloigné de la valeur attendue pour le Germanium non dopé à température ambiante (0.67eV), mais ça correspond à la valeur toujours trouvée par le passé avec ce

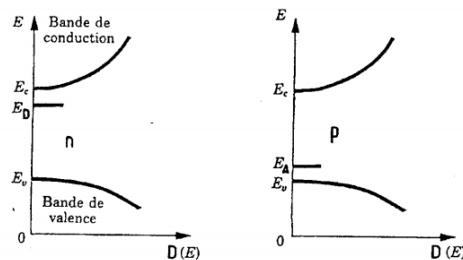
matériel... Une erreur systématique pourrait être une chute de tension entre le volt-mètre et le semi-conducteur (notamment à cause des soudures), ou un écart entre la température du Ge et celle de la sonde d'après JBD, moi j'y crois pas car dans chacune de ces variables une erreur systématique rendrait $\ln(\sigma) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ non linéaire ! A réfléchir...

1.4 Questions et remarques

- Dans le cas des conducteurs, la conductivité diminue avec la température car l'augmentation de la température augmente le nombre de chocs et les frottements donc dissipation d'énergie.
- D'où vient l'expression en exponentiel de la conductivité ? Produit de la densité d'électrons fois la densité de trous.... A chercher
- Attention conductivité en S/m
- La première manip qu'on a fait peut servir de mesure de température de thermistance. Mais cela n'est possible que avec un semicon non dopé car si on le dope on aura beaucoup plus de porteurs liés au dopage que de porteurs liés à l'agitation thermique donc on verra pas du tout l'effet de la température ça changera pas grand chose.
- Remarque : le semicon est en vérité pas si petit... Est-ce que c'est vraiment la bonne température ? Déjà être sûr que la température est homogène, et ensuite être sûr que c'est vraiment celle du capteur.
- Temps de réponse d'un capteur de température ? Dépend de sa taille, de sa capacité calorifique, de l'environnement dans lequel on le met... Donc toujours un problème spatial, temporel, avec des capteurs de température...
- Ecart du gap lié peut être à la température qu'on estime pas comme il faut ? Ou aux branchements. En tout cas lié au protocole de mesure et c'est lui qu'il faut remettre en question.
- Bien penser à vérifier l'homogénéité du barreau
- OGS :
 - Pour le cuivre $10^{29} m^{-3}$
 - Pour les semi-cons dopés entre 10^{14} et $10^{18} cm^{-3}$
- Si la plaquette de Ge intrinsèque est cassée, utiliser une thermistance et mesurer sa conductivité, on peut remonter à un gap, mais on peut pas comparer à une quelconque valeur tabulée.

2 Manip 2 : Propriétés des matériaux semi-conducteurs : étude d'un SC extrinsèque Ge dopé P

Principe général : On a vu en ordre de grandeur qu'on avait de très faibles densité d'électrons avec des conducteurs intrinsèques. Par contre si on introduit volontairement des impuretés qui sont des atomes qui possèdent soit plus soit moins d'électrons de valence que ceux du germanium par exemple on a apparition d'un niveau riche en trou ou en électrons juste en dessous de la BC ou juste au dessus de la BV.



Ici on parle d'un conducteur dopé p, on enrichit donc le semi conducteur en trous et on ajoute un niveau riche en trous juste au dessus de la BV. Les électrons de la BV peuvent donc rejoindre facilement ce niveau ! On va fixer le courant à $30 \pm 0.5\text{mA}$ (ici on est dopé donc meilleure conductivité donc on arrive à monter à de plus grand courant, et ainsi minimiser l'erreur relative) puis on va:

- Mesurer la conductivité de la plaque à T ambiante toujours avec (1) en mesurant U à T_{ambiante} (ça sert pour estimer la mobilité plus tard)
- Utiliser l'effet Hall : on place la plaquette dans l'entrefer d'un électro-aimant dont on règle le champ B en faisant varier I_{bobines} et on en déduit la densité de porteur (trous ici) d'après la formule

$$U_{\text{Hall}} = \frac{B * I_{sc}}{nqb} \quad (3)$$

- Dédurre des deux mesures précédentes une valeur de la mobilité des porteurs (trous ici)
- Evolution de U_H en fonction de T : changement de signe à partir d'une certaine température : changement de la nature des porteurs : électrons deviennent prépondérants (A voir niveau timing)

2.1 Matériel

- Electro-aimant **ATTENTION** : gros bobinages donc inductance L très élevée, si l'on coupe subitement le courant (turn off l'alim, ou change-

ment de calibre de l'amperemètre qui ouvre brusquement le circuit)
 $L \frac{di}{dt}$ devient immense et on endommage le matériel !

- Gaussmètre
- Alimentation QJ3005X tension nominale 4A
- Amperemètre pour checker le courant
- Pied à coulisse pour mesurer l'entrefer et le semi-con
- Petite cage qui coupe les champs magnétiques pour étalonner le gaussmètre :
Menu -> Utilities -> Null puis on le plonge dans la cage de Faraday -> Reset
- Support avec pince 3 doigts pour fixer le gaussmètre

2.2 Etapes

- Etalonnage du champ B crée par l'aimant permanent :
On choisit un entrefer suffisamment petit pour avoir un champ B homogène et intense, mais suffisamment grand pour avoir une gamme de linéarité B(I) assez large avant la saturation du champ B dû au matériau ferromagnétique. Chercher autour de $e = 1,2cm$ et tracer $B_{entrefer} = f(I_{bobines})$ pour déterminer la plage (en courant) de réponse linéaire (nous on avait linéaire jusqu'à 3A, sachant que $I_{max} = 4A$, à ne surtout pas dépasser) ainsi que l'équation de la droite pour faire la correspondance I bobine - B crée. **ATTENTION SURTOUT AU CABLAGE DE L'ELECTROAIMANT** : il y a un des deux sens qui est bloqué par des diodes (de roue libre pour protéger l'alimentation en cas de coupure subite du courant). Vérifier de plus que les fusibles sont opérationnels et bien vissés...

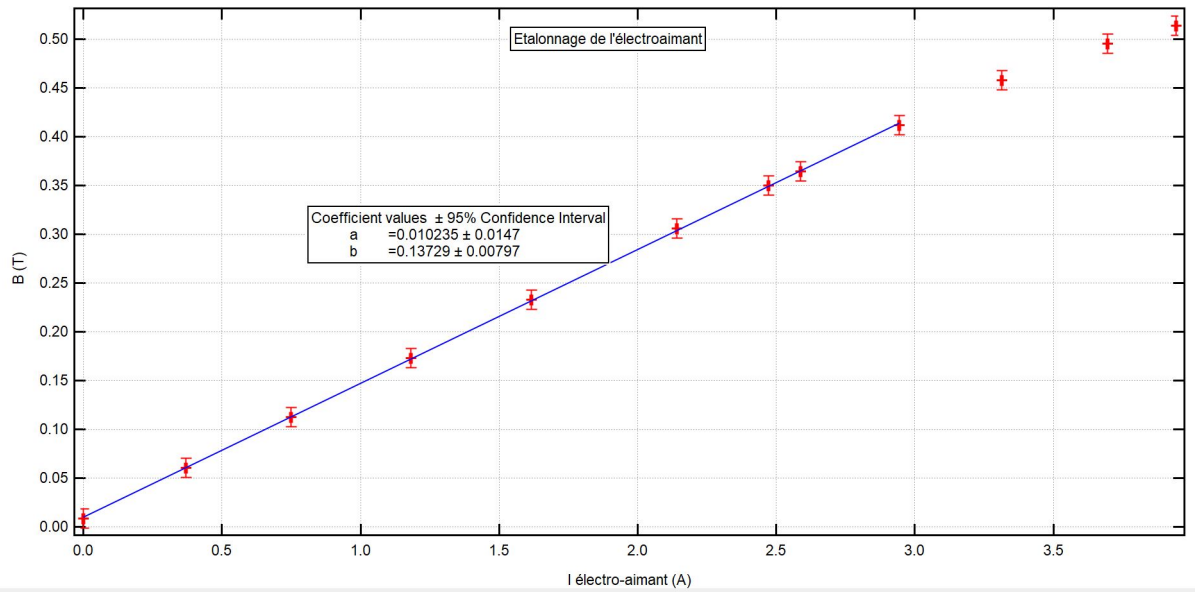


Figure 4: Etalonnage de l'électroaimant

- Avant toutes choses on fait une mesure de conductivité de la plaquette à température ambiante exactement comme tout à l'heure avec (1) et on la note

On obtient : $\sigma =$

- Ensuite on fait les branchements pour récupérer la tension Hall, on fixe le courant à 30mA. Hors de l'entrefer $B = 0$ donc on veut $U_{Hall} = 0$. Ca n'est pas forcément le cas à cause du fait que les soudures ne sont pas exactement en face l'une de l'autre (orthogonales au passage du courant dans le sc) ce qui fait qu'on récupère une partie du gradient de potentiel imposé pour avoir le courant fixé (à 30mA ici). Donc il faut aussi ici fixer le 0 en se mettant à champ nul et en réglant le bouton prévu à cet effet sur le module pour avoir $U_H = 0$

Ensuite on met le sc dans l'entrefer et on trace la droite afin d'obtenir la densité de porteurs de charges grâce à (3) (on a mis B en ordonnée car il a la plus grande incertitude) :

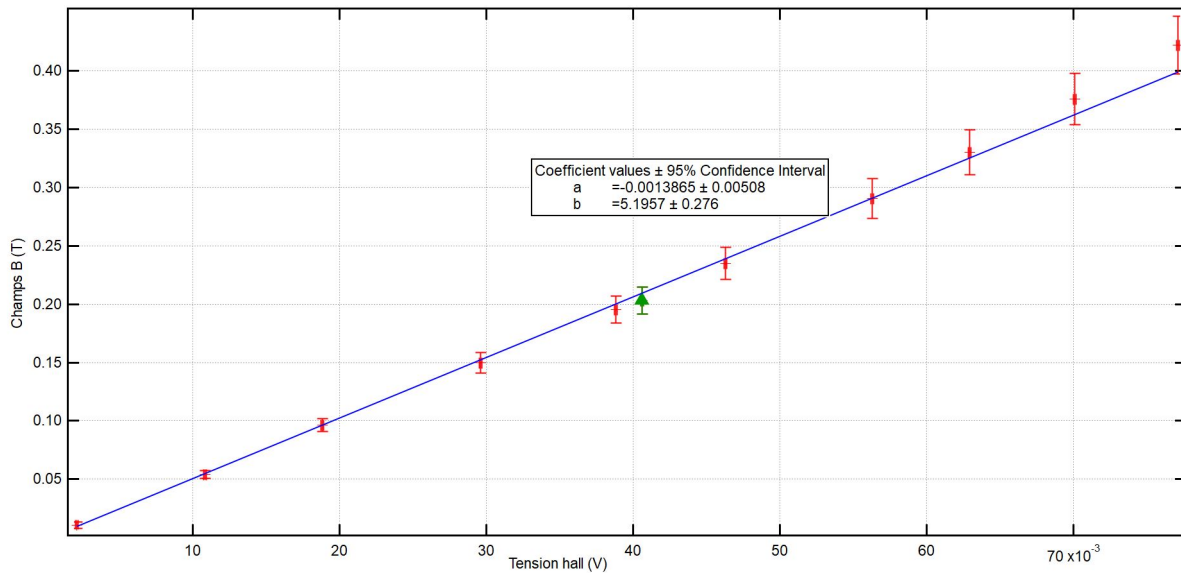


Figure 5: Effet Hall sur du Germanium dopé p.

$$n =$$

Valeur que l'on peut comparer à celle du cuivre par exemple : $n_{Cu} = 10^{29} m^{-3}$

- A partir de la conductivité déterminée au tout début on en déduit la mobilité des porteurs de charges :

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} =$$

Valeur qu'on peut comparer à celle des électrons dans le cuivre par exemple :

$$\mu_{Cu} = 3,2 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$$

Très intéressant elle est beaucoup plus grande... On a donc une vitesse de déplacement plus grande : $\vec{v} = \mu \vec{E}$ et on conséquence on peut obtenir de forts courants

2.3 Questions et remarques

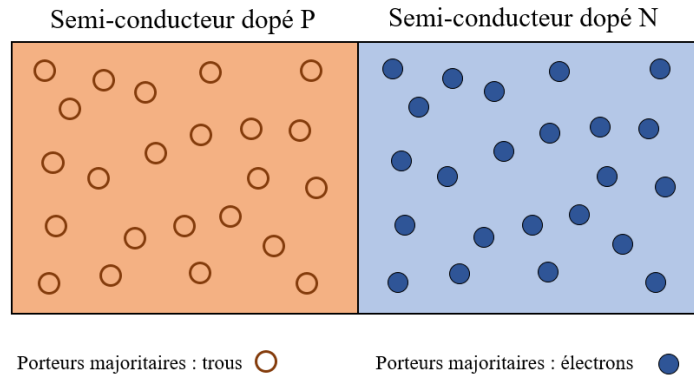
- Si on veut faire un capteur à effet Hall avec un matériau non dopé : dépendance à la température trop important car nombre de porteurs liés à l'agitation thermique devient trop proche du nombre de porteurs liés à l'effet Hall. De même il ne faut pas qu'il soit trop dopé parce que le nombre de porteurs liés au dopage risque

d'être trop grand devant le nombre de porteurs liés à l'effet Hall et donc on va rien voir. D'ailleurs avec le Germanium on a donc pas un très bon capteur le Silicium par exemple serait mieux.

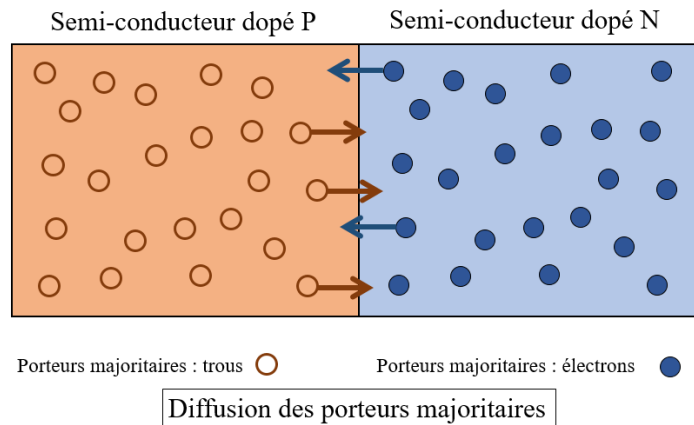
3 Manip 3 : Rendement quantique d'une photodiode

3.1 Un peu de théorie sur les jonctions pn

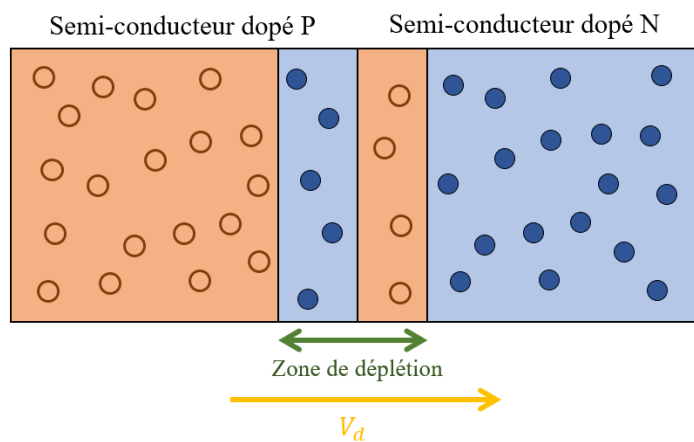
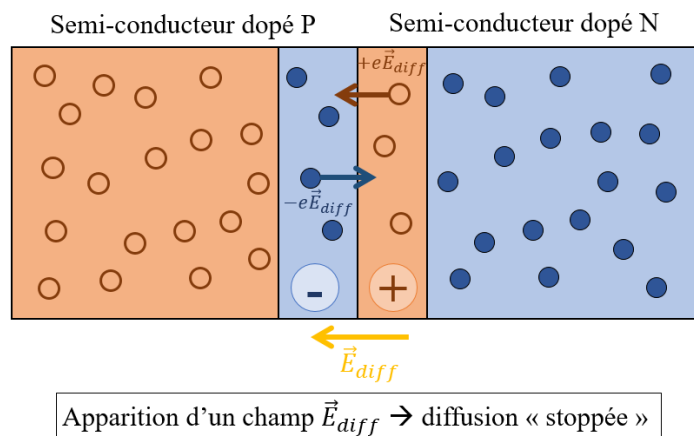
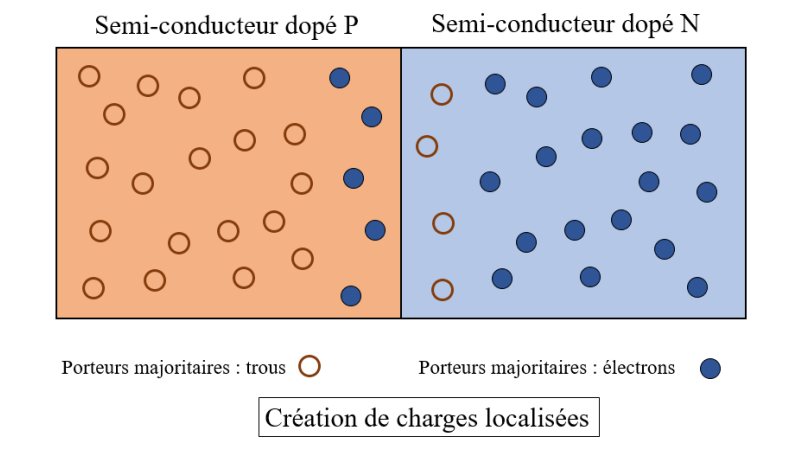
Une jonction pn est constituée de l'association d'un semi-conducteur dopé p, donc dont les porteurs majoritaires sont les trous, et d'un semi-conducteur dopé n, dont les porteurs majoritaires sont les électrons.



Lorsqu'on les mets en contact, il y a diffusion au niveau de la zone de contact et donc création d'une petite zone appelée zone de déplétion.

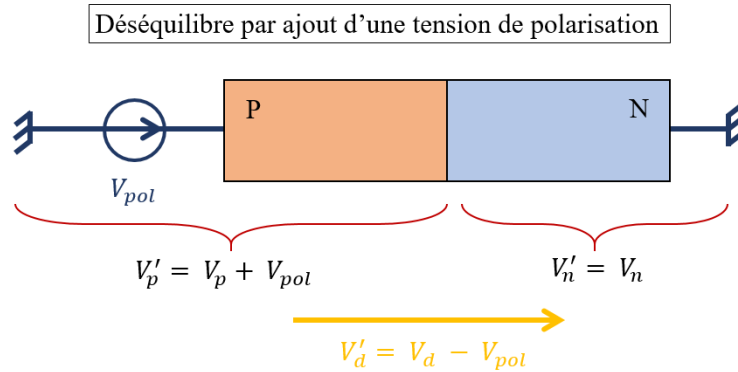


Toutefois cela induit l'apparition de charges localisées, et donc d'un champ $\vec{E}_{diff}$ (cf figure 2) qui va entraîner un mouvement opposé à celui de la diffusion. Tout cela se stabilise pour une valeur de potentielle qu'on va noter V_d , barrière de potentiel qui "stoppe" la diffusion.



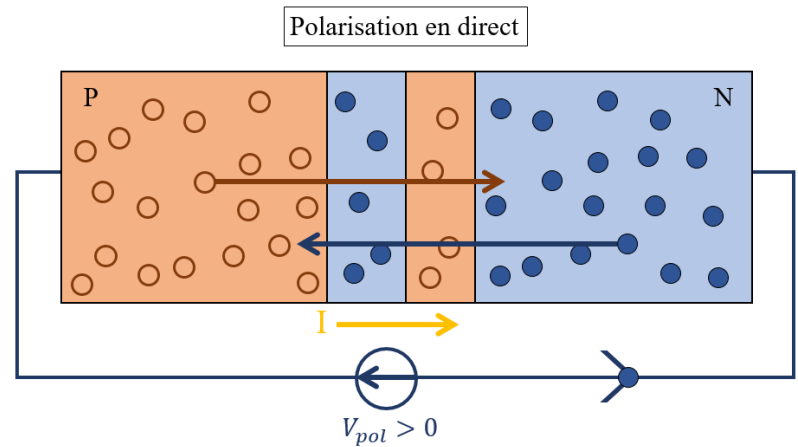
Maintenant on polarise tout cela en appliquant une tension V_{pol} aux bornes de la jonction. La tension est donc désormais : $V'_d = V_d - V_{pol}$: on a un déséquilibre, qui va

favoriser soit la diffusion soit le déplacement dans le champ électrique, selon le signe de V_{pol} .



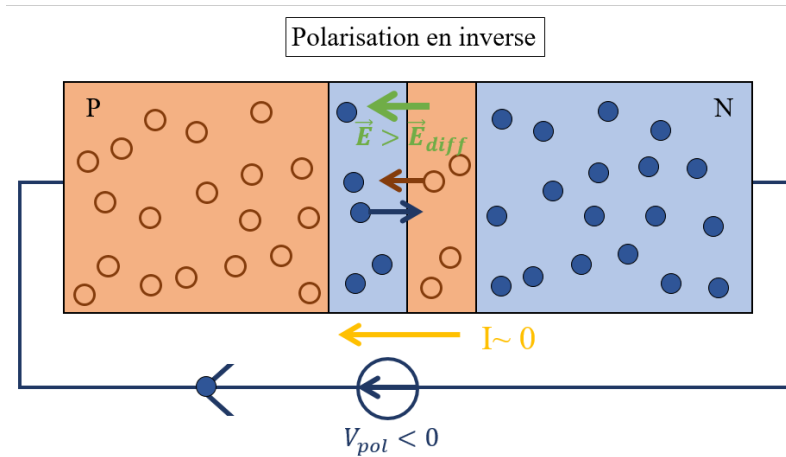
- Si $V_{pol} > 0$:

$V'_d < V_d$: on n'arrête plus la diffusion donc on va avoir circulation des électrons et apparition d'un courant qu'on appelle courant direct.



- Si $V_{pol} < 0$

$V'_d > V_d$: la diffusion des porteurs majoritaires est stoppée par contre on a un fort champ $\vec{E}$ dans la zone de déplétion, et dès qu'un porteur minoritaire se retrouve par hasard dans la zone de déplétion il est propulsé par $\vec{E}$. Donc on va avoir un flux d'électron mais très faible car lié aux porteurs minoritaires. Pour une diode, on est dans la situation où elle est bloquée ! Pour une photodiode : on va éclairer la zone de déplétion et par l'interaction entre les photons et la matière on va avoir création de paires électrons-trous dans la zone de déplétion et donc "encourager" le courant inverse. Ce courant augmente linéairement avec la puissance optique qu'on envoie.



Principe de la manip:

Une photodiode est constituée d'une jonction pn polarisée en inverse. On sait qu'une jonction pn, donc une diode, a la caractéristique suivante : polarisée en inverse, elle est bloquée, aucun courant ne passe. Pourtant en éclairant la zone de déplétion, l'interaction des photons avec la matière entraîne la création de paires électrons-trous dans la zone électrons trous et ainsi encourage et favorise le passage d'un courant inverse dans la photodiode. On obtient ainsi la caractéristique suivante, dont le photocourant augmente linéairement avec la puissance optique de la source lumineuse. C'est cette capacité de traduire la lumière reçue en un courant qui en fait un photorécepteur utilisé partout. Nous allons nous intéresser à cette capacité de transformer un photon en un courant à travers la notion de rendement quantique. Evolution du courant récupéré par la photodiode dépend du nombre de photons reçus par unité de temps Φ_p :

$$I_p = q\eta\Phi_p + I_s$$

où I_s est le courant d'obscurité, qui correspond au flux de porteurs minoritaires qui arrivent par "accident" (diffusion) dans la zone de déplétion et sont propulsés par le champ E. Toutefois il est vraiment très faible (ordre du nA) donc on peut le négliger.

$$I_p = q\eta \frac{P_{opt}}{h\nu}$$

Rendement quantique :

$$\eta = \frac{\text{Nombre d'électrons mis en conduction}}{\text{Nombre de photons reçus}}$$

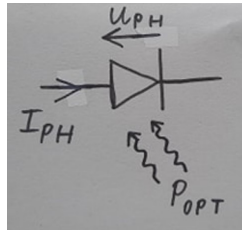
On mesure ce rendement quantique en traçant la droite $I_p = f(P_{opt})$. On n'a pas de valeurs tabulées à quoi le comparer mais on peut essayer de l'interpréter en terme de propriétés de réflexion de la photodiode.

3.2 Matériel

- Plaquette photodiode-LED avec LED, PD, alim qui va avec etc, $R_m = 14.7k\Omega$ et $R_0 = 220\Omega$
- KEYSIGHT 34461A Multimètre
- Puissance-mètre à photodiode
- Condenseur pour diriger le faisceau de la LED

3.3 Montage

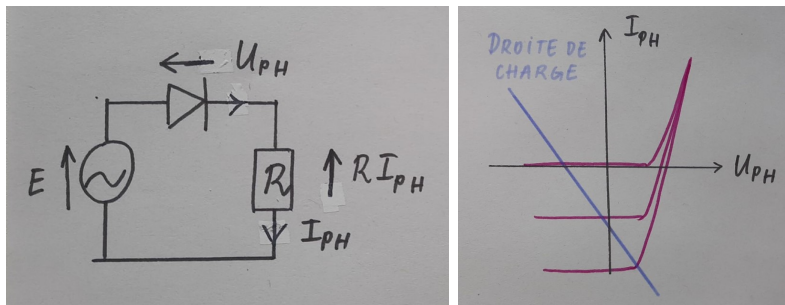
On a :



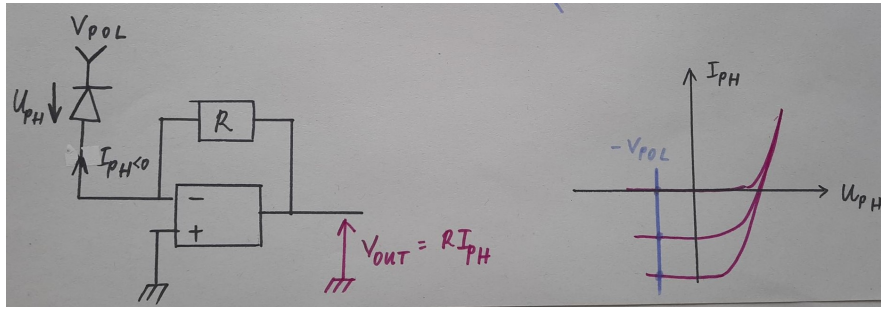
On veut :

- Récupérer une tension image d'un photocourant
- Polariser la photodiode en inverse

La première idée de montage est la suivante, mais l'ennui est que la tension aux bornes de la photodiode dépend directement de I_{PH} donc on aura une droite de charge pas verticale...



On utilise donc le montage suivant appelé montage transimpédance qui permet d'obtenir $U_{PH} = -V_{pol}$ quel que soit le photocourant qui circule dans la photodiode :



On choisit une résistance de mesure $R_m = 14,7k\Omega$ sur le montage transimpédance.

Remarque : sur la plaquette de JBD on peut choisir soit le montage "naïf" qu'on va en fait préférer pour une étude dynamique car ne faisant pas intervenir d'ALI on n'a pas de problèmes de slew rate etc, soit le montage transimpédance très pratique en étude statique. Choix avec le petit bouton à droite du coax de la photodiode.

3.4 Etapes

- Branchements sur la plaquette...
- On commence par faire l'étalonnage de la LED : on fait tourner le petit bouton de V_{pol} pour faire varier la tension de polarisation et donc le courant que l'on mesure avec un ampèremètre au niveau des bornes jaunes et on fait correspondre la puissance optique émise par la LED mesurée avec un puissancemètre à photodiode.
Tout faire sous un drap noir

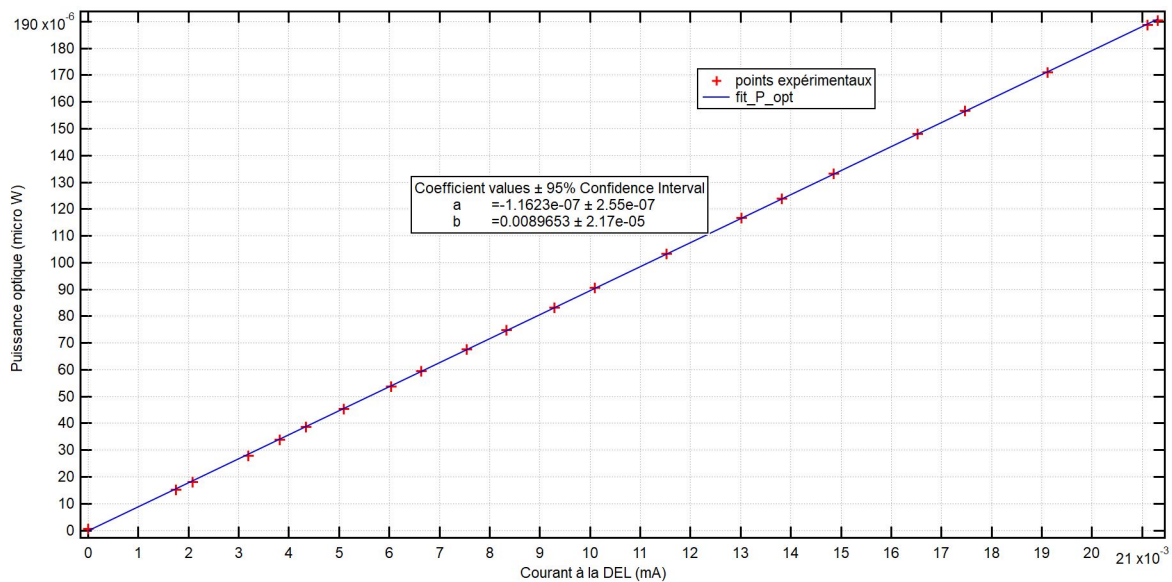


Figure 6: Etalonnage de la LED

- Ensuite on éclaire la PD avec la LED et on récupère le photocourant sur un multimètre... Attention à bien être polarisée en inverse pour être dans le domaine où I_{PH} augmente linéairement avec P_{opt} (mais de toute manière c'est géré par la plaquette).

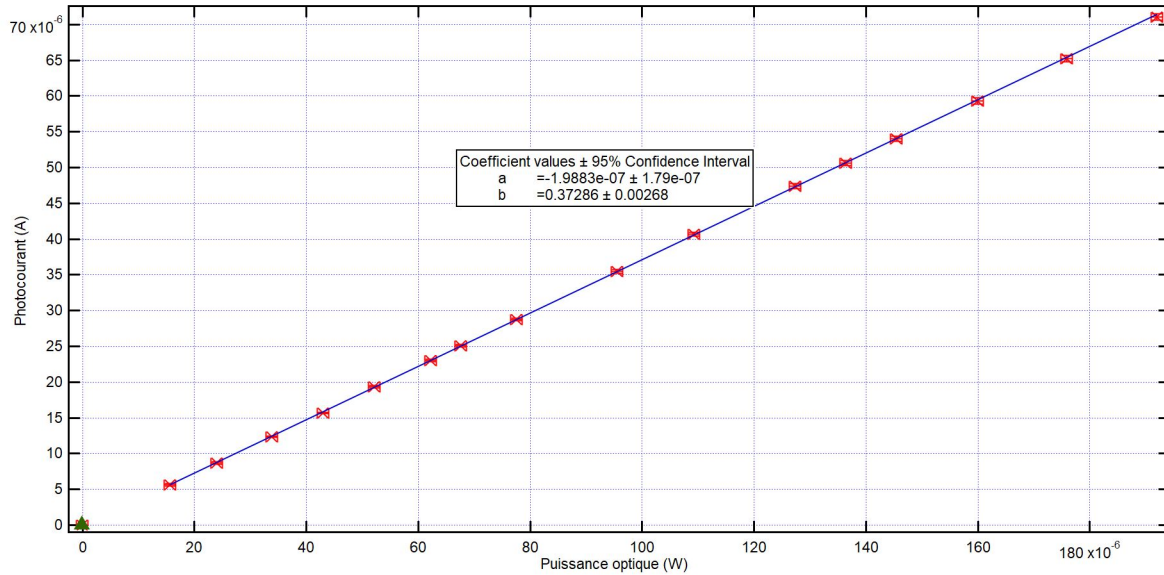


Figure 7: La pente est proportionnelle au rendement quantique

- Rendement quantique : récupéré par la pente de la caractéristique :

$$\eta =$$

- Maintenant on veut comparer ça avec le coefficient de réflexion : on utilise une diode laser car beaucoup plus intense et directive.
On mesure la puissance incidente puis la puissance réfléchie et on récupère un coefficient de transmission qu'on peut interpréter avec le rendement quantique

$$T = 1 - \frac{P_{ref}}{P_{inc}}$$

3.5 Questions et Remarques

- Utilité du montage transimpédance ? Si on veut que la photodiode réponde vite c'est mieux d'utiliser ce montage transimpédance : le temps de réponse vaut (à

peu près) la capacité de jonction fois la chute de tension dans la jonction. Par contre la capacité de jonction fois résistance de mesure or courants petits donc il faut mettre des grosses résistances donc réponse très lente. Donc si on veut caractériser la réponse dynamique de la photodiode il faut effectivement utiliser le montage naïf !!! Quoiqu'il arrive d'ailleurs la photodiode répondra beaucoup moins vite que la LED car on a une très grosse section, or la capacité de jonction est directement proportionnelle à la section, donc grosse capacité et gros temps de réponse.

- Pour la longueur d'onde de la LED diode utiliser un spectromètre pour vérifier... Normalement 640 nm et largeur de 15nm à mi-hauteur. On assimile la longueur d'onde à la longueur d'onde centrale donc on suppose
- Regarder la doc des PIN10 pour comparer le rendement quantique...
- Faire la remarque que le puissancemètre est une photodiode aussi... Dont on suppose connaître bien le rendement quantique.
- Remarque : dans ce montage toutes les manip doivent être dans l'objectif propriétés d'un semi-conducteur.
- Attention pas très bonne idée de mettre un condensateur sur le montage LED/PD car on envoie pas tout avec la même incidence donc plus dur à interpréter. On peut essayer d'envoyer une diode laser pour avoir une incidence normale, et moduler la puissance optique avec un polariseur-analyseur. Par contre faire très attention, la diode laser envoie elle même une lumière polarisée... Prendre juste un analyseur.
- Prendre 14,7 k pour la résistance de mesure car les courants sont faibles donc il faut une grosse résistance pour avoir des tensions mesurables.
- Indice de réflexion du silicium ? 3,5. Important car explique le rendement quantique (??).
- Toute la puissance du faisceau ne rentre pas dans le matériau finalement. Chouette de valider ça avec la petite manip. Peut être faite aussi en jouant sur l'angle ? Perte d'énergie avec les phonons ??? (rien compris perso) Pas faire d'incertitude mais en conclure qu'une partie non négligeable des photons rentre pas dans le matériau ce qui explique bien le fait qu'on est pas un courant aussi grand qu'on aimerait ! Intéressant. Mais dire qu'il faudrait pouvoir faire des mesures plus propres et plus systématiques pour conclure.
- Rendement quantique = rendement du matériau VS Sensibilité spectrale = rendement de transduction du capteur

4 Manip 4 : réponse spectrale d'une photodiode

4.1 Matériel

- Oscilloscope 4 voies pour pouvoir faire les stats
- Lampe blanche + son alim
- Chopper (hacheur) + son alim
- Monochromateur 295-600 nm
- Capteur pyro-électrique, Cellule silicium (10K-1K ?), et leur alim avec les câbles spéciaux
- Câble avec pinces croco au cas ou on a un problème de masse entre le monochromateur et le capteur

4.2 Etapes

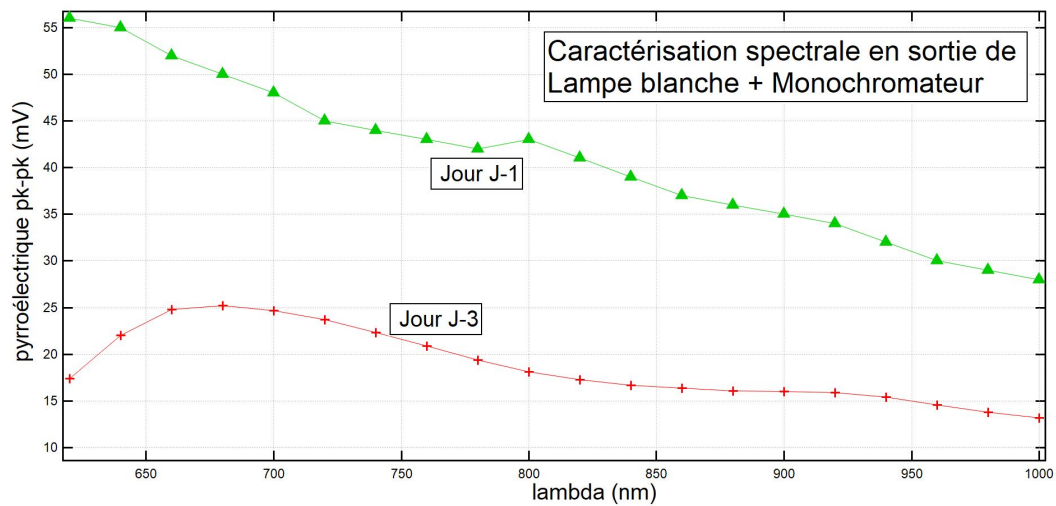


Figure 8: Etalonnage de l'intensité en fonction de la longueur d'onde grâce au pyroélectrique qui a une réponse plate.

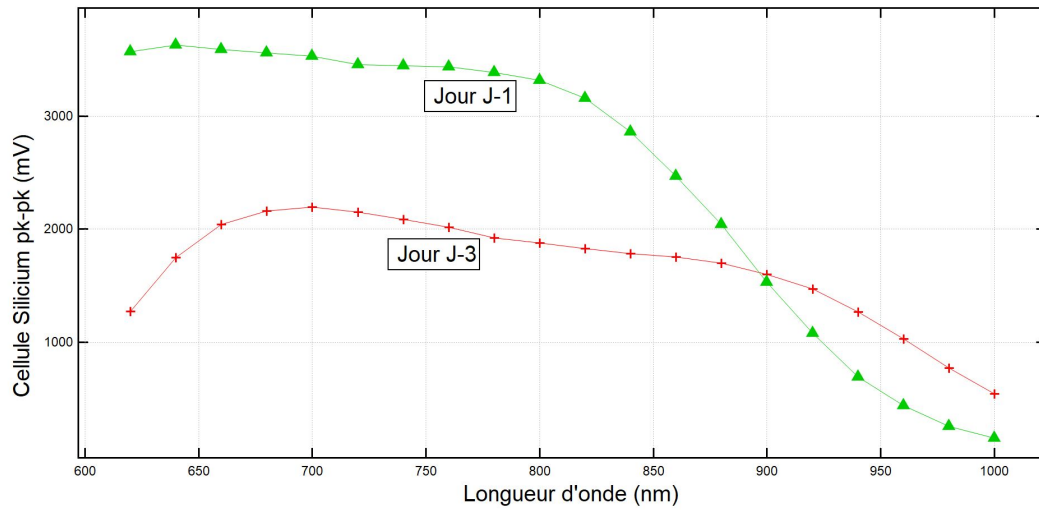


Figure 9: Mesure brute avec la cellule au Silicium

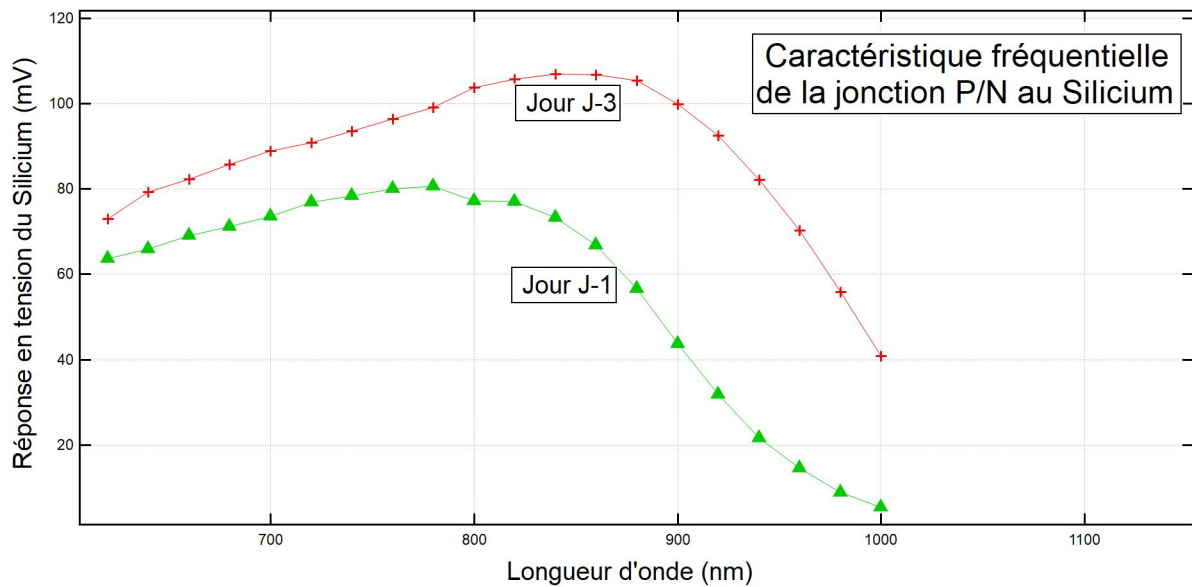


Figure 10: Sensibilité de la cellule au Silicium, on peut déterminer la longueur d'onde de coupure.

4.3 Questions et remarques

- Pour la manip avec le monochromateur peut être plutôt que de faire la réponse spectrale regarder juste à l'oscilloscope la mesure de λ_{gap}
- Cellule photovoltaïque de silicium amorphe : gap plus petit ce serait peut être mieux

- Pour la réponse spectrale on pourrait aussi juste tracer la partie linéaire pour remonter au rendement quantique
- Sur la réponse spectrale toujours tracer en relatif ($S/S_{\max}$)
- Astuce pour le monochromateur : visser le capteur jusqu'au bout puis dévisser de un quart de tour

5 Manip surprise : Autocollimation avec les incertitudes

Matos :

- Un double de focale "inconnue" (100mm) sur pied
- lampe blanche sur pied
- un objet (lettre p sur dépoli) sur pied
- un miroir plan
- un réglet

On dispose les éléments dans l'ordre : lampe blanche, objet, lentille, miroir. On fait l'image nette de l'objet sur lui même (légerement décallé pour pouvoir le voir) grace au miroir au travers de la lentille. **L'astuce consiste ensuite à mesurer au réglet 1 fois pour chaque coté (on retourne la lentille et on autocollimate à nouveau). En faisant la moyenne des deux distance on s'affranchit de l'incertitude sur la position de la lentille par rapport à son support.**