

MP 12 : Photorécepteurs

Cassandra Dailedouze, Manon Barrière

Introduction

Un photorécepteur est un transducteur convertissant un flux lumineux en un signal électrique. Un des photorécepteurs que vous connaissez tous est l'œil. En effet, lorsque des rayons lumineux arrivent jusqu'à notre œil, ce dernier les convertit en signaux électriques neuronaux, exploitables ensuite par le cerveau.

Les caractéristiques du récepteur conditionnent la perception que nous avons des phénomènes optiques : on ne voit par exemple pas le rayonnement infrarouge alors que la plupart des reptiles y parviennent, nous sommes aussi incapable de distinguer séparément les 24 images par seconde d'un film au cinéma. L'œil a donc une réponse spectrale et un temps de réponse limités. C'est pour cela d'ailleurs que dans de nombreux domaines de la physique, on fait appel à différents photorécepteurs nous permettant de percevoir les phénomènes optiques invisibles à l'œil nu. Nous allons ici nous intéresser aux caractéristiques des photorécepteurs, et en particulier à ceux de la photodiode, détecteur rapide, linéaire et pas cher, et d'un usage très répandu. Les photodiodes sont de plus faciles à mettre en œuvre et de faible encombrement. Il s'agit d'un **récepteur photonique** (sensible au nombre de photons incidents). Nous ferons intervenir une autre catégorie de photorécepteurs dans ce montage, les **récepteurs thermiques** (l'élévation de la température sur le récepteur est à l'origine du signal électrique).

1 Caractéristique courant-tension de la photodiode

Liste du matériel :

- GBF, Oscilloscope
- Sonde différentielle
- Boîte à décade R variable
- Photodiode PIN 10 (disponible dans les maquettes d'électronique)
- 1 BNC banane (il est important de ne pas mettre directement un câble coaxial), des fils..

On envoie un signal variable avec le GBF ($f=1$ Hz d'amplitude 8 V) sur l'anode de la photodiode (borne noire du BNC banane). Puis de la cathode (borne rouge du BNC) on va à la résistance. La masse du GBF est reliée à la masse de la résistance. On prélève ensuite la tension aux bornes de la résistance (image du courant dans la photodiode) et aux bornes de la photodiode à l'aide d'une sonde différentielle pour éviter les problèmes de masse. On peut représenter directement avec ce montage la caractéristique courant-tension de la photodiode à l'oscilloscope (en mode persistance).

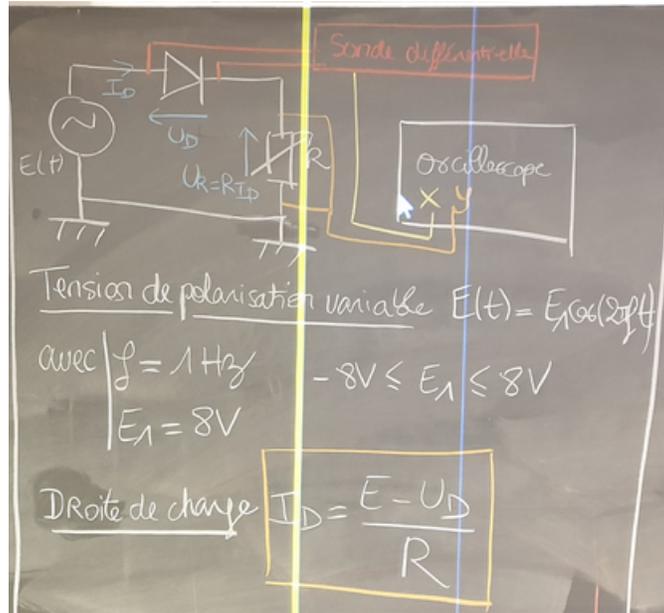


FIGURE 1 – Caractéristique de la photodiode - Schéma électrique

Il est important ici de parler de la notion de point de fonctionnement du système (croisements entre la caractéristique de la photodiode et la courbe $U=E-RI$)

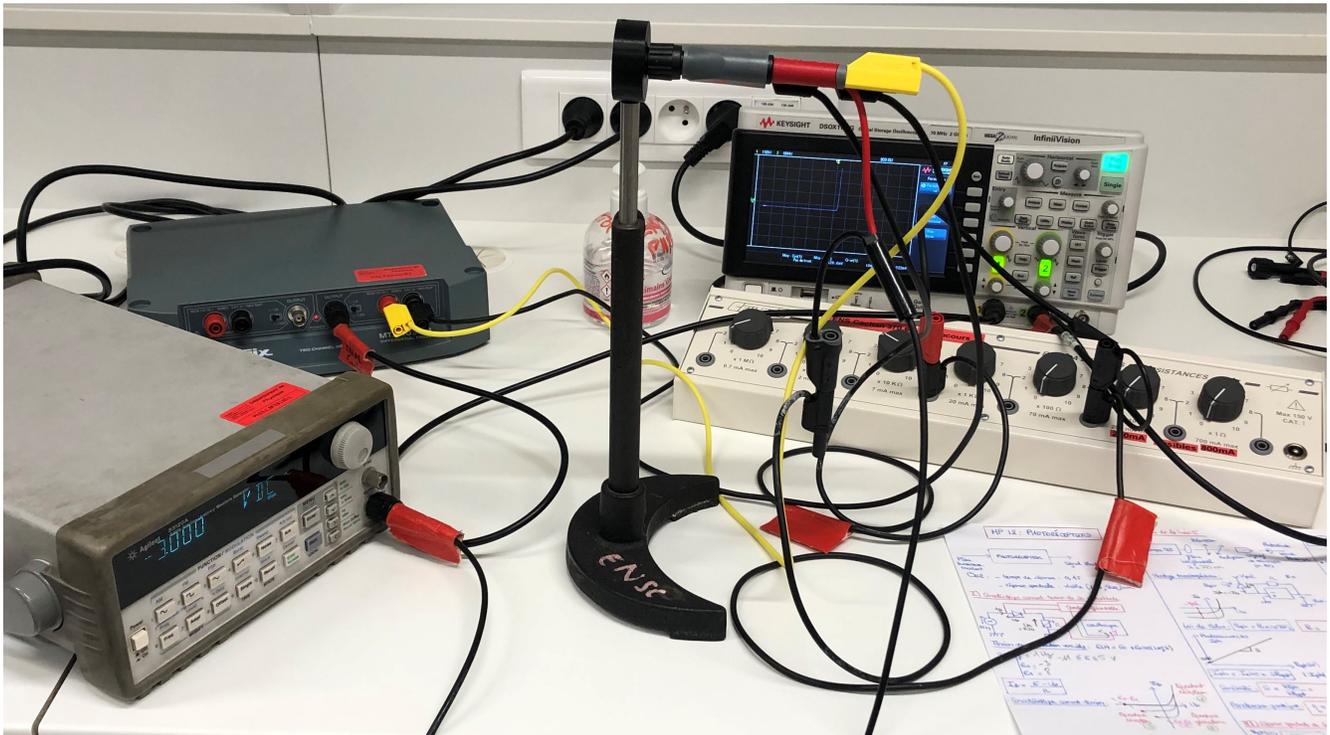


FIGURE 2 – Caractéristique de la photodiode - Branchements

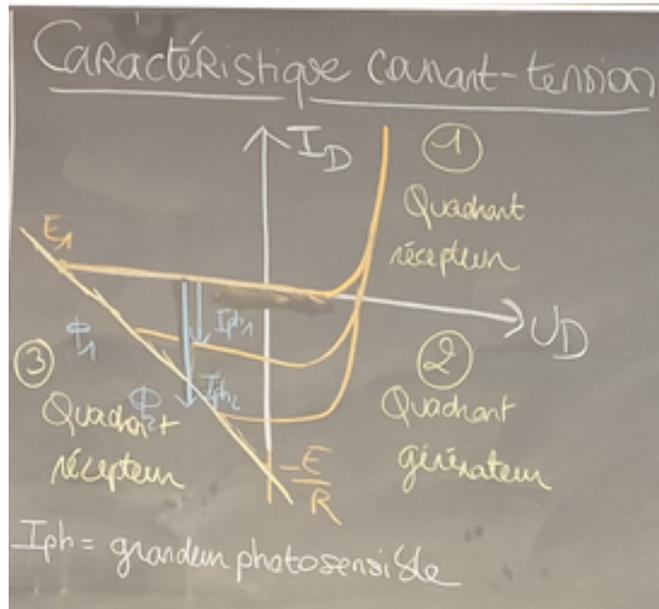


FIGURE 3 – Caractéristique de la photodiode - Quadrants

Influence des paramètres :

- Influence du flux lumineux incident : On envoie un flux lumineux sur la photodiode. On voit que l'intensité croît en valeur absolue lorsque le flux lumineux augmente (naissance d'un photocourant). Il est donc nécessaire de toujours être dans la zone de polarisation en inverse de la photodiode pour avoir cette dépendance.
- Influence de la tension d'entrée : On prend la tension de polarisation faible et on voit qu'on balaye peu la caractéristique vers la gauche. Pour le reste du montage, on veillera à avoir une tension de polarisation suffisamment importante (quelques V).
- Influence de la résistance : Plus la résistance est importante et plus le courant est lisible, mais on risque de sortir de la zone de linéarité (la pente sur la caractéristique est trop faible, et le point de fonctionnement n'est plus dans la zone linéaire). Pour la suite du montage, on veillera à avoir une résistance de l'ordre de 10 k Ω .

On peut parler rapidement des quadrants : 3e quadrant ($U < 0$ $I < 0$) \rightarrow diode polarisée en inverse : zone de linéarité entre photocourant et puissance optique ; 2e quadrant ($U > 0$ $I < 0$) \rightarrow la diode est génératrice (cellule photovoltaïque) ; 1er quadrant ($U > 0$ $I > 0$) \rightarrow diode en fonctionnement récepteur mais zone de non linéarité.

Il est important de souligner le fait que dans ce montage on va étudier les photorécepteurs en fonctionnement récepteur et non générateur, et donc toujours faire en sorte d'être en présence d'une photodiode polarisée en inverse.

2 Etude de la linéarité

Un photorécepteur est linéaire lorsque le signal qu'il donne est proportionnel à l'éclairement qu'il reçoit. Dans ce cas, le coefficient de proportionnalité s'appelle la sensibilité.

Liste du matériel :

- Lampe QI, filtre interférentiel ($\lambda = 589 \text{ nm}$), filtre anticalorique
- 2 Polariseurs
- Objectif de microscope x10
- Photodiode PIN 10 (disponible dans les malettes d'électronique)
- Plaquette d'électronique avec le montage transimpédance (dans la même malette)
- Wattmètre en mode statistique
- Puissance mètre optique

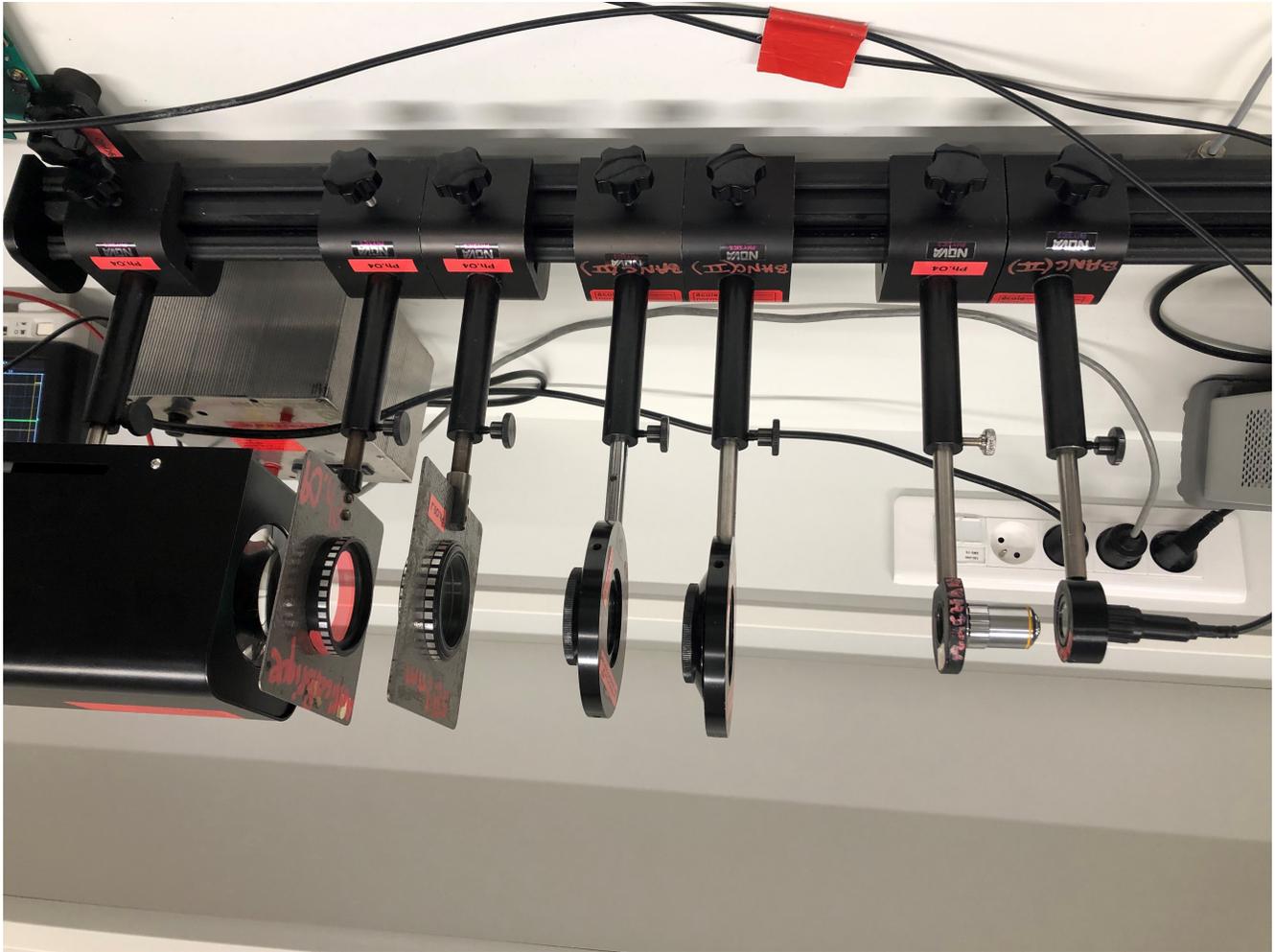


FIGURE 4 – Linéarité - Schéma du dispositif

Pour faire cette étude, il est compliqué de trouver une source de lumière adaptée (c'est-à-dire non polarisée et particulièrement stable dans le temps). Le meilleur compromis m'a semblé être lampe QI + filtre interférentiel ($\lambda = 589 \text{ nm}$).

La lumière monochromatique ainsi créée avec la lampe et le filtre est envoyée sur un ensemble de polariseur/analyseur afin de faire varier la puissance en entrée de la photodiode selon la loi de Malus. J'ai placé un objectif de microscope (x 10) pour focaliser au mieux les rayons sur la photodiode. J'ai travaillé dans le noir pour avoir des résultats plus propres et avec un tissu noir sur le récepteur au moment de l'oral.



FIGURE 5 – Linéarité - Montage transimpédance

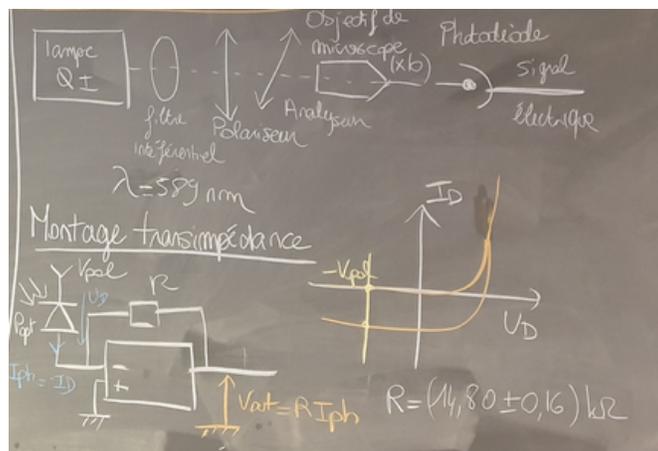


FIGURE 6 – Linéarité - Schéma de principe

On met ensuite un montage transimpédance en sortie de la photodiode pour que celle-ci soit forcément polarisée en inverse, mais aussi pour avoir une droite de charge verticale (même tension de polarisation quelquesoit le photocourant concerné). Il permet de plus à la tension V_{out} de valoir RI_{ph} . On se promène ainsi sur la caractéristique en jouant sur V_{pol} . L'avantage est que contrairement à la première manip, on n'a pas de soucis à se faire, on sera toujours à $\sim V_{pol}$, loin du moment où la courbe se redresse (ce qui ne nous intéresse pas et brouille le signal) quelquesoit le flux de photons.

La plaquette du département de physique laisse le choix entre 2 montages (réglable à partir d'un petit interrupteur) : le même que celui présenté en première partie avec une résistance de charge et un autre avec un ALI qui permet de s'affranchir de la contrainte $E > RI$ pour être effectivement polarisé en inverse (car l'ALI impose que la tension aux bornes de la photodiode soit égale à V_{pol}), c'est ce montage que l'on appelle transimpédance. Il a cependant pour inconvénient d'ajouter des problèmes en dynamique (slew rate + capacité secondaire).

On place le polariseur et l'analyseur de manière à ce qu'aucune lumière ne sorte de l'analyseur, ils sont alors croisés. On relève ainsi la tension en sortie image du photocourant par l'intermédiaire de la résistance, dont la valeur est mesurée avec un ohmmètre en fonction de la puissance optique entrante qui s'exprime à partir de l'angle choisi tel que :

$$P_{opt} = P_o \cos^2(\theta)^2$$

où P_o est mesurée à l'aide d'un puissance mètre optique.

De la regression linéaire qui correspond au tracé du Photocourant (I_{ph}) en fonction de la puissance optique P_{opt} , on trouve une ordonnée à l'origine correspondant au courant d'obscurité qui doit être très faible par rapport au photocourant et la pente de la droite donne accès à la sensibilité S qui permet de calculer le rendement quantique η à la longueur d'onde considérée :

$$I_{ph} = I_{obs} + SP_{opt} \text{ où } |I_{ph}| \gg |I_{obs}|; S = \frac{\delta I_{ph}}{\delta P_{opt}} \text{ et } \eta = \frac{hc}{\lambda e} S$$

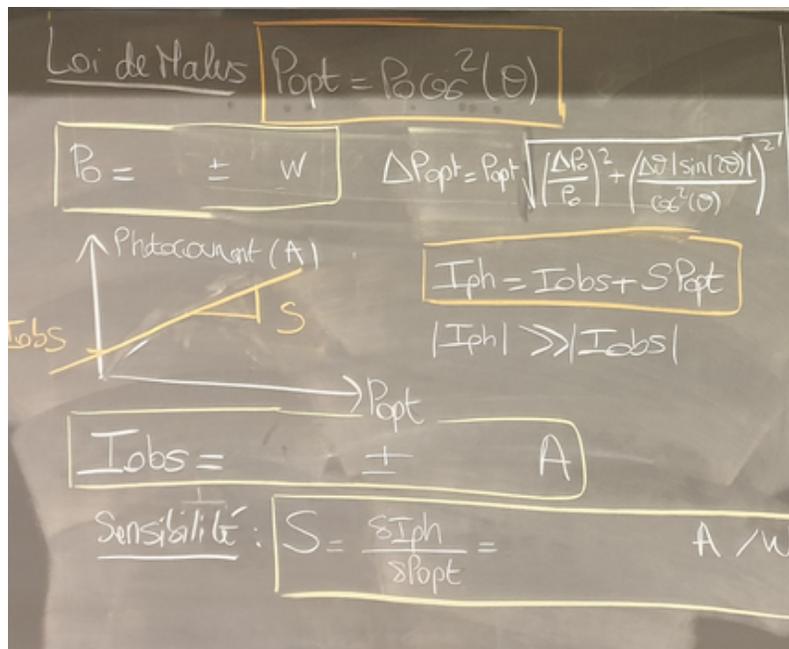


FIGURE 7 – Linéarité - Exploitation des résultats

Valeurs expérimentales :

- $P_o = 32,0 \pm 0.1W$
- $R = 14,80 \pm 0.16k\Omega$
- $I_{obs} = 12 \pm 2nA$
- $S = 0.2935 \pm 0.0008 A/W$ (bon accord avec la notice constructeur)
- $\eta = 61.9 \pm 0.2\%$

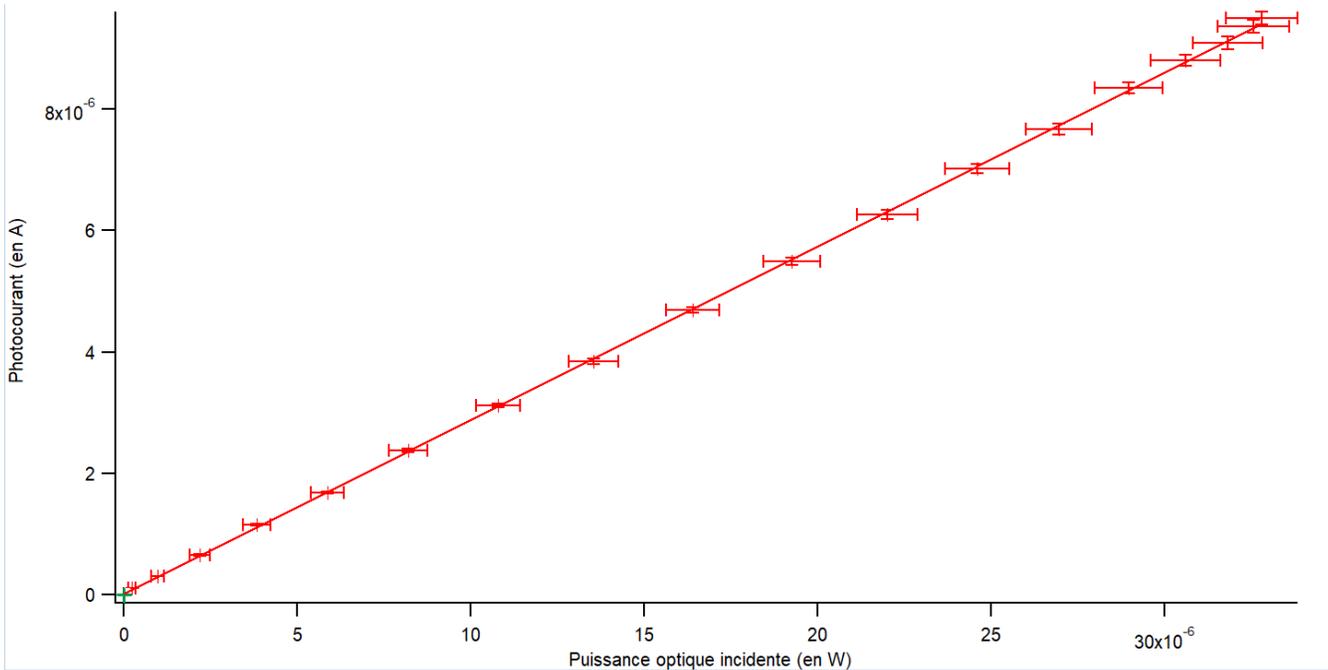


FIGURE 8 – Linéarité - Graphe obtenu

Le calcul du rendement quantique se fait de la sorte :

- Nombre de photons par unité de temps (en s^{-1}) aussi appelé flux photonique moyen ou flux énergétique : $n_{ph} = \frac{P_{opt}}{\frac{hc}{\lambda}}$

- Photocourant sortant de la photodiode : $I_{ph} = \eta n_{ph} = \eta e \frac{P_{opt}}{\frac{hc}{\lambda}}$

On en déduit donc puisque $S = \frac{I_{ph}}{P_{opt}}$ que $\eta = \frac{hc}{\lambda e} S$ qui représente la proportion de photons qui réussissent à créer une paire electron-trou et donc à participer au photocourant.

3 Réponse spectrale de la photodiode

Cette manip permet de déterminer la réponse spectrale de la photodiode, et donc d'étudier la sensibilité relative de la photodiode en fonction de la longueur d'onde d'entrée.

Liste du matériel :

- Lampe QI
- Chopper (hacheur optique) avec son boîtier de réglage

- Monochromateur Jobin Yvon
- Pyromètre, photodiode au silicium adaptable sur le monochromateur et l'alimentation des détecteurs
- Oscilloscope

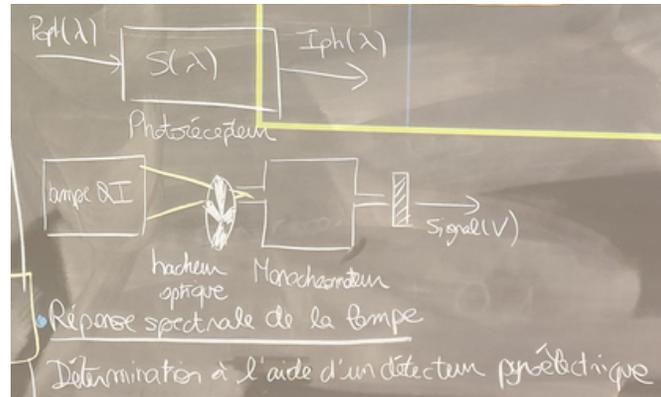


FIGURE 9 – Réponse spectrale de la photodiode - Schéma de principe

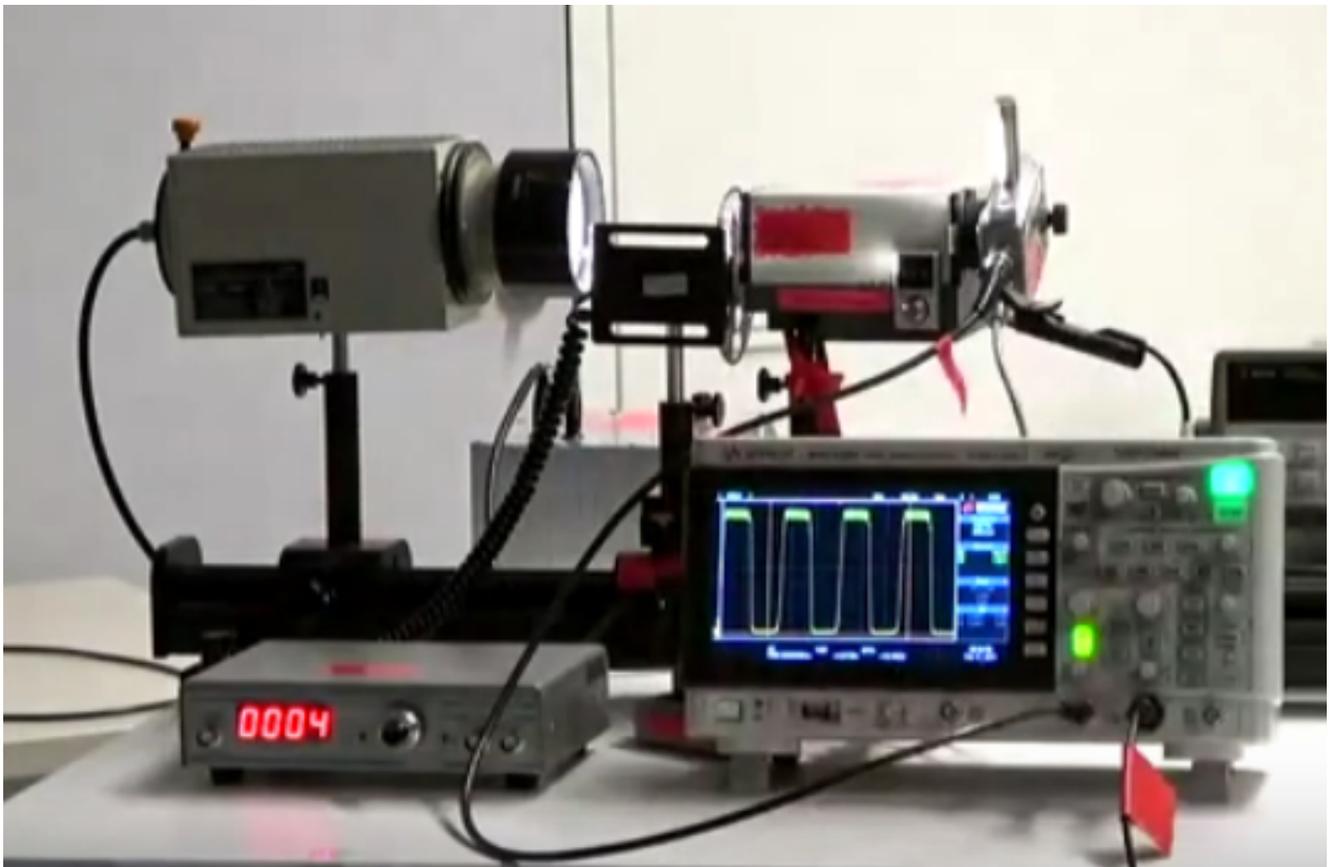


FIGURE 10 – Réponse spectrale de la photodiode - Montage

On utilise une lampe QI pour la lumière incidente. Arnaud m'a conseillé de prendre ces vieilles lampes QI (on pense que les plus récentes peuvent avoir un filtre anticalorique intégré). Elle m'a

permis en effet d'avoir un plus joli spectre. Cependant, comme j'avais d'autres problèmes qui s'additionner avant d'obtenir un beau graphe, je n'ai aucune idée de l'influence de la lampe choisie en réalité, et peut être que cette histoire de filtre n'est pas du tout vraie... Mais dans le doute prenez celle-ci.

Dans tous les cas, quelque soit la lampe blanche utilisée, elle a toujours un spectre propre qui va gêner notre mesure de réponse spectrale en venant se superposer aux résultats si on mesure directement la réponse de la photodiode en fonction de la longueur d'onde avec ce type d'éclairage.

On doit donc d'abord trouver le spectre de la lampe blanche et c'est parfait parce que ça permet de faire intervenir un récepteur thermique : le pyromètre, dont la caractéristique principale et essentielle (pour les jurys...) est que les récepteurs thermiques possèdent une réponse spectrale plate.

— Réponse spectrale de la lampe

On place un hacheur optique après la lampe simplement parce que le pyromètre n'est sensible qu'à des variations de flux incident et il faut donc moduler la lumière en entrée ($f=4$ Hz attention à ne pas mettre un hachage trop rapide).

Ensuite on utilise un monochromateur qui permet de sélectionner en sortie une longueur d'onde déterminée dans un spectre large. Il existe un monochromateur spécialement conçu pour cette expérience au département de physique. C'est le Jobin-Yvon. Attention au fait qu'il faille multiplier par 2 la lecture de la longueur d'onde, vu qu'il est conçu pour utiliser l'ordre 2 de son réseau. Il est possible de placer des fentes en entrée et en sortie. J'ai travaillé sans fente pour gagner en intensité lumineuse en sortie. Le signal sortant du pyromètre étant déjà super faible, c'est dommage de le réduire encore plus. J'ai aussi ouvert les fentes en entrée et sortie avec la petite tirette. Un filtre antirecouvrement est placé en entrée et en sortie du monochromateur pour éviter tout recouvrement d'ordre, il coupe les longueurs d'onde inférieures à 540 nm (voir la notice du monochromateur pour plus d'investigations..).

Enfin, le pyromètre est placé en sortie du monochromateur en le visant pas trop fort et pas complètement sinon la mesure ne peut simplement pas être faite, le signal est affreux... Ne vous étonnez pas que le signal soit de l'ordre de 5mV à 20 mV avec ce récepteur.

Un dernier détail technique primordial... il y a du 50 Hz qui entache le signal de sortie du pyromètre simplement parce que le monochromateur et le pyromètre ne sont pas à la même masse (placez votre main sur le monochromateur vous verrez c'est magique le signal devient très beau d'un coup!). Pour régler ce soucis, j'ai placé deux pinces crocodiles et un fil entre le monochromateur et la masse du détecteur.

Donc après toutes ces considérations "techniques", on récupère un signal de très faible amplitude mais pourtant exploitable et ceci sans mettre en place de détection synchrone (malgré ce qui pouvait être fait dans les précédents comptes rendus), et on peut enfin mesurer l'amplitude crête à crête du signal de sortie en fonction de la longueur d'onde sélectionnée en entrée (Attention je répète, on multiplie par 2 la valeur indiquée).

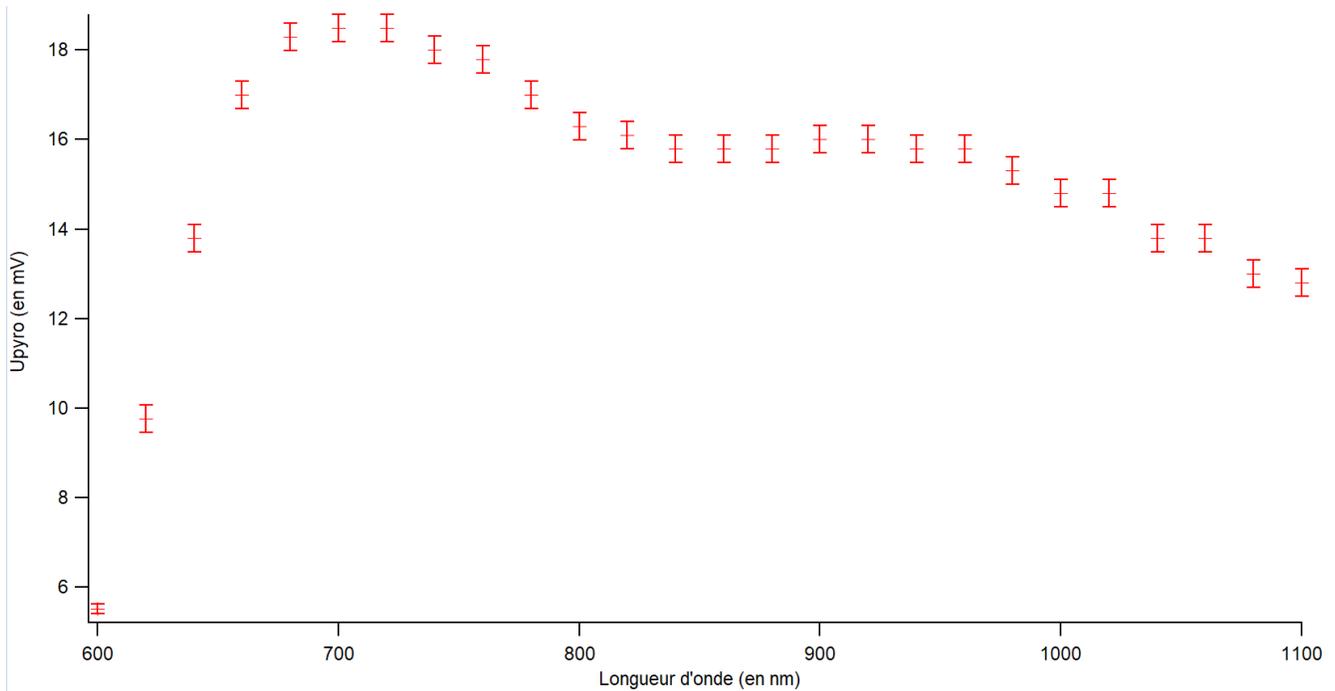


FIGURE 11 – Réponse spectrale de la lampe - Mesure avec le pyromètre

— Réponse spectrale de la photodiode

On fait de même avec la photodiode (que l'on ne serre pas trop non plus). Pour la photodiode, le hacheur optique n'est plus utile et on peut simplement mesurer l'amplitude de la tension continue que l'on récupère en sortie. Pour présenter l'intérêt du hacheur optique dans l'expérience et pour faire la même chose qu'avec le pyromètre, j'ai conservé le hacheur optique et mesuré une amplitude crête à crête de la même façon que précédemment. Attention, il y a toujours le problème de masse et les pinces crocodiles doivent rester en place.

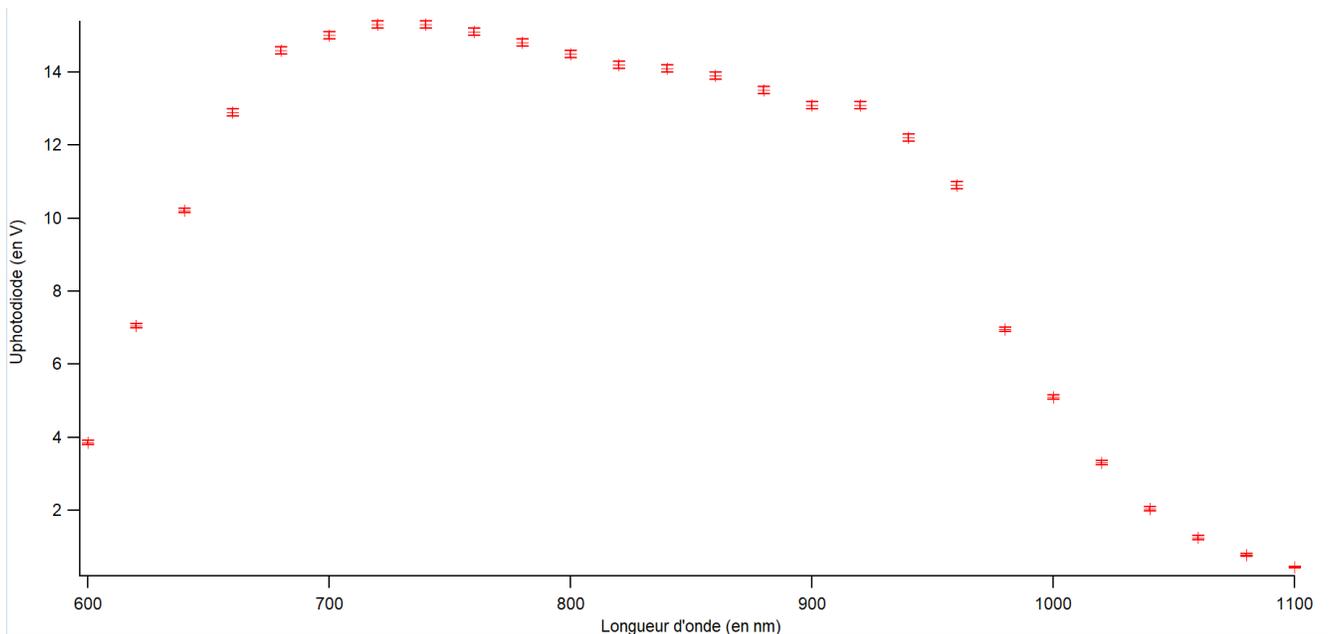


FIGURE 12 – Réponse spectrale de la lampe et de la photodiode - Mesure avec la photodiode

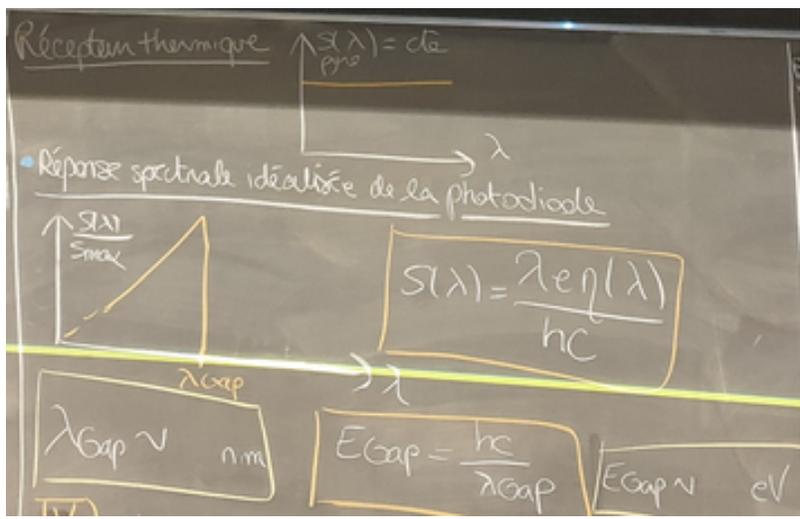


FIGURE 13 – Réponse spectrale de la lampe et de la photodiode - Graphes théoriques

Enfin, avec les deux mesures précédentes, on peut tracer la réponse spectrale de la photodiode (elle s’obtient en faisant $\frac{U_{\text{photodiode}}/U_{\text{pyro}}}{(U_{\text{photodiode}}/U_{\text{pyro}})_{\text{max}}}$) et déterminé des paramètres importants. J’ai choisi de tracer la sensibilité spectrale relative pour que la mesure soit répétable et corresponde bien à celle que j’avais fais en préparation le jour de l’oral.

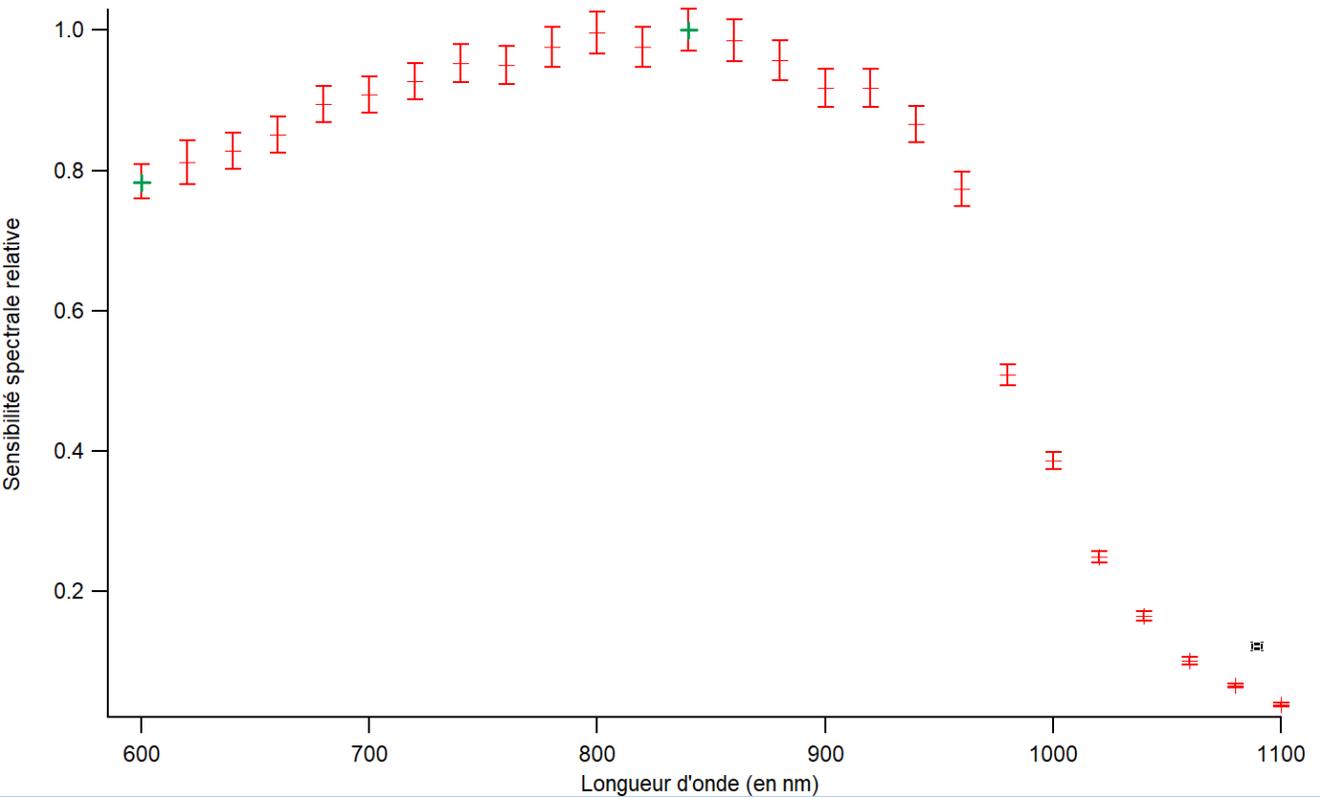


FIGURE 14 – Réponse spectrale de la photodiode - Calcul avec les deux graphiques précédents

Valeurs expérimentales :

— $\lambda_{\text{gap}} \simeq 980\text{nm}$ (ce ne sont que des ordres de grandeurs, puisque la chute n’est pas nette)