

Photorécepteurs

Matériel

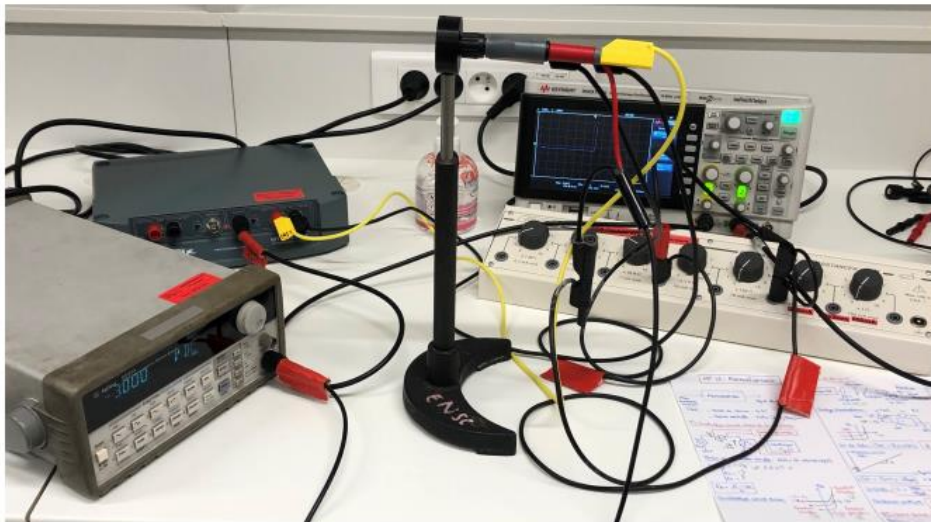
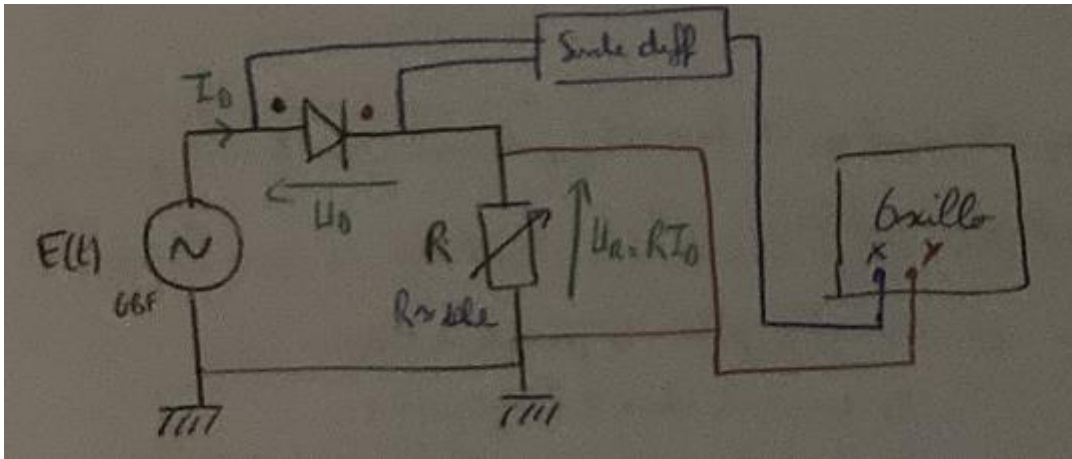
- oscilloscope
- photodiode PIN10 (malette électronique)
- boîte à décades de résistances
- GBF
- sonde différentielle
- plaquette électronique avec montage transimpédance (carte mère + carte fonctionnelle photodiode + DEL)
- alimentation $\pm 15V$
- lampe QI + filtre AC
- filtre interférentiel ($\lambda = 589 \text{ nm}$)
- condenseur
- drap noir
- wattmètre
- spectromètre
- résistances de $15 \text{ k}\Omega$ et 200Ω
- polariseur + analyseur
- puissancemètre optique
- pinces crocodiles
- hacheur optique avec son boîtier de réglage
- monochromateur Jobin Yvon
- pyromètre
- photodiode au silicium

Introduction

Un photorécepteur est un transducteur convertissant un flux lumineux en un signal électrique. L'œil est un photorécepteur par exemple. Les caractéristiques du récepteur conditionnent la perception que nous avons des phénomènes optiques : on ne voit pas le rayonnement IR, ni les 24 images par seconde d'un film au cinéma -> ce qu'on appelle la réponse spectrale et le temps de réponse. Dans ce montage,

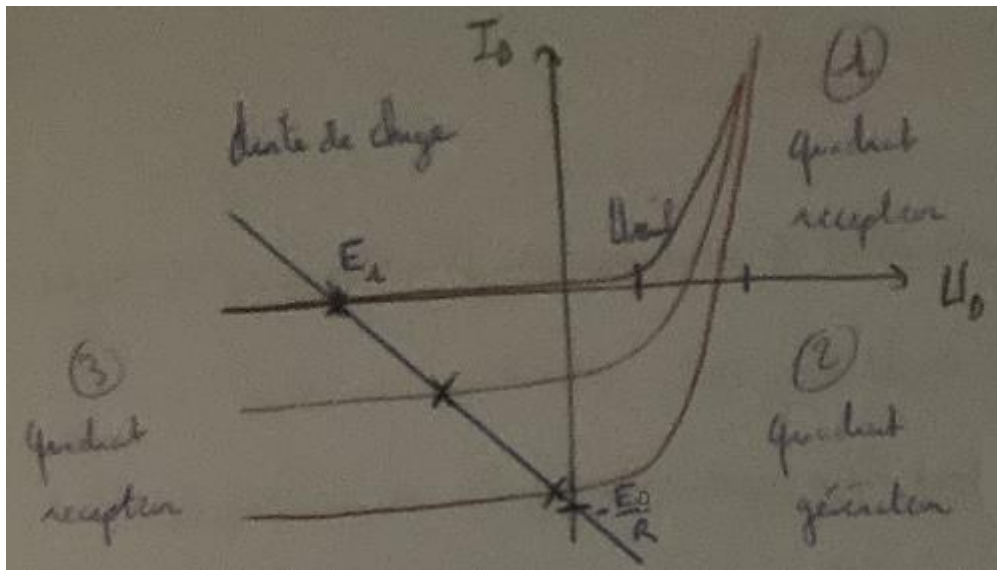
on s'intéressera en particulier à la photodiode et à ses caractéristiques car elle est très répandue : rapide, linéaire, pas cher... Il s'agit d'un récepteur photonique, c'est-à-dire sensible aux photons incidents.

I Caractéristique courant-tension de la photodiode



On envoie un signal sinusoïdal d'amplitude 10 V, $f = 1\text{Hz}$ avec le GBF sur l'anode de la photodiode (borne noire du BNC banane), on relie la cathode (borne rouge du BNC banane) à la résistance. La masse du GBF est relié à la masse de la résistance. On prélève 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 (mode XY, mode persistance).

$E(t) = E_0 \cos(\omega t)$ (tension de polarisation), point de fonctionnement du système : croisement de la caractéristique de la photodiode avec la droite de charge $U_0 = E - R I_0$, on a donc : $I_0 = \frac{E - U_0}{R}$



Remarque : le but de la photodiode est de renvoyer une tension proportionnelle à un flux lumineux reçu donc de rester dans la zone 3 linéaire. Pour cela, il faut que la tension d'entrée soit assez grande (pour y rester le plus possible) et que les résistances soient importantes pour que le courant soit visible mais pas trop pour rester dans la zone linéaire (typiquement 10 k Ω).

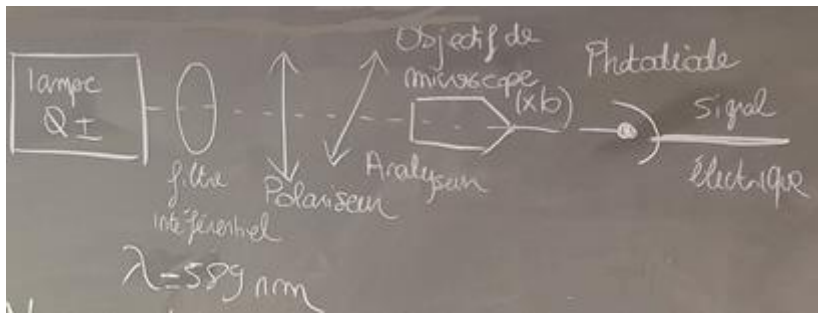
On envoie un flux lumineux sur la photodiode. On voit que l'intensité croît en valeur absolue lorsque le flux lumineux augmente (naissance d'un photo-courant). Il est donc nécessaire de toujours être dans la zone de polarisation en inverse de la photodiode pour avoir cette dépendance (zone 3).

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.

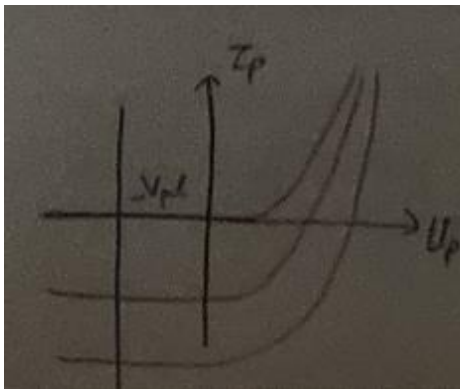
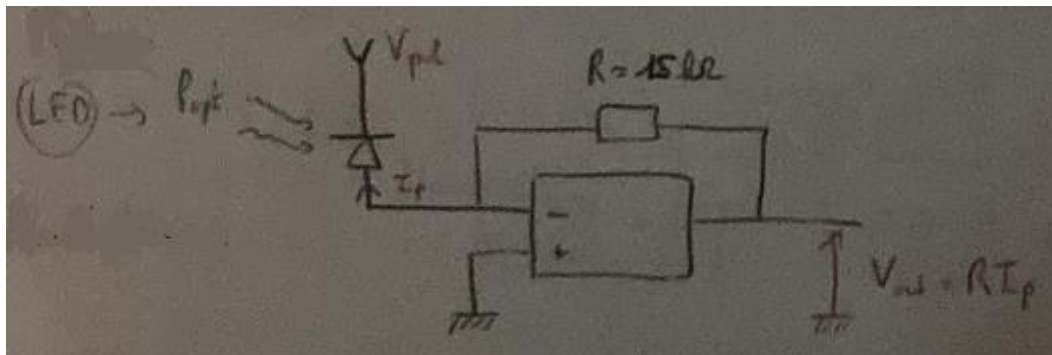
II Étude de la linéarité

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.

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 semble être lampe QI + filtre interférentiel ($\lambda = 589$ nm par exemple). 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. On place un objectif de microscope (x 10) pour focaliser au mieux les rayons sur la photodiode. Pour avoir des résultats plus propres, il convient de travailler dans le noir (utiliser un tissu sur le récepteur au moment de l'oral).



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 quel que soit le photo-courant concerné). Il permet de plus à la tension V_{out} de valoir $R I_{ph}$. On se promène ainsi sur la caractéristique en jouant sur V_{pol} . L'avantage est que, contrairement à la première expérience, on sera loin de la zone où la courbe se redresse (ce qui ne nous intéresse pas et brouille le signal), quel que soit le flux de photons.



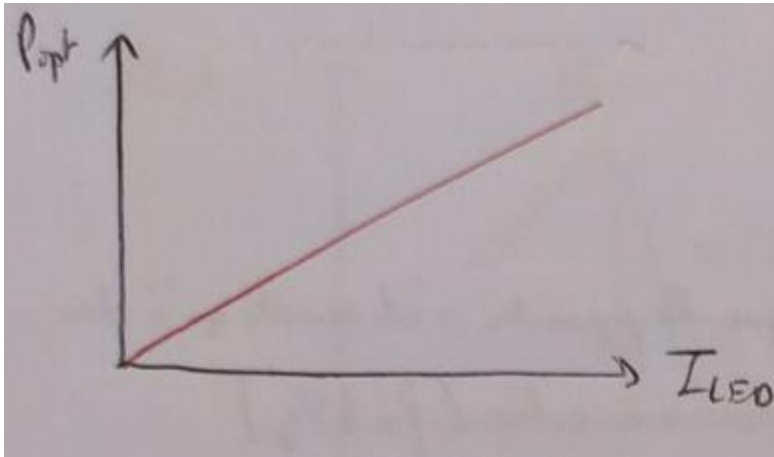
On croise le polariseur et l'analyseur. On relève ainsi la tension en sortie image du photo-courant par l'intermédiaire de la résistance, dont la valeur est mesurée avec un ohmmètre en fonction de la puissance optique entrante qui s'exprime à partir de l'angle choisi tel que : $P_{opt} = P_0 \cos^2(\theta)$, P_0 est mesurée à l'aide d'un puissancemètre optique.

On a : $I_{ph} = e\eta\phi_p + I_s$, ϕ_p est le flux de photons reçus par unité de temps, I_s est le courant d'obscurité (négligeable), η est le rendement quantique (représente la proportion de photons qui réussissent à créer une paire électron-trou, et donc à participer au photo-courant).

On a donc $I_{ph} = e\eta \frac{P_{opt}\lambda}{hc}$, la sensibilité est $S = \frac{I_{ph}}{P_{opt}}$

On commence par étalonner la puissance optique de la DEL rouge. On place un condensateur entre la DEL et la photodiode pour récupérer le faisceau lumineux. On place un wattmètre à la place de la

photodiode, on ajoute un drap noir. On fait varier le potentiostat de la DEL et on lit I_{DEL} (ampèremètre) et P_{opt} .

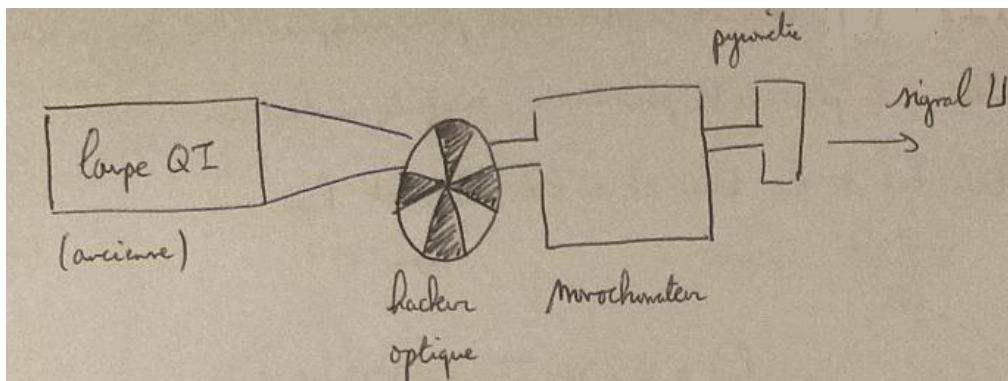


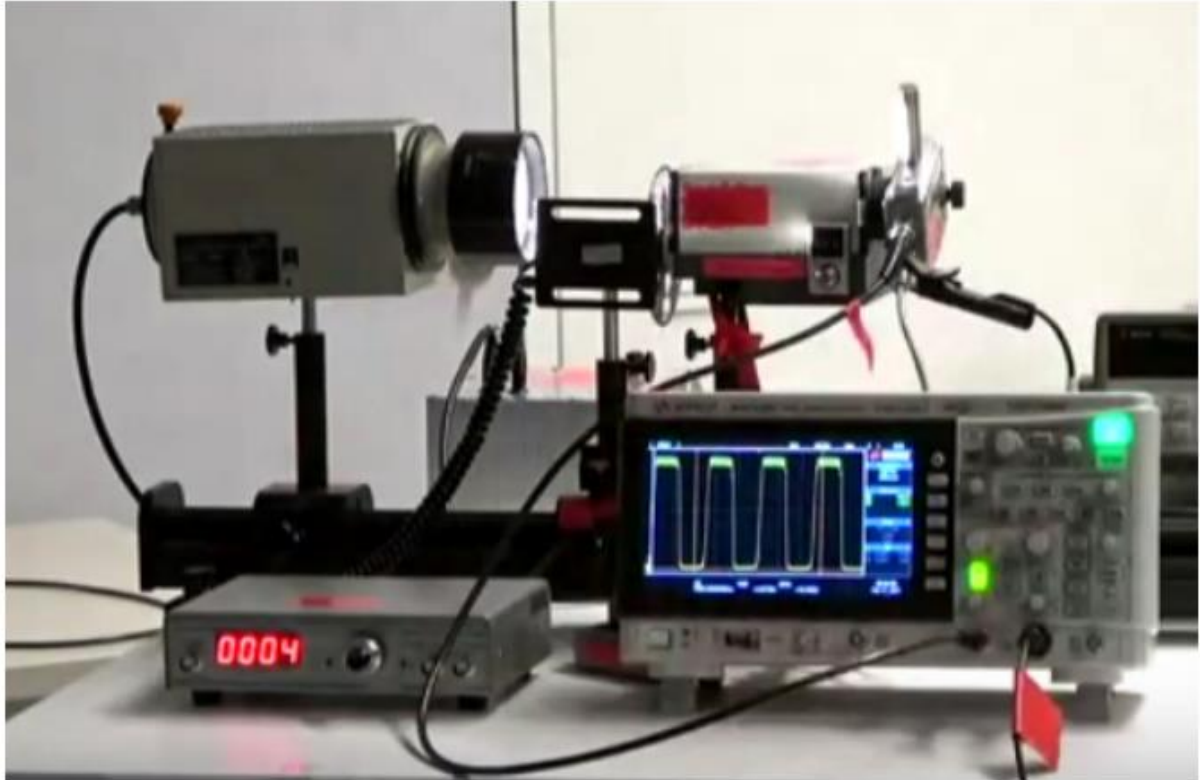
Ensuite on remet la photodiode à la place du wattmètre, on fait varier le courant dans la DEL et on lit la valeur de la tension image du courant dans la photodiode : $U = R I_{ph}$.

On trace I_{ph} en fonction de P_{opt} et on en déduit η : $\eta = \frac{hc}{\lambda e} S$, on mesure λ avec un spectromètre.

III Réponse spectrale de la photodiode

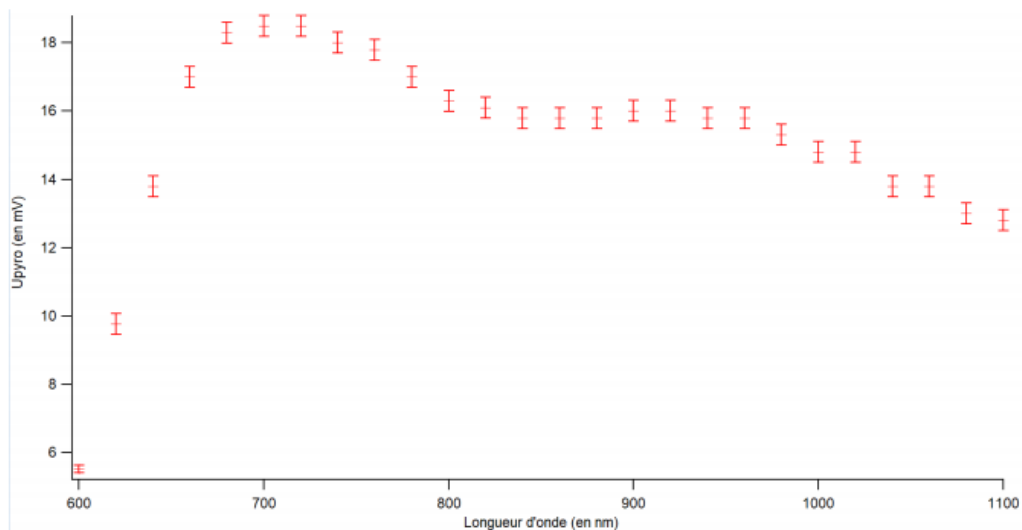
On peut aussi tracer la réponse spectrale de la photodiode et étudier sa sensibilité relative en fonction de la longueur d'onde d'entrée.



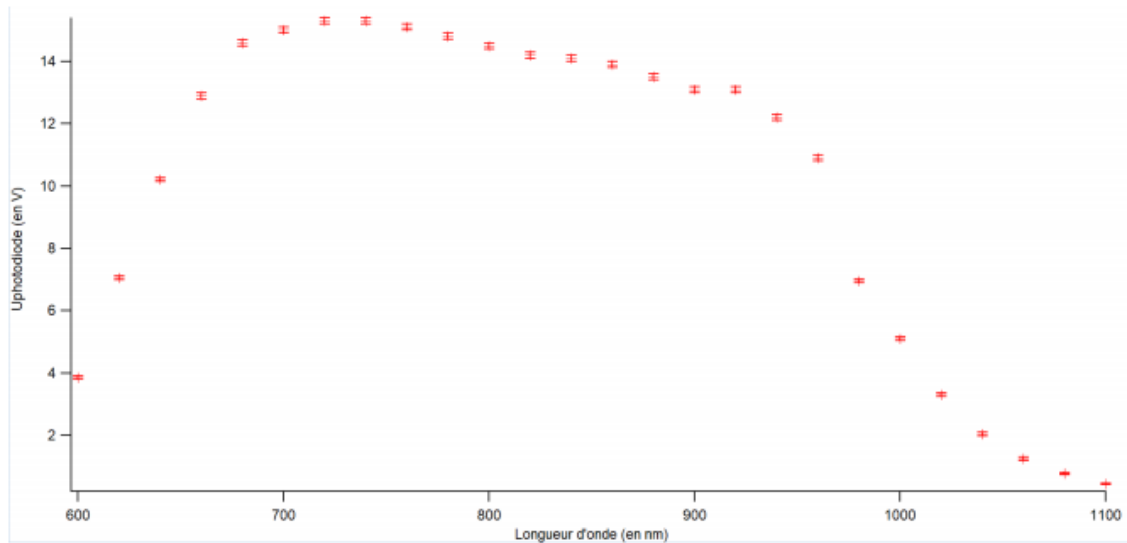


On place un hacheur optique après la lampe simplement parce que le pyromètre n'est sensible qu'à des variations de flux incident et il faut donc moduler la lumière en entrée ($f=4$ Hz attention à ne pas mettre un hachage trop rapide). Ensuite on utilise un monochromateur (le Jobin Yvon) qui permet de sélectionner en sortie une longueur d'onde déterminée dans un spectre large (avec ce monochromateur il faut 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, mais cela réduit le signal sortant du pyromètre, qui est déjà faible de base. Enfin, on place le pyromètre en sortie du monochromateur en le vissant pas trop fort et pas complètement sinon la mesure ne peut simplement pas être faite.

Remarque : problème de masse : relier le monochromateur et la masse du détecteur par deux pinces crocodiles et un fil.



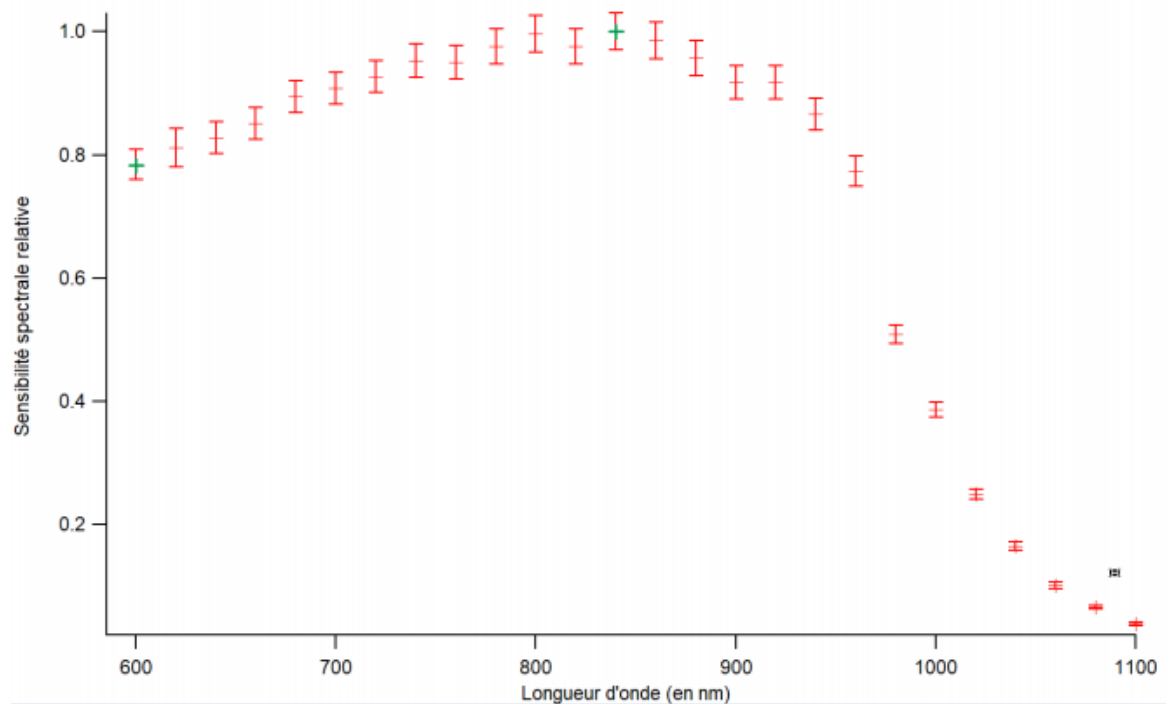
On réalise ensuite les mêmes mesures en remplaçant le pyromètre par la photodiode. Pour la photodiode, le hacheur optique n'est plus utile et on peut simplement mesurer l'amplitude de la tension continue que l'on récupère en sortie (on le garde quand même pour avoir les mêmes conditions). Il y a toujours le problème de la masse, donc les pinces crocodiles doivent rester en place.



Avec les deux mesures précédentes, on peut tracer la réponse spectrale de la photodiode et

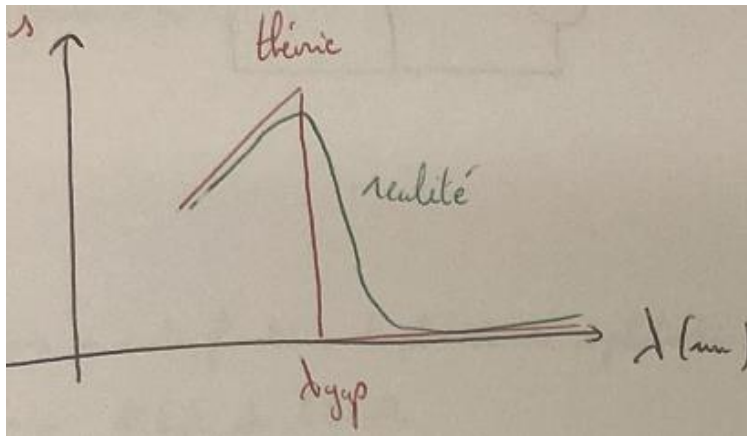
déterminer les paramètres importants. On trace la sensibilité relative : $s = \frac{\frac{U_{photo}}{U_{pyro}}}{\left(\frac{U_{photo}}{U_{pyro}}\right)_{max}}$

$$S(\lambda) = \frac{e\lambda\eta(\lambda)}{hc}$$



On en déduit le gap : $E_{gap} = \frac{hc}{\lambda_{gap}}$, λ_{gap} est la longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est maximale.

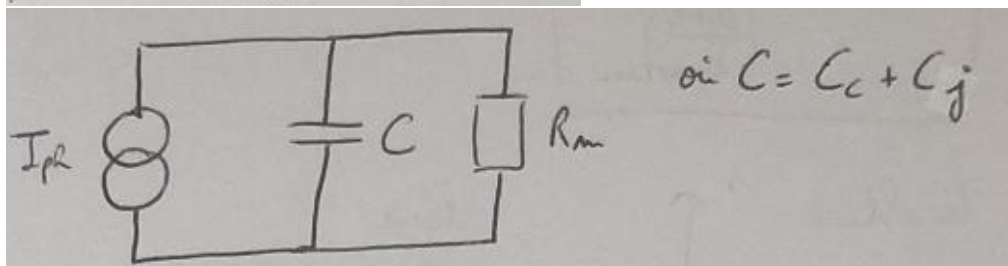
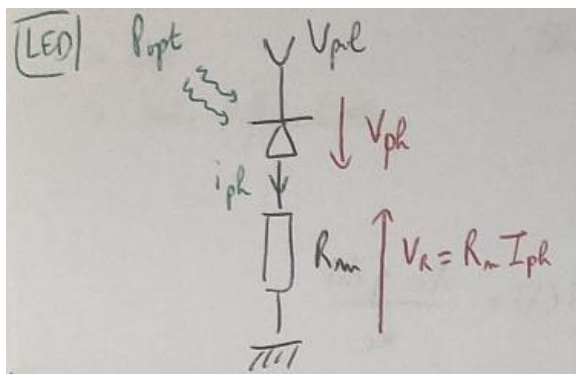
Pour des semi-conducteurs, E_{gap} vaut environ 1 eV.



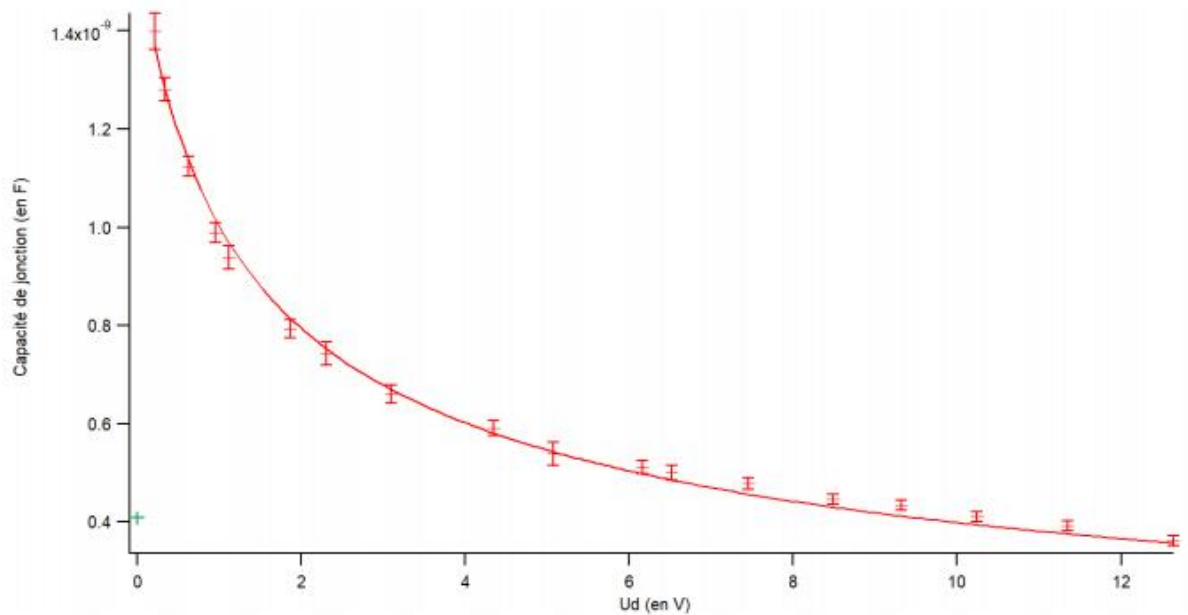
IV Étude du temps de réponse

L'objectif est d'étudier le temps de réponse d'une photodiode et de remonter à sa capacité. Pour cela, on utilise une DEL qui va envoyer un signal créneau (100 mV environ, 500 Hz). On choisit une fréquence suffisamment faible pour que le régime permanent soit atteint et suffisamment grande pour la rapidité de la mesure. Il faut placer une résistance (200 Ω) en série de la DEL pour la protéger. On place une forte résistance en série avec la photodiode pour convertir le courant produit en une tension importante (environ 40 k Ω).

On place également un voltmètre aux bornes de la photodiode pour relever sa tension (on le retire lors de la mesure du temps de montée, ça perturbe le signal). Puis on mesure le temps de montée à 63% de la tension aux bornes de la résistance pour en déduire $\tau = RC$ et donc C , en faisant varier la tension de polarisation de la photodiode. On recommence avec d'autres valeurs de tension (on fait varier le potentiostat de la photodiode).



C_c est la capacité du câble coaxial.



$$\langle V_{ph} \rangle = -V_{pol} + R \langle I_{ph} \rangle$$

$$\tilde{V}_{ph} = R_m \tilde{I}_{ph}$$

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + \left| \frac{V_{ph}}{V_0} \right|}} + C_c$$

Le fait que la capacité de jonction d'une photodiode diminue avec la valeur absolue de la tension inverse de polarisation signifie que l'on polarise les photodiodes le plus fortement possible en inverse quand on cherche à diminuer leur temps de réponse. C'est indispensable quand on cherche à observer des fluctuations rapides de puissance optique (télécom, ...). Il faut cependant veiller à ne pas dépasser la tension de claquage.

Conclusion

Dans ce montage, nous avons vu les différentes caractéristiques de la photodiode, un composant semi-conducteur qui convertit le flux lumineux en signal électrique.

Bibliographie

-Physique expérimentale, De Boeck

-Sextant, Optique expérimentale (en particulier pour la réponse spectrale de la photodiode, et la description des photorécepteurs notamment celle du pyromètre)

Questions

- Quels sont les photorécepteurs de l'œil ?
 - ➔ Ce sont les cônes pour la vision diurne (RVB) et les bâtonnets.
- Pourquoi utilise-t-on une sonde différentielle ?
 - ➔ Pour éviter les problèmes de masse, si elle n'était pas présente, on court-circuiterait la résistance.
- Pourquoi avoir choisi $f=1$ Hz lors du tracé de la caractéristique à l'oscilloscope ?
 - ➔ Pour pouvoir visualiser à l'œil le balayage de la caractéristique lorsque la fréquence et donc la tension envoyée sinusoïdale varie. De plus, on ne peut pas augmenter f sans limite car la caractéristique tracée est une caractéristique statique.
- Comment fonctionne un filtre interférentiel (ou filtre dichroïque) ?
 - ➔ Leur principe de fonctionnement est semblable à celui d'une cavité Fabry-Perot, constituée d'une lame à faces parallèles transparente dont les faces d'entrée et de sortie sont rendues très réfléchissantes par un dépôt de couches diélectriques multiples. Si l'épaisseur de la cavité est un multiple de $\lambda/2$, les interférences entre les différentes ondes transmises sont constructives pour la longueur d'onde λ . On obtient donc des maxima de transmission centrés sur ces longueurs d'onde. Ces maxima sont d'autant plus aigus que le coefficient de réflexion des deux faces de la cavité est grand. Pour les longueurs d'onde non transmises, la quasi-totalité de l'énergie est réfléchie. L'intérêt de ces filtres est qu'ils transmettent un intervalle spectral beaucoup plus étroit (≈ 10 nm) que les filtres usuels à colorants. Il faut les éclairer du côté filtre interférentiel car ils absorbent alors très peu d'énergie, donc ne s'échauffent pas. Un inconvénient est qu'ils sont assez sensibles à l'inclinaison du faisceau. Par ailleurs, ces filtres transmettant un faible intervalle spectral, ils conduisent à des expériences peu lumineuses.
- A quoi sert l'objectif de microscope ?
 - ➔ Focaliser les rayons lumineux et donc récupérer un maximum de puissance en sortie. On pourrait aussi mettre une lentille pour focaliser mais c'est sans doute plus efficace comme ça.
- Pourquoi dans la 2^e partie la droite de charge est verticale ?
 - ➔ Si on considère que l'ALI est idéal, $V_+ = V_-$ donc $U_d = -V_{pol}$.
- Pourquoi la chute de la réponse spectrale de la photodiode n'est pas directe ?
 - ➔ La couche mince polycristalline comporte de nombreux défauts et donc la chute n'est pas aussi drastique qu'en théorie. On peut passer de la bande de valence à la bande de conduction grâce à elles.
- Que se passe-t-il à forte longueur d'onde ?
 - ➔ Si la longueur d'onde est trop grande, les photons incidents ont une énergie inférieure à celle du gap du semi-conducteur et aucun photon n'est détecté.
- Comment fonctionne un détecteur pyroélectrique ?
 - ➔ Le rayonnement incident crée une modification de température du détecteur. Certains corps, dits ferroélectriques, ont une polarisation électrique permanente. Cette polarisation électrique décroît lorsque la température augmente. Le moment dipolaire électrique par unité de volume P se traduit par l'apparition de charges surfaciques, $\sigma = \pm P$, sur les deux faces perpendiculaires à l'axe de polarisation. En régime permanent, des charges extérieures

mobiles neutralisent ces charges surfaciques et la différence de potentiel entre les deux faces disparaît.

- Autres exemples de photorécepteurs thermiques ?
 - ➔ Thermopile, bolomètre
- Quel est l'intérêt du montage transimpédance ?
 - ➔ Il assure une polarisation en inverse et permet de travailler à V_{pol} constant. Il permet aussi d'avoir un temps de réponse plus faible, plus la tension de polarisation augmente et plus la capacité de jonction devient faible.