

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 malettes 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).

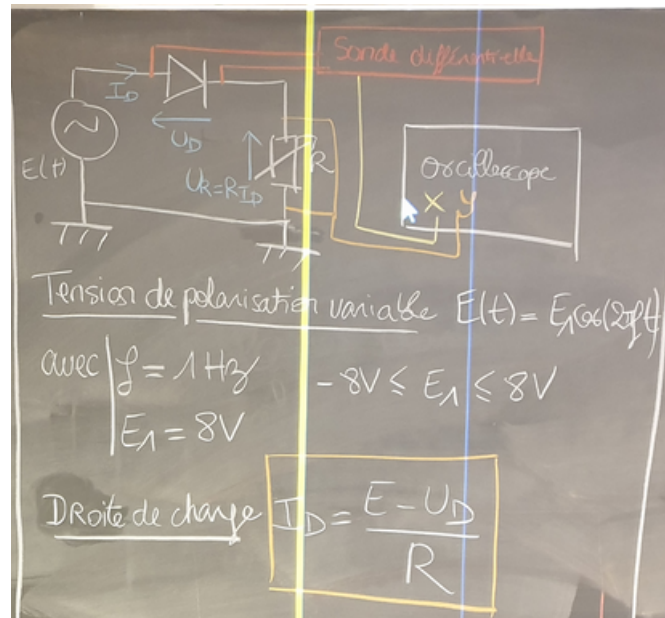


FIGURE 1 – Caractéristique de la photodiode - Schéma électrique

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 $U=E-RI$)

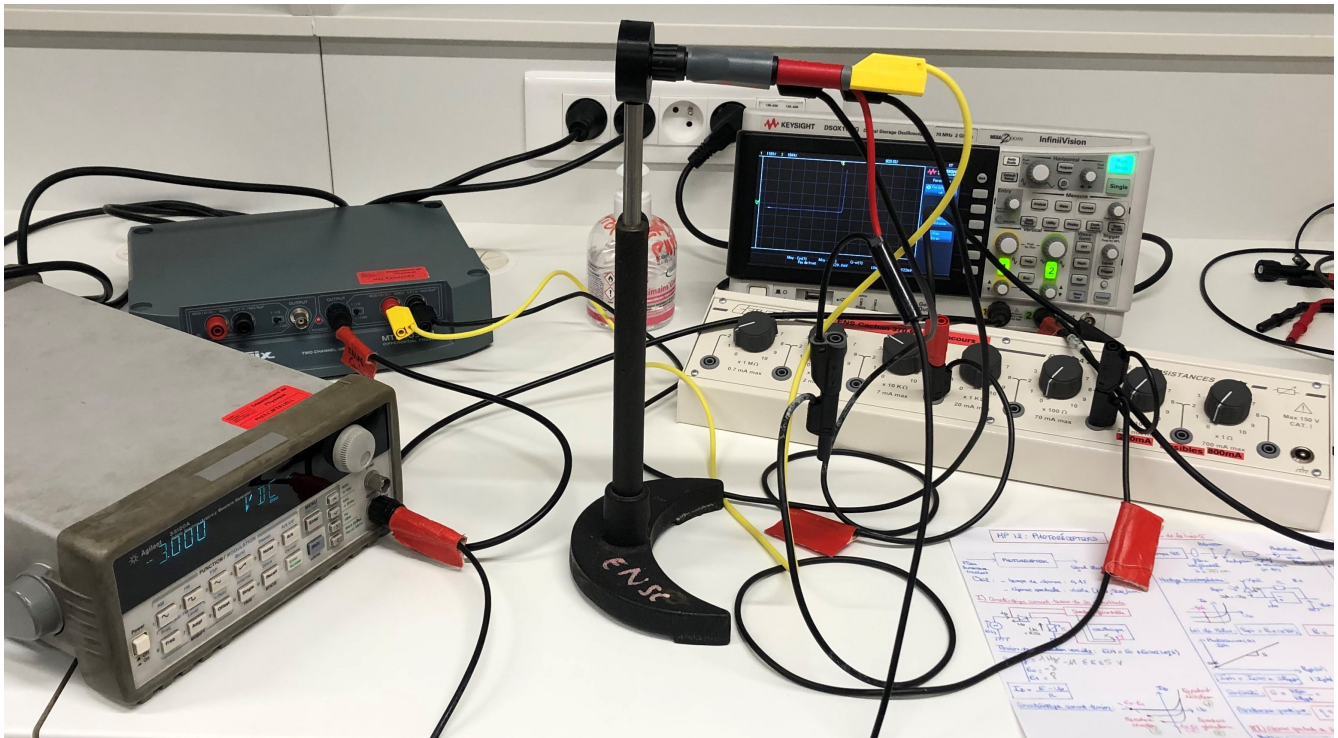


FIGURE 2 – Caractéristique de la photodiode - Branchements

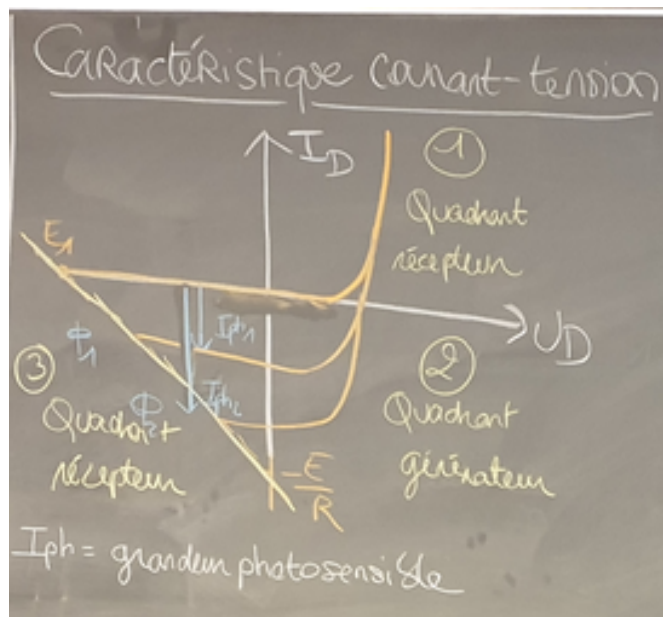


FIGURE 3 – Caractéristique de la photodiode - Quadrants

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

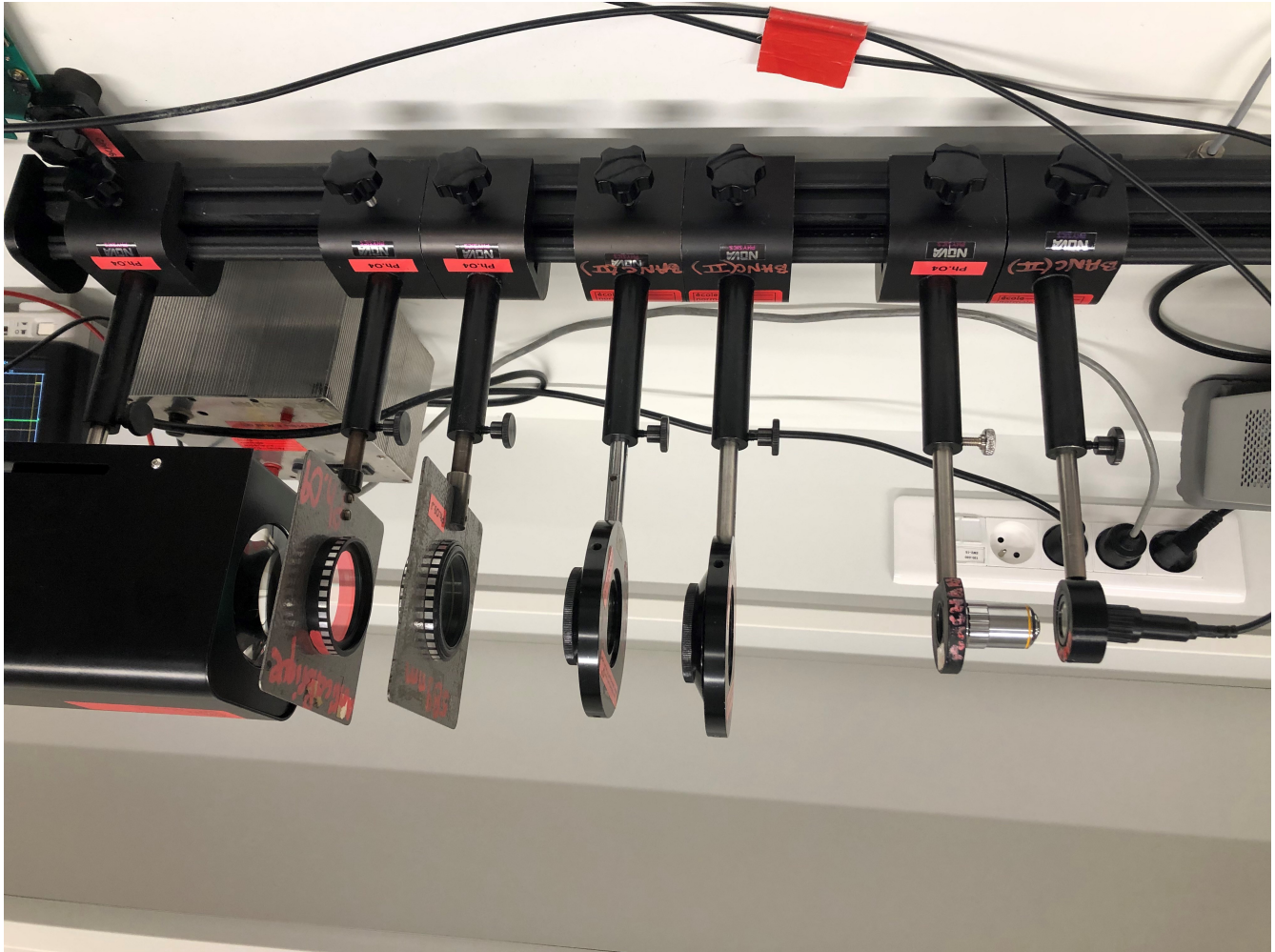


FIGURE 4 – Linéarité - Schéma du dispositif

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.

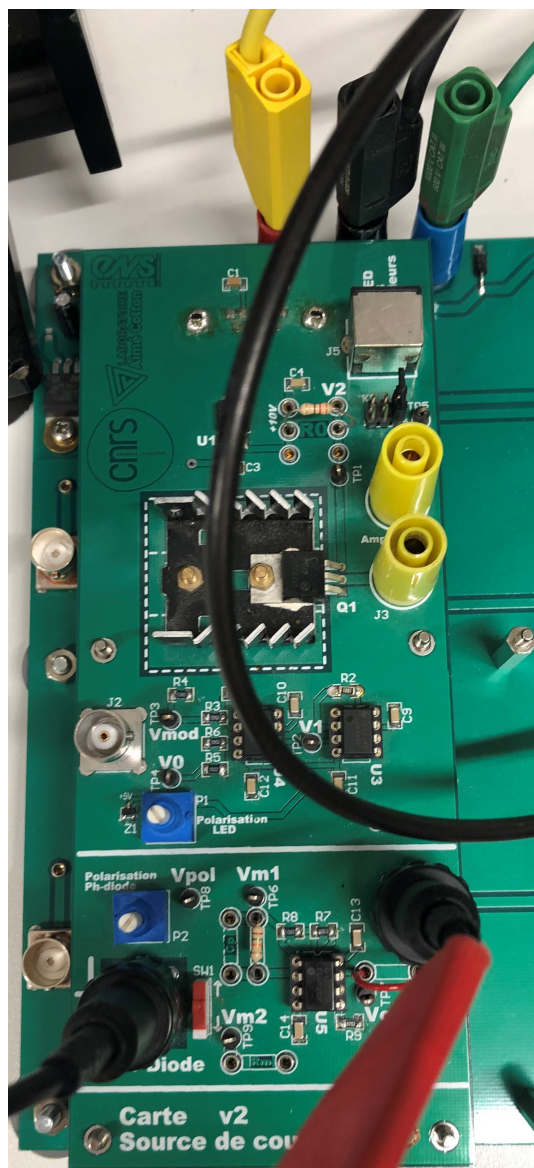


FIGURE 5 – Linéarité - Montage transimpédance

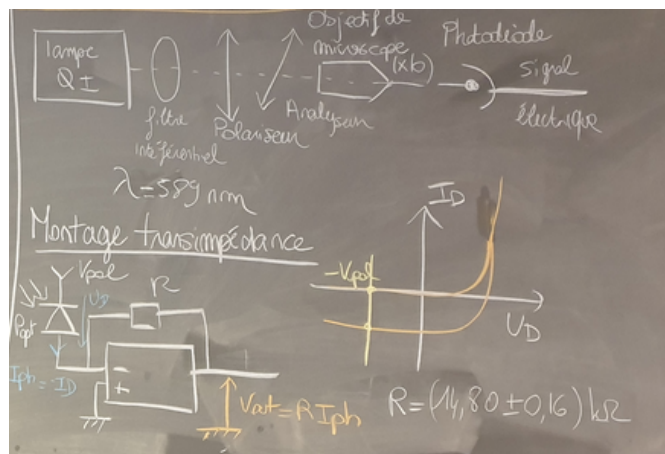


FIGURE 6 – Linéarité - Schéma de principe

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 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 :

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

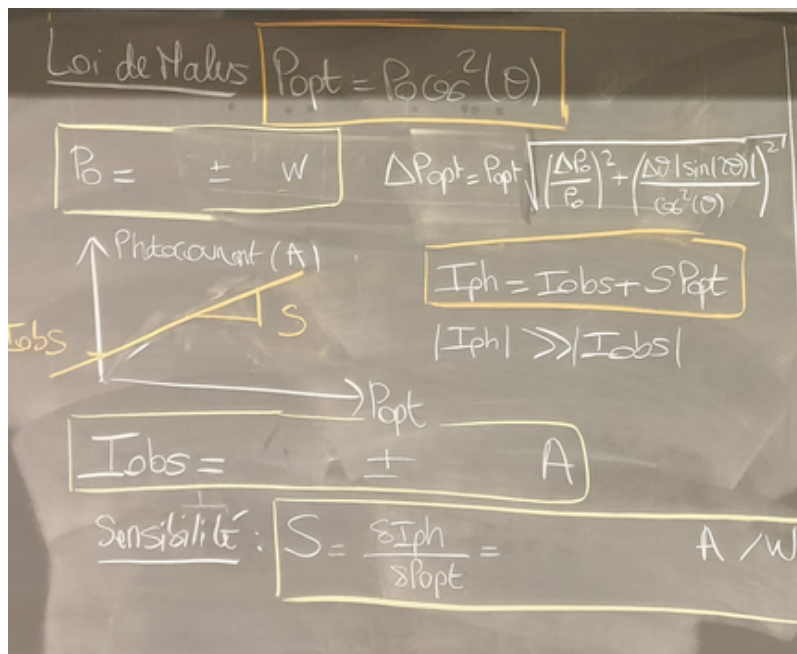


FIGURE 7 – Linéarité - Exploitation des résultats

Valeurs expérimentales :

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

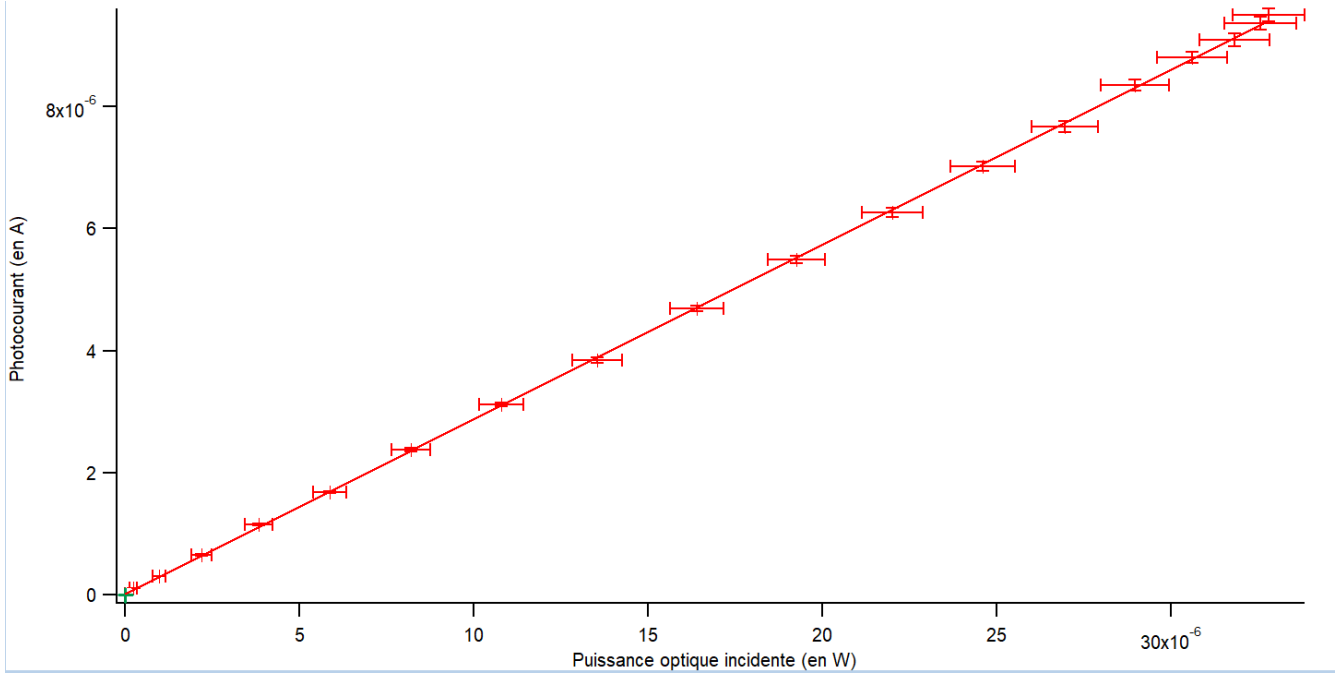


FIGURE 8 – Linéarité - Graphe obtenu

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

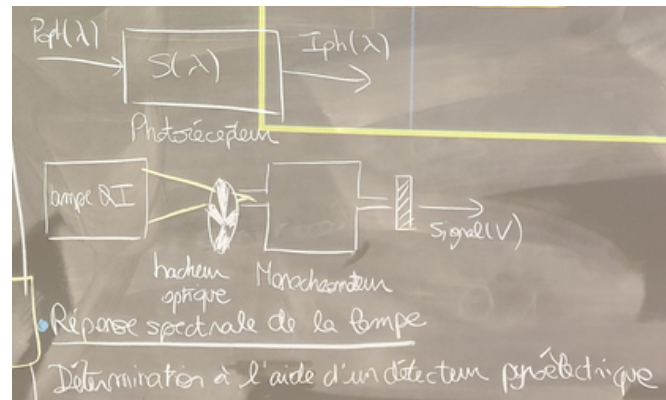


FIGURE 9 – Réponse spectrale de la photodiode - Schéma de principe

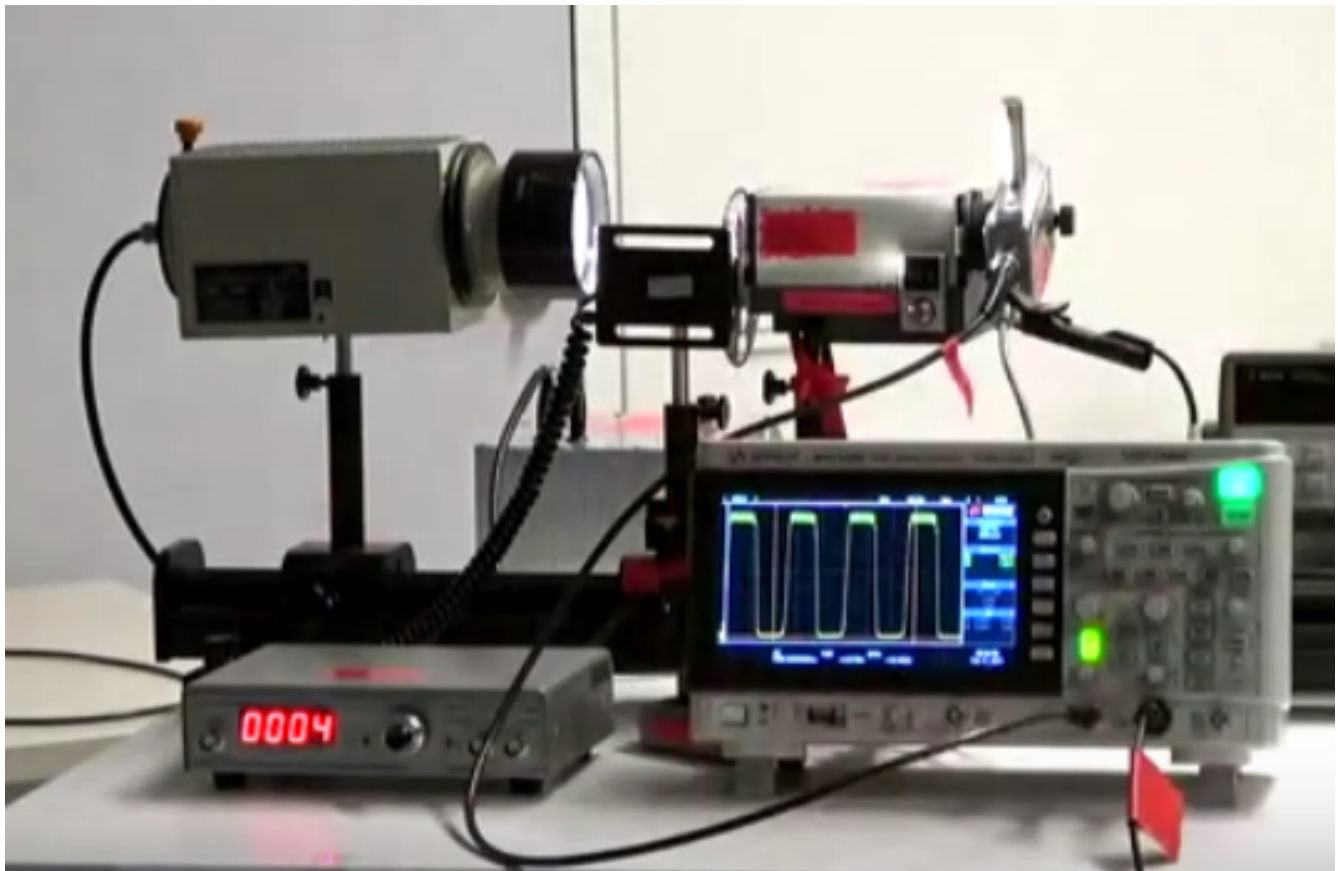


FIGURE 10 – Réponse spectrale de la photodiode - Montage

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).

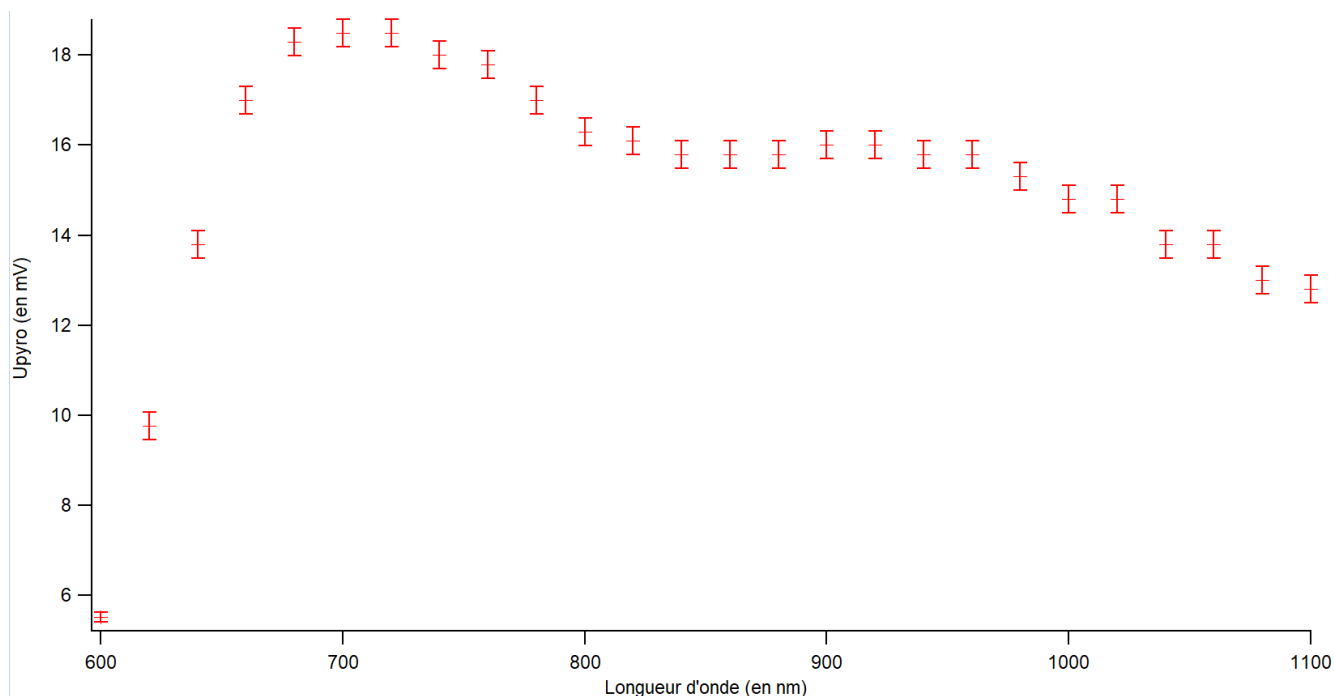


FIGURE 11 – Réponse spectrale de la lampe - Mesure avec le pyromètre

— 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.

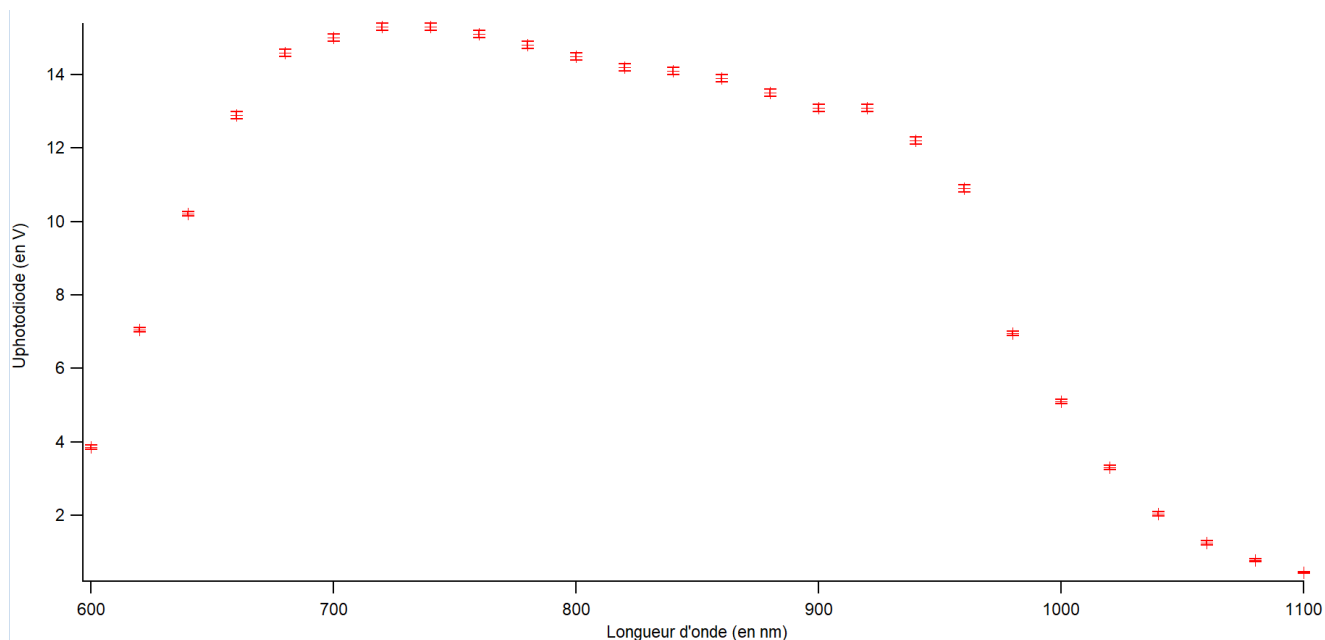


FIGURE 12 – Réponse spectrale de la lampe et de la photodiode - Mesure avec la photodiode

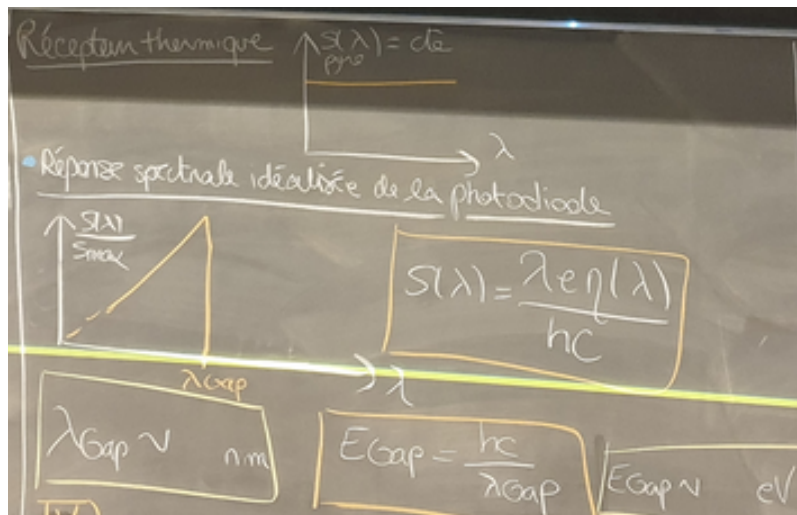


FIGURE 13 – Réponse spectrale de la lampe et de la photodiode - Graphes théoriques

Enfin, avec les deux mesures précédentes, on peut tracer la réponse spectrale de la photodiode (elle s'obtient en faisant $\frac{U_{photodiode}/U_{pyro}}{(U_{photodiode}/U_{pyro})_{max}}$) 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.

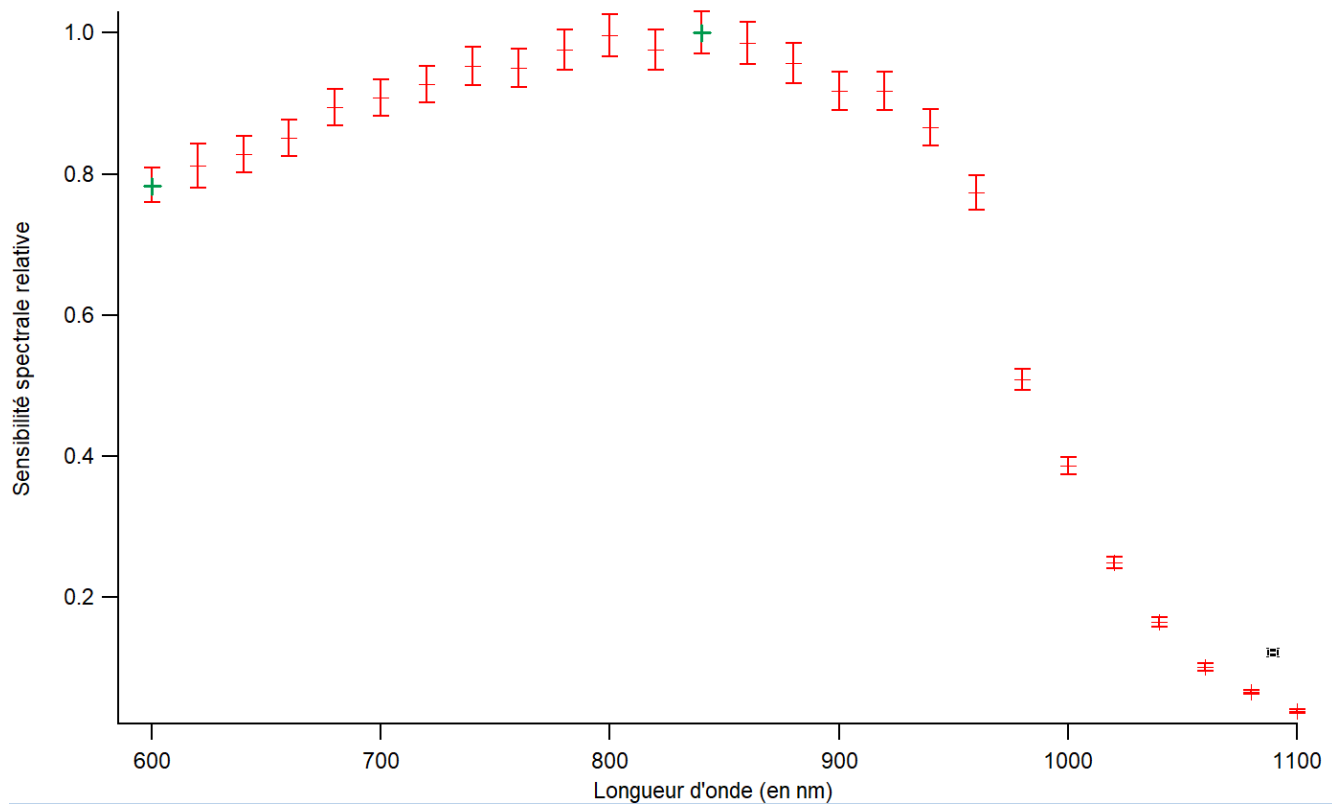


FIGURE 14 – Réponse spectrale de la photodiode - Calcul avec les deux graphiques précédents

Valeurs expérimentales :

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

— $E_{gap} \simeq 1.31 \text{ eV}$

4 Etude du temps de réponse

Je n'ai pas eu le temps de faire cette partie lors de ma présentation, mais j'ai eu un problème avec la deuxième manip qui m'a retardée. Je pense qu'elle est présentable si tout se passe bien avant et si vous choisissez cette ordre là. En tout cas une chose est sûre, il y a un choix à faire sur l'ordre des manip parce que la réponse spectrale et le temps de réponse sont les caractéristiques primordiales de ces récepteurs, c'est celles auxquelles on fait attention lorsqu'on veut les utiliser ensuite. Voyez avec laquelle des deux vous êtes le plus à l'aise pour la mettre en premier.

Liste du matériel :

- GBF
- Multimètre
- Oscilloscope
- LED (couleur choisie = rouge), photodiode PIN 10
- Plaquette d'électronique avec le montage transimpédance
- Sonde d'oscilloscope (à accorder)

Pour l'étude du temps de réponse, il vaut mieux rester sur le montage à résistance de charge (switch vers le bas de l'interrupteur sur la plaquette du département). Tout est bien décrit dans le polycopié de JBD que j'ajoute à la suite de cette partie et dans le compte rendu de Louis Heitz sur les effets capacitifs (2020). Attention, le temps de réponse d'un photorécepteur dépend du circuit dans lequel ce composant est inséré. En pratique on préfère utiliser un montage transimpédance pour avoir un temps de réponse plus court mais ici un circuit transimpédance avec un ALI rendrait plus complexe la fonction de transfert qui ne serait plus un premier ordre.

On utilise la plaquette du département prévu à cet effet. On envoie une tension continue sur la photodiode (quelques volts, potentiomètre V0) avec une légère modulation (signal créneau à 100 mV environ) à 500 Hz environ. 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 (200Ω) en série de la LED pour la protéger. On place une forte résistance en série avec la photodiode pour convertir le courant produit en une tension importante (on a pris $R_m = 38.88 \text{ k}\Omega$). 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 $\tau = R_m C$ et donc C , en faisant varier la tension de polarisation de la photodiode.

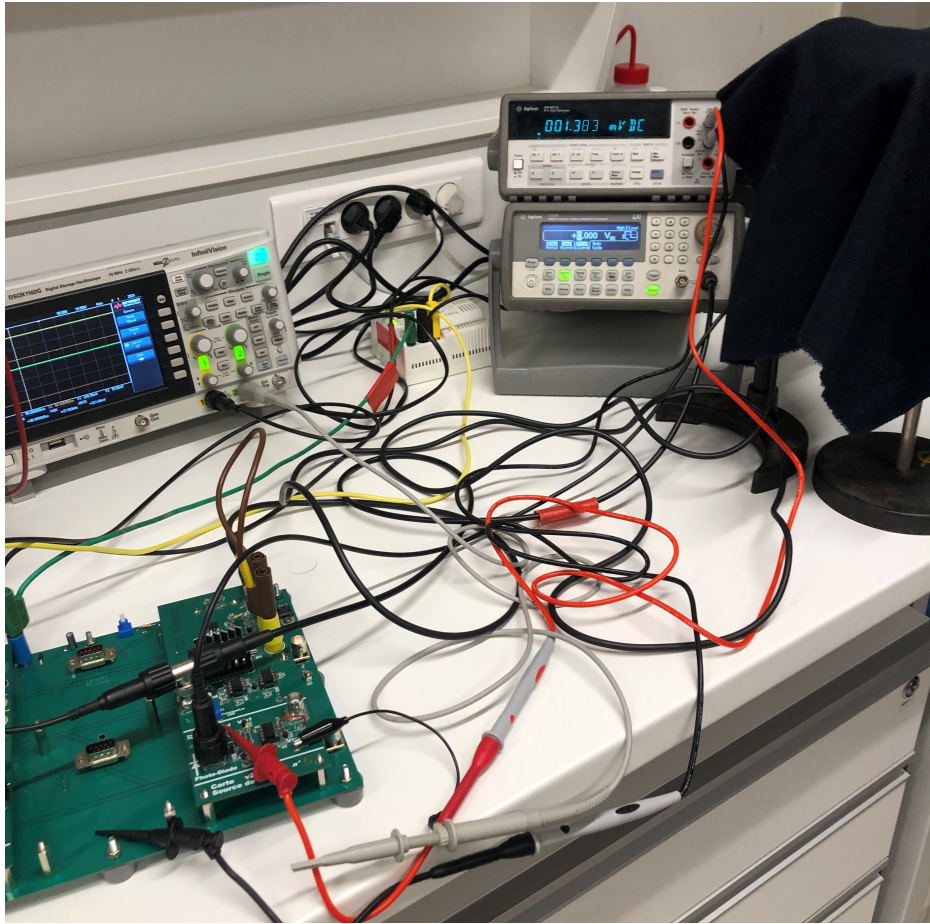


FIGURE 15 – Etude du temps de réponse - Montage ou sac de noeuds...

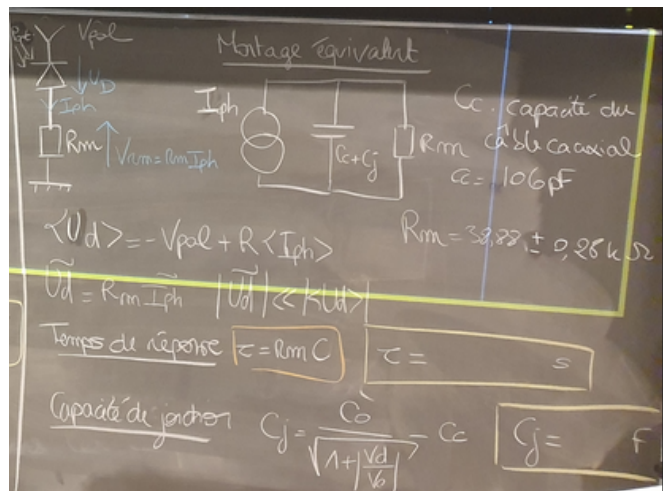


FIGURE 16 – Etude du temps de réponse - Principe

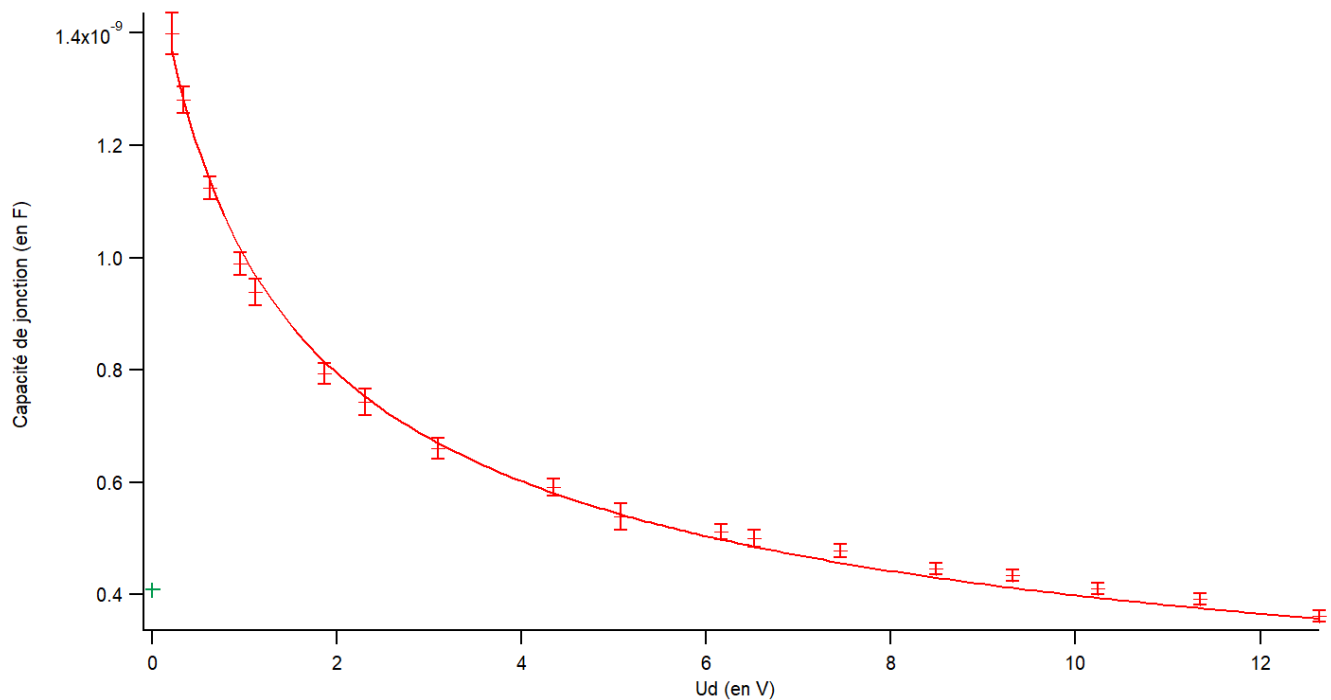


FIGURE 17 – Etude du temps de réponse - Graphe obtenu

Quelques conseils supplémentaires de choses à ne pas oublier :

- Penser à utiliser une sonde différentielle accordée à l'oscilloscope ou utiliser des montages suiveurs pour s'affranchir de la capacité du câble coaxial. Le cas échéant, mesurer la capacité du câble coaxial au RLC mètre pour la soustraire à la mesure.
- Attention à bien retirer le voltmètre à chaque mesure de temps de montée
- Couvrir avec un tissu noir l'ensemble LED+Photodiode
- Préléver U_d qui est la tension aux bornes de la photodiode et non V_{pol}

Etude de la capacité de jonction d'une photodiode

- Travail expérimental et rédaction du document :

Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.)
mail : desmouli@physique.ens-cachan.fr

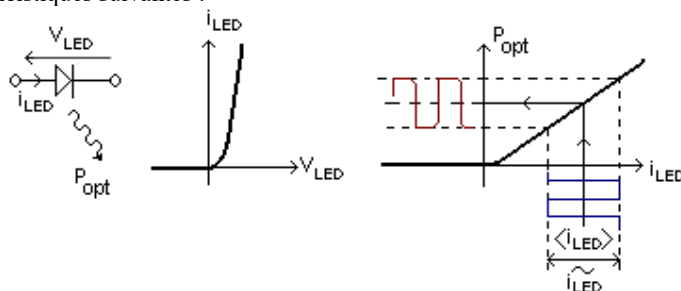
L'expérience proposée consiste à envoyer un flux lumineux qui varie en créneau sur une photodiode afin de déterminer le temps de réponse de cette dernière. De ce temps de réponse, nous déduirons sa capacité de jonction. Nous nous intéresserons, en particulier, à l'évolution de cette capacité avec la tension de polarisation inverse appliquée sur la photodiode

I. Principe de l'expérience.

L'expérience comporte un circuit émetteur de flux lumineux et un circuit récepteur. Les deux circuits sont disponibles sur une même maquette (ENSC349). La diode électroluminescente employée est une diode rouge. La photodiode caractérisée est de type PIN10. Elle présente une surface sensible de 1 cm² environ et comporte une capacité de jonction importante, de l'ordre de la centaine de pF. Elle fonctionne dans le visible.

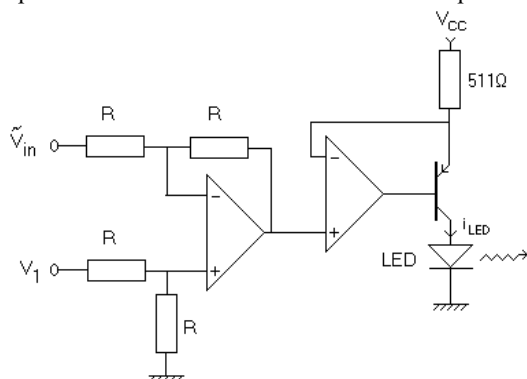
- *Le circuit chargé de créer le flux lumineux de test.*

Le flux lumineux en créneau sera obtenu à partir d'une diode électroluminescente dans laquelle on injectera un courant en forme de créneau. En effet, en statique, le comportement d'une diode électroluminescente peut être représenté par les caractéristiques suivantes :



Dès que le courant injecté dans le composant dépasse une valeur donnée, la puissance optique émise va évoluer de façon affine par rapport au courant. Pour obtenir un flux lumineux évoluant temporellement en forme de créneau, il va falloir que le courant présente une composant continue afin d'être polarisé dans la zone affine. Sa partie variable donnera l'allure de la variation de puissance optique.

Le circuit électronique utilisé pour créer le flux lumineux d'allure voulue présente la structure suivante :



Il permet d'obtenir un courant dans la diode électroluminescente vérifiant :

$$i_{LED} = \frac{V_{cc} - (V_1 - \tilde{V}_{in})}{R_o} = \langle i_{LED} \rangle + \tilde{i}_{LED}$$

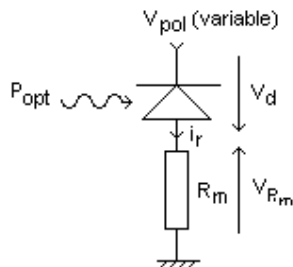
La tension V_1 est continue et réglable avec un potentiomètre situé sur la maquette. La tension V_{in} est une tension variable en créneau, sans composante continue, appliquée par un GBF. R_o est une résistance de 511Ω .

Sur le plan dynamique, on fera en sorte de rendre le temps de réponse de la photodiode le plus long possible, afin que le temps de réponse de la diode électroluminescente soit négligeable devant ce dernier et que l'on puisse considérer les créneaux de flux lumineux obtenus comme parfaits, vis-à-vis de la photodiode.

• *Le circuit chargé de détecter le flux lumineux : photodiode et conversion tension/courant.*

La photodiode va convertir la puissance optique reçue en un courant pratiquement proportionnel à cette puissance. Ce courant sera ensuite converti en tension pour être directement visualisable sur un oscilloscope.

Le circuit employé se présente sous la forme suivante :



La tension de polarisation V_{pol} est une tension positive réglable, qui permet d'assurer une polarisation en inverse de la photodiode. La résistance R_m est une résistance de précision destinée à convertir le courant de sortie de la photodiode en une tension observable.

Sous l'action d'un flux lumineux variable autour d'une valeur moyenne, le courant émis par la photodiode présentera également une valeur moyenne et une variation. Il en sera donc de même pour la tension aux bornes de la résistance de mesure. Sachant que nous allons chercher à étudier l'évolution du temps de réponse de la photodiode en fonction de la tension aux bornes de cette dernière, il va falloir faire en sorte que cette tension soit à pratiquement continue. La tension V_d aux bornes de la photodiode est donnée par

$$V_d = -V_{pol} + V_{R_m}$$

Pour limiter l'ondulation sur V_d , il faudra limiter l'ondulation sur V_{R_m} . Pour ça, on fera en sorte que la valeur moyenne du flux lumineux soit grande devant sa variation. Ainsi, l'ondulation sur V_d sera négligeable et V_d pourra être assimilée à sa valeur moyenne.

Par ailleurs, la diode est reliée à la maquette par un câble BNC. Pour tenir compte de ce câble sur le comportement du circuit, il faudra penser à ajouter, en parallèle sur la photodiode, une capacité de 100 pF par mètre de câble.

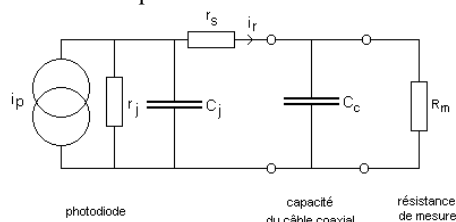
Pour comprendre le temps de réponse de ce circuit, on va le modéliser en régime de petits signaux.

$$\langle V_d \rangle + \tilde{V}_d = -\langle V_{pol} \rangle + \langle V_{R_m} \rangle + \tilde{V}_{R_m}$$

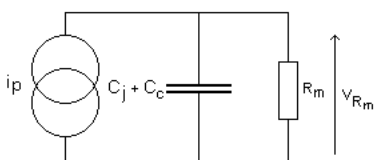
Si on ne conserve que les variations, on arrive à

$$\tilde{V}_d = \tilde{V}_{R_m}$$

Ce qui signifie qu'on se ramène au schéma équivalent suivant :



La résistance r_j est une résistance de fuite que l'on considérera comme infinie. La résistance r_s est une résistance de connectique que nous supposons très faible devant la résistance de mesure R_m qui vaut 100 k Ω . La capacité C_j est la capacité de jonction que nous voulons étudier. Compte tenu des simplifications faites, le système étudié se présente, en régime de petits signaux, sous la forme suivante :



On a donc

$$\tilde{i}_p = (C_j + C_c) \cdot \frac{d\tilde{V}_{R_m}}{dt} + \frac{\tilde{V}_{R_m}}{R_m}$$

Sachant que i_p , le photocourant est pratiquement proportionnel à la puissance optique reçue, la relation entre la puissance optique d'entrée et la tension de sortie est de la forme

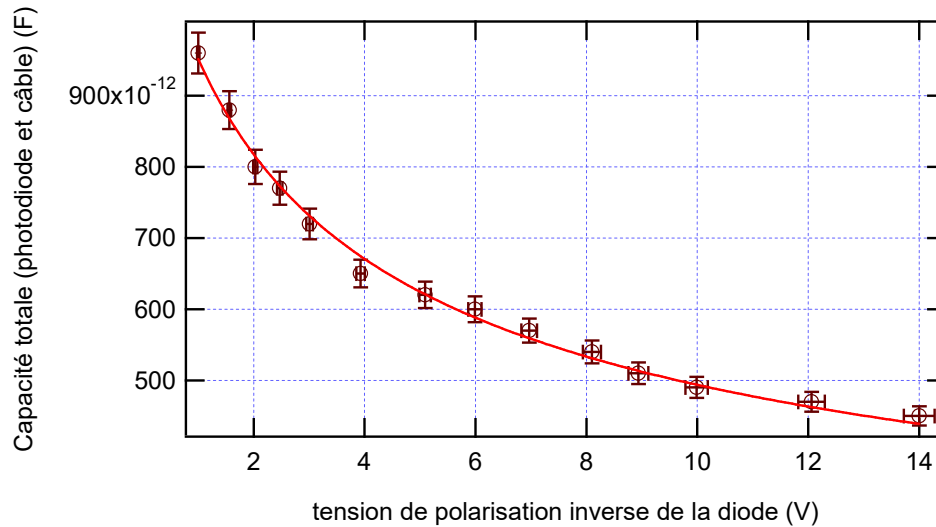
$$\frac{\tilde{V}_{R_m}}{\tilde{P}_{opt}}(p) = \frac{K}{1 + R_m \cdot (C_j + C_c) \cdot p}$$

En mesurant le temps réponse à 63% du système, connaissant R_m , on en déduit une capacité qui est la somme de la capacité de jonction et de la capacité rapportée par le câble coaxial.

Remarque : pour réaliser la conversion courant/tension, on aurait pu employer un circuit transconductance à amplificateur opérationnel, mais il s'agit en fait d'une fausse bonne idée. En effet, dans ce cas, on ne peut plus déduire la capacité de jonction du temps de réponse, car ce n'est plus la résistance R_m qui intervient dans le temps de réponse à 63% mais la résistance de connectique r_s que nous ne connaissons pas.

II. Résultats expérimentaux et discussion.

Expérimentalement, on mesure la tension aux bornes de la diode avec un voltmètre afin d'éviter les problèmes de masse. Le temps de réponse est mesuré à partir de la tension aux bornes de R_m , récupérée avec une sonde de tension d'oscilloscope afin d'éviter d'introduire une capacité de mesure trop importante en parallèle avec R_m . Compte tenu de la faiblesse de la variation de flux lumineux, le signal récupéré en sortie de la photodiode sera fortement perturbé, essentiellement par un signal à 50 Hz. Nous travaillerons à une fréquence voisine du kHz et nous moyennerons les traces sur lesquelles nous ferons nos mesures de temps de montée. Il faut noter que la prise de mesures est assez lente à cause du moyennage.



On fait un ajustement avec une fonction de la forme

$$C = C_c + \frac{C_o}{\sqrt{1 + |V_d|/V_o}}$$

Dans l'ajustement, on force C_c à 100 pF afin de prendre en compte la capacité du câble coaxial qui relie la photodiode au circuit. L'autre terme correspond à la capacité d'une jonction abrupte polarisée en inverse. On obtient, par l'ajustement, $C_o = 1.11 \pm 0.03$ nF . et $B = 1.45 \pm 0.10$ V.

Pour la photodiode, le constructeur donne une valeur de capacité de jonction comprise entre 300 et 400 pF sous 10V pour la photodiode PIN10. Expérimentalement, pour 10V, nous avons trouvé une capacité globale légèrement inférieure à 500 pF ce qui correspond, pour la seule capacité à un peu moins de 400 pF ce qui est cohérent.

Conclusion.

Le fait que la capacité de jonction d'une photodiode diminue avec la valeur absolue de la tension inverse de polarisation explique que l'on polarise les photodiodes le plus fortement possible en inverse quand 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.

Références.

TP Phytem sur l'étude d'un photorécepteur en statique et en dynamique, conçu et écrit par Bernard Journet.

Liste de matériel.

Maquette sur l'étude d'un photorécepteur (ENSC349) avec la photodiode PIN10 et une LED rouge associée au kit ENSC349.

Deux pieds d'optique permettant de maintenir l'émetteur et le récepteur accolés.

Une alimentation stabilisée +15V/-15V.

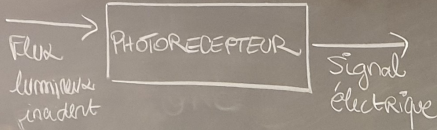
Un GBF.

Un multimètre et deux pinces crocodiles.

Un oscilloscope Agilent ou HP (avec curseur en X et en Y simultanément) avec deux sondes de tension.

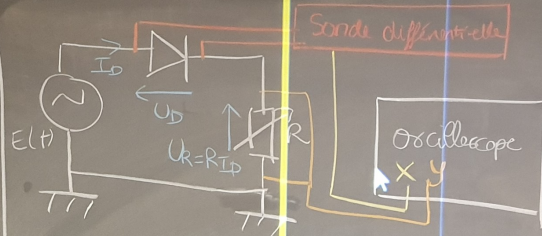
Tableau complet

MP 12 PHOTORÉCEPTEURS



Oeil : temps de Réponse : $\sim 0,1\text{ s}$
Réponse spectrale : visible $[400, 800]\text{ nm}$

I) Caractéristique courant-tension de la photodiode



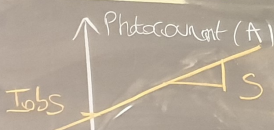
Tension de polarisation variable $E(t) = E_1 \cos(2\pi f t)$

avec $f = 1\text{ Hz}$ $-8\text{ V} \leq E_1 \leq 8\text{ V}$
 $E_1 = 8\text{ V}$

Droite de charge $I_D = \frac{E - U_D}{R}$

Loi de Malus $P_{\text{opt}} = P_0 \cos^2(\theta)$

$P_0 = \pm W$ $\Delta P_{\text{opt}} = P_{\text{opt}} \sqrt{\left(\frac{\Delta P_0}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \theta \sin(2\theta)}{\cos^2(\theta)}\right)^2}$



$I_{\text{ph}} = I_{\text{obs}} + S P_{\text{opt}}$
 $|I_{\text{ph}}| \gg |I_{\text{obs}}|$

$I_{\text{obs}} = \pm A$

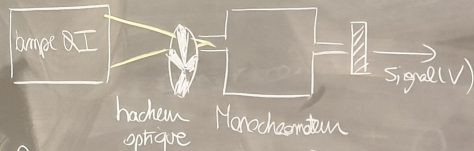
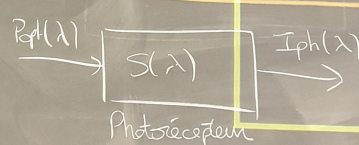
Sensibilité : $S = \frac{S I_{\text{ph}}}{S P_{\text{opt}}} = A / W$

Rendement quantique

$\eta = \frac{h \nu S}{e \Phi}$

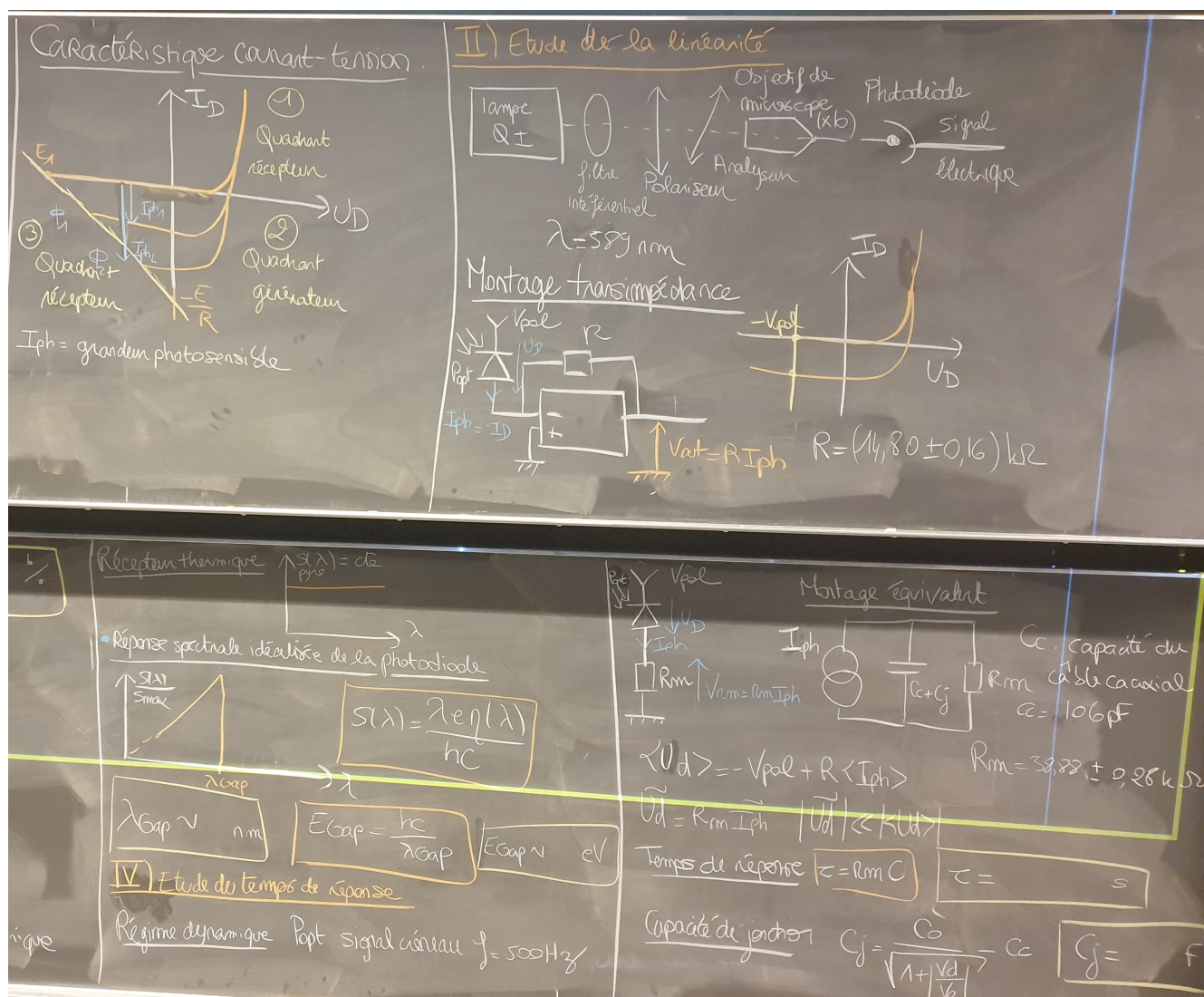
$\eta = \pm \%$

III) Réponse spectrale de la photodiode



Réponse spectrale de la lampe

Détermination à l'aide d'un détecteur pyroélectrique



Remarques

Rapport du jury : "Dans ce montage, les questions classiques de métrologie peuvent être abordées : sensibilité, bande passante et temps de réponse. Il importe de distinguer les détecteurs photoniques et thermiques, notamment du point de vue de leur réponse spectrale. Plus généralement, il faut connaître les principes physiques des photo détecteurs utilisés et pouvoir justifier les liens entre ces principes et les caractéristiques métrologiques. Il faut également, lorsqu'on cherche à effectuer une étude spectrale, faire attention à la réponse spectrale de tous les éléments du montage, y compris celle des éventuels polariseurs et analyseurs. Remarquons pour finir que la notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode."

Bibliographie

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

- Physique expérimentale, ALD etc (il y a une grosse partie du bouquin pour ce montage, allez le lire)
- Comptes rendus de 2010 [ici](#), et sur les effets capacitifs
- Notices Etude spectrale d'un récepteur [ici](#); puissance mètre optique [ici](#)

Questions

- Quels sont les photorécepteurs de l'oeil ? 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'oeil 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 ? On appelle ça aussi un 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 réfléchi. En pratique, on superpose plusieurs cavités de ce type pour obtenir la courbe de transmission désirée. Pour améliorer les performances des filtres interférentiels, les fabricants les accolent souvent à des filtres colorés. On peut s'en rendre compte en observant par réflexion un filtre dit interférentiel : l'une des faces semble métallique (côté du filtre interférentiel qui réfléchit pratiquement toutes les longueurs d'onde), l'autre est colorée. 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. Pour obtenir les spécifications du constructeur, il faut les éclairer sous incidence normale. 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 doit-on multiplier la lecture de la longueur d'onde par 2 sur le monochromateur ? On est à l'ordre 2 du réseau dans le monochromateur.

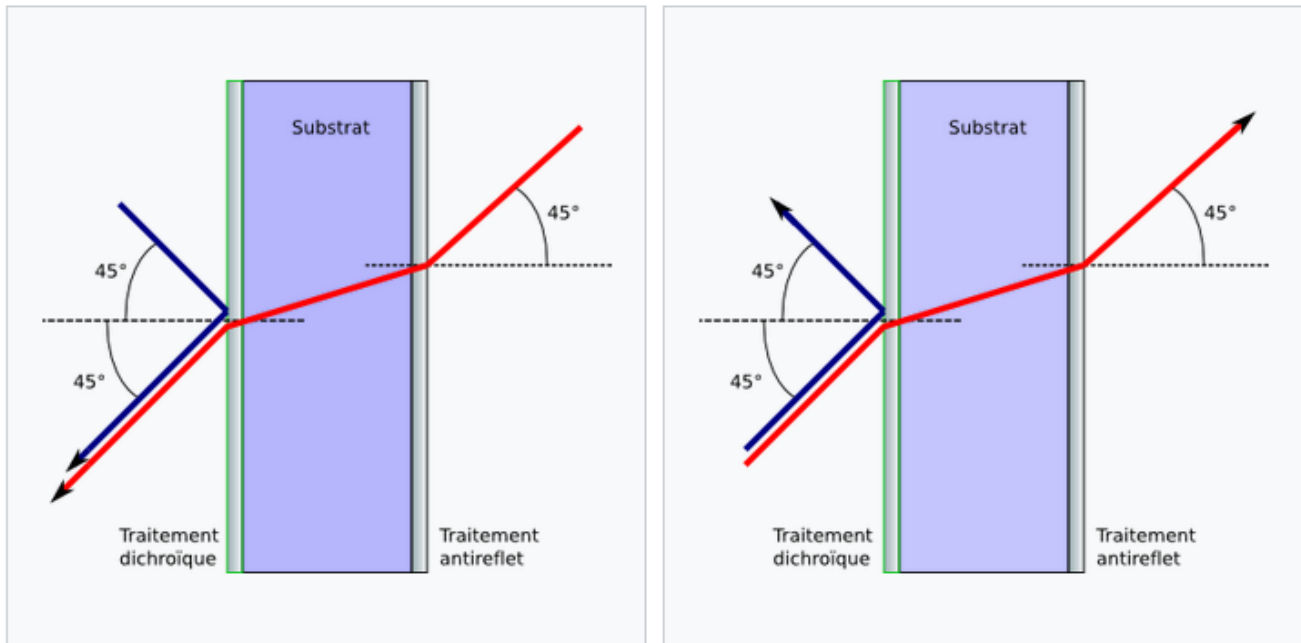
- Pourquoi dans le grand 2 la droite de charge est verticale ? Si on considère que l'ALI est idéal, $V_+ = V_-$ donc $U_d = -V_{pol}$.

- Comment obtient-on la formule du rendement quantique ? cf partie 2

- Calcul de E_{gap} et commentaires : E_{gap} est de l'ordre de 1.3 eV donc c'est le bon ordre de grandeur pour le semi conducteur

- Exemple de matériau semi conducteur : silicium

- 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



Mélange de faisceaux par un miroir dichroïque. Séparation de couleurs par un miroir dichroïque

FIGURE 18 – Schéma de principe

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.

Manip supplémentaire : Refaire le montage pour la linéarité entre le photocourant et le flux lumineux en court-circuitant la photodiode avec un ampèremètre. Cette astuce permet d'étudier plus rapidement la linéarité entre le photocourant et la puissance optique entrante de la photodiode.

Remarques

On pouvait aussi se concentrer sur 2 types de quadrants et étudier le côté photovoltaïque.