

## TP n°6 & 7 - Photorécepteurs

Que ce soit dans le monde des télécommunications ou bien celui de l'expérimentation et de la mesure, les photorécepteurs ont une place essentielle dans la physique expérimentale. Dans ce TP nous essayons de mettre en évidence les principales propriétés d'un photorécepteur particulier: la **photodiode**.

Mise en garde : le matériel mis à votre disposition est cher, il faut donc être très précautionneux.

Les principales caractéristiques que nous souhaitons mettre en évidence sont

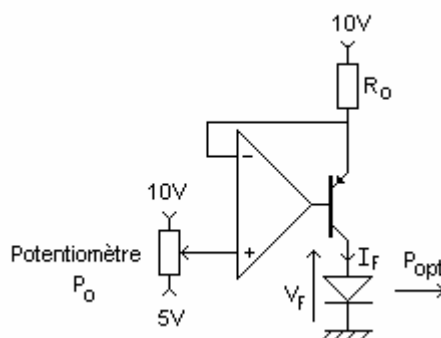
- la caractéristique courant-tension,
- la sensibilité spectrale,
- le courant d'obscurité,
- l'étude en régime dynamique d'un montage récepteur.

### A. Étude statique

#### I. Principe de l'étalonnage des sources

Une des difficultés des mesures "photométriques" est de disposer d'un faisceau lumineux connu. Nous utiliserons ici un récepteur calibré en guise d'étalon de mesure. Nous disposons de trois sources de lumière (diode électroluminescente - LED) réunies dans un même boîtier : une source rouge (R :  $\lambda = 660$  nm – intensité max  $\approx 1200$  mcd), une verte (V :  $\lambda = 525$  nm – intensité max  $\approx 1050$  mcd) et une bleue (B :  $\lambda = 470$  nm – intensité max  $\approx 1000$  mcd). Il s'agira donc dans une première étape d'étalonner ces sources.

Le montage utilisé est celui d'une diode polarisée en direct. La LED est ici alimentée par une source de courant dont le schéma est donné figure 1. (Schéma identique pour les trois types de LED). Le potentiomètre  $P_o$  permet de régler le courant direct dans la diode (noté  $I_F$ ), la tension à ses bornes est  $V_F$ .



**Figure 1.** Circuit de commande de la diode électroluminescente

Si l'amplificateur opérationnel fonctionne bien dans son domaine linéaire, alors le courant  $I_F$  est donné par la formule suivante :

$$I_F = \frac{V_{Cl} - V_i}{R_o}.$$

On donne ici :  $V_{CC} = 15$  V ;  $V_{cl} = 10$  V ;  $R_o = 165 \Omega$  (deux résistances de  $330\Omega$  à 1% en parallèle).

La tension aux bornes de la LED utilisée est accessible sur la borne  $V_a$ . La tension  $V_i$  est accessible sur la borne  $V_2$ .

Le détecteur étalon est lui-même un photomètre à diode PIN qui délivre l'information *flux* reçu (en W) que nous appellerons  $P_{opt}$  par la suite; on doit bien sûr ajuster la gamme de mesure de puissance au cas réel. Ce

photomètre est calibré pour différentes longueurs d'onde, il convient de bien sélectionner celle qui correspond à la LED étudiée.

On dispose d'un banc optique permettant de placer le boîtier contenant les sources, une lentille et le photomètre. On peut donc faire l'image de la source sur le photomètre étalon à l'aide de la lentille fournie afin de récolter le maximum de flux optique. Compte tenu des positions des trois LED sur un même axe vertical il faut déplacer verticalement le boîtier à chaque changement de LED, et si nécessaire reprendre légèrement le réglage de focalisation.

Ainsi il est possible de tracer pour chacune des LED les deux caractéristiques statiques (courant - tension)  $I_F$  ( $V_F$ ) et (puissance émise - courant)  $P_{opt}$  ( $I_F$ ) (attention de choisir à chaque fois la bonne longueur d'onde sur le photomètre).

## **II. Etude des caractéristiques de la Photodiode à étudier**

On utilise une photodiode OPT-P100-6 (Silicon Sensors) de type PIN, dont les électrodes (anode et cathode) sont reliées à un connecteur BNC. Pour ce modèle l'anode est reliée au boîtier.

### **II.1. Caractéristiques importantes d'une photodiode :**

Si on fait varier la puissance optique reçue par le composant, on constate, lorsque la photodiode est polarisée en inverse, que le courant inverse qui la traverse va augmenter. L'évolution de ce courant en fonction du nombre de photons reçus par unité de temps  $\Phi_p$  peut être modélisé de la façon suivante :

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

où  $\eta$  est le rendement quantique (rapport du nombre d'électrons mis en conduction sur le nombre de photons reçus) et  $I_s$  est le courant d'obscurité que l'on pourra négliger dans un premier temps.

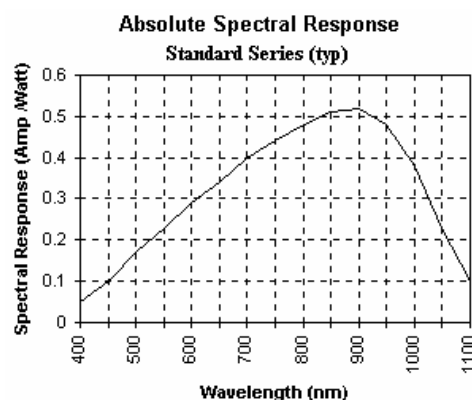
Compte tenu des paramètres que nous avons relevés, si  $\nu$  est la fréquence des photons reçus et  $h$  la constante de Planck ( $h \approx 6.62 \cdot 10^{-34}$  J.s) on peut aussi écrire que

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

On peut également définir la sensibilité de la photodiode comme étant

$$S = I_p / P_{opt}$$

Cette sensibilité dépend de la longueur d'onde. L'émetteur dont nous disposons est constitué de trois LED de couleurs différentes. On pourra donc en déduire la sensibilité spectrale de la photodiode pour chaque longueur d'onde de l'émetteur et comparer les résultats obtenus à la courbe typique fournie par le constructeur (figure 2).

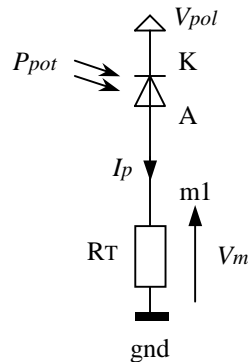


**Figure 2.** Sensibilité spectrale

Pour observer le courant dans la photodiode, on peut envisager de réaliser différents circuits électroniques, dont le but sera de réaliser une conversion courant/tension. Nous allons maintenant présenter deux solutions pour réaliser cette conversion.

## II.2. Première solution :

Le montage de base de la photodiode est donné figure 3.

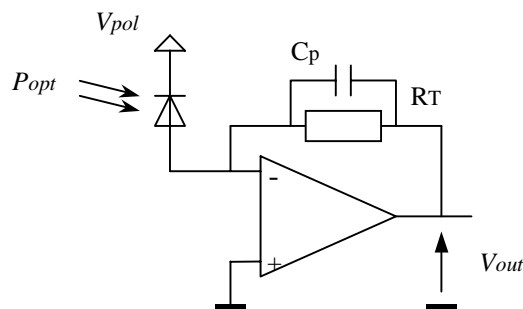


**Figure 3.** Montage de polarisation de la photodiode.

La photodiode est polarisée en inverse sous la tension  $V_{pol}$ , ajustable par un potentiomètre (relier K à  $V_{pol}$  et m1 à A). La résistance  $R_T$  assure la conversion du courant photonique (noté  $I_p$ ) en tension à mesurer  $V_m = R_T \cdot I_p$ . On donne  $R_T = 30 \text{ k}\Omega$  (résistance à 1%). On réalisera la mesure de  $V_m$  et de  $V_{pol}$  avec l'oscilloscope muni de sondes de tension atténuatrices par 10. On pourra alors en déduire la tension aux bornes de la diode ainsi que le courant photonique. La tension aux bornes de  $R_T$  peut également être mesurée avec un voltmètre.

## II.3. Seconde solution

On considère le montage de la figure 4, montage dit de transconductance, associant la photodiode, polarisée sous la tension  $V_{pol}$ , à un amplificateur opérationnel (relier K à  $V_{pol}$  et m2 à A). On relie donc maintenant A à l'amplificateur opérationnel. On a pris ici la même valeur pour la résistance que dans l'étude précédente ( $R_T = 30 \text{ k}\Omega$  et  $C_p = 10 \text{ pF}$ ).



**Figure 4.** Montage transconductance.

Ce circuit réalise une conversion courant tension et permet donc d'observer à l'oscilloscope une tension image du courant qui traverse la photodiode.

Etablir la fonction de transfert de ce circuit.

## III. Travail expérimental

### III.1. Relevés expérimentaux.

Nous allons chercher à étudier les caractéristiques de notre photodiode pour les trois longueurs d'onde de notre émetteur (préciser la longueur d'onde étudiée sur le photomètre à chaque changement de couleur). On

accordera une attention particulière aux unités ainsi qu'aux ordres de grandeurs des paramètres. Pour cela, nous allons procéder de la façon suivante :

- Nous allons commencer par étalonner le système avec la LED rouge (les deux autres LED éteintes). On connecte la fiche banane rouge à la fiche banane blanche ( $I_{out}$ ) de la partie « émetteur » de la maquette. On réalise les réglages optiques nécessaires, afin d'obtenir une image de la LED la plus lumineuse et la plus petite possible sur notre récepteur étalon (le récepteur calibré du photomètre). On place alors le récepteur étalon afin que la tache image soit intégralement comprise sur la pastille réceptrice du récepteur étalon. On relève alors les caractéristiques  $I_F(V_F)$  et (puissance émise - courant)  $P_{opt}(I_F)$ . On en déduit la tension de seuil pour la LED rouge. On rappelle que la tension  $V_F$  aux bornes de la LED est accessible par la borne  $V_a$  et le courant  $I_F$  par les bornes  $V_2$  et  $V_{Cl}$ .
- Ceci étant fait, on retire le récepteur étalon et on le remplace par la photodiode à étudier, en prenant soin de la placer de telle sorte que la tache image de la source soit intégralement comprise sur sa partie réceptrice. On relie la photodiode à la partie « réception » de la maquette et on placera les cavaliers sur la maquette afin d'utiliser le montage transconductance (Cf fig. 4). On fera alors varier la tension de polarisation de la photodiode au moyen du potentiomètre prévu à cet effet et on relèvera la caractéristique  $I_p(V_{pol})$  pour plusieurs valeurs de  $P_{opt}$  (on obtiendra alors un réseau de caractéristiques paramétré par  $P_{opt}$ ). De ce réseau, on déduira la sensibilité spectrale pour la longueur d'onde étudiée. Pour être plus complet, on pourra se placer à une tension inverse de polarisation fixée, par exemple  $-10V$  et relever le courant dans la photodiode pour une dizaine de puissances lumineuses, tracer l'évolution du courant en fonction de la puissance (avec incertitudes), et en déduire un encadrement de la sensibilité spectrale.
- On reprend la même démarche pour le vert et pour le bleu afin d'obtenir les caractéristiques demandées et en notant particulièrement le seuil de la LED et la sensibilité spectrale de la photodiode pour la longueur d'onde considérée.
- On va chercher à déterminer l'ordre de grandeur du courant d'obscurité de la photodiode inconnue. Pour cela, on cache la photodiode et on mesure le courant d'obscurité  $I_S$  pour différentes valeurs de la tension de polarisation.

### III.2. Interprétation des résultats.

- Comparer la tension de seuil des différentes LED. De quel paramètre physique dépend ce seuil. Que peut-on en conclure concernant les LED étudiées ?
- Comparer les valeurs de sensibilités spectrales obtenues à celle attendues sur la courbe donnée figure 2. De même, évaluer le rendement quantique en fonction de la longueur d'onde.
- Discuter des avantages et des inconvénients relatifs des circuits donnés figure 3 et figure 4.

## B. Étude dynamique

Le montage permettant de moduler la puissance optique émise par la LED (ici on a choisi la LED rouge) est donné figure 5. La modulation est obtenue à partir d'une tension de commande qui est la somme d'une composante continue (fixant la valeur moyenne) et d'une composante alternative (fixant la modulation) (circuit U2).

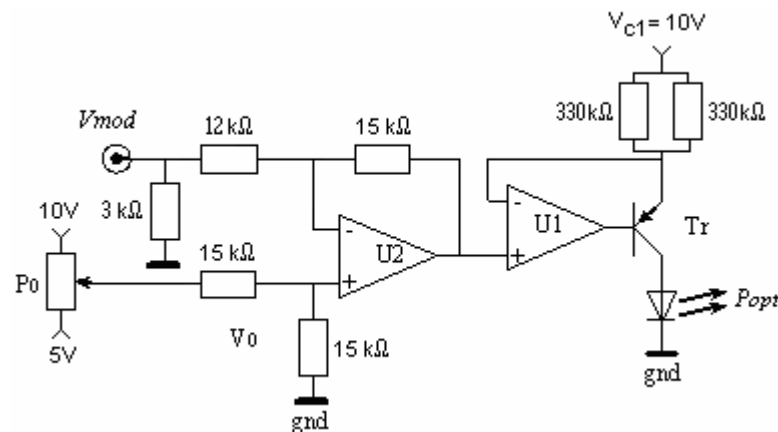
Quel type de modulation réalise-t-on ?

La photodiode étant sensible à la puissance optique c'est elle qui assure directement la démodulation. Choisir (en réglant  $V_o$ ) un point de polarisation "bien placé" de façon à obtenir un comportement linéaire.

Remarque : Pour réaliser la superposition d'une composante continue d'éclairage avec une fluctuation, on a intégré un soustracteur au circuit. Ce dernier est réalisé avec des résistances de  $15\text{k}\Omega$ , sauf pour l'entrée  $V_{\text{mod}}$  qui arrive sur  $3\text{k}\Omega$  en parallèle sur le générateur et  $12\text{k}\Omega$  en direction de l'amplificateur chargé de la soustraction. Cette configuration permet de retrouver exactement la tension  $V_o$  en sortie du soustracteur quand on n'applique pas de tension sur  $V_{\text{mod}}$ . En revanche, lorsque cette dernière est non nulle, en sortie, on récupère

$$V_s = \frac{27}{24} \cdot V_o - \frac{30}{24} \cdot V_{\text{mod}}$$

1. Appliquer un signal sinusoïdal ou carré, très basse fréquence, à l'entrée modulation  $V_{\text{mod}}$  et observer le comportement de la LED.



**Figure 5.** Modulation d'un faisceau lumineux.

On augmente la fréquence de modulation. Observer les conditions limites conduisant à un effet non linéaire dans la modulation (rôle du courant moyen dans la LED, de la tension de modulation et de la photodiode).

2. Avec un signal sinusoïdal à l'entrée  $V_{\text{mod}}$  observer le signal  $V_{\text{out}}$  en sortie du montage de détection (figure 4).

Comparer cette tension à celle réalisant la modulation. Comment interpréter les différences observées ? Tracer l'évolution du gain linéaire et du déphasage associés à la fonction de transfert

$$\underline{T} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{mod}}}$$

de l'ensemble du système de transmission. Faire un ajustement sous IGOR pour identifier les paramètres d'un filtre passe-bas du second ordre. Conclusion ?

Quel est l'effet du condensateur  $C_p$  ?

Quelle est l'influence de la tension de polarisation  $V_{\text{pol}}$  sur la fréquence de coupure du montage ?

3. Appliquer un signal carré à l'entrée modulation  $V_{\text{mod}}$  d'amplitude  $\pm 1\text{V}$  et de fréquence 500 Hz (après avoir mis  $V_o$  à la bonne valeur) et observer le signal aux bornes du circuit de la figure 3 (montage le plus simple avec la photodiode et la résistance de  $30\text{k}\Omega$ ). On commence par appliquer une tension  $V_{\text{pol}}$  de 1V que l'on

augmentera par la suite. Observer la tension aux bornes de la résistance et comparer notamment les temps de montée et de descente de cette tension.

Nous allons désormais nous intéresser au temps de montée. Pour cela, on augmentera  $V_{pol}$  progressivement et avec un multimètre, on mesurera la tension aux bornes de la photodiode. Pour chaque valeur de la tension on mesurera le temps de réponse à 63%. On supposera que le temps de réponse obtenu est le produit de la valeur de la résistance utilisée par la capacité de jonction de la photodiode. En déduire la courbe donnant l'évolution de la capacité de jonction en fonction de la tension aux bornes de la diode. Faire un ajustement de cette courbe avec les deux fonctions suivantes :

$$C_a(V_{diode}) = C_o + \frac{C_1}{(A_1 + V_{diode})^{1/2}} \quad \text{et} \quad C_b(V_{diode}) = C_o + \frac{C_2}{(A_2 + V_{diode})^{1/3}}$$

Que représente  $C_o$  ? Justifier l'évolution de la capacité avec la tension aux bornes de la diode.

4. Comment pourrait-on transmettre un signal de type "audio" et le récupérer ?