

# MP12 – PHOTORECEPTEURS

11 janvier 2017

"Bon et si tu mets une bob et un condo en série ça fait quoi?"

Alexandre Michel & Jérémy Sautel

HERVÉ JUNIOR DIT LE CHAUVÉ

## Niveau : L3

### Commentaires du jury

**2014, 2015** : 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 photodétecteurs 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.

**2007, 2008** : Il existe d'autres photorécepteurs que la photodiode. Un éclairage d'intensité variable peut s'obtenir en utilisant deux polariseurs conformément à la loi de Malus.

**2005** : Le temps de réponse d'un photorécepteur peut dépendre du circuit dans lequel ce composant est inséré.

### Bibliographie

↗ *Physique expérimentale*, Jolidon<sup>1</sup>

→ Est-il encore besoin de préciser que ce livre sera donné en référence dans tous les montages ?

### Prérequis

- Fonctionnement d'une diode
- Semi-conducteur
- Loi de Malus

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Fonctionnement et linéarité de la réponse</b>	<b>2</b>
1.1	Etude primaire de la photodiode . . . . .	2
1.2	La photorésistance . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Réponse spectrale des photodétecteurs</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Comparaison des temps de réponse pour la photodiode et la photorésistance</b>	<b>5</b>

## Introduction

### ⚡ Jolidon

La physique expérimentale passe par l'utilisation de capteurs. En optique, le premier capteur que nous utilisons est notre œil, qui nous sert à convertir le signal lumineux reçu sur la rétine en impulsions électrique via le nerf optique. Mais ce capteur « naturel » possède des limites notamment en ce qui concerne la réponse spectrale (domaine du visible, soit une plage extrêmement réduite) et le temps de réponse (au maximum, notre œil peut distinguer 24 images par seconde comme étant des images successives et au delà comme étant un film continu). Pour aller plus loin dans la détection de signaux, nous devons donc utiliser des photorécepteurs. Il y en a de deux types : les détecteurs photoniques et les détecteurs thermiques. Les photorécepteurs thermiques utilisent une mesure de température dans un matériau dont la température varie lorsqu'il est soumis à un flux lumineux. Les détecteurs photoniques reposent sur l'effet photo-électrique. C'est l'absorption d'un photon qui crée des porteurs de charge au sein du matériau. Bien entendu, la réponse d'un détecteur dépend aussi de son environnement, des conditions expérimentales et du « circuit » sur lequel il est branché.

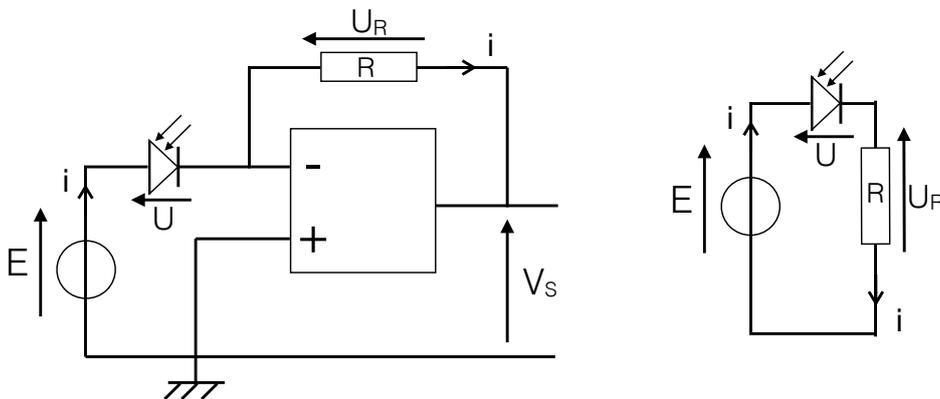
Nous nous restreindrons ici à étudier en détail les photorécepteurs les plus utilisés en laboratoire à notre niveau, que sont la photodiode et la photorésistance.

## 1 Fonctionnement et linéarité de la réponse

### 1.1 Etude primaire de la photodiode

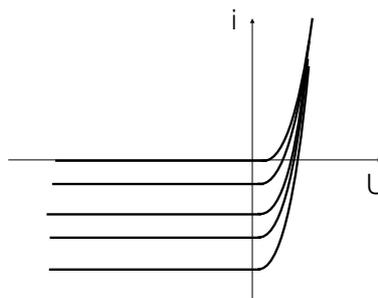
#### ⚡ Jolidon

Nous allons étudier la réponse d'une photodiode en fonction de l'intensité lumineuse qui lui est appliquée. Nous ne pouvons pas insérer directement la photodiode aux bornes d'un voltmètre car il nous faut un circuit qui possède un point de fonctionnement et qui se place dans la zone où la diode a une réponse linéaire en fonction du flux lumineux. Pour cela pouvons réaliser deux montages électriques différents :



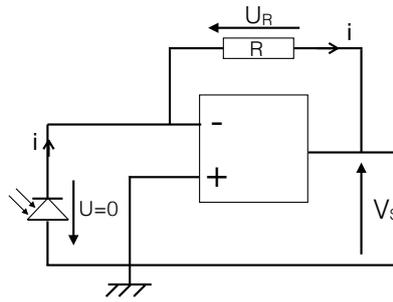
Nous choisirons le montage de l'amplificateur opérationnel qui a l'avantage de ne pas être très sensible à l'impédance des appareils de mesure. De plus, on se souvient que pour utiliser correctement un convertisseur tension-courant avec AO, il faut que les courants de polarisation de l'AO soient très faibles devant le courant que l'on veut convertir. Ici le photocourant est  $\neq 100 \mu\text{A}$  tandis que les courants de polarisation de l'AO sont de l'ordre du pA.

Pour obtenir la réponse d'une photodiode, il nous faut déjà en tracer la caractéristique. Nous obtenons une allure de ce type pour un certain éclairage :

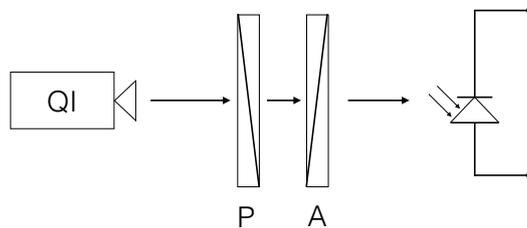


Enfin nous plaçons, au vu de cette caractéristique, le point de fonctionnement dans la zone où la diode est bloquante (plateau de courant), c'est-à-dire là où la valeur du courant dépend du flux lumineux. Nous analysons maintenant

naturellement quelle est cette dépendance en traçant la valeur du courant en fonction du flux pour une valeur de tension de générateur  $E$  donnée. Nous la prendrons ici nulle ce qui revient à brancher la photodiode dans le circuit suivant :



Il s'agit maintenant de faire varier le flux de manière à ce qu'il puisse être quantifié d'une autre manière qu'avec un photorécepteur (Merci Jamy!). Une manière élégante et efficace de faire cela est d'installer un polariseur et un analyseur devant la photodiode, d'éclairer le système avec une lampe Quartz-Iode (QI) et de faire varier l'angle entre les deux pour faire varier le flux que l'on peut désormais quantifier via la loi de Malus :  $\Phi = \Phi_0 \cos^2(\theta)$  (nous quantifions en réalité  $\Phi/\Phi_0$  où  $\Phi_0$  est l'intensité lumineuse en l'absence de polariseur/analyseur).



Nous obtenons alors les courbes suivantes après traitement des incertitudes. Pour réduire les incertitudes (ie avoir une erreur à l'ordre 2 au lieu de l'ordre 1) on peut mesurer l'intensité du courant pour un angle donné ainsi que pour son opposé et ainsi effectuer une moyenne telle que :

$$I = \frac{I(+\theta) - I(-\theta)}{2} \tag{1}$$

On mesure alors la pente de cette droite qui correspond à la *sensibilité* de la photodiode définie par :

$$\Gamma = \frac{\delta I}{\delta(\Phi/\Phi_0)} \tag{2}$$

On obtient la valeur  $\Gamma = \pm \mu A$  (avec une propagation des incertitudes sur regressi) à comparer avec la valeur théorique donnée par le fabriquant.

**Remarque très importante**

- Il y a 2 hypothèses sous-jacentes dans cette expérience qui sont très bien vérifiées dans notre cas :
- la réponse du photodétecteur ne dépend pas de la polarisation de l'onde. On peut pour cela laisser fixe l'analyseur et ne tourner que le polariseur.
- les polariseurs/analyseurs ont une réponse identique pour toutes les longueurs d'onde (que nous étudions). Ici la lampe QI émet du vert-bleu jusque dans l'IR donc avec les polariseurs disponibles au laboratoire, on considère cette hypothèse bien vérifiée. (Attention aux questions là-dessus à l'oral)

↓ *Etudions maintenant un autre photodétecteur, la photorésistance, pour pouvoir la comparer avec la photodiode et ainsi nous permettre de pouvoir déterminer au mieux quel est le meilleur photodétecteur à utiliser en fonction de ce que l'on veut mesurer.*

## 1.2 La photorésistance

✎ Jolidon

Comme son nom l'indique, la photorésistance est une résistance formée à partir d'un matériau semi-conducteur. Vous allez me dire très bien, je vais vous répondre, oui. On exploite alors la particularité de ce matériau semi-conducteur qui est que la conductivité augmente lorsqu'il est soumis à un rayonnement. Ainsi, lorsqu'un rayonnement arrive sur la photorésistance, un photon (s'il a une énergie suffisamment importante) peut être absorbé et fait passer un électron dans la bande de conduction, ce qui crée des paires électrons-trous et augmente ainsi la conductivité du matériau. Maintenant, fini la théorie et revenons très sobrement à ce circuit sur lequel on va brancher la photorésistance. Comme on a directement une dépendance de  $R$  en fonction de  $\Phi$ , et que l'on connaît parfaitement la caractéristique d'une résistance, on peut établir exactement le même protocole que pour la photodiode, en choisissant cette fois le point de fonctionnement avec le circuit sans AO (et oui ça change!). Pour ce faire, on choisit une tension  $E$  fixée et on fait varier le flux lumineux avec le même montage optique que précédemment. On fait également varier le flux lumineux avec des polariseurs croisés suivant la loi de Malus pour des angles positifs et négatifs comme nous le faisons pour la photodiode (Eq 1).

Voici la courbe que nous obtenons; notons qu'elle est assez loin d'être linéaire.

(courbe de la réponse de la photorésistance avec cos carré)

On s'attendait à cette allure du fait de l'explication théorique dans le paragraphe précédent. On pourrait aussi se questionner sur le modèle théorique qui établit l'évolution de la résistance avec le flux et on obtiendrait une relation du type :

$$R(\Phi) = R_0 \left( 1 + \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^\alpha, \quad (3)$$

où  $\alpha$  peut être déterminé dans une bonne approximation à  $-1/2$  (on peut glisser cette remarque mais le mieux est de le vérifier avec une modélisation si on va vite et surtout si on a le temps).

On aurait également pu directement brancher cette résistance à un ohmmètre (c'est fait dans le Jolidon) mais par un souci de logique pour notre propos, nous avons choisi d'intégrer cette photorésistance dans un montage, ce qui la met dans la même situation que la photodiode. Attention, il ne faut pas comprendre ici que le Jolidon n'est pas un bon livre pour préparer ce montage, vous l'aurez compris. Nous pouvons alors comparer sans risque la linéarité de l'un et de l'autre.

↓ Comme nous l'avons signalé dans notre introduction, le domaine de l'optique du visible (et du non visible) possède une certaine plage de longueur d'onde sur laquelle il est possible que les instruments que nous avons à notre disposition n'aient pas une réponse uniforme (à flux fixé).

## 2 Réponse spectrale des photodétecteurs

✎ Jolidon

Pour observer la réponse spectrale d'un instrument de mesure, le protocole est assez basique puisqu'il repose sur le fait de ne faire varier que la longueur d'onde de travail indépendamment des autres paramètres (notamment l'intensité du signal). En optique nous allons appliquer exactement ce protocole en appliquant des filtres interférentiels de longueurs d'onde allant du bleu au rouge devant une lampe QI. Mais là il y a un hic...

Nous savons que la lampe QI possède un spectre en cloche (et non linéaire!!!) assez large centré sur le rouge. Ainsi il est donc naturel que lorsque nous mettons un filtre interférentiel devant la QI, nous ayons une intensité plus importante pour le rouge que pour le bleu par exemple. Nous ne travaillons donc pas à flux lumineux constant puisque nous venons de dire que celui-ci dépend de la longueur d'onde. Il nous faut donc normaliser nos mesures par le spectre de la lampe QI.

Pour avoir accès à ce spectre, nous utilisons un photorécepteur thermique et non plus photonique. Effectivement, les photorécepteurs thermiques ne sont pas sensibles à la longueur d'onde de l'onde incidente (en général) et c'est particulièrement le cas de la *thermopile*. Ainsi, nous allons pouvoir mesurer ici le flux lumineux en fonction de  $\lambda$  avec une thermopile, ce qui nous donnera exactement le spectre de la QI. Pour cela, on branche aisément la thermopile aux bornes d'un voltmètre et on l'éclaire par la QI au travers de différents filtres interférentiels (nous avons utilisé les P124.1/9).

### Remarque

Il est également possible d'utiliser le puissance-mètre Thorlabs par exemple. Il s'agit d'une photodiode qui a été préalablement étalonnée en usine, par exemple avec une thermopile. Elle possède donc une réponse plate en  $\lambda$ .

Nous n'avons plus qu'à prendre les mêmes mesures avec une photodiode et à multiplier par le facteur de renormalisation de la QI, qui est lui déterminé avec la thermopile. Attention, nous avons bien entendu pris en compte ici le fait que la réponse de la photodiode soit linéaire en flux lumineux, ce qui nous permet de simplement multiplier par un facteur de normalisation. Cela aurait été impossible avec une photorésistance du fait de sa réponse non linéaire. Nous obtenons une grandeur renormalisée  $\gamma = \beta \frac{I_{photodiode}}{I_{thermopile}}$  avec  $\beta$  choisi tel que  $\max(\gamma) = 1$ .

On obtient alors avec les incertitudes, une droite affine. Son ordonnée à l'origine peut être expliquée *via* l'existence d'une longueur d'onde seuil correspondant à l'énergie que ne doit pas dépasser un photon pour atteindre la zone d'espace de charge, y induire une paire électron-trou et ainsi participer au photocourant.

### 3 Comparaison des temps de réponse pour la photodiode et la photorésistance

✦ Jolidon

Pour caractériser la différence de temps de réponse entre la photodiode et la photorésistance, nous pouvons simplement pour l'instant visualiser la réponse de ces deux récepteurs lorsqu'ils sont soumis à un éclairage avec un stroboscope. On choisit la fréquence d'émission des flashes du stroboscope puis on observe sur l'oscillo la réponse de la photodiode, et enfin on superpose celle de la photorésistance.

On définit dans notre montage le temps de réponse comme étant l'abscisse de l'intersection entre la tangente de la fonction de réponse juste après l'impulsion et la valeur limite aux temps longs (*cf* Figure). On se rend déjà compte, qualitativement, que le temps caractéristique de la photodiode est très inférieur à celui de la photorésistance. Maintenant nous allons quantifier le problème en réalisant une acquisition.

(éventuellement courbe de réponse)

La différence très importante de temps de réponse entre la diode et la résistance nous permet de prendre la réponse (presque impulsionnelle) de la photodiode comme référence de l'impulsion lumineuse vis à vis de la photorésistance. Ainsi, si nos montages font intervenir des temps caractéristiques grands devant la  $\mu s$ , nous pourrions considérer que le temps de réponse de la photodiode est négligeable. Dans un montage où le temps de réponse caractéristique est de l'ordre de la seconde, nous pouvons également considérer la photorésistance comme ayant une réponse très courte. Le type de photorécepteur employé dépend donc du montage utilisé.

## Conclusion

L'avantage de la photorésistance (car oui, il y en a un), c'est de pouvoir être polarisée très facilement dans un circuit sans envisager de questions compliquées vis à vis du point de fonctionnement. Passée cette difficulté, la photodiode

(peu coûteuse) permet d'obtenir un temps de réponse de l'ordre de MILLE fois moins que celui de la photorésistance, et une dépendance spectrale linéaire.

**Ouverture :** A quoi servent les phototransistors ? Ils servent à étudier la dynamique d'une chute libre en TP ! Et ouais mon petit gars, ça te laisse sur le cul hein ? (*San-Antonio*).