

MP12 : Photorécepteurs

Selim Touati , Nicolas Vitrant

7/11/2013

Bibliographie

- SEXTANT, Optique Expérimentale. 1997.
- DUFFAIT. Épreuves d'Optique - Agrégation de Sciences Physiques. 1997.

Contents

1	Caractéristique, linéarité	2
1.1	Photodiode	2
1.2	Photorésistance	4
2	Réponse spectrale	6
2.1	Photodiode	7
2.2	Photorésistance	8
3	Temps de réponse	8
3.1	Photodiode	9
3.2	Photorésistance	9

Rapports de Jury

2011, 2010 : Il importe de distinguer les détecteurs photoniques et thermiques, notamment du point de vue de leur réponse spectrale. La notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode.

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

Introduction

Les photorécepteurs physiques sont des capteurs qui transforment le rayonnement électromagnétique en signal électrique. Ce sont donc des *transducteurs*.

Il existe 2 grandes catégories de détecteurs:

- Les détecteurs photoniques : l'absorption d'un photon dans un matériau fait passer un électron vers un état excité par effet photoélectrique qui peut être externe (un électron est éjecté hors du matériau), c'est le cas par exemple du photomultiplicateur ou interne (les électrons passent directement dans un circuit, ex: photodiode, photorésistance).
- Les détecteurs thermiques : Sensibles à l'élévation de température (due à l'absorption du rayonnement) qui est convertie en signal électrique. La thermopile en est un exemple.

Dans tous les cas, ce sont des détecteurs de flux énergétique.

Dans ce montage, nous allons étudier les caractéristiques (linéarité entre le signal électrique et le flux incident, la réponse spectrale et le temps de réponse) de 2 photorécepteurs: la photodiode et la photorésistance.

1 Caractéristique, 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.

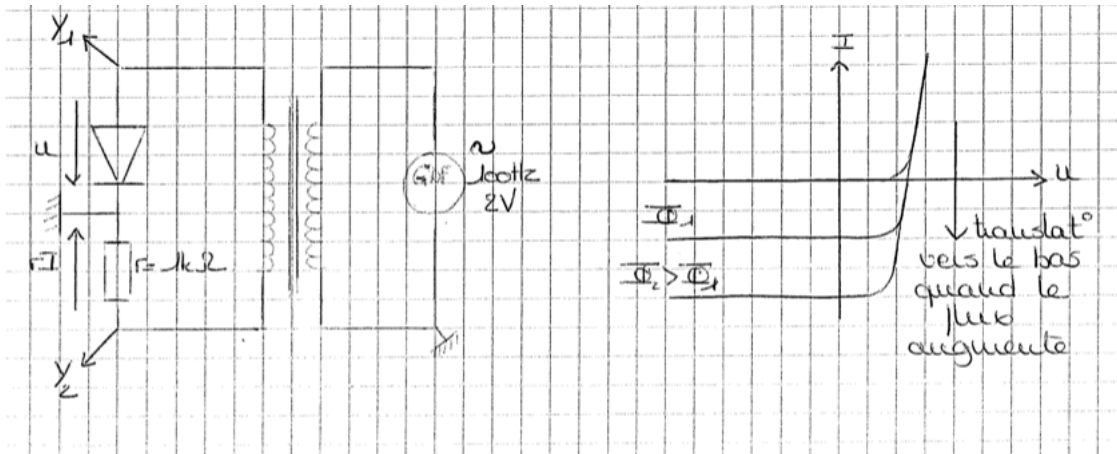
1.1 Photodiode

Une photodiode est une jonction P-N dont la caractéristique dépend du flux incident. Lorsqu'un photon est absorbé au niveau de la Zone de Charge d'Espace (ZCE) une paire d'électron/trou est créée. L'électron se déplace de la zone P vers la zone N ce qui implique la création d'un photocourant I_{Ph} dans le circuit. Une photodiode est donc la somme d'une diode et d'un générateur de courant (effet photoélectrique). L'expression mathématique de sa caractéristique est :

$$I_d = I_s(e^{\frac{eV_d}{k_B T}} - 1) - I_{Ph}$$

où I_s est le courant d'obscurité.

Expérience 1 : Caractéristique d'une photodiode



Manip: On observe directement la caractéristique sur l'oscillo en mode XY. On éclaire la photodiode pour montrer l'influence de la lumière sur la caractéristique.

La loi des mailles appliquée à ce circuit nous indique qu'il existe un point de fonctionnement (U_{diode}, I_{diode}) qui correspond à l'intersection de la droite de charge (caractéristique de l'ensemble générateur+résistance) et de la caractéristique de la photodiode.

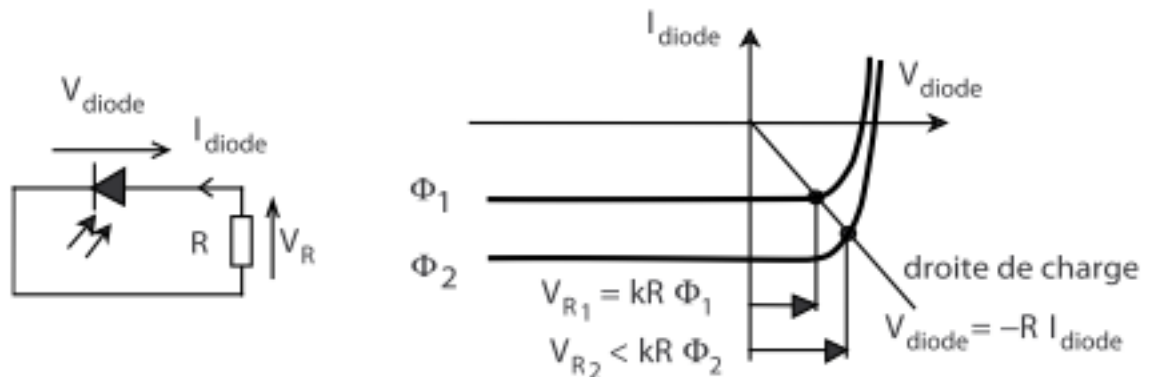


Figure 1: Photodiode non polarisée

La partie de la caractéristique qui nous intéresse (pour que la photodiode fonctionne en capteur de lumière) est le quadrant $I < 0, U < 0$. En effet, dans cette partie le courant est directement proportionnel au flux lumineux incident. Il faut choisir des valeurs de E et R qui nous permettent de polariser la diode en inverse et donc de se placer dans le quadrant souhaité.

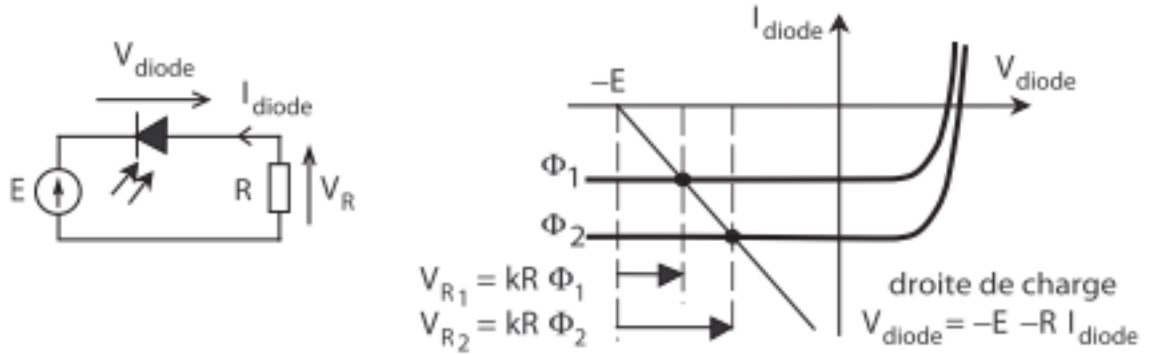
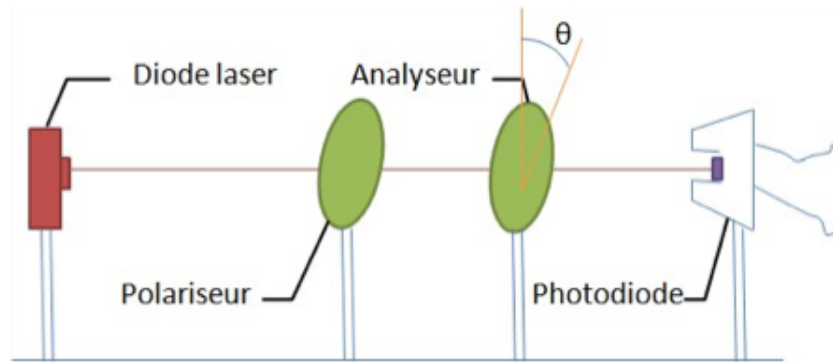


Figure 2: Photodiode polarisée en inverse

Conclusion: Nécessité de se placer dans la portion inverse de la caractéristique pour un fonctionnement en détecteur de la photodiode.

On polarise la diode en inverse en choisissant $E = -10V$ et $R = 10k\Omega$. Vérifions la linéarité entre le flux lumineux incident et le photocourant inverse. Pour cela, on utilise un laser non polarisé et on fait varier le flux lumineux à l'aide d'un polariseur et d'un analyseur puis on mesure le courant à l'aide d'un voltmètre au borne de la résistance.

Expérience 2 : Linéarité



Conformément à la loi de Malus, le flux lumineux reçu par la photodiode est donné par:

$$\phi(\theta) = \phi_0 \cos^2(\theta + \epsilon) + \phi_{min},$$

où ϕ_{min} est le flux passant avec les polariseurs croisés et ϵ l'erreur de lecture de l'angle à l'origine.

Une méthode pour s'affranchir de l'erreur de lecture est de réaliser 2 mesures, à θ et $-\theta$.

En effet, dans ce cas on obtient : $\frac{\phi(\theta) + \phi(-\theta)}{2} = \phi_0 \cos^2(\theta) + \phi_{min}$.

On mesure $\frac{U(\theta)}{U_0}$ et on vérifie que c'est bien proportionnel à $\cos^2(\theta)$.

Résultats:

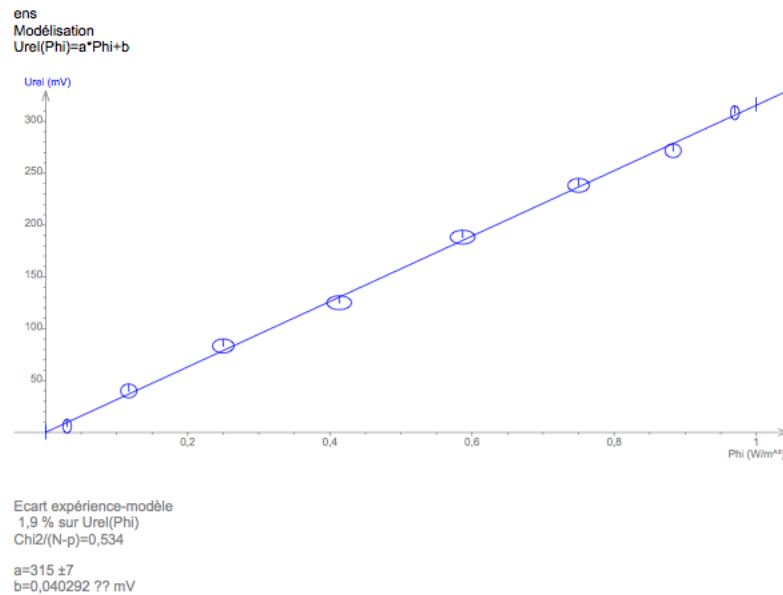


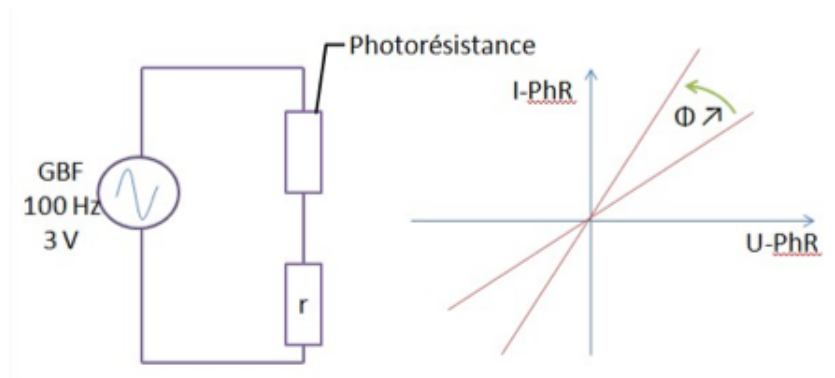
Figure 3: Réponse de la photodiode polarisée en inverse en fonction du flux lumineux

1.2 Photorésistance

Une photorésistance est un composant semi-conducteur dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente. En effet, lorsque le photon incident est suffisamment énergétique (pour permettre au électrons de passer le gap entre la bande de valence et la bande de conduction), il y a production de paires électron-trou, ce qui augmente la conductivité et donc diminue la résistance. La création de paires électron-trou est d'autant plus importante que le flux lumineux est intense. La résistance évolue donc comme l'inverse de l'éclairement, cette relation peut être considérée comme linéaire sur une plage d'utilisation limitée.

Traçons la caractéristique de la photorésistance en utilisant le même montage que pour la photodiode.

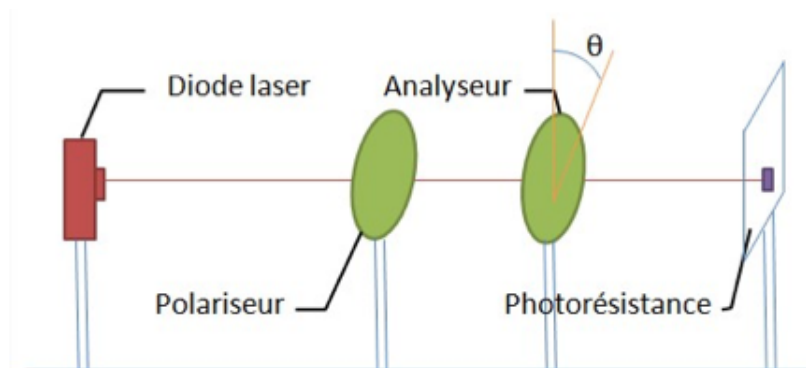
Expérience 3 : Caractéristique de la photorésistance



On voit que la photorésistance se comporte comme un conducteur ohmique (sa caractéristique est une droite) dont la résistance diminue quand le flux incident augmente (pente en $1/R$). La grandeur électrique liée au flux lumineux est dans ce cas la résistance.

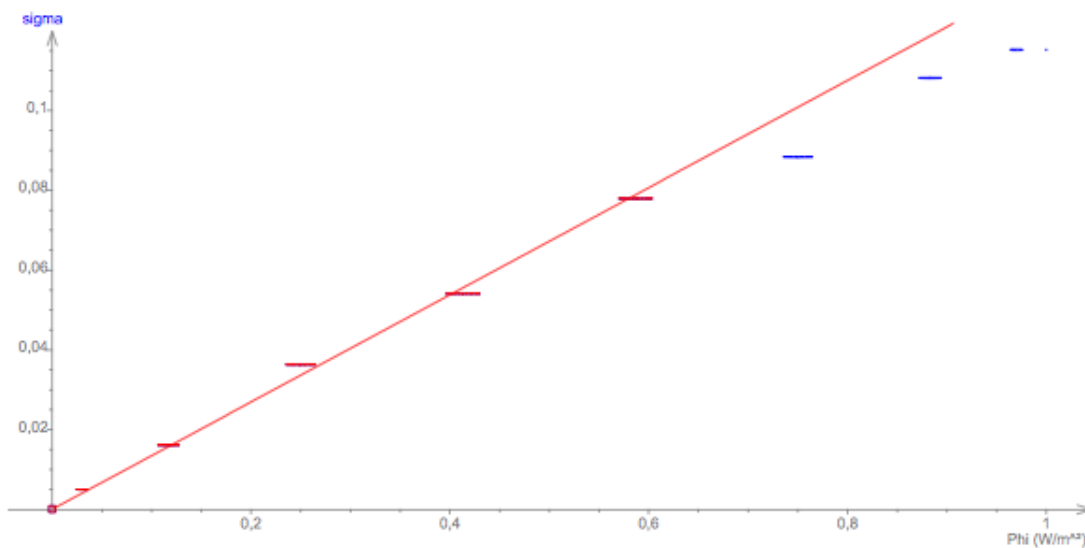
Vérifions la linéarité entre ces 2 grandeurs en procédant de la même manière qu'avec la photodiode mais au lieu de mesurer le courant, on mesure la résistance de la photorésistance à l'ohmètre.

Experiencia 4 : Linéarité de la photorésistance



Résultats:

ens
Modélisation
 $\sigma(\Phi) = a \cdot \Phi + b$



Ecart expérience-modèle
3,2 % sur $\sigma(\Phi)$
 $\chi^2/(N-p) = 0,00$

$a = (134 \pm 8) \cdot 10^{23} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
 $b = (66,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-24}$

Figure 4: Réponse de la photorésistance en fonction du flux lumineux

On montre ici que la photorésistance a une plus faible linéarité pour les fortes intensités. Ce capteur ne sera donc pas utilisé pour juger d'une intensité mais plutôt pour détecter s'il y a ou non de la lumière (capteur tout ou rien).

2 Réponse spectrale

En réalité, la réponse des détecteurs photoniques dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident. La mesure de sensibilité n'est donc valable que pour une longueur d'onde. En connaissant la réponse spectrale, on peut la transposer pour toutes les longueurs d'ondes. Les détecteurs thermiques quant à eux sont par principe indépendants de la longueur d'onde du rayonnement incident (réponse plate).

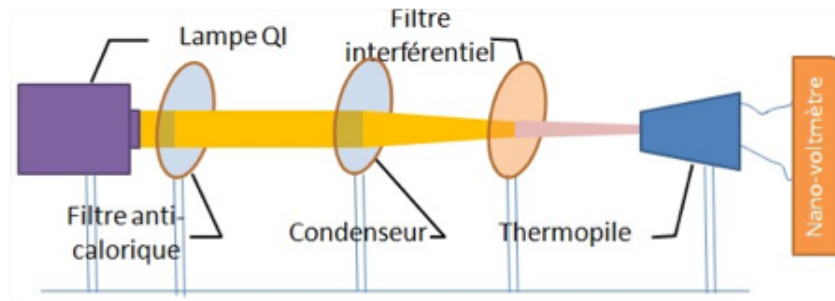
On veut établir ici la réponse spectrale d'une photodiode et d'une photorésistance.

Pour établir la réponse spectrale de nos photorécepteurs, le problème est qu'on ne connaît pas la réponse spectrale de l'ensemble QI + filtre interférentiels. Pour cela, on va normaliser la réponse par rapport à celle de la thermopile qui elle a une réponse plate (détecteur thermique).

La thermopile est constituée de thermocouples en série utilisant l'effet Seebeck. Chacun ayant une de ses jonctions en contact avec l'élément absorbant le rayonnement et l'autre en contact avec le boîtier métallique à la température T_2 de référence. Le rayonnement incident entraîne une élévation de la température de l'élément absorbant. La différence de température entre T_1 et T_2 entraîne un thermocouple que l'on mesure à l'aide d'un nano-voltmètre. L'avantage de la thermopile est qu'elle a une réponse plate comme un corps noir. C'est à dire que $U_{th}(\lambda) = K \times \varphi(\lambda)$ avec K qui est indépendant de la longueur d'onde.

Pour cela, on réalise l'expérience suivante:

Expérience 5 : Réponse spectrale de la photodiode



2.1 Photodiode

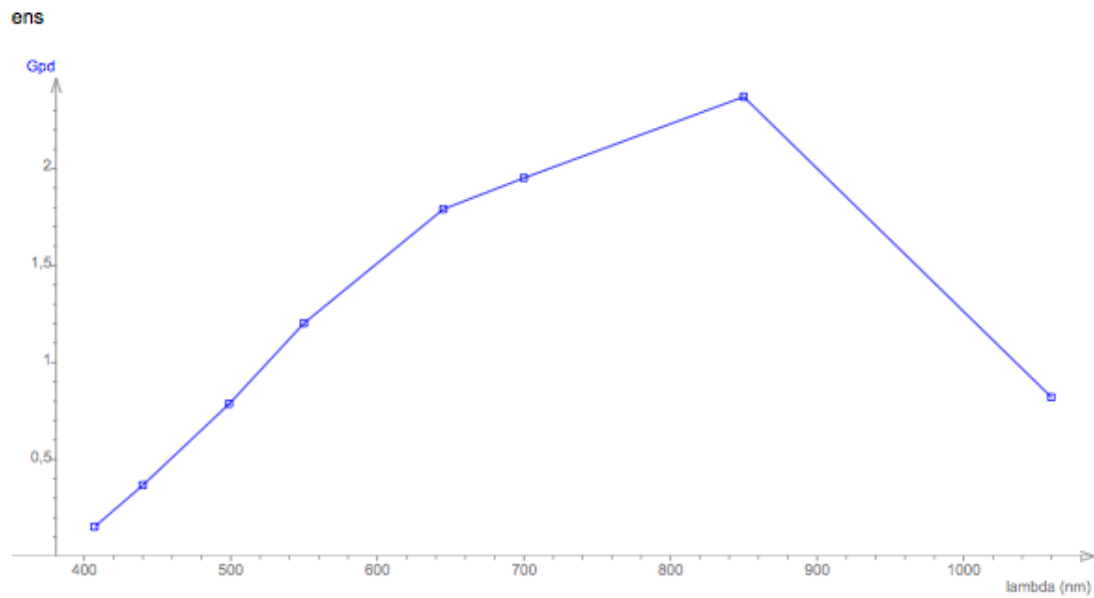


Figure 5: Réponse de la photodiode polarisée en inverse en fonction du flux lumineux

On voit que le maximum de sensibilité de la photodiode est dans l'infrarouge. Elle peut très bien servir de détecteur de signal envoyé par une télécommande par exemple.

2.2 Photorésistance

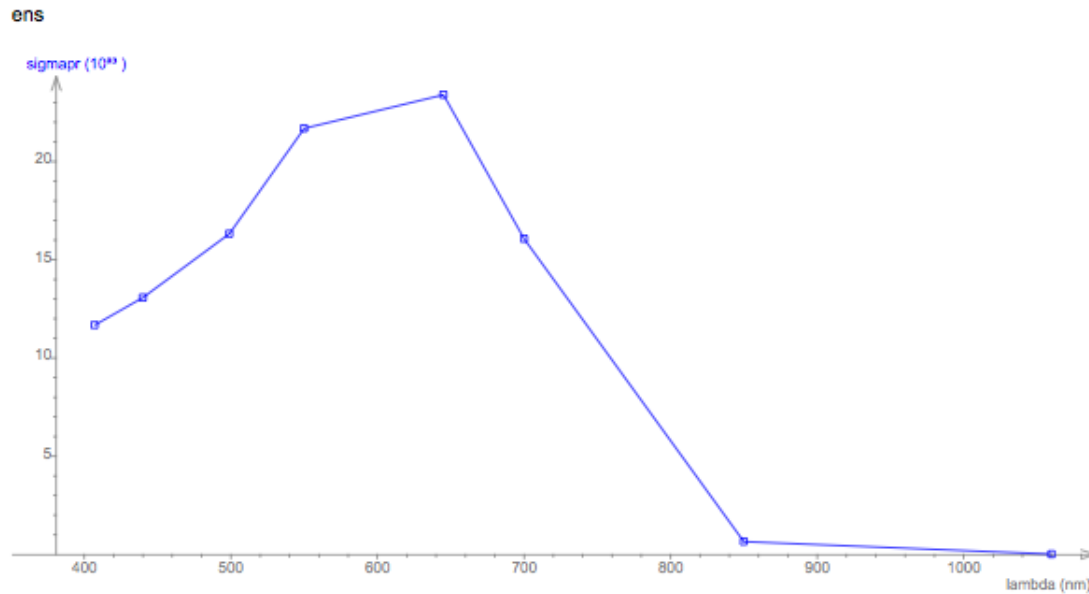


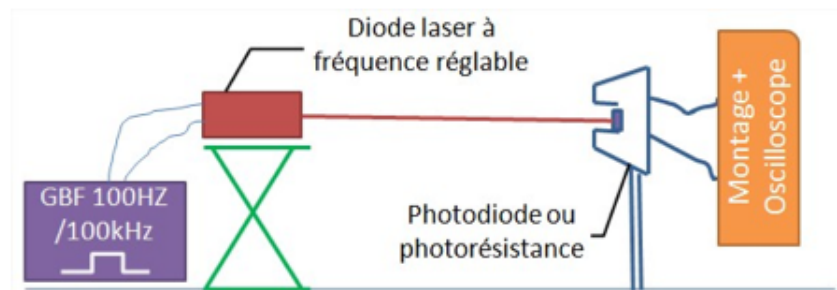
Figure 6: Réponse de la photorésistance en fonction du flux lumineux

La photorésistance est le plus sensible dans le rouge.

3 Temps de réponse

Dans cette partie, nous nous intéressons au temps de réponse de nos photorécepteurs. Pour cela, on alimente une diode laser à fréquence réglable à l'aide d'un GBF (signal créneau) et on s'intéresse à la réponse de la diode (ici le photocourant inverse mesuré aux bornes de la résistance). On augmente la fréquence du GBF jusqu'à ce que le signal commence à se déformer, c'est à dire qu'il ne "voit" plus les crêteaux envoyés par la diode laser.

Experience 6 : Temps de réponse



On mesure le temps de chute à l'oscilloscope pour obtenir le temps de réponse.

3.1 Photodiode

On observe une décroissance exponentielle qui est due à l'effet capacitif de la jonction PN de la photodiode qui dépend de la polarisation (C diminue quand E augmente) et de la largeur de la ZCE. On observe un temps de réponse de l'ordre de plusieurs centaines de nanosecondes qui est idéal pour les utilisations technologiques de précision ou pour le traitement numérique.

3.2 Photorésistance

On observe un temps de réponse de l'ordre de la milliseconde. Ce résultat est donc médiocre pour une utilisation de précision mais convient tout à fait pour de nombreuses applications, comme par exemple les détecteurs de lumière ou de présence.