

MP14 - Photorécepteurs.

Gauthier ROUSSEAU & Emmanuel LOMBARD

2012/2013

Références

- [1] Bellier. *Montage de physique, pour l'idée de la télécommande et la compréhension des photodiodes et photorésistances*. 2004.
- [2] Dufait. *Épreuves d'Optique - Agrégation de Sciences Physiques*. 1997.
- [3] Sextant. *Optique expérimentale*. 1997.

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 éclairage d'intensité variable peut s'obtenir en utilisant deux polariseurs conformément à la loi de Malus.

Table des matières

1	Introduction [1]	2
2	Comparaison d'une Photodiode avec une photorésistance [2] [3]	2
2.1	Caractéristique et linéarité d'une Photodiode	2
2.2	Caractéristique et linéarité d'une Photorésistance	4
3	Réponse spectrale de la photodiode [2] [3]	5
4	Temps de réponse [2] [3]	6
4.1	Photorésistance	6
4.2	Photodiode	7
5	Conclusion	8

Préambule

Ce montage reprend en grande partie le montage de 2011/2012 qui a été particulièrement bien réfléchi et qui a eu de très bonnes critiques en correction. Merci à eux !

1 Introduction [1]

Dans ce montage nous allons nous intéresser aux photorécepteurs. Les photorécepteurs sont des systèmes capables de détecter la lumière du visible et proche visible (UV et Infrarouges). De ce fait, un œil est un photorécepteur car il est capable de détecter la lumière par des molécules et de transmettre l'information au cerveau.

Ici nous allons nous intéresser spécifiquement aux photorécepteurs électroniques couramment utilisés lors d'expériences en physique. Un photorécepteur que vous avez sûrement souvent rencontré est le récepteur de télécommande de votre télévision ou de votre chaîne-hifi. En effet, la télécommande envoie un signal sous forme de créneaux très court (de l'ordre de la centaine de μs en proche infrarouge que le photorécepteur va devoir lire pour changer de chaîne. Le but de ce montage va être de comparer différents photorécepteurs afin de comprendre quel est celui qui est le plus adapté à la réception du signal de télécommande. Il existe 2 types principaux de photorécepteurs : les photoniques (qui sont sensibles directement aux photons qui arrivent sur le capteur : les photodiodes et les photorésistances) et les thermiques (qui sont sensibles à l'élévation de la température due au rayonnement incident : la thermopile).

Dans un but d'être le plus large possible nous allons comparer ces trois photorécepteurs afin de caractériser leur linéarité, réponse spectrale, temps de réponse.

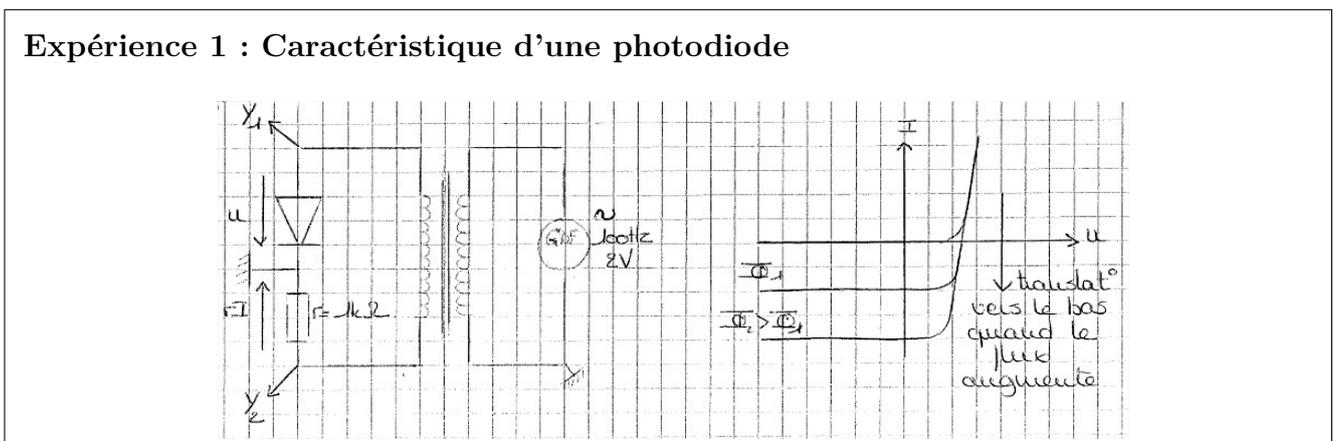
2 Comparaison d'une Photodiode avec une photorésistance [2] [3]

2.1 Caractéristique et linéarité d'une Photodiode

On rappelle succinctement ce qu'est une photodiode (une jonction de semiconducteur dopé P et N). Lorsqu'un électron est absorbé au niveau de la Zone de Charge d'Espace (ZCE) une paire d'électron/trou est créée. L'électron se déplace de P vers N ce qui implique la création d'un photocourant $I_p h$ dans le circuit.

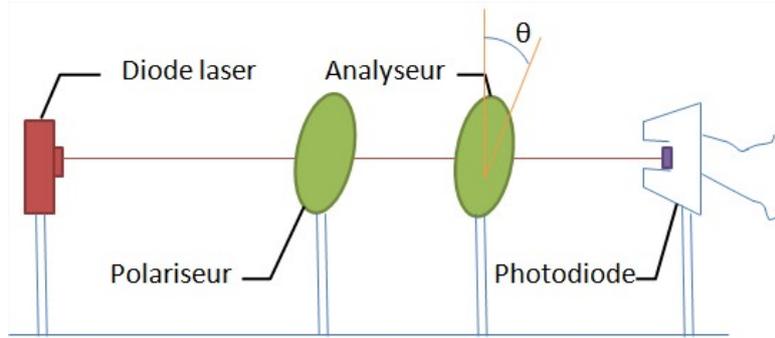
Une photodiode est donc la somme d'une diode et d'un générateur de courant (effet photoélectrique). L'expression mathématique de sa caractéristique est :

$$I_d = I_s \times (e^{\frac{eV_d}{kBT}} - 1) - I_{ph}$$



On trace directement la caractéristique (inverser Y). En se plaçant en mode XY. Au début on ne met pas de lumière sur la photodiode (on cache) puis on en rajoute de plus en plus. Ensuite il faut évaluer la droite de charge, pour cela il faut se placer sur l'évolution linéaire de la diode. On met le générateur en mode continu en tension négative, puis on observe ce qui se passe pour des résistances différentes et des luminosités différentes. On voit que fixer les paramètres $E = -2,5V$ et $R = 5k\Omega$ permet de nous placer dans la portion inverse de la caractéristique.

Expérience 2 : Linéarité. C'est une manip qualitative. Le but de l'expérience est d'utiliser la loi de Malus pour faire varier l'intensité lumineuse incidente sur la photodiode et visualiser la tension aux bornes de la résistance .



On utilise une diode laser de longueur d'onde = 650 nm. L'intérêt de la diode laser est d'avoir une longueur d'onde fixe (pour pouvoir calculer un rendement quantique). La diode est déjà partiellement polarisée mais il faut tout de même ajouter un polariseur pour améliorer la polarisation.

Loi de Malus : $\phi_0(\theta) = \phi_0 \cos^2(\theta + \epsilon) + \phi_{min}$ Où ϕ_{min} le flux passant avec les polariseurs croisés et ϵ est l'erreur de la lecture de l'angle à l'origine. Pour s'affranchir de cette erreur il faut réaliser une mesure à $-\theta$ et à $+\theta$.

Cela donne la formule : $\frac{\phi(-\theta) + \phi(+\theta)}{2} = I_0 \cos^2(\theta) + \phi_{min}$

On mesure U_R et on veut voir si $U_{PhD}(\theta) \propto \phi(\theta)$.

On effectue en LIVE deux mesures et surtout il faut mesurer U_0 en LIVE pour pouvoir faire une mesure relative (condition en labo pas les même que les conditions en LIVE).

D'où un calcul finale (à faire avec Regressi). $\frac{U(\theta)}{U_0}$ à comparer à $\cos^2 \theta$ que l'on considère proportionnelle au flux incident.

Mesures :

		$U_0 =$	\pm	
$\frac{U(-\theta_1)}{U_0} =$	\pm	$\frac{U(+\theta_1)}{U_0} =$	\pm	Moyenne = \pm
$\frac{U(-\theta_2)}{U_0} =$	\pm	$\frac{U(+\theta_2)}{U_0} =$	\pm	Moyenne = \pm

montrer que nos mesures en LIVE collent bien avec les mesures effectuées en préparation.

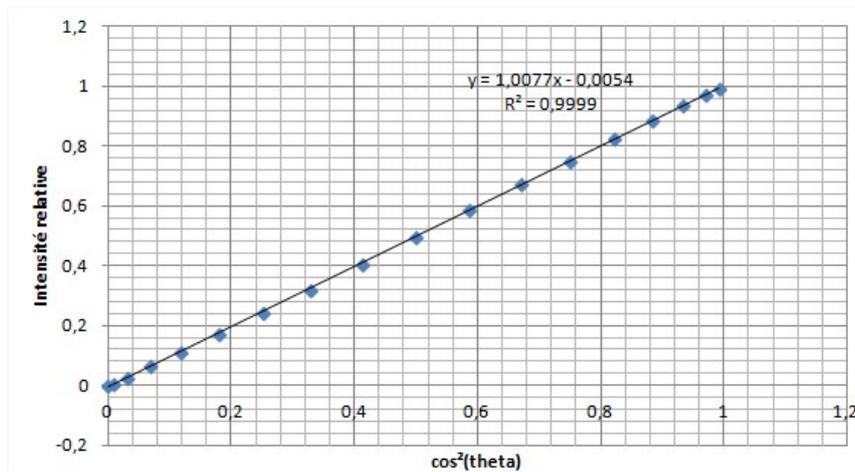


FIGURE 1 – Allure de l'intensité relative en fonction de $\cos^2\theta$

Expérience 3 : Rendement quantique avec le puissance-mètre : l'intérêt de la diode laser est de pouvoir calculer un rendement quantique. On utilise le puissance-mètre pour laser de marque Thorlabs avec interface sur ordi (précision constructeur : 3%). Le rendement quantique η se calcule de la sorte :

$$\eta = \frac{\text{nombre d'électrons générés}}{\text{nombre de photons incidents}} = \frac{I/e}{P\lambda/hc}$$

Où P est la Puissance reçue par le puissance-mètre, $I = U/R$ est l'intensité circulant dans la résistance, λ est la longueur d'onde du laser, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Mesures :

$$\begin{aligned} P &= \pm \\ I &= \pm \\ \lambda &= \pm \\ \text{On trouve } \eta &= \pm \end{aligned}$$

Incertitude : les mesure de puissance et d'intensité étant indépendante on peut utiliser la formule :

$$\Delta\eta = \eta \times \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2}$$

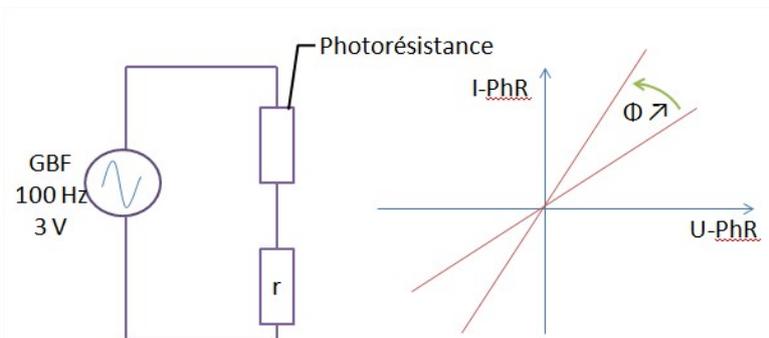
Lorsque la photodiode n'est pas polarisée, on dit qu'elle est en mode photopile : c'est le principe des panneau solaire photovoltaïque. (PS : nous n'avons pas fait les expériences dans ce mode car il n'est pas linéaire). Montre le panneau solaire.

2.2 Caractéristique et linéarité d'une Photorésistance

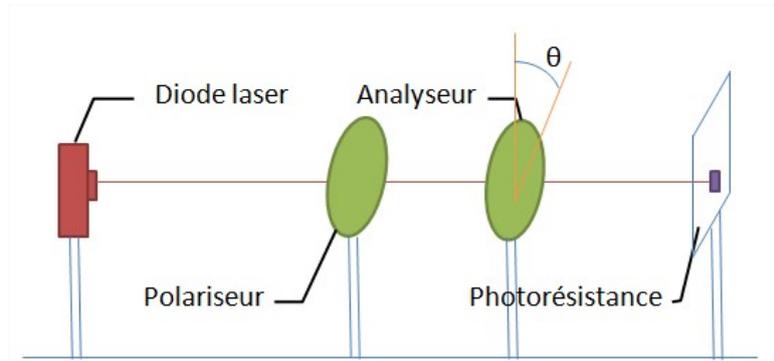
La photorésistance est constituée d'un seul semi-conducteur. L'arrivée des photons avec suffisamment d'énergie permet d'exciter les électrons et de le permettre de passer le gap entre la bande de Valence et la bande de conduction ce qui diminue la résistance.

On effectue les mêmes expériences que pour la photodiode pour tracer la caractéristique et donner la linéarité de la photorésistance.

Expérience 4 : Caractéristique de la photorésistance



Expérience 5 : Linéarité de la photorésistance même montage que précédemment, la seule différence est que pour mesurer l'effet on mesure la résistance la photorésistance à l'ohmmètre .



On montre ici que la photorésistance à 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 sur les lumières de jardin par exemple)

3 Réponse spectrale de la photodiode [2] [3]

Revenons à la télécommande qui envoi dans l'infrarouge et pour laquelle on veut trouver le photorécepteurs parfait. Est-ce que la photodiode étudiée réceptionne le proche infrarouge ? Pour cela il faut étudier la réponse spectrale.

Il faut comparer l'intensité reçu à la puissance émise réellement pour des longueurs d'onde données. Il faut pour cela utiliser une autre capteur : la thermopile.

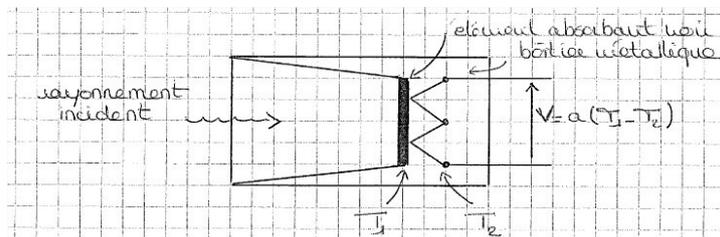


FIGURE 2 – Thermopile

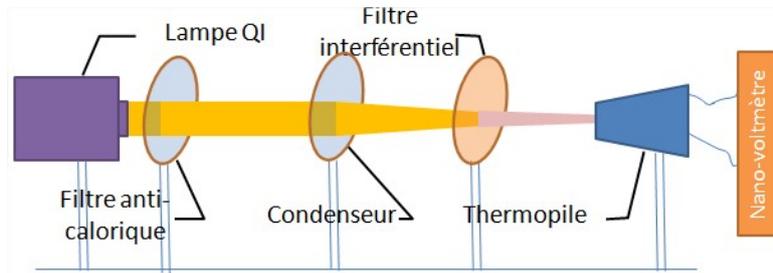
La thermopile est constituée de thermocouples en série utilisant l'effet Seebeck. Chacun ayant une de ses jonctions en contact avec l'élément absorbant le rayonnement et l'autre en contact avec le boîtier métallique à la température T_2 de référence.

Le rayonnement incident entraine une élévation de la température de l'élément absorbant. La différence de température entre T_1 et T_2 entraine 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 $U_{th}(\lambda) = K \times \phi(\lambda)$ avec K qui est indépendant de la longueur d'onde.

Précision de la bécane : $0.016\text{mV}/\mu\text{W}$.

Expérience 6 : Réponse spectrale Matériel : filtres interférentiels, lampe quartz iode, nano-voltmètre, regressi. On va donc chercher à tracer $S(\lambda) = \frac{U_{th(\lambda)}}{U_{th(\lambda)}}$ en comparant le flux réellement émis (mesuré par la thermopile) et la réponse de la photodiode pour différentes longueur d'onde.



La manipulation dépend fortement de la manière dont on focalise la lumière. Obtenir une allure est très délicat et nécessite de replacer la photodiode et la thermopile exactement au même endroit.

En préparation on a déjà fait tous les points. On choisit d'en refaire un pour :

$\lambda =$ On trouve $U_{th} =$ \pm

Au même emplacement on positionne la photo-diode et on trouve :

$U_{PhD} =$ \pm

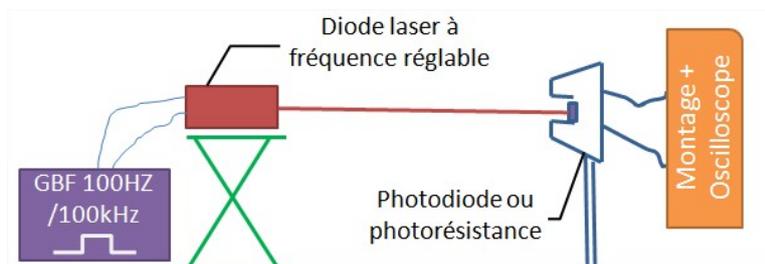
$\frac{U_{th(\lambda)}}{U_{th(\lambda)}} =$ \pm

Pour que cette valeur ait un sens en LIVE il faut la faire en relatif à la puissance reçue sans filtre (pas de problème à priori le jour de l'oral) La photodiode est plus sensible vers le rouge : les photons de plus faible énergie pénètre plus loin dans la jonction et sont absorbés plus proche de la ZCE.

La photodiode est donc adapté à la télécommande car elle est sensible aux infrarouges, reste à savoir si le temps de réponse est bon pour pouvoir détecter le signal (de l'ordre de la centaine de μs)

4 Temps de réponse [2] [3]

Expérience 7 : Temps de réponse Matériel : GBF qui permet de fixer la fréquence de "clignotement" de la diode laser, Oscilloscope, montage du début, Photodiode ou photorésistance.



On utilise la diode laser à fréquence d'émission réglable par un GBF en crénaux que l'on dirige en premier lieu sur la photorésistance puis sur la photodiode pour visualiser leurs réponse sur oscilloscope.

4.1 Photorésistance

On observe un temps de réponse de l'ordre de la milliseconde ce qui ne permettra pas de lire le signal de la télécommande (fréquence de l'ordre de 100 μs). Ce résultat est donc médiocre pour une utilisation de précision mais convient tout à fait pour de nombreuses applications. Par exemple les détecteurs de lumière ou de présence.

4.2 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.

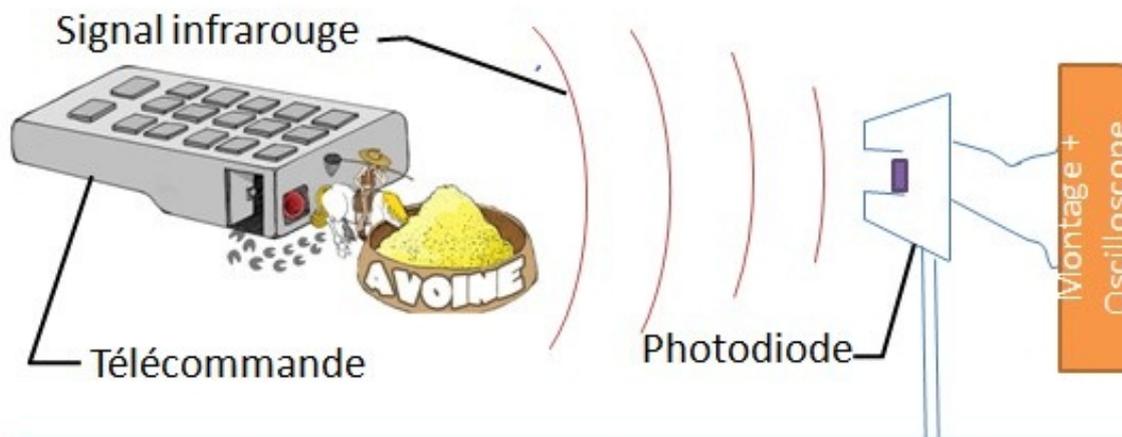
On observe un temps de réponse de l'ordre de plusieurs centaines de nanosecondes qui est idéal pour les utilisations technologiques de précision ou pour le traitement numérique.

On peut utiliser cette manip pour mesurer la capacité d'une jonction PN mais nous le ferons sûrement pas, par manque de temps (voir montage 2011/2012)

Le signal de la télécommande

Comme nous l'avons déjà dit le capteur de télécommande doit être capable de détecter un signal créneaux sur lequel va être inscrit l'information à traiter (signal binaire interprété par l'appareil pour réaliser une action, changer de chaîne par exemple)

Expérience 8 : Télécommande Matériel : télécommande, oscilloscope, montage du début, Photodiode . IL faut mettre la télécommande le plus près possible de la photodiode. On règle le trigger de l'oscillo pour qu'il se déclenche lorsque le signal est reçu.



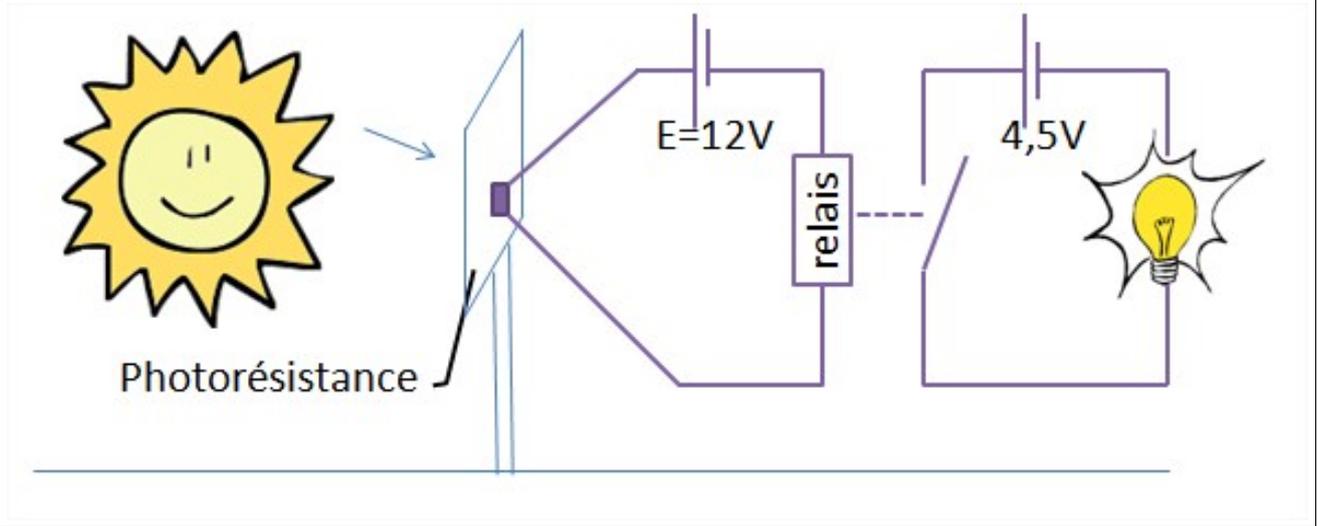
5 Conclusion

bilan

	Photorésistance	Photodiode	Thermorésistance
linéarité	moyen	bonne	à tester
temps de réponse	de l'ordre de la <i>ms</i>	de l'ordre de la <i>μs</i>	mauvais + de 5 secondes
réponse spectrale	Visible et Infrarouge	Visible et Infrarouge	plate
Encombrement	Faible	faible	+ important
Prix	le moins cher	abordable	Cher
Utilisation	Optique de pointe + photovoltaïque	Automatisme (détecteur de présence)	mesure de puissance d'un rayonnement

Après avoir rempli le tableau montrer cette manip de fin s'il y a encore un peu de temps.

Expérience 9 : Détecteur de lumière Matériel : Relais, pile + ampoule, alim continue 12V, photorésistance . Lorsque la photorésistance n'est pas éclairé R est grand, l'intensité est faible et le relais ne bascule pas, la lampe est allumée. Dès que l'on atteint le courant de basculement on éteint la lampe.



A noter que nous avons testé des détecteurs particuliers. Il faudrait des heures et des heures pour avoir un aperçu de l'ensemble des photodétecteurs. Certains ont des réponses encore + rapides, d'autres répondent que sur des gammes très réduites de longueur d'onde et d'autres encore sont bien plus complexes. C'est le cas par exemple des capteurs CCD.

On aurait pu parler des capteurs CCD ou des panneaux solaires mais il reste trop peu de temps après avoir parlé des propriétés fondamentales.