

La Photodiode : du composant au capteur optique

ELECTRONIQUE POUR LE TRAITEMENT DE L'INFORMATION
TRAVAUX PRATIQUES

Denis Brac & Eric Magnan
G3B11

Nous attestons que ce travail est original, que nous citons en référence toutes les sources utilisées et qu'il ne comporte pas de plagiat.

1 Caractéristiques des photodiodes

Durant les quatre séances de TP nous nous sommes intéressés aux photodiodes. On propose dans un premier temps d'en décrire les principales caractéristiques avant de s'intéresser aux applications fréquentes des photodiodes.

Généralités

La photodiode est une diode particulière, et donc un dipôle non symétrique. Par conséquent, les lois habituelles utilisées dans les circuits linéaires ne s'appliquent pas avec ce genre de composants.

De plus il s'agit d'un composant capable de capter un signal lumineux et de le transformer en signal électrique. Ce type de composant est réalisé à l'aide d'un semi-conducteur (jonction P-N) pour lequel les photons absorbés permettent le déplacement des électrons entre les deux couches.

On définit ainsi le rendement quantique :

$$\eta = \frac{\text{électron fournis}}{\text{photons absorbés}}$$

On introduit également la sensibilité spectrale, grandeur qui quantifie le rapport entre courant produit par la photodiode et l'intensité lumineuse qu'elle a reçue. Ce paramètre se mesure en $A.W^{-1}$ et dépend fondamentalement de la longueur d'onde.

$$S_\lambda = \frac{\text{Courant produit}}{\text{Intensité lumineuse reçue}} = \frac{n_{e-} \cdot \frac{q}{t}}{n_{photon} \cdot \frac{hc}{\lambda}} = \frac{\eta q \lambda}{hc}$$

Pour la *SFH206K*, $\eta \approx 90\%$ et $S_\lambda = 0,67 A.W^{-1}$ pour $\lambda_{max} = 850 nm$.

Dimensions

Pour évaluer les dimensions d'une diode, on s'intéresse en général à deux paramètres :

- La surface du capteur.
- L'angle solide définissant la zone sensible.

En particulier, la géométrie de la résine époxy transparente qui entoure le capteur exerce une large influence sur l'angle solide qui définit la zone sensible.

Les dimensions des photodiodes sont très variables et la surface du semi-conducteur (capteur) est directement reliée au temps de réponse du composant¹. On notera par exemple que la *SHF206K* a un capteur de surface $S = 7,0 mm^2$ et un angle solide $\alpha = 120^\circ$, tandis que les photodiodes utilisées dans le panneau solaire *AM-5308CAR-SCE* (*Sanyo*), ont plutôt des dimensions de l'ordre de $L \times l = 45 \times 15 mm^2$.

Caractéristiques statiques

Comme les autres diodes, les photodiodes peuvent être modélisées comme l'association en série d'une diode parfaite et d'une résistance. Un montage alimenté par un Générateur Basse Fréquence permet d'observer la modification de la caractéristique de la photodiode lorsqu'on l'éclaire. On observe alors un abaissement de la caractéristique : la photodiode se comporte comme fournit un courant. En effet, si la photodiode est polarisée en inverse, on se situe

¹Résultats présentés dans le cours de H.Benisty, «Les Diodes».

dans le cadran «capteur», où $\mathcal{I} < 0$ et $\mathcal{U} < 0$.

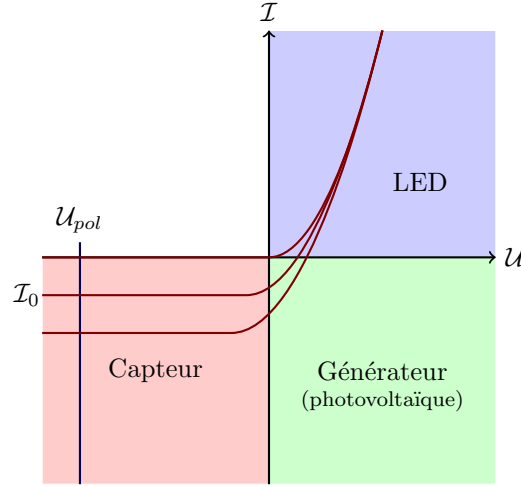


FIG. 1 – Caractéristique d'une photodiode

Néanmoins, on ne peut pas se permettre de mettre une tension inverse trop grande car la photodiode est limitante. En effet, la caractéristique réelle a pour profil :

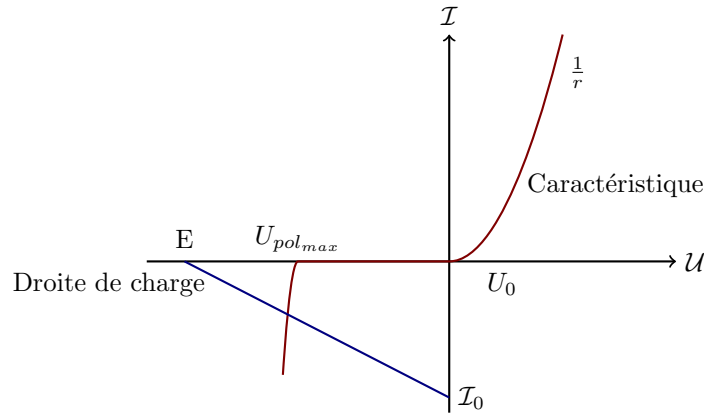


FIG. 2 – Caractéristique d'une photodiode

Le point de fonctionnement se situe au niveau de l'intersection entre la droite de charge et la caractéristique de la diode. La photodiode est donc limitée en puissance. Cela justifie également la nécessité de faire intervenir un générateur pour se situer dans les cadrans 2 et 4, alors que le cadran 3 fonctionne très bien sans.

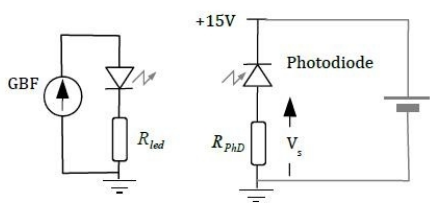
2 Photodiodes utilisées comme photodétecteurs

Mesure de la bande passante

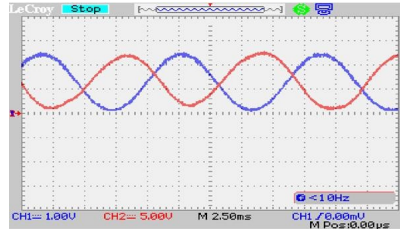
Le montage utilisant une photodiode polarisée en inverse comme photodétecteur permet d'étudier la rapidité du capteur, c'est-à-dire sa bande passante. On utilise une tension d'offset de manière à ce que le courant passe dans le bon sens dans la LED (sinon, elle serait éteinte au moins la moitié du temps). Expérimentalement, on obtient comme résultat de la superposition de la tension délivrée en entrée (bleu) et de celle reçue en sortie (rouge) :

En utilisant le balayage en fréquence du GBF, on peut repérer rapidement la bande passante. Le signal de sortie s'atténue pour les hautes fréquences c'est donc un filtre passe-bas. On regarde alors la valeur de la tension maximale en sortie pour une faible fréquence, puis on divise cette valeur par $\sqrt{2}$ et on augmente la fréquence jusqu'à ce que notre maximum atteigne cette valeur. On relève ainsi la valeur de la bande passante à -3 dB . En répétant la manipulation avec des valeurs de R_{PD} , on remarque que la bande passante diminue avec l'augmentation de la résistance de charge. On peut comprendre ce phénomène en modélisant la photodiode comme une source de courant en parallèle avec une capacité parasite C_p . On a alors :

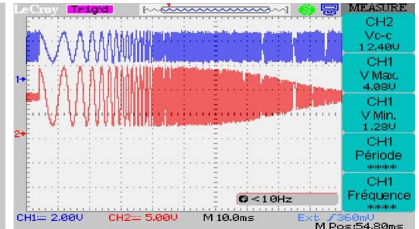
$$V_s = \frac{R}{1 + jRC_p\omega} \text{ et } f_0 = \frac{1}{2\pi RC_p}$$



(a) Montage de mesure de la bande passante



(b) Réponse en fréquence de la diode



(c) Observation rapide du type de filtre

La fréquence f_0 est inversement proportionnelle à R .

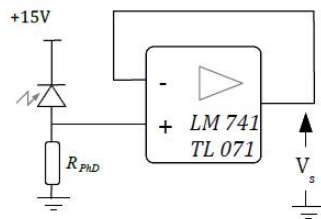
La présence d'un câble coaxial peut se modéliser par le rajout d'une capacité en dérivation. On a alors :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R(C_p + C^*)} \text{ avec } C^* \text{ la capacité du câble coaxial}$$

De plus, $C_p + C^* = 120 \text{ pF}$, donc $C_p = 120 - 110 = 10 \text{ pF}$ (valeur très proche de la documentation qui nous donne 15 pF).

Montage circuit suiveur

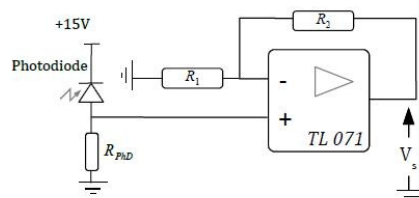
Un montage suivant équipé d'un amplificateur opérationnel permet d'éviter l'influence de la capacité linéique des câbles coaxiaux. On s'intéresse ici au *slew-rate* qui définit la vitesse maximale de variation de la tension dans l'amplificateur. Le signal de sortie est déformé car la tension varie trop vite par rapport au *slew-rate* de l'amplificateur *LM-741* ($0,5 \text{ V.ms}^{-1}$). On obtient alors un signal triangulaire et la pente du triangle correspond à la valeur du *slew-rate*.



(d) Montage suiveur

On peut alors remplacer le *LM-741* par un *TL-071* (de *slew-rate* 16 V.ms^{-1}) et on s'aperçoit alors que le signal n'est pas déformé (sinusoidal) car la variation de la tension par rapport au temps ne dépasse pas la valeur du *slew-rate*. On calcule de nouveau la capacité parasite et on obtient $C_p = 16,9 \text{ pF}$.

Montage amplificateur de tension



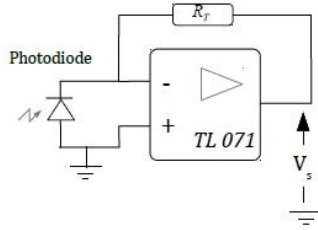
(e) Montage amplificateur de tension

On choisit $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$ de manière à obtenir un gain de 10. On mesure une bande passante de 333 kHz , ce qui paraît plutôt élevé. En balayant la fréquence, on observe un filtre passe-bas ayant une résonance assez élevée. La bande passante de ce filtre est beaucoup plus fine.

Montage transimpédance

Etudions un autre montage pour améliorer la sensibilité et la bande passante.

La tension de polarisation de la photodiode est nulle et cela correspond à une capacité parasite de 72 pF . Dans ce montage, $V_s = iR_T$ donc R_T et R_{phD} des précédents montages ont exactement le même rôle. Pour $R_T = 100 \text{ }\Omega$, on

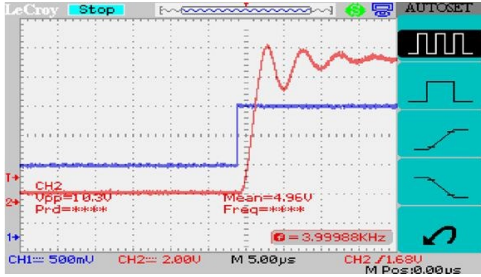


(f) Montage trans-impédance

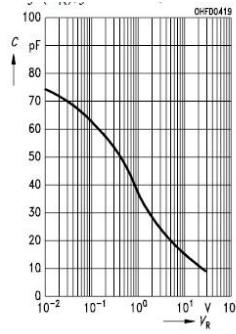
observe une résonance à 176 kHz : la tension atteint 15 V d'amplitude. C'est le phénomène de *gain peaking*. On a également :

$$f_{peak} = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_T C_p}}$$

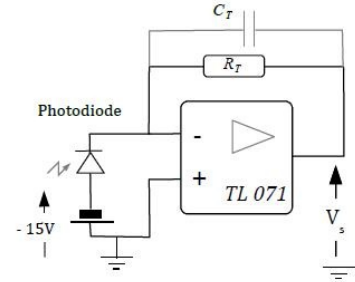
Sur des signaux non sinusoïdaux, ce phénomène peut être gênant. Par exemple, la réponse d'un signal carré est déformée au niveau du saut de tension (*Fig. (g)*).



(g) Montage amplificateur de tension



(h) $C_p = f(V_{pol})$



(i) Montage de mesure de la bande passante

Le document (h) provient de la fiche technique «Silicon PIN Photodiode, SFH 206 K», distribuée gratuitement par **OSRAM Opto Semiconductors** sur leur catalogue en ligne : (www.catalog.osram-os.com).

Il est donc judicieux de polariser la photodiode avec une tension de 15V ce qui nous donne $C_p = 10 \text{ pF}$.

On peut également rajouter une capacité C_T de quelques pF comme cela est représenté sur le document (i). On limite alors la résonance.

3 Photodiodes utilisées pour le photovoltaïque

En moyenne, la surface de la Terre reçoit un rayonnement lumineux de la part du Soleil de l'ordre de 1kW.m^{-1} . Dans la mesure où l'énergie traditionnelle est non renouvelable et difficile à transporter, l'utilisation de ce rayonnement est une alternative qu'il convient de prendre en compte.

Les enjeux principaux d'une telle ressource sont d'une part l'optimisation du rendement, et d'autre part l'adaptation du panneau solaire à la demande en énergie (à puissance égale, préfère-t-on une grande tension ou une grande intensité?).

Propriétés des photodiodes utilisées dans le photovoltaïque

Dans le cadre de notre expérience, nous nous sommes intéressés à un petit panneau solaire comportant trois photodiodes, le modèle *AM-5308CAR-SCE* de marque *Sanyo*.

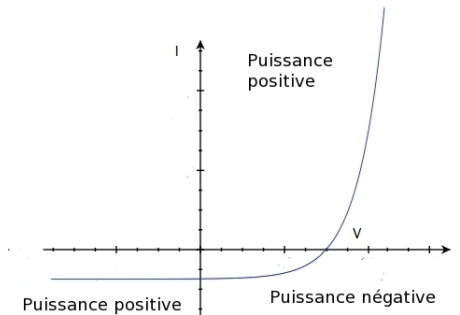
D'une puissance maximale $P_{max} = 117\text{mW}$ (laquelle correspond à une tension délivrée $U_{P_{max}} = 1,9\text{V}$ et une intensité $I_{P_{max}} = 61,3\text{mA}$), cette cellule constitue un exemple typique des composants qui sont assemblés dans de grands panneaux solaires.

Un calcul de rendement indique réalisé à partir des dimension de la cellule indique :

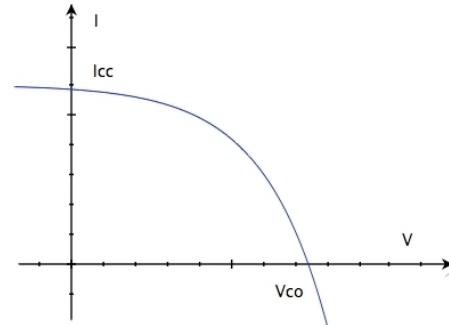
$$\eta_{max} = 53\%$$

Caractéristique et point de fonctionnement des cellules photoélectriques

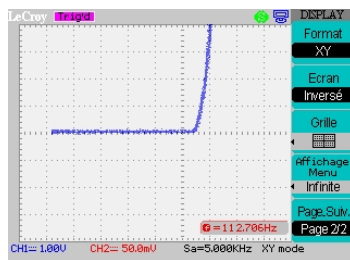
Les diodes ont une caractéristique passant par trois cadrans du plan (I, U) . Par conséquent, il en existe au moins un pour lequel la puissance électrique est négative et le composant est actif. De fait, lorsqu'on éclaire la photodiode, la caractéristique «descend» : Un courant est créé. Dans ce cas, on retourne la caractéristique pour observer la tension et l'intensité en positif (on passe en convention générateur).



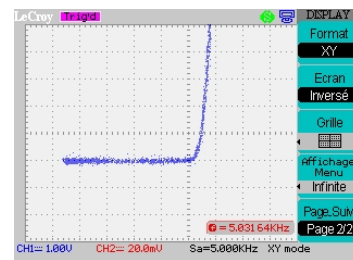
(j) Caractéristique d'une diode usuelle



(k) Caractéristique d'une diode en convention générateur

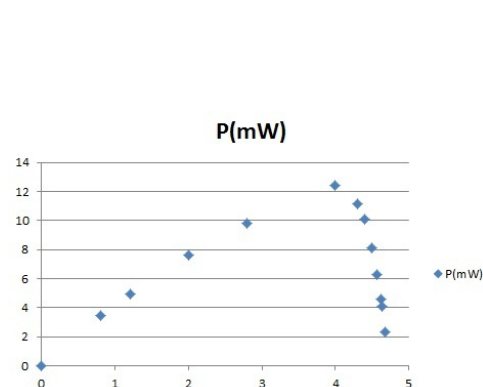


(l) Caractéristique de la cellule à l'ombre

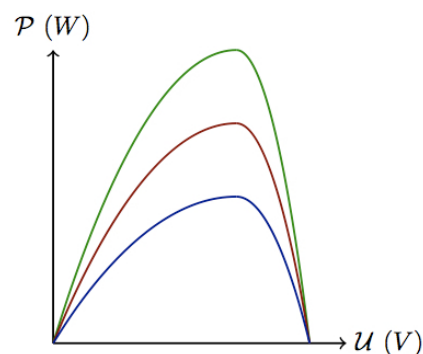


(m) Caractéristique de la cellule éclairée

Bilan énergétique



(n) Courbe expérimentale de la puissance délivrée par la photodiode

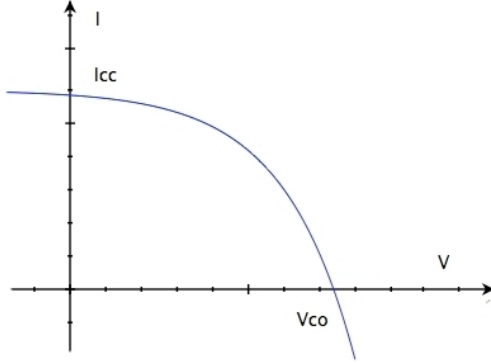


(o) Puissances pour différents éclairagements

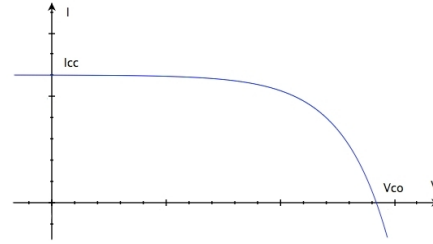
D'un point de vue énergétique, les courbes de puissance ont une allure assez étroite : il est donc difficile d'atteindre la puissance optimale et on tombe très facilement vers des puissances très médiocres. En pratique, le point de puissance optimale ne varie pas avec l'éclairage (cf. (o)), donc il est relativement facile de trouver la résistance qu'il faudrait choisir pour être au maximum de la puissance. Malheureusement, on cherche rarement à dissiper toute l'énergie électrique en Effet Joules !

Pour essayer de se rapprocher du maximum de puissance on utilise la méthode de *Maximum Power Point Tracking*. Développée pour les systèmes de production d'énergie dont la puissance dépend de la charge, il s'agit d'un système que l'on insère entre le panneau solaire et le circuit. Le composant opère par tâtonnements jusqu'à trouver le maximum de puissance².

Association en série



(p) Caractéristique d'une cellule photovoltaïque



(q) Caractéristique du dipôle équivalent à une association en série de deux panneaux solaires

On s'intéresse maintenant à l'association en série de deux panneaux solaires. Le but est d'augmenter la surface exposée au rayonnement lumineux et d'obtenir ainsi une plus grande puissance en sortie.

Lorsqu'on se place au maximum en puissance, on mesure $V_{CO} = 4,6V$ et $I_{CC} = 4,6mA$. On en déduit que I_{CC} n'est pas modifié par l'adjonction de deux panneaux, mais que V_{CO} est multiplié par deux.

Lorsqu'on occulte l'un des panneaux, le courant et la tension chutent brutalement et deviennent nuls. De même, si une seule photodiode est masquée, le courant et l'intensité sont divisés par deux.

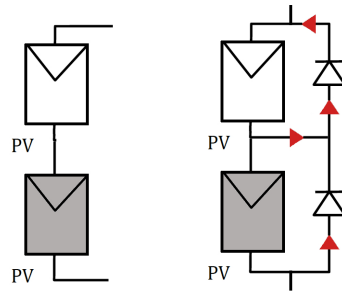


FIG. 3 – Diodes en série avec et sans diodes de *by-pass*

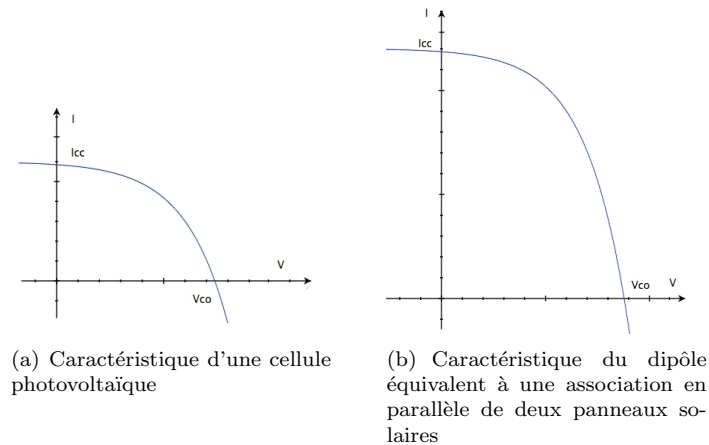
Sur le circuit de gauche, la cellule grisée n'est pas éclairée : elle est bloquante pour le reste du circuit. En conséquence, l'intensité est nulle à travers tout le circuit et aucun courant ne peut être récupéré. On en déduit qu'un tel montage n'est pas adapté à une situation réelle : La plupart du temps, les panneaux solaires ne sont pas uniformément éclairés et pourtant, on souhaite quand même récupérer de l'énergie. On utilise donc des diodes de *by-pass* qui doivent permettre d'annuler cet effet. De fait, si l'une des cellules n'est pas uniformément éclairée, le courant issu des autres cellules peut tout de même traverser le circuit. Les diodes de *by-pass* permettent donc de compenser parfaitement le problème des ombres.

Association en parallèle

De manière analogue à un montage en série, il est possible d'associer les panneaux solaires en parallèle. La caractéristique du dipôle résultant en est alors modifiée. Cette fois-ci, l'intensité augmente et la tension reste identique.

²D'après le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Instrumentation (<http://sites-final.uclouvain.be/elec/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/MPPT/MPPT/Situation.htm>).

On peut donc envisager un générateur équivalent fournissant une bonne intensité (de l'ordre de 60 mA pour deux panneaux). En particulier, ceci peut-être utile pour charger des batteries telles que les accumulateurs Ni-MH ou Ni-Cd.



Bilan

Les photodiodes utilisées pour le photovoltaïque diffèrent fondamentalement des autres diodes puisqu'elles sont utilisées en tant que générateur dans le circuit. En fonction de leur association, on modifie les propriétés du générateur équivalent, ainsi une mise en série permet d'obtenir une bonne tension et une mise en parallèle donne un bon courant. Néanmoins, il est très difficile d'atteindre le point de fonctionnement optimal des cellules et le rendement chute très vite. Ainsi, les diodes sont encore aujourd'hui beaucoup plus utilisées pour limiter les pertes dans l'éclairage (très bon rendement comparé aux lampes à incandescence) plutôt que pour produire de l'énergie électrique.

4 Photodiodes utilisées dans un capteur optique

Après avoir détaillé de manière générale le fonctionnement des photodiodes, on s'intéresse désormais à un exemple concret d'utilisation en tant que capteur optique. On propose ainsi de réaliser une fourche optique de manière artisanale. On placera la photodiode dans le «cadran capteur».

Réalisation du montage de la fourche optique

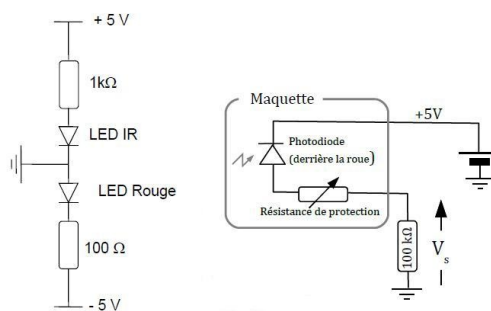


FIG. 4 – Schéma du montage de la fourche optique

Dans la partie gauche du circuit, on utilise des résistances en série pour limiter le courant qui traverse les LED afin qu'elles ne grillent pas. Dans le circuit du détecteur, la photodiode est alimentée par une tension de 5V en inverse : cela permet de s'assurer qu'on travaille dans le bon cadran de la caractéristique et que la photodiode remplit bien le rôle de capteur.

Construction d'une fourche optique artisanale

On s'intéresse au montage précédent en choisissant comme LED Infra-Rouge une *TSAL-6100* et comme photodiode, une *SFH-206-K*. En mesurant les tensions, on s'aperçoit que le multimètre est toujours plus précis que l'oscilloscope (écarts relatifs : 3,2% pour l'oscilloscope et 0,8% pour le multimètre).

On mesure alors la tension V_S lorsque l'on met la photodiode face à la LED rouge puis face à la LED IR :

$$V_S = \begin{cases} 276mV & \text{Pour la LED rouge} \\ 3,2V & \text{Pour la LED IR} \end{cases}$$

On obtient pour l'efficacité quantique de 10,4% pour la LED rouge 40% pour la LED IR. On attribue cette différence très nette à la sensibilité spectrale de la diode qui dépend de la longueur d'onde. Ainsi, la courbe proposée par Osram indique un pic relativement étroit vers 850 nm, ce qui justifie un meilleur rendement pour la LED IR.

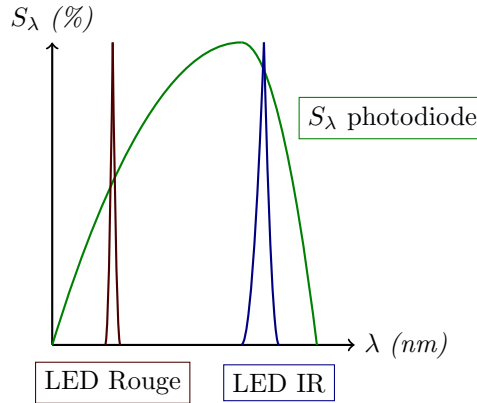


FIG. 5 – Différence de sensibilité entre les deux LEDs

On utilise donc par la suite la LED infrarouge qui est mieux détectée par la photodiode. On rajoute alors un moteur qui fait tourner une roue percée régulièrement entre la LED et la photodiode. On obtient un signal périodique sur V_s qui peut, entre autres, nous permettre de déterminer la vitesse de rotation de la roue. On l'estime à 50 tr.min^{-1} .

Comparaison avec une fourche optique commerciale

On s'intéresse à la fourche optique commerciale *H-0-A-0901*. On observe à l'écran de l'oscilloscope une courbe en créneaux très propre (pas de « bavures » au niveau des sauts de tension).

On réalise ensuite un pont diviseur de tension pour diviser par deux la tension de sortie de la fourche optique. On utilise pour cela des résistances de différents ordres de grandeur rappelés ci-dessous.

R	Ve	Vs
10	5.6mV	2.8mV
10k	2.16V	1.11V
1M	3.76V	1.16V

FIG. 6 – Diodes en série avec et sans diodes de *by-pass*

On remarque que pour les plus faibles résistances, la tension est effectivement divisée par 2 mais lorsqu'on atteint le $M\Omega$, la résistance de l'oscilloscope entre en jeu et ne peut plus être négligée.