

MP 12 : Photorécepteurs

David AMBLARD , Laurent LE

Mercredi 22 janvier

Pour le fonctionnement du monochromateur, voir [1] p.223.

Pour le fonctionnement du pyromètre, voir [1] p.77

Pour avoir les schémas du montage, je vous invite à consulter le pdf qu'on met également en ligne où on a reporté notre tableau. Il y a les montages réalisés en pratique.

Introduction

Un photorécepteur est un capteur recevant en entrée un rayonnement électromagnétique et fournissant en sortie un signal électrique appelé signal photosensible. Dans ce montage, on va montrer quelques caractéristiques principales des photorécepteurs à travers l'exemple de la photodiode qui, polarisée en inverse, fournit un signal photosensible, à savoir son courant I_D , image du flux lumineux incident Φ . *Attention, ici il faut parler au moins de deux photorecepteurs, puisque il y a un s dans le titre. On a utilisé le pyromètre en complément comme on le verra dans la suite*

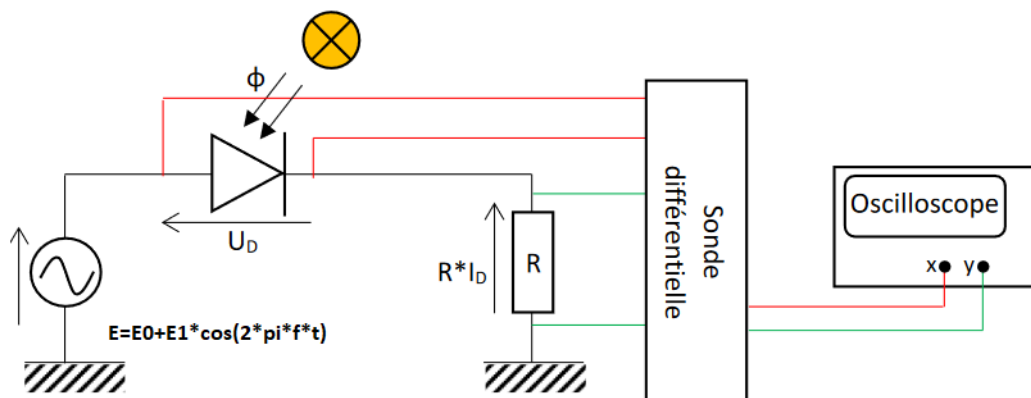


FIGURE 1 – Mesure de la caractéristique $I_D = f(U_D)$ de la photodiode

On réalise le montage de la figure 3. On mesure en X la tension aux bornes de la photodiode et en Y la tension aux bornes de la résistance (afin de mesurer un signal proportionnel au courant de la photodiode). On utilise ici une sonde différentielle pour s'affranchir de tout problème de masse des fois que le GBF ne soit pas flottant. Mais il semblerait qu'il le soit (d'après Super Simon). Dans le doute, on met la sonde...

Pour la photodiode, de type PIN10, sur la notice de la photodiode on peut lire que le blindage est relié à l'anode, et l'âme à la cathode. Donc en branchant un BNC-banane à la sortie de la photodiode, sur la partie lié à l'âme, on a la partie du circuit reliée à la résistance, et sur la partie liée au blindage, on est relié à l'anode, donc à la partie branchée directement sur le GBF. On se

retrouve vite avec plein de fils les uns sur les autres (sur une entrée de la boîte à décade, on a bien 5 ou 6 fils branchés), mais on ne prend pas peur et on branche...

On prend $E_0 = -4V$, $2 \times E_1 = 10V_{PP}$ de façon à parcourir des tensions négatives et positives pour la photodiode, sans la griller. Pour la résistance, on prend $R = 10k\Omega$, et pour la fréquence $f = 100Hz$

On fait varier la puissance incidente à l'aide de polariseur analyseur placés après une lampe QI pour voir la caractéristique se décaler comme sur la figure 2. Ici il peut être bien de placer l'ensemble sur banc d'optique pour éviter d'avoir du matos qui se déplace de partout.

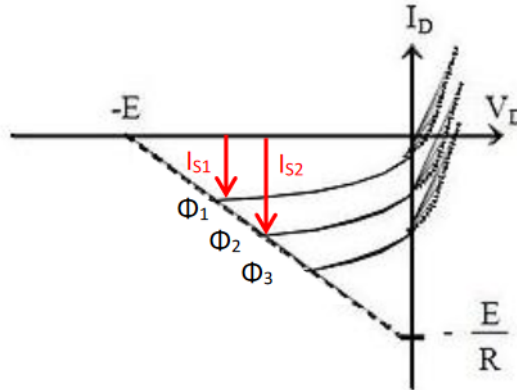


FIGURE 2 – Caractéristique $I_D = f(U_D)$ de la photodiode

Attention : De part le montage, on ne peut voir que ce qui est à droite de la pente en pointillé, car $I_D > \frac{E_{min} - V_D}{R}$ avec $U_D = V_D$. Ici $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$.

Attention vous aller avoir une hystérésis pour des flux importants lorsque vous tracerez le palier de tension constante pour $I_D < 0$. Personne au département ne sait expliquer pourquoi, mais il semblerait que JFR ait une idée (d'après Super Simon).

Transition Pour l'étude de cette photodiode, on va s'intéresser à la partie $U_D < 0$ et $I_S < 0$ car dans cette partie le courant mesuré est directement relié à la puissance optique reçu par la photodiode. (Voir [1] p.59)

1 Lien entre I_D et P_{opt}

Il s'avère que la diode polarisée en inverse donne un courant $I_D(\lambda) = \frac{q\eta(\lambda)}{hc} P_{opt}$, donc proportionnel à la puissance optique reçue. On va vérifier cette linéarité à l'aide du montage LED+Transconducteur. Le but va être de tracer une grandeur proportionnel au courant dans la photodiode en fonction d'une grandeur proportionnel à la puissance optique, et de vérifier qu'on a bien une droite.

Pour le montage à proprement parlé je vous renvoie au pdf du tableau. On se sert ici des plaquettes d'élec, et on utilise la LED ROUGE (on prend la rouge et pas une autre). On place l'ensemble LED, lentille de $f = 50mm$ et photodiode sur un banc.

On possède un montage d'une LED dont on peut faire varier le courant à l'intérieur à l'aide d'un potentiomètre. Ici le transistor sert à piloter en courant la LED.

On fixe le courant dans la résistance R_0 à l'aide de V_0 . Le transistor permet de retrouver ce courant dans la LED. Or la tension entre V_{c1} et la masse reliée à la cathode de la LED est fixée (à V_{c1}), et ce pour toute intensité I . Donc en fait le transistor va permettre d'avoir le même courant dans la LED et dans la résistance. Bien que faire varier le courant dans la boucle va faire varier les tensions aux bornes de la résistance et de la LED, le courant dans la résistance et dans le LED sera toujours le même car le transistor adaptera sa tension en fonction de celle de la résistance

et de celle de la LED. La somme des tensions de la résistance, du transistor et de la LED sera toujours V_{c1} , et le courant le même dans toute la boucle, ce quelque soit I .

Or la puissance optique en sortie de la LED est proportionnelle au courant qui la traverse (*Ici en fait c'est un peu osé de dire ça. Il n'y a aucun modèle théorique qui permette de justifier cela d'après JBD. Mais pour la LED rouge, cette proportionnalité est assez bien vérifiée si le courant dans la LED reste inférieur à 20mA. Toutefois on ne disposait pas de matériel permettant de la vérifier. Le puissance-mètre n'est pas calibré... Mais quand on l'a fait il y a 2 ans, les résultats étaient probants. Mais on a choisi de contrôler la puissance optique incidente à l'aide de la LED car les polariseurs analyseurs atténue trop fortement la lumière. On n'a pas voulu mesurer une puissance directement au puissance mètre car il est trop imprécis, et quand bien même, étant une photodiode calibré, on mesurerait le signal en sortie d'une photodiode en fonction d'un signal d'une autre photodiode. C'est assez débile... Une autre solution d'après JBD serait d'utiliser des densités. A voir si ça marche bien et si ça atténue pas trop le signal en sortie de la LED.*)

Pour la photodiode, on réalise un montage transconducteur auquel est rajouté un montage inverseur (*L'inverseur sert totalement à rien. MAis sur les plaquettes, il est intégré au TL82 dans lequel est le transconducteur, donc pas moyen de s'en affranchir*). La tension de sortie est proportionnelle au courant traversant la photodiode. Ce montage permet d'avoir une tension constante aux bornes de photodiode, ici de $-10V$

On trace donc $I_{LED} = f(V_{out})$ car I_{LED} est proportionnelle à P_{opt} et V_{out} à I_D .

Pour les incertitudes :

- sur I_{LED} , on a $\pm(0.5\% + 5^\circ)$ chiffre significatif
- sur la tension, on prend celle à l'oscillo

Transition : Jusque là on a travaillé à longueur d'onde fixée. Mais on voudrait aller plus loin, et être capable de déterminer la réponse spectrale de la photodiode sur une plus grande gamme de longueur d'onde.

2 Réponse spectrale de la photodiode

Pour avoir plus de notice, voir dans la base de données *Récepteur pyroélectrique et Silicium + alimentation pour étude réponse spectrale d'un photorecepteur*, ID : 300 ou encore http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Notices/P15.3_Monochromateur%20H10_JOBIN-YVON.pdf

Nous avons travaillé à longueur d'onde fixée pour les premières expériences; cependant, les photorécepteurs sont aussi utilisés pour mesurer des flux lumineux issus de lampes dont le spectre est large (il suffit de penser aux capteurs CCD). On veut donc ici être capable de déterminer leur sensibilité spectrale $\frac{q\eta(\lambda)\lambda}{hc}$ pour différentes longueurs d'ondes.

On utilise une lampe Quartz-iode pour la lumière incidente.

Nous utilisons un monochromateur, qui va nous permettre de séparer facilement les longueurs d'onde d'une lumière blanche pour étudier la réponse monochromatique de la photodiode pour différentes longueurs d'ondes les unes après les autres.

Le problème est que la lampe quartz-iode n'a pas une réponse spectrale plate. Il va falloir déterminer le spectre de la lampe pour avoir $P_{opt}(\lambda)$.

Pour cela, on utilise un autre photodétecteur, le pyromètre, qu'on place en sortie du monochromateur. C'est un récepteur à la sensibilité spectrale plate, c'est-à-dire que son signal photosensible (à savoir une tension ici) est proportionnelle à la puissance optique reçue, avec la même constante de proportionnalité pour toute longueur d'onde.

Le pyromètre est uniquement sensible aux variations de flux incident, ce qui fait qu'il faut moduler la lumière avec un hacheur, c'est-à-dire une hélice qui tourne à une fréquence fixée (ça s'appelle un chopper).

On montre que l'amplitude du fondamental de la tension en sortie du pyromètre est proportionnelle à la puissance optique incidente (voir [2] p.203)

On récupère l'amplitude de la composante spectrale à 10Hz en faisant une FFT à l'aide de l'oscilloscope avec une fenêtre *flat top*.

On passe ensuite à la mesure du courant en sortie d'une photodiode accolée au monochromateur (on mesure la tension aux bornes d'une résistance en série avec la photodiode).

On mesure ici les gains en dB des composantes spectrales, et on a alors la sensibilité spectrale relative de la photodiode via les formules que vous trouverez sur le pdf du tableau.

Au niveau des mesures à proprement parlé, elle sont très délicates. Les mesures aux pyromètres sont assez moches, on a des signaux très faibles. Il faut vraiment réussir à faire rentrer un maximum de lumière dans le monochromateur. On a aussi tout intérêt à ne pas mettre de filtre anticalorique. Typiquement on commence à être heureux pour la qualité de mesure lorsqu'on arrive à mesurer pour 700nm une puissance en sortie du monochromateur de l'ordre de $500\mu W$. Sans ça pour récupérer la composante spectrale à 10Hz, on peut utiliser la détection synchrone (apparemment il faut demander à Colin pour plus d'explications sur son fonctionnement, si Simon est pas super chaud dessus). Pour la métériel, prenez bien la photodiode qui se visse sur le monochromateur (il faut aller la voler en éllipsométrie).

Pour les mesures, prévoir de faire 3 mesures en live, parce il y a assez peu de chance de retomber sur les valeurs de la préparation. Le moindre mouvement monochromateur peut vous changer les valeurs lu avec les deux photorécepteurs. Il faut donc ne rien faire bouger quand on échange le pyromètre avec la photodiode pour faire une mesure.

Sur le graphe tracé, on voit apparaître deux zones : une pente pseudo-constante en dessous de $850nm$, et une partie fortement décroissante pour $\lambda > 850nm$. Pour la partie pseudo-constante, certains disent qu'il s'agit d'une zone affine : personnellement je ne vois pas pourquoi le rendement quantique serait constant, et le correcteur n'a pas su me le dire non plus. Pour la partie décroissante, les photons ne sont alors plus assez énergétiques pour franchir le gap de la photodiode en silicium.

Transition Après avoir étudié les caractéristiques "statiques" des photorécepteurs, attardons-nous sur leurs performances dynamiques et plus particulièrement au temps de réponse d'une photodiode, lié à la capacité de jonction du composant.

3 Mesure de la capacité de jonction d'une photodiode

Pour la modélisation d'une sonde d'oscilloscope, voir poly de JBD dans la partie oscilloscope numérique du poly de début d'année

On réalise le montage que vous trouverez au tableau. Pour envoyer une puissance optique en créneau, on prend la LED rouge, et on pense bien à couper la polarisation V_0 . On peut régler typiquement sur une fréquence du créneau de $1000Hz$ et une tension de $5V_{pp}$.

Une modélisation possible de la photodiode autour d'un point de fonctionnement, donc pour la composante AC du signal, est celle d'une source de courant avec une capacité de jonction en parallèle comme sur le schéma du tableau. Dans ce cas la fonction de transfert du montage est celle-ci d'ordre 1 (voir tableau)

Pour mesurer cette capacité de jonction, on envoie sur la photodiode un signal monochromatique dont la puissance optique est un créneau au cours du temps, à l'aide d'une LED. On mesure alors le temps de montée à 63%.

On utilise pour cela une sonde de l'oscilloscope pour ne pas introduire de capacité parasite d'un coaxial et limiter l'influence de la capacité de l'oscilloscope. Mais toutefois on a encore un le cable coaxial entre la photodiode et la plaquette, qu'on ne peut pas dégager...

Conclusion

Ce montage a été l'occasion d'étudier différentes caractéristiques d'une photodiode. Nous avons pu voir le lien de proportionnalité à longueur d'onde fixée, entre la grandeur photosensible, son courant, et la puissance optique reçue. Nous avons vu toutefois que la réponse spectrale de la photodiode dépendait de la longueur d'onde incidente, ce qui peut limiter son utilisation pratique à une certaine plage de longueur d'onde. Enfin nous avons pu voir une caractéristique dynamique de la photodiode, à savoir son temps de réponse, lié à la capacité intrinsèque au composant.

4 Bibliographie pour construire la leçon

En plus de la biblio, on peut aussi avoir recours à [3] partie II.9 notamment pour le pyromètre.

Références

- [1] SEXTANT. *Optique expérimentale*. 1997.
- [2] ASCH GEORGES. *Les capteurs en instrumentations industrielle*. 2006 (couverture bleue).
- [3] ALD et COMPAGNIE. *Physique expérimentale, Optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique*. 2016.

5 Manip surprise

Coefficient de frottement statique d'un solide sur un banc métallique.

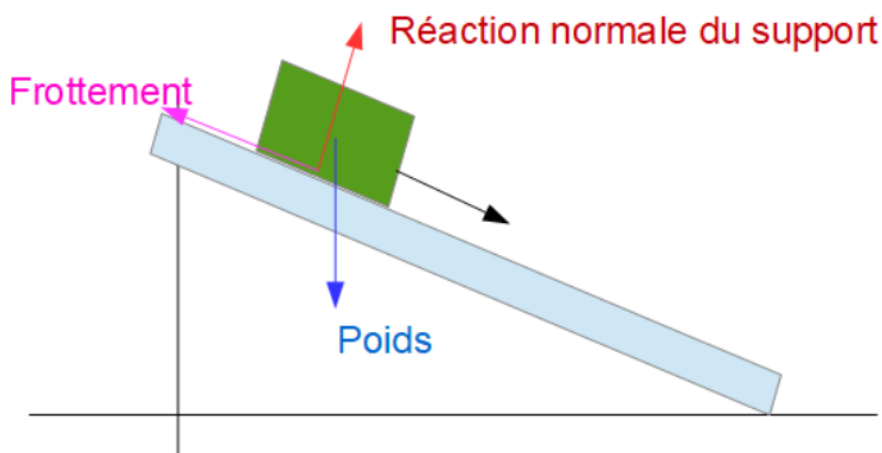


FIGURE 3 – Schéma de la manip surprise

Le but est de déterminer le coefficient de frottement statique d'un solide sur un banc métallique. On soulève le plateau jusqu'à ce que le solide glisse. A cet angle, on a : $\mu_s = \tan(\phi)$, avec μ le coefficient de frottement statique et ϕ l'angle entre le plateau et le plan horizontal. On a accès à un angle avec un compas et un fil tendu par un poids qui est égal à l'angle entre l'horizontal et l'inclinaison du banc. On trouve $\phi = 27$. On obtient $\mu_s = 0,51$. Les incertitudes viennent du repérage de l'angle sur le compas. Cependant, la plus grande source d'erreur vient du fait qu'on ne penche pas de plus en plus le banc de manière quasi-statique, mais par à coup, ce qui change

l'angle limite à partir duquel le palet se met en mouvement. Pour les incertitudes, il faut donc réaliser plusieurs fois la mesure pour réaliser une incertitude de type A.

6 Autopsie de la leçon

6.1 Questions

- Pourrais-tu présenter d'autres modèles électriques de la photodiode selon où on se place dans la caractéristique ? *On s'est placé dans le cadran $U < 0$ et $I < 0$, on a alors un générateur de courant pour notre fonctionnement. Pour n'importe quelle tension appliquée, on a un courant constant, d'où le plateau dans $U < 0$ et $I < 0$. Dans la partie $U > 0$ et $I > 0$, on a alors un générateur de tension avec une résistance parasite (verticale). Dans le cadran $U > 0$ et $I < 0$, on a $U \cdot I < 0$, on a le régime photovoltaïque, on capte les photons extérieurs et on génère de la puissance.*
- Peux-tu expliquer qu'est-ce qu'une photodiode ? *Jonction PN séparée par une zone de déplétion. Si on polarise en inverse, on renforce le champ électrique dans la zone de déplétion. Si un photon arrive, il peut créer une paire électron-trou. Le champ \vec{E} les met en mouvement, ce qui crée un courant.*
- Comment améliorer le temps de réponse (le diminuer) ? *Il faut diminuer la capacité de jonction, pour cela on peut diminuer la section sensible de la photodiode.*
- Quel est l'ordre du montage global dans la partie réception ? *On multiplie les ordres, donc ordre 3.*
- Exemple de photorécepteur dont la sensibilité spectrale est plate ? *Le pyromètre (les thermopiles).*
- Qu'est-ce qu'un pyromètre ? *Ce n'est pas un semi-con. On transforme un flux de chaleur en tension, c'est un récepteur thermique.*
- Caractéristique de la photodiode, pourquoi utiliser la sonde différentielle ? *Pour ne pas avoir de problèmes de masse. Si le générateur était flottant, on peut mettre la masse entre la photodiode et la résistance R .*
- Caractéristique de la photodiode : quelle est cette pente en pointillée ? *Si on applique la loi des mailles dans le circuit : $E = U_D + RI_d$ donc $U_D = E - RI_d$. E varie avec le GBF. Le point de fonctionnement varie avec le flux lumineux et I_d est proportionnel au flux lumineux $I_d = -\alpha\phi$ et donc $U_D = E + R\alpha\phi$, il se déplace sur la courbe en pointillée dans le cas où $E = -|E|_{\max}$. Le problème est que si on augmente trop le flux lumineux ou si la résistance augmente trop, le point de fonctionnement sort du cadran photorécepteur.*
- Intérêt du transconducteur pour avoir une image du photocourant ? *Dans ce cas la tension aux bornes de la photodiode est constante, et indépendante du courant traversant la photodiode (ce qui n'est pas le cas avec le montage avec une résistance en série de la photodiode).*
- Est-ce que dans les deux montages on est censé avoir une relation de linéarité entre courant et flux incident (les deux premiers montages) ? *Si on trace la droite de la partie II avec le montage de la partie I, si on sort du cadran photorécepteur, on aurait un courant trop important par rapport au courant attendu dans le cas linéaire. Pour un certain flux trop important, on a plus de point de fonctionnement, la photodiode reste bloquée, on a donc une saturation.*
- Partie récepteur : est-ce que l'ordre global est important ? *On travaille ici en statique donc à des fréquences bien loin des fréquence de coupure, donc ce n'est pas important.*
- Partie II : sur la droite, pourquoi ne pas fixer l'ordonnée à l'origine ? *On le fait pas car on a un courant d'obscurité. En plus, on peut se contenter de vérifier la proportionnalité entre le courant dans la photodiode et le courant dans la LED en considérant que ce dernier est relié de façon affine à la puissance optique émise sans que ça change le raisonnement.*

- Réponse spectrale : Pourquoi il y a ce facteur homothétique (quand on refait les mesures en live de réponse spectrale) ? *C'est parce que l'étalonnage du pyromètre n'a pas été refait avec le nouvel alignement. De plus, on doit déviser le pyromètre pour mettre la photodiode, donc on change un petit peu la puissance en sortie du monochromateur en le bougeant légèrement.)*
- Comment obtenir le rendement quantique, sur quelle partie de la courbe ? *Dans le domaine avant 800 nm, (jusqu'à 400 nm environ, on ne le voit pas car le monochromateur utilisé ne nous le permet pas), on a a priori une pente constante selon λ . Donc on a un rendement quantique constant η dans cette zone. Après ça chute à cause du gap du silicium.*
- Quelle expérience faire à partir de nos mesures pour avoir la sensibilité spectrale ? *Il faut utiliser un puissance-mètre qui est aussi une photodiode mais le nôtre n'est pas calibrée en plus... Ce n'est pas grave de comparer les 2 photodiodes car ce sont tous les deux des pentes. On fait une mesurerr de sensibilité pour un point et on applique un facteur multiplicatif à toute la courbe normalisée à l'aide de cette mesure.*
- Partie dynamique : quelles précautions prendre ? *Au niveau de la mesure, il faut relier l'oscilloscope à la plaquette. On a utilisé une sonde pour ne pas avoir des problème d'impédance d'un câble coaxial mais on a pas le choix entre la photodiode et la plaquette... Et la deuxième précaution et le choix l'offset et l'amplitude du signal envoyé à la LED.*
- Pyromètre : comment ça marche ? *Surface sensible qui chauffe et par effet Seebeck crée une tension.*
- Photomultiplicateur : comment ça marche ? *Effet avalanche, un électron crée un signal qui est amplifié successivement avec des dinodes (amplificateur des électrons).*
- Photorésistance : comment ça marche ? *La résistance change avec le flux lumineux incident, elle chute avec le flux lumineux, on mesure cette variation de résistance. A vérifier le fonctionnement*
- Dans quelle condition on peut passer au modèle de la photodiode avec la capacité de jonction comme je l'ai fait dans le montage ? *Seulement dans le cas dynamique en tenant compte des composantes AC des signaux (on vire le continu). On supprime les valeurs moyennes car on fonctionne autour d'un point de fonctionnement. La tension de polarisation est constante. On a à tout instant : $V_{pol} = V_{out} - U_D$. Or $U_D = \langle U_D \rangle + \tilde{U}_D$ et $I_D = \langle I_D \rangle + \tilde{I}_D$ où les crochets indiquent la valeur moyenne. On a $V_{pol} = - \langle I_D \rangle R_m - \langle U_D \rangle$ (point de fonctionnement, avec $V_{pol} = cst$), et donc en passant à la valeur moyenne dans l'équation vraie à tout instant, on a $\tilde{U}_D = R_m \tilde{I}_D$ donc le modèle électrique de la photodiode vraie pour les composantes AC*

6.2 Remarques

- Essayer de montrer plusieurs photorécepteurs : ici pyromètre et photodiode, c'est pas mal
- Progression classique : statique puis dynamique
- Statique : être au courant du point de fonctionnement. Avec la transconductance à tension fixé, le point de fonctionnement décrit une verticale.
- Bien savoir décrire le fonctionnement du transistor : Il permet ici à la partie associée à la résistance R_0 d'imposer son courant dans la LED quelque soit la tension de la LED (en adaptant sa tension à celle de la résistance et celle de la LED).
- Attention aux polariseurs car ils peuvent être sélectifs en longueur d'onde, ils n'ont pas une réponse spectrale plate.
- Réponse spectrale : différentes méthodes Avec le pyromètre et le monochromateur, il faudrait une détection synchrone si vraiment on a pas de signal. On peut le faire avec une roue à filtres mais on étudie pas un autre photorécepteur (pyromètre).
- Mesure capacité de jonction : attention à mettre une sonde et garder en tête la capacité

linéique du câble coaxial.