
Photorécepteurs

- CHATELAIN : *Dispositifs à semi-conducteurs*, Chap. 9
- GUILLIEN : *Électronique*, tome 3
- BESSON : *Technologie des composants électroniques*, tome 2, Chap. 13
- HANDBOOK of OPTICS : Chapitre 4
- SEXTANT : *Optique expérimentale*, Chapitre 2
- BUP 762, p 471
- BOTTINEAU : *Expériences d'optique*

I) Introduction

On se limite ici aux récepteurs photoélectriques (lumière \rightarrow signal électrique) de type détecteurs (c'est-à-dire qui permettent de faire une mesure)¹. D'autres récepteurs existent, par exemple de type photothermique (chauffage solaire). On peut classer les détecteurs usuels suivant leur principe de fonctionnement.

1) Détecteurs quantiques

Chaque photon crée un porteur de charge (avec une probabilité η , l'efficacité quantique) qui participe à la réponse électrique. Tous ces récepteurs présentent un net effet de seuil en longueur d'onde.

a) Les photons arrachent les électrons à une photocathode

- *cellule photoélectrique à vide* : intéressante dans le principe, elle n'est plus utilisée actuellement. Elle servait autrefois à l'agrégation à la mesure de e/h .
- *tube photomultiplicateur* : surtout intéressant pour sa grande sensibilité (§ III).

b) Les photons créent des porteurs mobiles

Soit dans un semi-conducteur homogène – la photorésistance par exemple – soit à la jonction entre deux matériaux semi-conducteurs – c'est le cas des photodiodes, des phototransistors, des photopiles et des composants CCD.

- *photorésistance* : détecteur très sensible mais peu linéaire et peu rapide (cf. TP Semiconducteurs) ;
- *photodiode et phototransistor* : en usage courant, c'est le détecteur le plus utilisé (§ II) ;
- *photopile* : composant de grande surface qui sert à obtenir de l'énergie électrique (§ IV) ;
- *C.C.D.* : c'est le composant de base des caméras vidéo. On dispose ici de plusieurs *barrettes* (à 1D) C.C.D. (*Charge Coupled Device*) de haute résolution, dont une reliée au logiciel Caliens qu'on utilisera dans certaines expériences d'optique (fentes d'Young, diffraction...), et une plus « basique » qui servira à illustrer le principe de fonctionnement de ces dispositifs (§ V). On pourra aussi utiliser des *matrices* (à 2D) qui sont à la base des caméra vidéo et des « webcams ».

2) Détecteurs thermiques

On mesure l'échauffement dû à l'absorption de l'énergie du rayonnement. La sensibilité de ces détecteurs est faible mais indépendante de la longueur d'onde.

Les détecteurs thermiques disponibles ici sont :

- *thermopile* : l'échauffement est mesuré par des thermocouples (cf. TP Thermométrie) ;
- *capteur pyroélectrique* : l'effet pyroélectrique est l'apparition d'une tension entre les faces d'un cristal portées à des températures différentes.

¹Sauf dans l'expérience sur la cellule solaire (§ IV).

Il n'est pas possible d'étudier ici les propriétés (sensibilité, réponse spectrale, rapidité...) de chaque détecteur. On a donc choisi les propriétés les plus caractéristiques de certains d'entre eux.

II) Photodiode (détecteur le plus couramment utilisé)

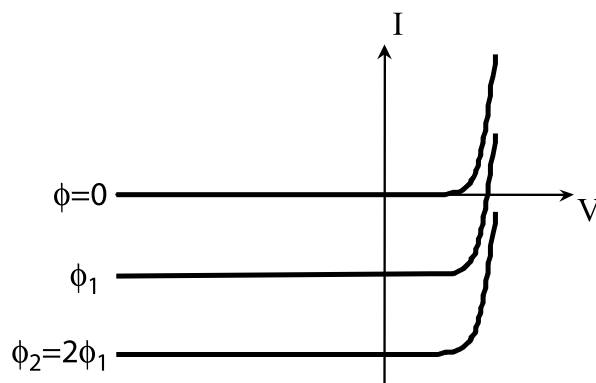
La lumière crée des porteurs dans une jonction p-n et augmente le courant inverse dû aux porteurs minoritaires. Pour un fonctionnement en régime linéaire, une photodiode doit être utilisée avec une polarisation inverse externe (voir plus bas). Nous disposons de photodiodes au silicium (gap indirect à 1,14 eV correspondant à $1,1\mu\text{m}$; modèles BPX 61 et BPW 34) dont le maximum de sensibilité est dans l'infrarouge proche ($\sim 0,85\mu\text{m}$)².

1) Caractéristique courant – tension

On l'obtient à l'oscilloscope grâce au montage suivant (la résistance sert à la fois à mesurer et à limiter le courant) :



Régler le décalage et le niveau du GBF pour explorer la caractéristique. En l'absence d'éclairement on a la caractéristique usuelle d'une diode (le courant pour des tensions très négatives est alors appelé courant d'obscurité). Observer sa modification quand on augmente le flux lumineux Φ (en Watts).



On passe d'une caractéristique à l'autre par un *décalage vertical proportionnel au flux* : $I = k\Phi$.

Note : idéalement il faudrait un oscilloscope différentiel pour avoir la tension aux bornes de la diode, sinon la résistance qui sert à mesurer le courant introduit une erreur sur cette tension.

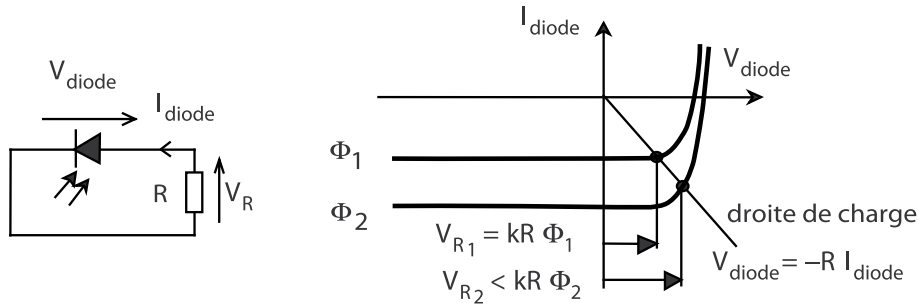
²Le phototransistor est une photodiode avec amplification interne de courant. Il est peu linéaire. Il ne sera pas étudié ici.

L'erreur est cependant sans importance dans la zone où les caractéristiques sont horizontales, l'effet étant dans ce cas un décalage horizontal.

2) Utilisation de la photodiode en détecteur de lumière linéaire

a) Photodiode non polarisée (ne pas réaliser ce montage)

C'est le montage le plus simple auquel on pourrait penser.

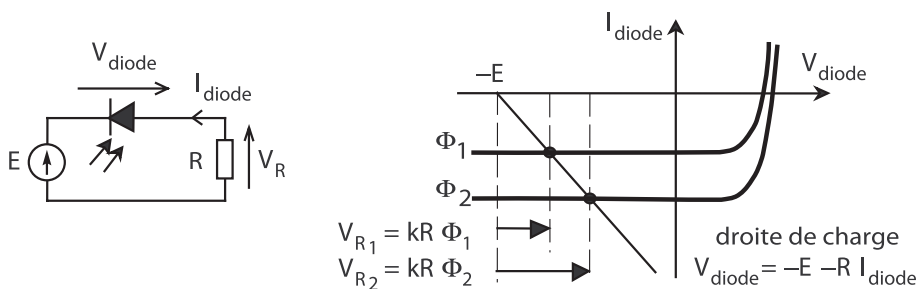


Déduire de la caractéristique que le fonctionnement n'est linéaire que sur une faible plage d'éclairement. En pratique ce montage n'est utilisé que pour effectuer des mesures de très faibles flux, car le courant d'obscurité ($\sim \text{nA}$) y joue un rôle plus faible que dans le montage avec polarisation inverse.

b) Photodiode polarisée en inverse (montage à utiliser par la suite ; très important)

Attention : On utilise dorénavant une **alimentation continue**, et non plus le GBF utilisé précédemment, puisqu'il ne s'agit plus de tracer la caractéristique !

Comprendre pourquoi le fonctionnement est cette fois-ci linéaire : V_R est proportionnelle au flux lumineux. Dans ce cas la photodiode peut être modélisée par un générateur de courant.



Afin de travailler dans une zone de fonctionnement linéaire, on contrôlera toujours que la tension aux bornes de la résistance est inférieure à la tension d'alimentation.

On travaille en général avec une tension de polarisation de quelques Volts (attention à ne pas dépasser la tension inverse maximale spécifiée par le fabricant !). Comment faut-il choisir la résistance R ? Se convaincre qu'en choisissant R petit, on améliore la "gamme de linéarité" de la photodiode. Quel problème rencontre-t-on si R est trop faible ?

En pratique, en choisissant $R \simeq E/I_{\max}$, on obtient à la fois un comportement linéaire et des signaux forts.

3) Vérification de la linéarité

Pour ces expériences, éviter d'utiliser un laser, même polarisé et branché depuis longtemps, car il présente souvent des fluctuations lentes importantes. Et de toutes les manières, ne pas prendre de laser non polarisé suivi d'un polariseur (Cf. Sextant p.268). Utiliser des DELs haute luminosité ayant atteint leur équilibre thermique, ce qui prend plusieurs minutes après leur branchement. Voir la section 6 pour leur branchement. Au cours de l'expérience ne pas les éteindre mais masquer leur faisceau au moyen d'un petit écran noir.

a) Rapide

En utilisant 2 DELs, montrer qu'il y a additivité des réponses en courant I :

$$I(\Phi_1) + I(\Phi_2) = I(\Phi_1 + \Phi_2)$$

Contrôler que le courant d'obscurité est négligeable (ou en tenir compte).

b) Complète

Opérer avec des *filtres gris*. On rappelle que la densité d'un filtre est :

$$D = \log \frac{\Phi_{\text{incident}}}{\Phi_{\text{transmis}}}$$

On dispose de filtres gris en verre de densité 1 à 4.

- Ces filtres ayant une absorption beaucoup plus faible que prévu dans le proche infrarouge, ce qui coïncide avec le maximum de sensibilité de la photodiode, ne pas utiliser de source de lumière blanche.
- La précision des filtres est environ 0,1 en densité, soit $10^{0,1} = 26\%$ en transmission. Cette imprécision empêche de faire un contrôle direct de la linéarité. Procéder de la façon suivante en présence du faisceau lumineux (vérifier à chaque fois que le signal est négligeable lorsqu'on masque la source, sinon le retrancher) :
 - mesurer $I(0)$, signal en absence de filtre (ne pas le confondre avec le courant d'obscurité) ;
 - mesurer $I(D_1)$, $I(D_2)$ et $I(D_1 + D_2)$.

Si le comportement est linéaire on doit avoir $I(0) = k\Phi$, $I(D_1) = k\Phi \times 10^{-D_1}$, ... d'où

$$\frac{I(D_1 + D_2)}{I(0)} = \frac{I(D_1)}{I(0)} \frac{I(D_2)}{I(0)},$$

où D_1 et D_2 n'ont pas besoin d'être connus a priori.

Si c'est le cas on peut en déduire :

- que le système de détection est linéaire³,
- une mesure précise des densités D_1 et D_2 : $D_1 = -\log \frac{I(D_1)}{I(0)}$.

On peut opérer avec des filtres de densités très différentes ($D_1 \approx 1$ et $D_2 \approx 4$ par exemple) et vérifier ainsi rapidement la linéarité sur 5 décades (grande dynamique).

³Il faudrait en toute rigueur le vérifier pour tout couple (D_1, D_2) .

4) Détermination de la sensibilité et du rendement quantique de la photodiode

Mesurer la puissance d'un laser He-Ne grâce :

- au détecteur pyroélectrique⁴ : il nécessite une modulation d'intensité lumineuse ; la tension délivrée est alors proportionnelle à la variation de température de la surface sensible entre les phases faisceau coupé/faisceau passant. Sa sensibilité est étalonnée pour différentes valeurs de la fréquence de modulation (voir sa notice). Mesurer la tension crête-crête à l'oscilloscope.

Attention : bien que le détecteur soit protégé par une fenêtre en quartz, il est essentiel de le placer assez loin du hacheur optique, qui fait ventilateur, et de se déplacer le moins possible dans la pièce ;

- au puissance-mètre optique (N.139), outil beaucoup plus adapté aux lasers que le détecteur pyroélectrique. Il s'agit en fait d'une photodiode calibrée. Lire sa notice !

En déduire la sensibilité de la photodiode dans le rouge (en $A \cdot W^{-1}$) et son rendement quantique (en électron par photon). Comparer aux valeurs annoncées par le constructeur.

5) Sensibilité spectrale

La réponse spectrale des photodiodes n'est pas plate. La connaissance de cette réponse est essentielle pour toute expérience de type spectroscopie, où la photodiode sert à mesurer des flux lumineux à différentes longueurs d'onde.

a) Expérience rapide illustrant la sensibilité dans l'IR

Prendre comme source une lampe QI avec condenseur. Comme toute lampe à incandescence, elle émet beaucoup d'IR et très peu d'UV. Attention le faisceau peut être destructeur : ne pas le focaliser sur la matière.

Interpréter le signal donné par la photodiode lorsque l'on place entre elle et la source deux polariseurs soigneusement croisés. Pour confirmation ajouter ensuite un filtre anti-thermique. Cette expérience illustre également les défauts des polaroïds dans l'infrarouge.

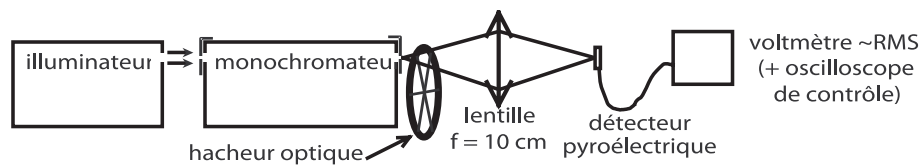
b) Étude complète de la sensibilité spectrale (ne pas y passer trop de temps)

On utilise le monochromateur avec son illuminateur. Choisir des fentes d'entrée et sortie larges (2,5 mm, la résolution en fonction de la largeur des fentes est indiquée sur l'appareil)⁵. On étudie tout d'abord le spectre émis par le monochromateur au moyen d'un détecteur pyroélectrique dont la réponse spectrale est quasiment plate (cf. notice 539 et Sextant pour des informations sur le principe de fonctionnement de cet appareil).⁶

⁴Ne pas utiliser la thermopile pour cette expérience car sa sensibilité dépend beaucoup du point d'impact du faisceau.

⁵L'appareil étant symétrique, il faut des fentes de même largeur en entrée et sortie. C'est à cause de la faible sensibilité du détecteur pyroélectrique qu'il faut prendre des fentes larges. D'ailleurs la résolution n'est pas essentielle ici.

⁶Ne pas utiliser la thermopile pour cette expérience, sa sensibilité est beaucoup trop faible.



Le réseau utilisé étant "blazé" dans l'ordre 1, on peut a priori continuer l'étude au delà de 800 nm (jusqu'à environ 1000 nm) sans être trop gêné par l'ordre 2 de la partie bleue du spectre⁷.

On mesure alors avec un voltmètre RMS, pour quelques longueurs d'onde (par exemple tous les 50 nm de 400 à 1000 nm), la valeur efficace de la tension alternative délivrée par le pyroélectrique⁸.

On remplace ensuite le détecteur pyroélectrique par la photodiode à étudier.

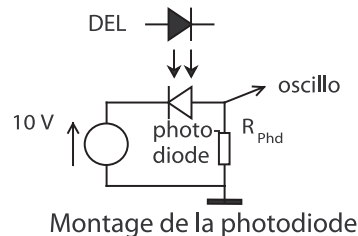
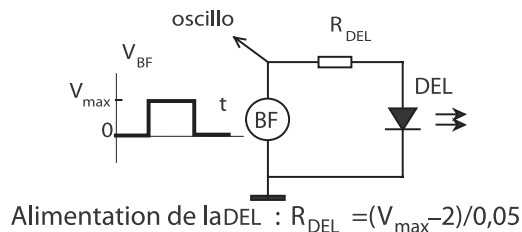
En déduire la fonction de réponse de la photodiode (rapport signal photodiode / signal pyroélectrique) pour une douzaine de points. Comparer à la courbe du constructeur.

NB : on peut aussi balayer le spectre continûment en utilisant le moteur du monochromateur, et utiliser l'ordinateur (programme *Enregistreur* dans Igor) pour enregistrer les courbes de réponse, et faire leur rapport.

6) Temps de réponse (facultatif)

La photodiode est un composant rapide, ce qui impose l'emploi d'une source lumineuse rapide pour tester son temps de réponse. Une diode électroluminescente à forte luminosité convient à cette expérience.

Choisir impérativement une DEL rouge de haute luminosité.



La figure de gauche indique comment alimenter la diode électroluminescente (DEL) :

- elle n'aime pas les tensions négatives : utiliser des signaux carrés avec décalage,
- elle supporte des courants de 50 mA au maximum et la tension à ses bornes lorsqu'elle éclaire vaut approximativement 2 V (pourquoi?). Donc pour contrôler le courant qui la traverse il faut choisir $V_{max} \gg 2$ V et prendre R_{DEL} en conséquence (on réalise ainsi un générateur de courant).

Enfin vérifier que le temps de montée des signaux carrés donnés par le générateur BF ne dépasse pas 0,1 μ s, sinon prendre un autre BF.

⁷Si l'on veut l'éliminer, on peut utiliser un filtre passe haut en longueur d'onde (par exemple le filtre OG590).

⁸Les mesures étant relatives, il est plus rapide d'évaluer la tension alternative efficace avec un voltmètre que la tension crête-crête avec un oscilloscope. Faire toutes les mesures avec la même fréquence pour le hacheur.

a) Mise en œuvre

La démarche proposée consiste à montrer que *dans les conditions usuelles*, le temps de réponse à un échelon d'éclairement n'est pas imposé par la photodiode mais par le circuit électrique qui lui est associé. On montre aussi que ce n'est pas la DEL qui limite la rapidité.

Il n'est pas question de faire ici une étude quantitative poussée : *le signal obtenu n'est qu'approximativement exponentiel*. Cependant pour évaluer simplement la rapidité on mesurera⁹ le temps caractéristique τ tel que l'écart à la valeur asymptotique soit divisé par $e \approx 3$.

Commencer avec $R_{\text{Phd}} = 100 \text{ k}\Omega$. Choisir une période du signal BF suffisamment grande pour que les asymptotes soient atteintes. Ajuster la distance DEL-photodiode pour éviter la saturation. Déterminer τ .

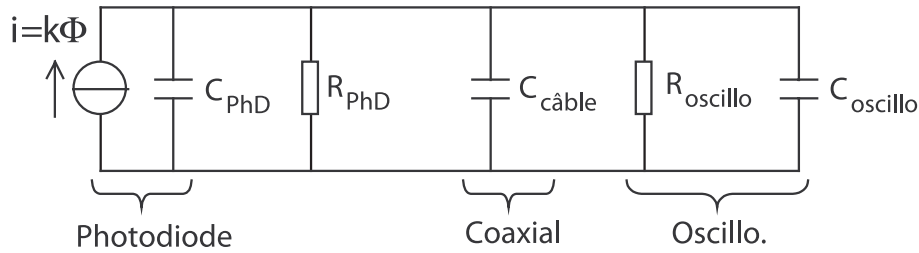
Sans changer l'alimentation de la DEL, passer à $R_{\text{Phd}} = 10 \text{ k}\Omega$. Ajuster à nouveau la période et la distance.

b) Conclusion

- Ce n'est pas l'éclairage qui limite la rapidité quand $R_{\text{Phd}} = 100 \text{ k}\Omega$.
- Ce n'est pas le composant photodiode qui limite la rapidité quand $R_{\text{Phd}} = 100 \text{ k}\Omega$.

c) Exploitation quantitative

On se donne le modèle *linéaire* suivant pour le circuit¹⁰ :



avec $C_{\text{PhD}} \simeq 20 \text{ pF}$ pour la BPW34, $C_{\text{oscillo}} \simeq 25 \text{ pF}$ et surtout $dC_{\text{cable}}/dL = 100 \text{ pF/m}$.

Faire un schéma électrique équivalent (avec un générateur de tension), en déduire qu'on attend :

$$\frac{\tau}{(R_{\text{PhD}} // R_{\text{oscillo}})} = \text{Cste avec Cste} = C_{\text{PhD}} + C_{\text{cable}} + C_{\text{oscillo}} \simeq C_{\text{cable}}.$$

On vérifiera que ce modèle concorde avec les mesures pour $R_{\text{Phd}} = 100 \text{ k}\Omega$ et $10 \text{ k}\Omega$.

Passer à $R_{\text{Phd}} = 1 \text{ k}\Omega$ (il faut alors accoler DEL et photodiode). Il se peut que le modèle ne convienne plus : $\tau/R_{\text{Phd}} \gg C_{\text{cable}}$. Mais attention, on ne peut pas savoir si c'est à cause du circuit d'éclairage ou du modèle de photodiode.

Pour des valeurs plus faibles de R_{Phd} le signal est probablement très bruité.

Le modèle s'avère donc valable pour des temps caractéristiques de l'ordre de la microseconde.

⁹Ne pas utiliser la méthode de la tangente qui est très sensible aux écarts à la loi exponentielle.

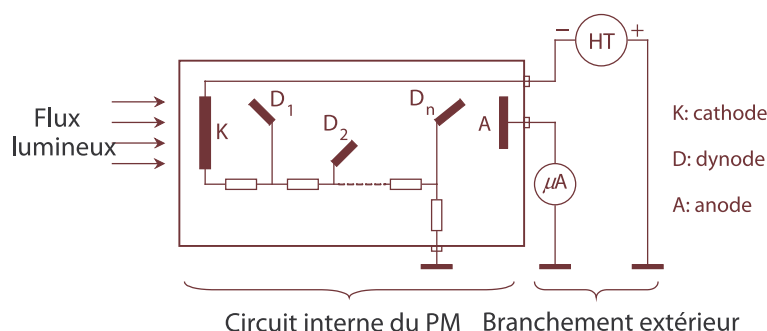
¹⁰Pour la modélisation de la photodiode par un générateur de courant voir II.2.b. On ajoute le condensateur "PhD" pour traduire le comportement de la photodiode à haute fréquence.

d) Suggestions

- Pour avoir un point de mesure en plus, on peut supprimer la résistance R_{PhD} .
- En utilisant un adaptateur BNC-BNC, accroître la longueur du câble coaxial de liaison avec l'oscilloscope.

III) Photomultiplicateur

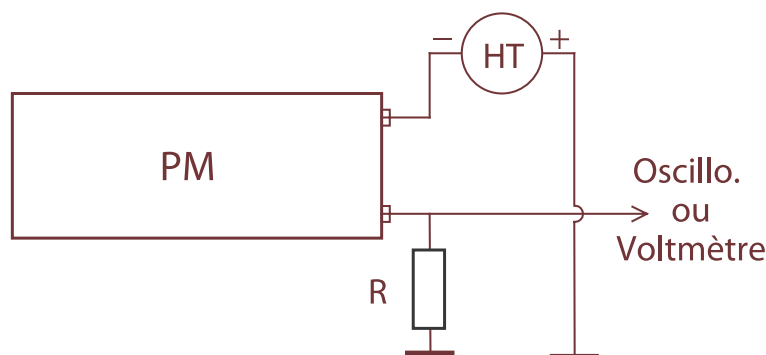
1) Principe



La face avant du photomultiplicateur (PM) est constituée d'une photocathode qui émet des électrons quand elle reçoit des photons (effet photoélectrique). À partir d'un électron reçu, chaque dynode émet plusieurs électrons secondaires, d'où une amplification importante du courant.

Le courant final croît très vite avec la tension d'alimentation ($I \propto V^n$ avec n un peu inférieur au nombre de dynodes). On utilisera en général le PM "Universel" 2013B sensible dans tout le visible. Il possède 10 dynodes. Voir sa notice.

Le culot du PM comporte 2 bornes de sortie BNC : l'une est à connecter au pôle négatif de l'alimentation HT, l'autre est à brancher sur l'appareil de mesure¹¹. Le PM se comportant comme un générateur de courant, on peut placer un microampèremètre sur sa sortie de mesure, mais il est préférable de mettre une résistance de mesure $R \sim 10 \text{ k}\Omega$ et de recueillir la tension à ses bornes (schéma ci-dessous).



¹¹Les connecteurs sont tels qu'il est impossible de se tromper.

a) Précautions d'emploi

- Régler d'abord la haute tension au minimum ($\sim 500\text{V}$) et l'augmenter progressivement en surveillant l'intensité.
- Le courant maximum toléré est $100\ \mu\text{A}$ et la haute tension maximum $1800\ \text{V}$ ¹².

2) Comparaison de la sensibilité du PM et de la photodiode

Vérifier qu'il n'y a aucun filtre dans le PM. Placer dans le porte-filtre prévu pour le PM (il élimine tout flux parasite) des filtres gris en verre de densités suffisantes (3+2 devrait convenir). Éclairer avec le laser. Alimenter le PM sous une tension moyenne ($\sim 1000\text{V}$). Mesurer le courant de sortie. Calculer, en tenant compte de l'absorption des filtres, la sensibilité en A/W du PM pour cette tension. Comparer à celle de la photodiode.

3) Influence de la tension d'alimentation sur la sensibilité (facultatif)

Accroître légèrement la tension d'alimentation du PM (de par exemple 10%) et vérifier que le signal de sortie subit une augmentation relative très supérieure. Conclure sur la nécessité d'avoir une tension d'alimentation très stable.

Facultatif : il est possible de vérifier que la sensibilité du PM obéit à la loi : $s = kV_{\text{alim}}^n$ où n est un nombre un peu inférieur au nombre de dynodes¹³.

IV) Photopiles au silicium : « cellules solaires » (facultatif)

Ce sont dans le principe des photodiodes mais fabriquées dans le but d'obtenir de la puissance avec un bon rendement énergétique et non une bonne linéarité.

On utilise ici une plaquette de 2 photopiles qui peuvent être reliées en série ou en parallèle.

1) Expérience qualitative

Éclairer la totalité de la surface des photopiles en plaçant la plaquette à quelques cm d'une lampe QI sans condenseur. Relier l'ensemble à un petit moteur continu.

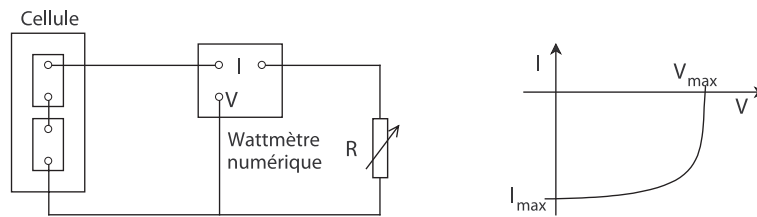
2) Mesure du rendement maximum

Éclairer les cellules comme auparavant, et les mettre en série. Réaliser le montage suivant. Pour le branchement du wattmètre, consulter sa notice.

- Mesurer V_{max} : pour cela, utiliser le wattmètre sur sa fonction voltmètre et choisir $R = \infty$.
- Mesurer I_{max} : pour cela, utiliser le wattmètre sur sa fonction ampèremètre et choisir $R = 0$.

¹²Valeurs indiquées sur le tube.

¹³Cet écart entre n et le nombre de dynodes a deux causes : relation non linéaire entre émission secondaire et tension, et efficacité de collection des électrons d'une dynode à l'autre dépendant de la tension.



- Mesurer la puissance électrique maximum : ajuster R pour avoir la puissance maximum P_{\max} (indication : un bon ordre de grandeur de R est donné par V_{\max}/I_{\max}).
- Mesurer la puissance lumineuse reçue par la cellule : utiliser la thermopile et tenir compte du rapport des surfaces¹⁴. Pour plus d'informations sur la thermopile, voir sa notice.

En déduire le rendement maximum de la cellule.

A l'heure actuelle, les cellules les plus performantes ont un rendement d'environ 20% pour une répartition spectrale correspondant à la lumière solaire.

V) Dispositifs de type CCD *cf. BUP 762 p. 471*

Ces dispositifs permettent de visualiser les variations spatiales d'éclairement. Grâce à un système de balayage qui lit les différents détecteurs élémentaires (photodiode associée à une capacité, CMOS...) les uns après les autres, les variations spatiales de l'éclairement sont transformées en variations temporelles de la tension de sortie.

On pourra observer la tension de sortie d'une barrette CCD linéaire sur un oscilloscope. Par exemple, on pourra visualiser le champ d'interférences produites par des fentes d'Young à l'aide de ce dispositif. La pixelisation est facile à montrer.

Remarques :

- ces détecteurs ayant un maximum de sensibilité dans l'infrarouge, ajouter un filtre anti-thermique si la source est une lampe à incandescence ;
- pour adapter la luminosité à la sensibilité de la caméra, interposer deux polariseurs plus ou moins croisés.

¹⁴La surface utile de la thermopile correspond à l'ensemble de sa face d'entrée.