



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHOTORÉCEPTEURS

2022-2023

Bibliographie :

- 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*
- KITTEL : *Physique de l'état solide*

Table des matières

1	[1P] Introduction	3
1.1	Détecteurs quantiques	3
1.2	Détecteurs thermiques	3
2	Photodiode (détecteur le plus couramment utilisé)	3
2.1	[1P] Caractéristique courant -- tension	4
2.2	[1P] Utilisation de la photodiode en détecteur de lumière linéaire	4
2.3	Vérification de la linéarité	5
2.4	[1P] Détermination de la sensibilité et du rendement quantique de la photodiode	6
2.5	[2P] Sensibilité spectrale	6
2.6	[AP] Temps de réponse de la photodiode	7
3	Cellules photovoltaïques	9
3.1	[1P] Généralités	9
3.2	[1P] Mesure des caractéristiques de cellules photovoltaïques	10
3.3	[1P] Rendement maximal	11
3.4	[AP] Estimation du nombre de cellules	11
4	[2P] Étude du flux lumineux d'une ampoule	12
5	[2P] Dispositifs de type CCD	13
5.1	Généralités	13
5.2	Les sources de bruit de la CCD	13
5.3	Caractérisation du bruit de lecture	14
5.4	Caractérisation du courant d'obscurité	14
5.5	Caractérisation des bruits de photon et d'obscurité	14
5.6	Autre manipulations	15
5.7	Référence complémentaire	15
6	[AP] Photomultiplicateur et granularité de la lumière	15
6.1	Théorie	15
6.2	Expériences	17

1 [1P] 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.

1.1 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.

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 (§ IV).

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 (étudié dans le TP Semiconducteurs);
- *photodiode* : en usage courant, c'est le détecteur le plus utilisé (§ II);
- *phototransistor* : photodiode avec amplification interne de courant. Il est peu linéaire et ne sera pas étudié ici.
- *photopile* : composant de grande surface qui sert à obtenir de l'énergie électrique (§ V);
- *C.C.D.* : c'est le composant de base des caméras vidéo. On dispose de plusieurs *barrettes* (à 1D) C.C.D. (Charge Coupled Device) de haute résolution qu'on utilisera dans certaines expériences d'optique (fentes d'Young, diffraction...). On illustre ici le principe de fonctionnement de ces dispositifs (§ VI). On pourra aussi utiliser des *matrices* (à 2D) qui sont à la base des caméras vidéo et des «webcams».

1.2 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.

- *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.

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.

2 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 μm ; modèles BPX 61 et BPW 34) dont le maximum de sensibilité est dans l'infrarouge proche ($\sim 0,85 \mu\text{m}$).

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



2.1 [1P] Caractéristique courant -- tension

On l'obtient à l'oscilloscope grâce au montage de la Fig. 1 (la résistance sert à la fois à mesurer et à limiter le courant) :



FIGURE 1 – Montage de la photodiode pour la caractéristique courant-tension (utiliser une résistance de l'ordre de $100k\Omega$)

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 $\sim \Phi$.

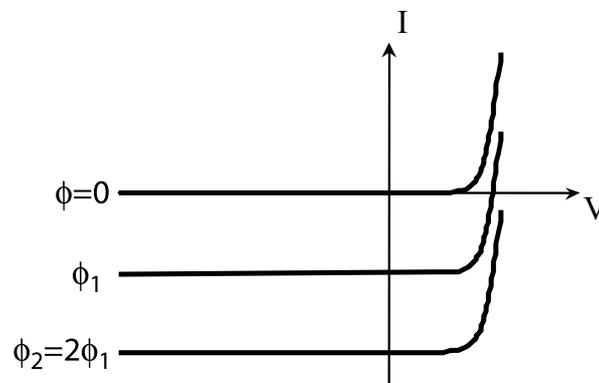


FIGURE 2 – Caractéristique courant-tension de la photodiode

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

2.2 [1P] Utilisation de la photodiode en détecteur de lumière linéaire

Photodiode non polarisée (ne pas réaliser ce montage) C'est le montage le plus simple auquel on pourrait penser.

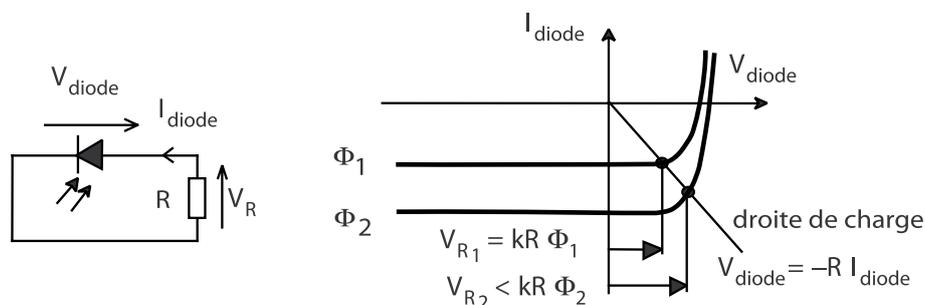


FIGURE 3 – Photodiode non polarisée

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 nA) y joue un rôle plus faible que dans le montage avec polarisation inverse.

Photodiode polarisée en inverse (montage à utiliser par la suite) 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.

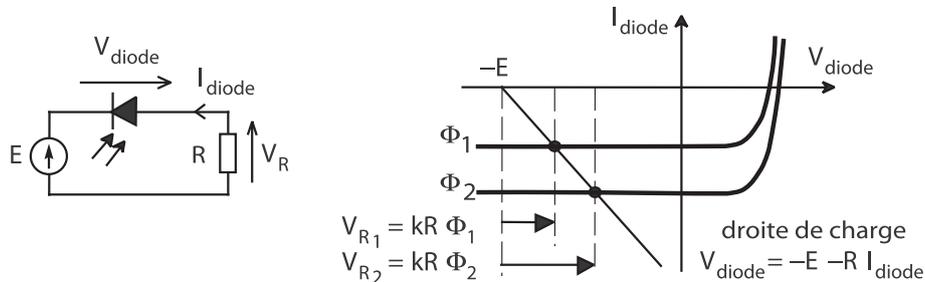


FIGURE 4 – Photodiode polarisée en inverse

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.

2.3 Vérification de la linéarité

Pour ces expériences, utiliser des DELs haute luminosité ayant atteint leur équilibre thermique, ce qui prend plusieurs minutes après leur branchement. Voir le § "Temps de réponse de la photodiode" pour leur branchement. Au cours de l'expérience ne pas les éteindre mais masquer leur faisceau au moyen d'un petit écran noir².

On évitera d'utiliser un laser (même polarisé et branché depuis longtemps³) pour lequel il faut prendre garde aux fluctuations lentes de puissance, souvent importantes.

[1P] Vérification simple En utilisant 2 DELs, montrer qu'il y a additivité des réponses en courant I :

$$I(\Phi_1) + I(\Phi_2) = I(\Phi_1 + \Phi_2). \quad (1)$$

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

[2P] Vérification complète Opérer avec des *filtres gris*⁴. On rappelle que la densité d'un filtre est

$$D = \log_{10} \frac{\Phi_{\text{incident}}}{\Phi_{\text{transmis}}}. \quad (2)$$

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.

2. Une main est un mauvais écran noir.

3. Et en aucun cas un laser non polarisé suivi d'un polariseur (Cf. Sextant p.268).

4. *Gris* signifie ici que la transmission est relativement plate spectralement.

- 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

$$\frac{I(D_1 + D_2)}{I(0)} = \frac{I(D_1)}{I(0)} \frac{I(D_2)}{I(0)}, \quad (3)$$

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 linéaire⁵,
- 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).

2.4 [1P] Détermination de la sensibilité et du rendement quantique de la photodiode

Mesurer la puissance d'un laser He-Ne grâce au puissance-mètre optique (N.139), outil beaucoup plus adapté aux lasers que le détecteur pyroélectrique décrit plus bas (il s'agit en fait d'une photodiode calibrée). Ensuite, en mesurant le courant aux bornes de la photodiode, en déduire la sensibilité de la photodiode dans le rouge (en $A \cdot W^{-1}$) et son rendement quantique en électron par photon (voir le Sextant). Comparer aux valeurs annoncées par le constructeur.

2.5 [2P] 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.

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.

Étude complète de la sensibilité spectrale (ne pas y passer trop de temps) On utilise le monochromateur avec son illuminateur (notice 328). 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)⁶. On étudie tout d'abord le spectre émis par le monochromateur au moyen d'un détecteur pyroélectrique dont la réponse spectrale est quasiment plate⁷. On se reportera à la notice 539 et au Sextant pour des informations sur le principe de fonctionnement de cet appareil, qui nécessite une modulation d'intensité lumineuse à l'aide d'un hacheur optique. La tension délivrée est alors proportionnelle à la variation de température de la surface sensible entre les phases faisceau coupé/faisceau passant. Observer le signal

5. Il faudrait en toute rigueur le vérifier pour plusieurs couples (D_1, D_2).

6. L'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.

7. Ne pas utiliser la thermopile pour cette expérience, sa sensibilité est beaucoup trop faible et dépend beaucoup du point d'impact du faisceau.



à l'oscilloscope. La sensibilité du détecteur est étalonnée pour différentes valeurs de la fréquence de modulation, permettant de remonter, à partir de la tension crête-crête, à la puissance lumineuse reçue (voir la notice). Ici, on ne s'intéresse qu'à des mesures relatives de la sensibilité et on pourra donc plus simplement (et donc plus rapidement) mesurer la tension avec un voltmètre RMS, en restant cependant à la même fréquence pour le hacheur optique. Il est important de bien condenser à l'aide d'une lentille la lumière en sortie du monochromateur sur les détecteurs, car les signaux obtenus sinon sont très faibles, particulièrement pour le détecteur pyroélectrique.

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.

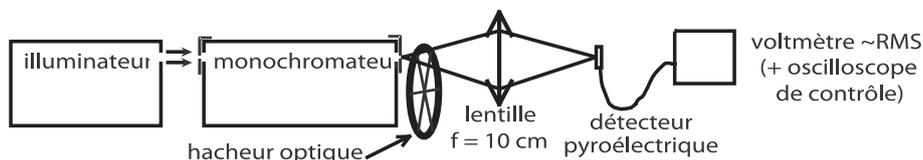


FIGURE 5 – Mesure de la sensibilité spectrale du détecteur pyroélectrique

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 spectre⁸ qui apparaît alors.

On mesure 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 pyroélectrique.

On remplace ensuite le détecteur pyroélectrique par la photodiode à étudier et on mesure son signal aux mêmes longueurs d'onde que précédemment.

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

NB : on peut aussi balayer le spectre continûment en utilisant le moteur du monochromateur, utiliser l'ordinateur pour faire un suivi temporel automatisé des courbes de réponse, et faire leur rapport⁹.

2.6 [AP] Temps de réponse de la photodiode

La photodiode est un composant rapide, ce qui impose l'emploi d'une source lumineuse rapide pour tester son temps de réponse. Dans cette expérience quantitative, on ne pourra qu'établir une limite supérieure sur le temps de réponse. Pour cette expérience, on choisira impérativement une diode électroluminescente (DEL) rouge de haute luminosité.

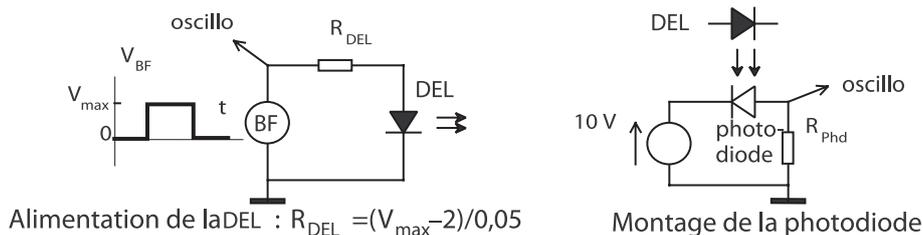


FIGURE 6 – Alimentation de la DEL et montage de la photodiode

La Fig. 13 (à 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).

8. Si l'on veut l'éliminer, on peut utiliser un filtre (par exemple le filtre OG590).

9. Il faut alors prendre garde que les points pris lors des deux acquisitions ne correspondent pas nécessairement exactement aux mêmes longueurs d'onde, mais cet effet est peu important pour un spectre d'émission variant lentement.

Enfin vérifier que le temps de montée des signaux carrés donnés par le GBF ne dépasse pas $0,1 \mu\text{s}$, sinon prendre un autre GBF.

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 mesurera¹⁰ 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.

On en conclut que :

- 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 $R_{\text{Phd}} = 100\text{k}\Omega$.

Exploitation quantitative On se donne le modèle *linéaire* suivant pour le circuit¹¹ :

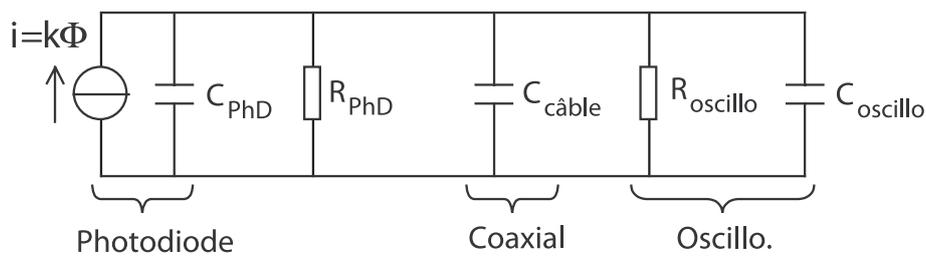


FIGURE 7 – Modèle du circuit

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

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

$$\frac{\tau}{(R_{\text{PhD}}R_{\text{oscillo}}/(R_{\text{PhD}} + R_{\text{oscillo}}))} = \text{Cste} \quad (4)$$

avec $\text{Cste} = C_{\text{PhD}} + C_{\text{câble}} + C_{\text{oscillo}} \simeq C_{\text{câble}}$.

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 : $\tau/R_{\text{PhD}} \gg C_{\text{câble}}$. 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, trop faible, est généralement trop bruité pour être exploitable.

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

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.

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

11. Pour 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.

3 Cellules photovoltaïques

3.1 [1P] Généralités

Introduction Les cellules photovoltaïques permettent de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Elles se présentent sous la forme de plaques sombres, équipées de bornes pour brancher des charges (accumulateur ou charge utile en utilisation directe). Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques, nous allons uniquement nous intéresser aux technologies silicium, qui constituent la grande majorité des cellules commerciales.

Les cellules photovoltaïques au silicium sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium, sur le même principe que la photodiode. La différence entre ces deux objets est technologique : les photodiodes sont optimisées pour avoir le plus fort courant inverse sous éclairage, dans un domaine spectral donné, afin d'être utilisées comme capteur. Les cellules photovoltaïques sont optimisées pour fournir la puissance maximale pour un éclairage dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire. Deux paramètres importants d'une photopile sont le courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{co} , ces deux paramètres dépendant de l'éclairage incident.

Jonction PN au silicium Au § II, nous avons étudié la jonction PN en convention récepteur, comme capteur de flux lumineux (voir Fig. 9, cas a). On remarque que pour un éclairage non nul, il existe une région de la caractéristique de la jonction où la puissance reçue est négative. C'est ce domaine qui est exploité dans les cellules photovoltaïques.

Désormais, nous considérons la jonction en convention générateur, soumise à un éclairage. On obtient alors la caractéristique de la Fig. 9 (cas b).

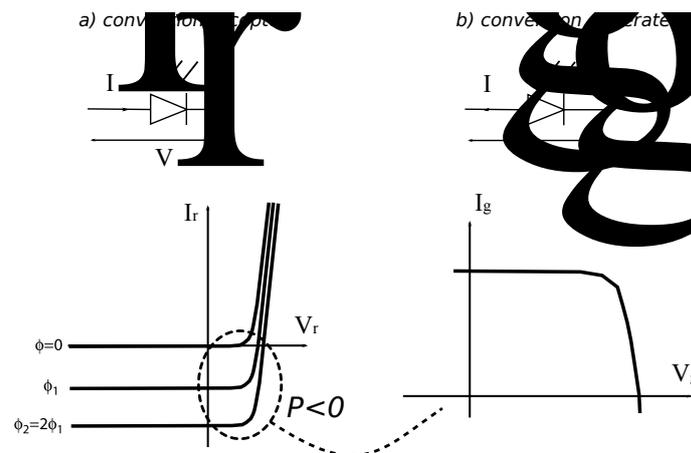


FIGURE 8 – Caractéristique de la cellule photovoltaïque

Au niveau microscopique, la génération du courant provient de l'absorption d'un photon aboutissant à la création d'une paire électron-trou au niveau de la jonction, schématisée sur la Fig. 10. L'énergie du photon $h\nu$ est absorbée et transférée à un électron excité de la bande de valence vers la bande de conduction. Cet électron relaxe très rapidement vers le minimum de la bande de conduction, cédant son énergie cinétique $h\nu - E_g$ au cristal sous forme de chaleur, où E_g est la largeur de la bande interdite ("gap"). Sous l'action du champ électrique régnant dans la jonction, il est collecté par une électrode. Symétriquement, le trou associé relaxe également dans la bande de valence et est collecté par une deuxième électrode. Il apparaît ainsi aux bornes du dispositif une tension en circuit-ouvert de l'ordre de E_g/q (en pratique $V_{co} \approx E_g/2q$) où q est la charge de l'électron. Le courant de court-circuit correspond au flux d'électrons photocréés. Il correspond donc au flux de photons absorbés multiplié par q et par le rendement quantique (voir Sextant).

Une faible valeur de E_g permet l'absorption de la plupart des photons du spectre solaire (et donc un courant important). Une grande valeur de E_g permet d'obtenir une tension élevée. Un compromis entre les deux permet d'optimiser la puissance, en pratique pour des gaps de l'ordre de 1 à 2 eV. Le silicium avec un gap de 1,1 eV est

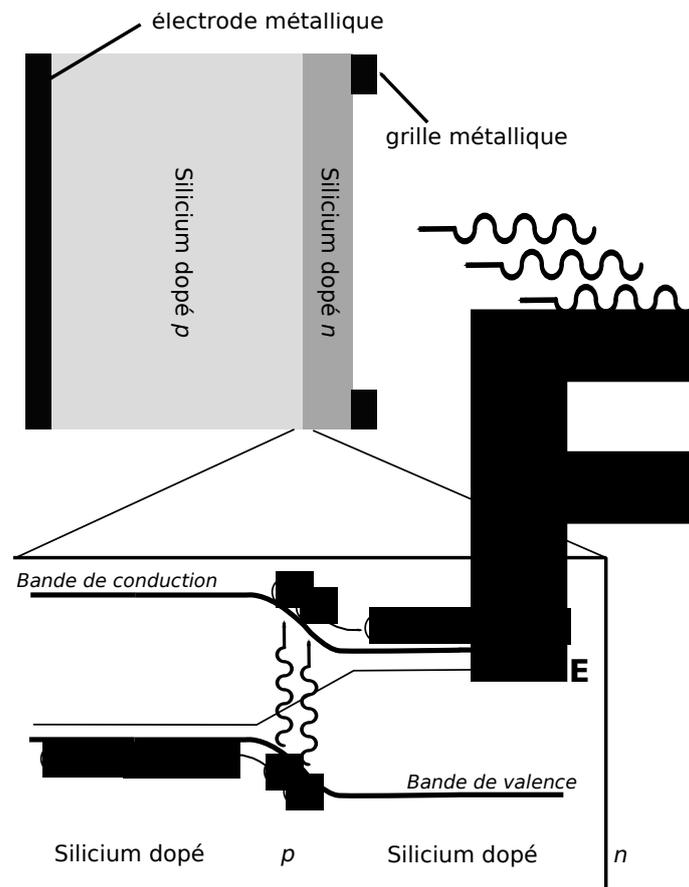


FIGURE 9 – Jonction p-n d'une cellule photovoltaïque

bien adapté, et possède également de nombreux avantages au niveau industriel (légèreté et faible coût, maîtrise des techniques de la microélectronique).

Associations série ou parallèle La tension en circuit ouvert est liée au gap du matériau utilisé ($V_{co} \approx 0,6V$ pour le silicium). Afin d'augmenter la tension délivrée, à charge donnée, on associera plusieurs cellules ("une cellule = une jonction") en série. Ainsi, la tension en circuit ouvert de N jonctions en série, éclairées identiquement, est alors $V_{N,co} = NV_{co}$, où V_{co} est la tension en circuit ouvert d'une cellule unique.

De manière similaire, si à éclairage donné la charge nécessite un courant plus élevé que celui d'une cellule unique, on les associera en parallèle.

Au final, le nombre d'association en série ou en parallèle sera adapté suivant la charge à alimenter.

3.2 [1P] Mesure des caractéristiques de cellules photovoltaïques

Outre le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert, on se propose de tracer la caractéristique complète de plusieurs cellules photovoltaïques. Pour cela, nous disposons de trois type de cellules photovoltaïques différentes :

- cellules en silicium amorphe,
- cellules en silicium polycristallin,
- cellules en silicium monocristallin.

Afin d'avoir un éclairage le plus homogène possible, placer la cellule à étudier à une trentaine de centimètres d'une quartz-iode sans condenseur. Placer également à côté (à la même distance du filament) une pile de Moll (notice 80) permettant de mesurer le flux surfacique incident. Réaliser le montage électrique suivant



FIGURE 10 – Etude des cellules photovoltaïques

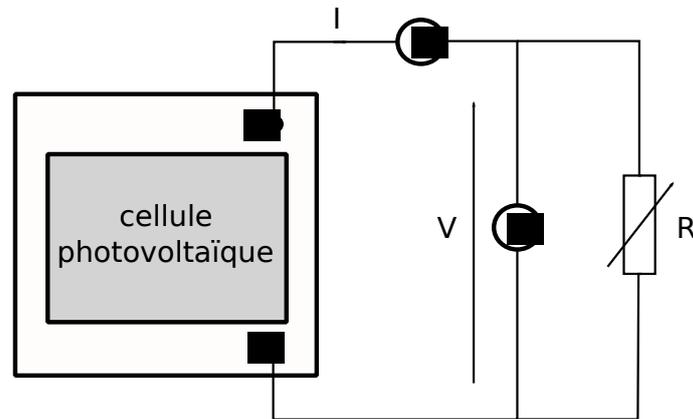


FIGURE 11 – Montage électrique de la cellule photovoltaïque

On pourra éventuellement remplacer l'ensemble ampèremètre+voltmètre par un wattmètre, mais les mesures de tension et d'intensité seront alors généralement moins précises. Comme charge, on prendra une résistance variable allant de $1\ \Omega$ à $1\ \text{k}\Omega$ (boîte à décades).

Pour chaque type de cellule, mesurer la tension et le courant délivré pour plusieurs valeurs de résistance de charge, et reconstruire la caractéristique.

3.3 [1P] Rendement maximal

Tracer également la puissance utile en fonction de la charge. A l'aide de la pile de Moll (dont on aura enlevé le filtre anti-thermique), calculer le flux lumineux surfacique incident, et en déduire le rendement (en mesurant précautionneusement la surface des cellules utilisées) pour chaque type de cellules. Quelle hiérarchie de rendement suivant le type de cellule observe-t-on ?

Une des sources de pertes dans les cellules photovoltaïques sont les recombinaisons de porteurs. Ces dernières sont particulièrement importantes au niveau des défauts (de surface et de volume) et des impuretés du matériau utilisé. A la lumière de cela, commenter le résultat précédent.

3.4 [AP] Estimation du nombre de cellules

Pour une jonction PN, on a le lien entre le courant et la tension (en convention récepteur) suivant : $I_p = I_{cc}(\Phi) + I_s \left(e^{\frac{eV_p}{k_B T}} - 1 \right)$, où $I_{cc}(\Phi)$ est le courant parcouru par la cellule court-circuitée, pour un flux surfacique Φ donné.

Dans le cas de N cellules en série, on obtient alors $I = I_{cc}(\Phi) + I_s \left(e^{\frac{eV}{Nk_B T}} - 1 \right)$, où V et I sont les tension et courant mesurés.

En procédant à un ajustement des caractéristiques tracées précédemment, estimer le nombre de cellules branchées en série pour chaque type considéré. Vérifier que cela est cohérent avec l'estimation que l'on peut faire à partir de la tension en circuit ouvert (nombre de cellules en série = $V_{co}/0,6V$ pour le silicium).



On pourra également associer en série ou parallèle deux cellules de même type, et tracer les caractéristiques correspondantes.

4 [2P] Étude du flux lumineux d'une ampoule

Cette expérience propose de vérifier la loi en $1/r^2$ du flux lumineux d'une source ponctuelle. On prend pour cela comme source lumineuse une ampoule à filament de tungstène. On supposera que le front d'onde local issu de cette source est approximativement sphérique suffisamment loin de celle-ci. En pratique, il est suffisant de se placer à au moins une vingtaine de centimètre de l'ampoule.

On prendra une ampoule à filament 60W/220V sur support, qu'on alimentera avec une transformateur 220V/220V. Les transformateurs pouvant généralement monter un peu plus haut en tension (notamment car le secteur est à présent en 230V), on prendra soin de ne pas dépasser 220V. Cette ampoule peut être entourée d'un cache cylindrique, permettant de n'éclairer que dans une direction, et elle pourra être mise sur un chariot élévateur pour contrôler sa position verticale. La mesure du flux lumineux se fera à l'aide d'une photodiode auto-alimentée, disposée sur un banc optique. L'utilisation d'un banc optique est nécessaire pour cette manipulation, car il permet une mesure précise du déplacement de la photodiode. On essaiera d'aligner aussi proprement que possible le banc optique avec la source lumineuse, et de mettre le photorécepteur à la même hauteur que l'ampoule.

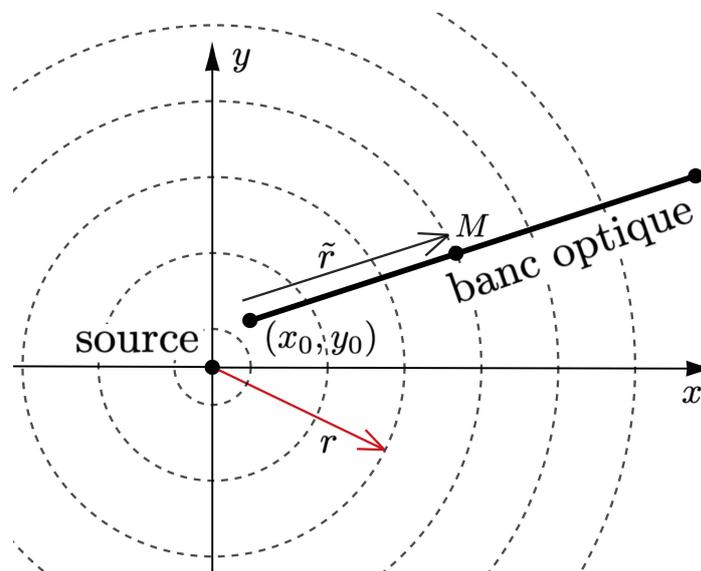


FIGURE 12 –

Une difficulté pour le traitement de cette manipulation est qu'un léger écart d'alignement peut fausser l'exposant 2 attendue pour la décroissance du flux lumineux. Par ailleurs, l'onde localement sphérique étudiée aura pour origine une source ponctuelle fictive, dont la position pourra différer légèrement de celle de l'ampoule. Une situation réelle est illustrée dans le figure ci-dessus, dont on prendra les notations, et où le centre du repère polaire correspond à la position de la source ponctuelle fictive. On suppose que l'origine du banc optique est en (x_0, y_0) , et que le vecteur directeur normalisé repérant la coordonnée \tilde{r} associée au banc optique est $\vec{e}_{\tilde{r}} = (\alpha, \beta)$. On obtient alors que la coordonnée polaire r du point M est :

$$r = \sqrt{(x_0 + \alpha\tilde{r})^2 + (y_0 + \beta\tilde{r})^2} = \sqrt{\tilde{r}^2 + 2(\alpha x_0 + \beta y_0)\tilde{r} + (x_0^2 + y_0^2)}, \quad (5)$$

où on a utilisé le fait que $\vec{e}_{\tilde{r}}$ est de norme unité.

Supposant un front d'onde localement sphérique, on donc attend un flux lumineux en :

$$U = \frac{U_0}{r^2} = \frac{U_0}{\tilde{r}^2 + a\tilde{r} + r_0^2}, \quad (6)$$

où r_0 caractérise la position de l'origine du banc optique par rapport à la source ponctuelle fictive. On supposera que des éventuels effets d'alignements entre le photorécepteur et le front d'onde sont négligeables. Effectuer cet ajustement pour confirmer la loi attendue.

5 [2P] Dispositifs de type CCD

5.1 Généralités

Les dispositifs de type CCD 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) les uns après les autres, les variations spatiales de l'éclairement sont transformées en variations temporelles de la tension de sortie, laquelle est amplifiée puis numérisée.

En TP, la caméra CCD est très utile pour établir des profils d'intensité lumineuse. On peut se référer par exemple au poly de TP *Diffraction* dans lequel on visualise la figure de diffraction d'un faisceau laser par une fente à l'aide de la CCD.

On s'intéresse par la suite à caractériser une CCD en tant que capteur plutôt que de s'en servir pour effectuer des mesures.

Un **programme Jupyter notebook** est disponible (sur le site du Jury de l'Agrégation) pour traiter les données expérimentales.

Attention

- ces détecteurs ayant un maximum de sensibilité dans l'infrarouge, ajouter un filtre antithermique si la source est une lampe à incandescence ;
- pour adapter la luminosité à la sensibilité de la caméra si elle sature, il peut être nécessaire d'interposer deux polariseurs plus ou moins croisés ou de mettre un ou des filtre(s) de densité gris. On peut également jouer sur le temps d'exposition.

5.2 Les sources de bruit de la CCD

La CCD donne pour chaque pixel un nombre de coups (i.e. un code numérique entier) N linéairement lié au nombre de photoélectrons ϕ produits durant le temps d'exposition :

$$N = \frac{\phi}{G} + n + B, \quad (7)$$

avec G le gain (en électrons/coups) du convertisseur analogique/numérique (CAN) de la barrette CCD, B un biais (décalage) ajouté par le CAN et n un nombre aléatoire de coups introduit par la chaîne d'acquisition du CCD. Le nombre de photoélectrons produits $\phi = \phi_\gamma + \phi_d$ est la somme des photons effectivement convertis en électrons ϕ_γ et de l'intégrale ϕ_d du courant d'obscurité généré par la CCD elle-même (qui dépend de la température selon une loi de Boltzmann).

Dans un dispositif de type caméra / CCD, on peut donc distinguer plusieurs sources indépendantes de bruit :

- **le bruit de photons** lié à la fluctuation du nombre de photons arrivant sur le capteur (voir le § sur le photomultiplicateur) qui est **poissonien**,

il est pris en compte en décrivant ϕ_γ par une distribution de Poisson, de paramètre $\langle \phi_\gamma \rangle$ proportionnel au nombre moyen de photons incidents et donc au temps d'exposition. Il ne dépend pas du capteur CCD en soi, mais est lié à la source : il sera donc nul si la CCD n'est pas éclairée ;

- **le bruit d'obscurité** (dark) lié à la fluctuation du nombre d'électrons émis par le capteur par agitation thermique qui est **poissonien** aussi,



il est décrit par ϕ_d , une distribution de Poisson de paramètre $\langle \phi_d \rangle$ aussi proportionnel au temps d'exposition, mais indépendant du flux lumineux incident ;

- ' le bruit de lecture' (readout) lié aux caractéristiques électroniques des instruments électroniques et numériques de la caméra (convertisseurs analogiques / numériques, amplification etc.) qui est **gaussien**,

il est décrit par n , une distribution de Gauss de moyenne nulle et d'écart type σ_{ro} , indépendant du temps d'exposition ou du flux lumineux incident.

Ainsi en prenant en compte ces erreurs, on voit que ϕ , en tant que somme de deux distributions de Poisson est également une distribution de Poisson, de paramètre $\langle \phi \rangle = \langle \phi_\gamma \rangle + \langle \phi_d \rangle$. L'espérance et la variance du nombre de coups peuvent donc s'écrire :

$$\langle N \rangle = \frac{\langle \phi \rangle}{G} + B, \quad \text{Var } N = \frac{\langle N \rangle - B}{G} + \sigma_{ro}^2 \quad (8)$$

où on rappelle que la variance d'une loi poissonnienne est égale à sa moyenne : $\text{Var}(\phi/G) = \langle \phi \rangle / G^2$, et que la moyenne (ou la variance) de la somme de processus indépendants, est égale à la somme des moyennes (ou des variances) de ces processus.

5.3 Caractérisation du bruit de lecture

Pour ces expériences, on utilisera la caméra CCD Mightex avec le logiciel *CCDCameraApp* (Notice 189).

Le biais B peut être évalué en l'absence de signal incident et de courant d'obscurité. Pour cela, acquérir une image avec un temps d'exposition le plus court possible, avec un (bon) cache, et dans l'obscurité la plus totale (la main ne suffit pas, elle est transparente dans l'IR !). Vérifier que le signal obtenu est bien gaussien en traçant l'histogramme des valeurs. En déduire ainsi B et σ_{ro} . Pour cela, on pourra soit évaluer directement la moyenne et l'écart-type de la distribution, soit effectuer l'ajustement de la distribution Gaussienne, et en revenir à la valeur de ses paramètres.

5.4 Caractérisation du courant d'obscurité

Répéter la manipulation précédente avec des temps d'exposition non nuls, toujours avec un cache et dans l'obscurité.

Tracer la moyenne des distributions obtenues en fonction du temps d'exposition et vérifier que le signal moyen est une fonction affine du temps. Ceci donne le courant d'obscurité à une température de capteur donnée (la valeur de ce courant suit une loi de Boltzmann avec la température). Déduire de la pente de cette courbe la valeur du courant d'obscurité, et retrouver la valeur moyenne du biais par l'ordonnée à l'origine.

Tracer également l'écart type des distributions $\text{Var}N$ en fonction de leur moyenne moins le biais $\langle N \rangle - B$, et vérifier qu'il s'agit bien d'une loi affine. On peut retrouver ainsi le gain (pente) et σ_{ro} (ordonnée à l'origine).

Remarque : la moyenne peut être biaisée par des pixels défectueux, dont la valeur est anormalement élevée par rapport

5.5 Caractérisation des bruits de photon et d'obscurité

Dans cette partie, on va acquérir des signaux de *flat*, c'est-à-dire une image avec un éclairage uniforme. On utilise pour cela l'écran blanc rétroéclairé et on va faire des mesures à différents temps d'exposition. Pour montrer que la statistique du bruit de photons est bien poissonnienne, il faut vérifier que la relation $\text{Var } N$ en fonction de $\langle N \rangle$ est bien affine. Toutefois, il y a deux difficultés expérimentales :

- l'éclairage n'est pas assez uniforme sur toute la barrette CCD : il faut moyenniser sur une zone de la CCD où le profil d'intensité est à peu près plat ;
- il y a des pixels qui sont défectueux



Pour résoudre ces soucis, on acquiert des paires de *flat* (changer *Grab Frames* à 2 dans *CCDCameraApp* pour acquérir deux poses successives). On calcule ensuite la variance de la différence entre deux acquisitions successives, divisée par deux, et la demie moyenne de la somme des deux dont on soustrait le biais B évalué précédemment. Ainsi la variance n'est pas affectée par les pixels morts et la forme générale du profil d'intensité qui se soustraient. Ceci donne respectivement $\text{Var } N$ et $\langle N \rangle - B$.

La représentation de la variance en fonction de la moyenne mène ainsi à la relation affine introduite plus haut :

$$\text{Var } N = \frac{\langle N \rangle - B}{G} + \sigma_{ro}^2 \quad (9)$$

Par un ajustement de la variance en fonction de la moyenne, on peut évaluer le gain du CCD, et de nouveau le bruit de lecture σ_{ro} .

On corrobore ainsi la modélisation faite des différents types de bruits sur ce capteur CCD.

5.6 Autre manipulations

D'autres caractéristiques du capteur CCD pourraient être explorées avec le matériel à disposition : linéarité du capteur, rendement quantique. Avec une caméra dont on contrôlerait la température, on pourrait aussi vérifier le caractère boltzmanien du courant d'obscurité. Il est aussi possible de vérifier la statistique du bruit des pixels individuels en faisant un grand nombre d'expositions, et la comparer aux résultats précédents. Pour étudier les concepts d'acquisition et d'analyse d'images, on peut aussi faire remarquer la discrétisation spatiale du signal liée à la taille des pixels, et en amplitude lié à sa numérisation (avec une saturation) : ces effets d'acquisition limitent le potentiel d'analyse d'une image numérique.

5.7 Référence complémentaire

Voir le BUP 762 (p. 471), *Les capteurs CCD : Initiation à la théorie et à la pratique*.

6 [AP] Photomultiplicateur et granularité de la lumière

Le but de cette expérience est d'utiliser un photomultiplicateur pour mettre en évidence le bruit de photon, inhérent à toutes les sources de lumière du fait de leur nature corpusculaire.

6.1 Théorie

Origine du bruit de photon Le bruit de photon, aussi appelé bruit quantique ou bruit de grenaille ("shot noise"), désigne le bruit de fond qui limite fondamentalement la précision avec laquelle on peut mesurer la quantité de photons reçus par unité de temps au niveau d'un photodétecteur. Il s'explique par le caractère aléatoire de l'émission spontanée, les photons ayant par conséquent des temps d'arrivée aléatoirement variables sur le détecteur. Le bruit de photon pose surtout problème dans les observations à très basse puissance lumineuse. En astronomie par exemple, il introduit une fluctuation aléatoire sur la luminosité des différents points d'une image, ce qui la rend bruitée.

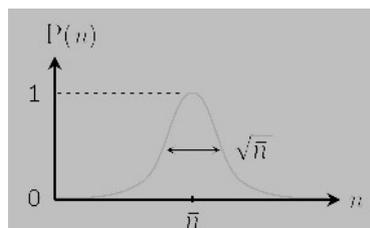


FIGURE 13 – L'arrivée des photons sur un détecteur suit une répartition gaussienne.

Mathématiquement, on peut montrer qu'une suite stationnaire d'évènements indépendants et sans mémoire suit nécessairement une loi de Poisson. Par conséquent, cette statistique s'applique à la détection de photons émis par



un signal lumineux de puissance moyenne constante. Ainsi, la probabilité de détecter n photons dans un intervalle de temps donné, lorsque \bar{n} sont émis en moyenne vaut

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}} \quad (10)$$

Pour les grandes valeurs de n , cette distribution a une forme gaussienne centrée en \bar{n} d'écart-type $\sqrt{\bar{n}}$. Le rapport signal sur bruit ("Signal-to-Noise Ratio") d'une mesure étant défini par le rapport de la moyenne par l'écart-type, on obtient

$$SNR = \sqrt{\bar{n}} \quad (11)$$

Ainsi, toute mesure d'intensité lumineuse est limitée par la détection aléatoire des photons. Cela se traduit par un rapport signal-sur-bruit qui s'améliore à mesure qu'on va vers les fortes intensités.

Principe de fonctionnement d'un photomultiplicateur Un photomultiplicateur est un photodétecteur très sensible, capable de détecter des photons uniques. Il se compose d'une photocathode qui convertit les photons en électrons par effet photoélectrique, et d'une anode collectrice qui délivre le courant de sortie. Afin que ce courant soit significatif, il est nécessaire d'amplifier grandement le nombre d'électrons émis par la photocathode (d'un facteur environ 10^6). C'est pourquoi cathode et anode sont séparées par toute une série d'électrodes appelée dynodes, portées à des potentiels croissants, qui procèdent par effet d'avalanche et produisent un courant mesurable, proportionnel à l'intensité lumineuse incidente.

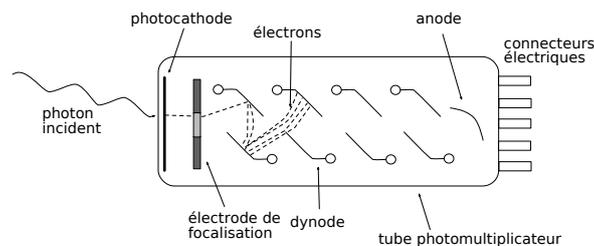


FIGURE 14 – Schéma de principe du tube photomultiplicateur

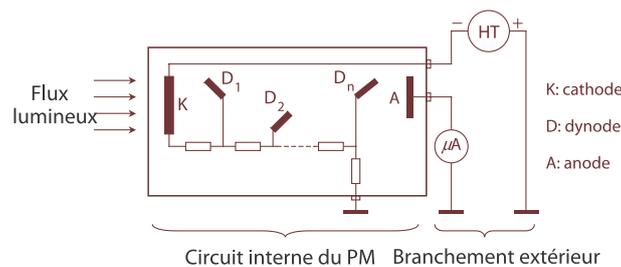


FIGURE 15 – Schéma de principe du tube photomultiplicateur

- On appelle rendement quantique du photomultiplicateur le taux d'efficacité de la conversion photons-électrons. Souvent noté η , il s'exprime simplement comme

$$\eta = \frac{N_{\text{electrons emis}}}{N_{\text{photons recus}}} \quad (12)$$

Attention, il ne s'agit pas du facteur d'amplification des dynodes ! En effet, ce dernier quantifie l'intensité du signal électrique provoqué par l'arrivée d'UN photon, tandis que le rendement quantique désigne la proportion de photons qui donnent effectivement lieu à un signal. Autrement dit, il y a une probabilité non nulle pour qu'un photon ne donne lieu à aucun électron à son arrivée sur le détecteur.

- On appelle taux de comptage ("count rate") le nombre de photons effectivement détectés par unité de temps. On le note Γ . Il s'exprime en Hz. Il est lié à la puissance P du rayonnement incident et à sa fréquence ν par la relation

$$\Gamma = \eta \frac{P}{h\nu} \quad (13)$$

où h désigne la constante de Planck. Dans la première des expériences décrites ci-dessous, on se propose d'utiliser cette relation pour remonter au rendement quantique à l'aide de mesures indépendantes de Γ et P .

- Enfin, on appelle taux de comptes noirs ("dark counts") le nombre de "faux" photons détectés par unité de temps. Autrement dit, s'il arrive parfois qu'un photon incident ne parvienne pas à arracher un électron, inversement il arrive qu'un électron soit émis par la photocathode alors même qu'elle n'a reçu aucun photon. Ce phénomène s'explique par diverses fluctuations (bruit électrique, agitation thermique) et donne lieu à un courant dit courant d'obscurité.

6.2 Expériences

Attention : le photomultiplicateur utilisé dans ces expériences est très fragile et ne supporte pas les puissances lumineuses supérieures à ses spécifications. Bien qu'il soit protégé par un filtre optique de densité 6, on veillera à éteindre la lumière de la pièce avant de brancher son alimentation. Réciproquement, on débranchera systématiquement le boîtier avant de rallumer la pièce. On pourra s'aider d'une lampe de poche en veillant à ne pas la diriger directement vers l'entrée du photomultiplicateur.

Caractérisation du photomultiplicateur On dispose d'un photomultiplicateur (PM) de marque Hamamatsu, modèle H12525-01, notice N.320, ENSP 3457. On cherche dans cette partie à déterminer ses caractéristiques principales : taux de comptes noirs, taux de saturation, sensibilité, rendement quantique.

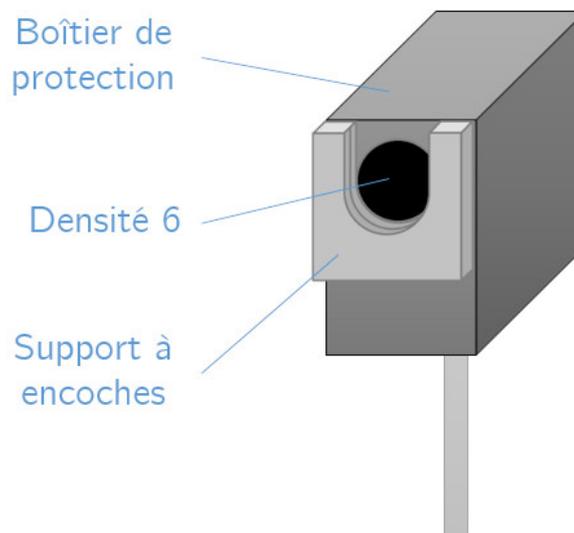


FIGURE 16 –

Eteindre la lumière de la pièce, puis brancher l'alimentation du PM sur le secteur. Regarder sa sortie à l'oscilloscope en mode "peak detect" (menu "acquire"). A l'aide d'acquisitions "single" successives, visualiser les pics individuels correspondant aux arrivées aléatoires des photons sur le PM. Constaté les variations de la densité de pics quand la luminosité varie. Estimer le taux de comptage correspondant à l'obscurité de la pièce.

- Pour mesurer le taux de comptage à partir d'une acquisition "single", on peut compter "à la main" le nombre de pics présents et diviser par la durée de la fenêtre. Pour réduire l'erreur statistique, on peut vouloir compter les photons sur une durée bien plus longue, auquel cas le faire à la main devient fastidieux. On pourra alors

utiliser une clé USB pour exporter le fichier depuis l'oscilloscope vers le logiciel Python, et utiliser le script "countrate.py" qui renvoie la valeur numérique de Γ .

- Pour une base de temps donnée, la fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope est indiquée en haut à droite de l'écran en Sa/s (« sample/sec » pour « échantillon/sec »), unité équivalente au Hz. Quelle condition doit respecter le taux de comptage Γ afin que l'oscilloscope ne manque aucun photon ? Dans toute la suite, on veillera à ce que cette condition soit respectée.

Taux de comptes noirs : Obturer la face d'entrée du PM le mieux possible (il faut insérer le petit carton dans la première encoche, la plus proche du PM, sinon il y a encore de la lumière parasite qui passe). Ajuster le noir jusqu'à ce que la densité de pics à l'écran vous paraisse minimale. Mesurer le taux de comptes noirs. Le comparer à la valeur donnée dans la notice de l'appareil.

Taux de saturation : Faire une acquisition "single" du signal correspondant à la détection d'un photon unique. Mesurer sa largeur typique et en déduire un ordre de grandeur du taux de comptage maximal. Comparer à la valeur de saturation de la notice (courbe de calibration).

Sensibilité et rendement quantique : A l'aide d'un laser (de préférence un He-Ne, qui émet une puissance plus stable qu'une diode), d'un puissance-mètre et de densités optiques variables, tracer la courbe d'étalonnage $\Gamma = f(P)$. On veillera à limiter au maximum la lumière parasite afin de pouvoir faire des points à très basse puissance laser (utiliser le tube de carton noir prévu à cet effet). Pour chaque valeur de puissance, estimer l'erreur statistique associée à votre mesure en la réalisant plusieurs fois (il est fortement conseillé de s'aider de Python pour le traitement). Quelles sont les limites haute et basse du domaine de linéarité ? Quelle est la sensibilité du PM dans la partie linéaire en MHz/pW ? Comparer aux valeurs typiques de sensibilité indiquées dans la notice. Remonter au rendement quantique (on attend une valeur de l'ordre de 0,3%).

Statistique poissonnienne du bruit de photon Afin de montrer que l'arrivée des photons suit une loi de Poisson, on va moyenniser le signal sur des durées variables et montrer que son SNR augmente en $\sqrt{n} = \bar{\Gamma}\sqrt{t}$.

- Acquérir à l'oscilloscope une fenêtre de durée $T = 1$ sec, à basse puissance laser. Typiquement un taux de comptage de $10^4 - 10^5$ Hz (attention à ne pas sortir du domaine de linéarité du PM).
- Importer le fichier sur QtiPlot et normaliser le signal à 1. Calculer sa moyenne et son écart-type. En déduire son SNR.
- Lisser le signal précédent par une moyenne glissante à l'aide d'une fenêtre de moyennage de durée $0,01T$. Calculer sa moyenne et son écart-type. En déduire son SNR.
- Recommencer pour des fenêtres de moyennage de taille t variable. Tracer la courbe $\text{SNR} = f(t)$ en échelle logarithmique. Conclure.

