

## Détecteurs quantiques de PAR et de rayonnement solaire validité, conditions d'emploi, étalonnage

Anne Labouret<sup>1</sup>

**Résumé :** *Les cellules photovoltaïques, dont le courant varie proportionnellement au flux lumineux incident, permettent de réaliser des détecteurs étanches peu onéreux, très utiles dans divers domaines de l'agronomie. Grâce aux technologies de cellules au silicium, présentant des réponses spectrales différentes, on peut accéder à la mesure du rayonnement utile à la photosynthèse (PAR : Photosynthetically Active Radiation ou rayonnement photosynthétique actif) et au rayonnement solaire global (RG). Moyennant des précautions d'emploi, ces détecteurs sont intéressants surtout pour multiplier les points de mesure sur le terrain.*

*Cet article détaille leur conception, leur mode de fonctionnement et les règles d'utilisation.*

**Mots clés :** détecteurs, silicium, PAR, rayonnement, rayonnement solaire, étalonnage

### Introduction

Le rayonnement solaire, impliqué dans la plupart des processus biologiques et chimiques de la vie sur terre, est constitué de diverses composantes : visible, ultraviolets, proche infrarouge, infrarouge lointain, qui n'ont pas le même rôle, notamment sur les mécanismes de croissance, de morphologie et de pathologie végétale ou animale, thèmes essentiels de la recherche en agronomie.

Par ailleurs, ces rayonnements sont très variables en fonction du lieu géographique, de la saison, de l'heure, des conditions climatiques et aussi localement par exemple en fonction de l'interaction avec le couvert végétal. Il est donc intéressant de disposer d'une solution à la fois scientifiquement correcte et économiquement viable afin de maîtriser et de multiplier la mesure de rayonnement, dans le temps et dans l'espace. Les détecteurs quantiques au silicium, utilisant la conversion photovoltaïque de la lumière en électricité, répondent à ces préoccupations. Ils sont à distinguer des détecteurs thermiques qui, quant à eux, utilisent la conversion de la lumière en chaleur.

### 1. Intérêt des cellules photovoltaïques pour la mesure de rayonnement

On emploie des cellules photovoltaïques pour mesurer le rayonnement, surtout parce qu'elles ont un signal directement proportionnel au flux lumineux et qu'elles présentent (selon leur technologie de fabrication) des réponses spectrales adaptées à différents types de rayonnement et des surfaces variant de moins de 1 cm<sup>2</sup> à plusieurs dizaines de cm<sup>2</sup>. De plus, grâce aux techniques éprouvées de protection climatique des panneaux solaires, elles constituent des capteurs fiables et bon marché.

#### 1.1 Principe de conversion

Un détecteur quantique utilise un dispositif à base de semi conducteur, une photodiode, généralement au silicium, qui a la faculté de convertir le flux lumineux en courant continu. Le mécanisme est celui de la conversion photovoltaïque : un photon dont l'énergie est supérieure

---

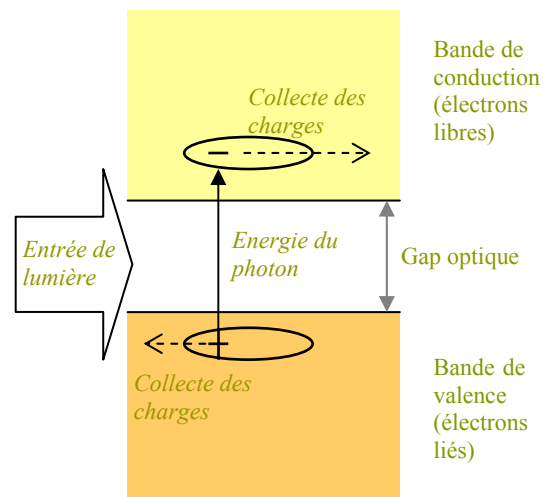
<sup>1</sup> SOLEMS S.A., 3 rue Léon Blum, F-91120 Palaiseau ✉ [anne.labouret@solems.com](mailto:anne.labouret@solems.com)

à la bande interdite du semi conducteur, ou « gap optique », est absorbé par celui-ci en créant une paire électron-trou c'est-à-dire une charge électrique négative et une charge électrique positive.

Autrement dit, grâce à son énergie, un photon extrait de l'atome de silicium un électron de la couche périphérique, ou bande de valence, qui devient un électron libre dans la bande de conduction susceptible de générer du courant électrique. Cette opération libère une charge positive, dite « trou », à la périphérie de l'atome, d'où l'appellation paire électron-trou.

Ce mécanisme est de nature « quantique » car il y a création d'une seule paire de charges par photon absorbé quelle que soit son énergie, dès lors qu'elle est supérieure à la bande interdite du matériau. Les photons d'énergie inférieure ne sont pas absorbés et l'excédant d'énergie des photons plus énergétiques que la bande interdite est perdu par désexcitation thermique.

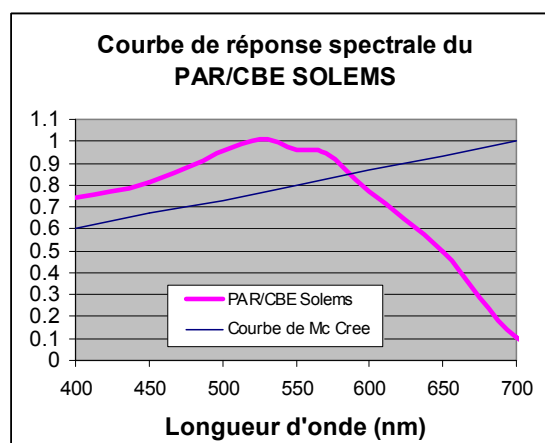
Par la constitution d'une jonction par dopage du silicium, on sépare ces charges pour les faire circuler dans un circuit extérieur, créant ainsi un courant électrique.



## 1.2 Technologies de cellules photovoltaïques

Grâce aux différents matériaux de cellules solaires, on peut réaliser soit des capteurs de rayonnement solaire, soit des capteurs de rayonnement PAR :

- Les cellules au silicium cristallin les plus classiques ont une réponse spectrale depuis le bleu (400 nm) jusqu'au proche IR (1 100 nm), longueur d'onde associée à leur gap optique de 1,1eV. Ces cellules sont donc intéressantes pour détecter le rayonnement solaire global (RG = direct + diffus) qui certes va au-delà, jusqu'à 3  $\mu\text{m}$  et plus dans l'infrarouge, mais avec une faible quantité d'énergie.
- Les cellules au silicium amorphe avec leur gap optique plus élevé de 1,77eV, sont quant à elles sensibles dans le visible, de 400 à 700 nm et approchent d'assez près le rayonnement utile à la photosynthèse, dénommé PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) selon la courbe de Mc Cree (1972). Ces mesures de PAR à l'aide de cellules amorphes ont été initiées par M. Chartier *et al.* (1989) avec des cellules SOLEMS et exploitées depuis à l'Inra par des unités des centres de Dijon, Bordeaux, Lusignan et Avignon notamment, au Cirad et chez Météo-France.



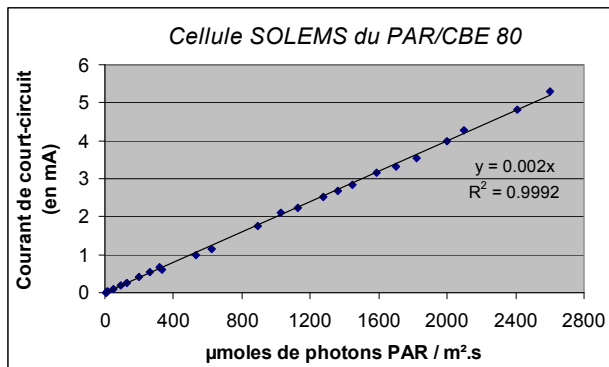
Auparavant, la mise en place d'un réseau de capteurs PAR était difficilement réalisable en raison du coût élevé des appareils de mesure, ce type d'expérimentation avec une grande quantité de points de mesures est réalisable depuis l'arrivée des capteurs au silicium.

### 1.3 Proportionnalité du courant de court-circuit

La courbe courant tension d'une photodiode sous éclairage présente des valeurs caractéristiques, que nous ne détaillerons pas ici. Le paramètre intéressant est le courant de court circuit, c'est-à-dire le courant sous impédance nulle, car il a l'avantage d'être directement proportionnel au flux lumineux. C'est donc ce paramètre qui est employé pour la mesure de rayonnement.

#### 1.3.a Capteurs PAR

Pour le PAR, la grandeur physique recherchée est un flux de photons, exprimé en  $\mu\text{moles de photons PAR/m}^2\cdot\text{s}$ . On voit sur le schéma ci-dessous l'excellente linéarité du courant de court-circuit d'une cellule SOLEMS au silicium amorphe en fonction du PAR en micromoles de photons/ $\text{m}^2\cdot\text{s}$ .



C'est là que la nature « quantique » de ces capteurs prend tout son sens. En effet, le mécanisme de la photosynthèse est fonction du nombre de photons impactant une surface qui à travers le capteur quantique est converti directement en nombre de charges électriques (une paire par photon) et il est donc mesuré par le courant de court-circuit.

#### 1.3.b Capteurs RG (de rayonnement solaire global)

Dans ce cas, la grandeur physique recherchée est un flux énergétique, en  $\text{W/m}^2$ , et non plus un nombre de photons/ $\text{m}^2\cdot\text{s}$  comme dans le cas du PAR.

Une cellule cristalline a également un courant de court-circuit proportionnel au flux incident, mais cette relation doit être étalonnée et exploitée à spectre constant, le plus souvent le spectre solaire naturel, type AM 1,5. Nous verrons les conditions d'emploi qui en résultent dans le paragraphe 3.1.

### 1.4 Géométrie des cellules

Pour intégrer un rayonnement sur une plus grande surface, on peut employer des cellules photovoltaïques de grandes dimensions, qui existent dans l'industrie. Rappelons cependant qu'un panneau solaire ou une photopile comportant plusieurs cellules en série ne peut pas constituer un capteur d'intégration spatiale, car la cellule la moins éclairée imposerait son faible courant aux autres. Un vrai intégrateur doit être composé d'une seule cellule de grandes dimensions.

Les cellules au silicium amorphe utilisées pour la détection du PAR sont déposées sur du verre selon des formats programmables, et elles sont donc compatibles avec des géométries particulières. Concrètement, il existe aujourd'hui des capteurs PAR ponctuels (de moins d' $1\text{cm}^2$ ), des capteurs en ligne avec une cellule de  $300 \times 4\text{ mm}$  de détection, et des capteurs en ligne équipés de plusieurs points de détection alignés.

Pour détecter un flux moyen sur une surface plus étendue, on répartit plutôt plusieurs capteurs PAR déjà convertis en tension et câblés en série (cf. 3.2).

## 2. De la cellule photovoltaïque au détecteur de rayonnement

Il y a trois aspects à considérer pour faire un détecteur de rayonnement à partir d'une cellule solaire : optique, électrique et climatique.

### 2.1 Réponse en cosinus et filtrage optique

Pour s'affranchir des effets d'incidence sur les capteurs, un capot diffusant est placé devant les cellules : le matériau plastique choisi doit être translucide, stable aux UV et résistant mécaniquement.

En utilisant une coque en PMMA (Polyméthylmétacrylate) opalescent, on obtient une excellente réponse en cosinus, jusqu'à 85° d'incidence, et on coupe également la contribution des cellules entre 350 et 400 nm. Le PMMA étant réfléchissant dans l'UV, il est totalement insensible à ces radiations et stable dans le temps, contrairement par exemple au polycarbonate non traité, plus résistant mécaniquement, mais qui jaunit aux UV.

### 2.2 Adaptation électrique du signal

Traiter le signal en courant est peu commode et déconseillé car cela pose le problème de pertes en ligne, parasites... On shunte donc les cellules, avec des faibles résistances de charge à couche métallique, qui sont les plus stables en température. Avec des résistances ajustables on peut régler le niveau du signal tout en restant proche du point de court-circuit de la cellule ce qui conserve la linéarité du courant en fonction du rayonnement reçu ; la règle à suivre est que le signal pleine échelle i.e. au point le plus haut de la gamme de mesure, doit rester < 100 ou 150 mV selon le type de cellule (voir constructeur).

*Exemple* : Si une cellule au silicium amorphe SOLEMS montée dans son boîtier fournit 30 mA @ 1000  $\mu\text{moles}/\text{m}^2.\text{s}$  et qu'elle est destinée à explorer la gamme 0-2500  $\mu\text{moles}$ , elle donnera donc  $30 \times 2,5 = 75$  mA pleine échelle, on la couplera donc à une résistance de 2 ohms maximum pour ne pas dépasser 150 mV.

La plupart des capteurs disponibles sur le marché tels les PAR/CBE ou PAR/LE de SOLEMS intègrent cette conversion en tension : le signal est alors fourni directement en mV continu. Autre avantage : ce mode de fonctionnement dit « photovoltaïque » ne requiert pas d'alimentation externe, il est économe en énergie.

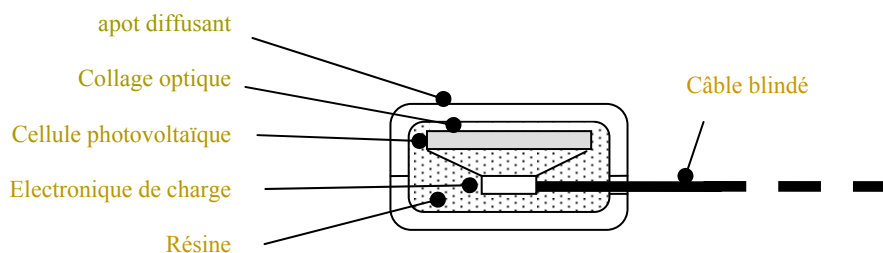
Pour certaines applications comme les chambres de culture à pilotage automatique, il peut être utile de disposer de capteurs PAR en boucle de courant 4-20 mA. Dans ce cas une alimentation 12 ou 24 V est nécessaire.

### 2.3 Etanchéité et câblage

Pour une bonne tenue dans le temps de ces capteurs exposés à l'extérieur dans toutes les conditions climatiques, la protection doit être soignée.

Le câblage sera blindé de préférence, pour éviter toute perturbation. Lorsque le signal du capteur est en voltage, on peut allonger les câbles sans perturber le signal ce qui est impossible lorsque le signal est en courant.

Pour la protection de ces capteurs, que ce soit pour la mesure du PAR ou du RG, SOLEMS utilise des boîtiers en PMMA. La cellule est collée optiquement au capot avant puis enrobée de résine avec la résistance, la connexion au câble et les composants électroniques nécessaires.



Vue en coupe d'un détecteur SOLEMS de PAR

### 3. Etalonnage et conditions d'emploi

#### 3.1 Possibilités d'utilisation

Les capteurs quantiques de PAR sont utilisables dans de nombreuses configurations, en flux incident, transmis ou réfléchi. Ils sont par exemple bien adaptés aux bilans radiatifs des couverts végétaux (calcul du PAR absorbé en mesurant les PAR incident, réfléchi et transmis). La seule limitation est la réponse spectrale qui n'est pas rigoureusement la même que la courbe de Mc Cree. Lorsque l'écart entre ces deux courbes est grand, il n'est plus possible par exemple de filtrer ces capteurs pour tirer partie des différentes bandes spectrales visibles dans le bleu, le rouge et le vert.

En ce qui concerne les capteurs quantiques pour la mesure de rayonnement solaire, de type RG, ils doivent être utilisés avec une répartition spectrale figée de la source de lumière. Si le capteur est étalonné par le constructeur pour la mesure extérieure, il faut l'utiliser uniquement en ensoleillement naturel, dont le spectre varie peu, sauf en tout début et en fin de journée et par temps d'orage. Il ne faut surtout pas l'utiliser en transmis (le feuillage ne transmet pas toutes les couleurs de la même manière) ni sous éclairage artificiel.

En résumé, pour la mesure du rayonnement solaire en  $W/m^2$ , on n'utilisera des capteurs quantiques que pour des mesures de flux incident, dans des conditions normales d'exposition.

	Unité à mesurer	Mesure de flux Incident	Mesure en transmis par un couvert végétal	Mesure de flux réfléchi
<b>Capteurs quantiques de PAR</b>	$\mu\text{moles de photons /m}^2.\text{s}$	<b>OUI</b>	<b>OUI</b>	<b>OUI</b>
<b>Capteurs quantiques de rayonnement solaire (RG)</b>	Rayonnement solaire en $W/m^2$	<b>OUI *</b>	<b>NON</b>	<b>NON</b>

*\* uniquement sous un spectre conforme à l'étalonnage fourni par le constructeur, soit la plupart du temps en extérieur, en conditions climatiques normales.*

### 3.2 Traitement du signal

La lecture de ces capteurs quantiques, dès lors qu'ils sont en tension continue, répond aux règles générales applicables à tous les capteurs de mesure. On les relie sur des centrales d'acquisition dont les caractéristiques répondent aux exigences du protocole expérimental : nombre de voies, sensibilité, fréquence de mesure, départ différé... On veillera en particulier à ce que la sensibilité des voies de mesure soit adaptée à la mesure à effectuer.

*Exemple* : Un capteur PAR qui donne 80 Mv @ 1 000  $\mu\text{moles/m}^2\cdot\text{s}$  et qui doit explorer la gamme 0-2 000  $\mu\text{moles}$  sortira un signal de 0 à 160 mV. Il doit être monté de préférence sur une voie 0-200 mV, plutôt que 0-2 V car la mesure sera ainsi plus précise.

Pour câbler plusieurs capteurs de façon à moyenner le flux en plusieurs points, le plus simple est de les monter en série. Les signaux en tension vont s'ajouter ce dont il faudra tenir compte pour choisir la sensibilité de la voie, et on déduira la valeur moyenne par division du signal total par le nombre de capteurs.

### 3.3 Etalonnage

La plupart des capteurs sont livrés avec une valeur d'étalonnage assortie d'une tolérance plus ou moins large selon les constructeurs. SOLEMS délivre une valeur par lot de livraison. Une seule valeur d'étalonnage est suffisante puisque le capteur est linéaire. Pour une meilleure précision, on aura recours à un étalonnage plus précis, pour chaque capteur, par comparaison avec un capteur étalon mesurant la même grandeur physique, ( $\mu\text{moles}$  de PAR ou  $\text{W/m}^2$  d'ensoleillement) que l'on placera dans les conditions les plus proches que possible des conditions expérimentales ; par exemple, pas sous une lampe pour des expériences en extérieur. Il faudra que les deux capteurs soient exactement dans le même plan d'incidence et soumis au même rayonnement : il faut être attentif aux ombres portées car même la présence d'une personne à côté du capteur peut créer une perturbation.

On entend ici par capteur étalon, un capteur raccordé à une norme internationale et dont la tolérance d'étalonnage est plus faible que le capteur secondaire à étalonner.

Il est recommandé de procéder à ces étalonnages au moins une fois par an, en début de campagne de mesures et également en fin de campagne si les capteurs ont subi de fortes températures  $> 50^\circ\text{C}$ . En effet, les capteurs au silicium peuvent prendre quelques pourcents de bonus en cas de grosses chaleurs provoquées par un fort ensoleillement.

## Conclusion

Si on respecte les consignes d'utilisation décrites ici, les capteurs quantiques rendent de grands services, Ils ne dispensent pas d'avoir aussi un capteur plus sophistiqué conservé hors des intempéries au laboratoire pour vérifier la validité des expériences et étalonner les capteurs quantiques « secondaires » comme on l'a vu précédemment.

En cours de mise au point, un système complet de détection de rayonnement « sans fils » va bientôt être disponible : les capteurs dialogueront par radio avec un concentrateur. Cela renforcera les possibilités de mesures avec un grand nombre de points. Le faible coût des capteurs quantiques qui incite à les multiplier sur le terrain sera encore un atout indéniable dans ce type d'expérimentation.

## Bibliographie

Chartier M., Bonchrétien P., Allirand J.-M. et Gosse G. (1989) Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). *Agronomie* 9, 281-284.