

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

Anne LABOURET, SOLEMS S.A., 3 rue Léon Blum, F-91120 PALAISEAU

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 différentes technologies de cellules au silicium, présentant des réponses spectrales différentes, on peut accéder au flux utile à la photosynthèse (PAR) et au rayonnement solaire global (RG). Moyennant quelques 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 clefs : détecteurs, 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 infra-rouge, infra-rouge 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.

D'autre part, ces rayonnements sont très variables à l'échelle macroscopique : lieu géographique, saison, heure du jour, conditions climatiques, et microscopique : température, interaction avec le couvert végétal... etc. Il est donc intéressant de disposer d'une solution à la fois scientifiquement correcte, et économiquement viable, afin de maîtriser et 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 - par opposition aux détecteurs thermiques, qui utilisent la conversion de la lumière en chaleur - répondent à ces préoccupations.

1. Intérêt des cellules photovoltaïques pour la mesure de rayonnement

Si on emploie des cellules photovoltaïques pour mesurer le rayonnement, c'est surtout parce qu'elles ont un signal directement proportionnel au flux lumineux, et qu'elles sont disponibles avec diverses réponses spectrales adaptées à différents types de rayonnement, et ce avec des surfaces de moins 1cm² à plusieurs dizaines de cm². De plus, grâce aux techniques éprouvées des panneaux solaires, elles permettent de constituer des capteurs fiables et relativement bon marché.

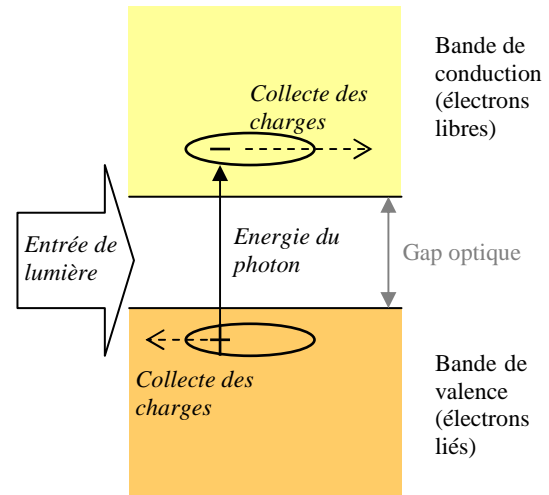
1.1 Principe de conversion

Un détecteur quantique utilise un dispositif à base de semiconducteur, 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 à la bande interdite du semiconducteur (ou « gap optique ») est absorbé par celui-ci en créant une paire électron-trou (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 (bande de valence), qui devient un électron libre (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 quel 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.



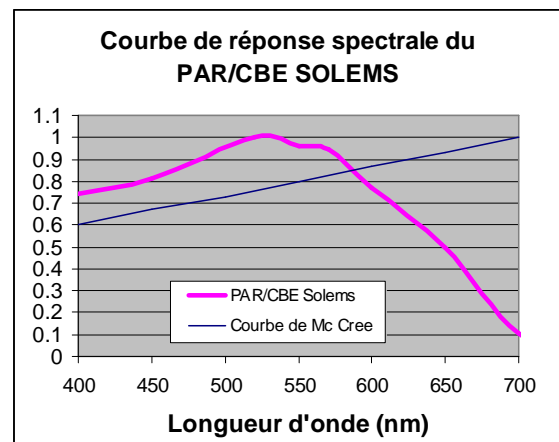
Par la constitution d'une jonction par dopage p-n ou p-i-n du silicium, on sépare ces charges pour les faire circuler dans un circuit extérieur, créant ainsi un courant électrique.

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 (400nm) jusqu'au proche IR (1100nm), longueur d'onde associée à son 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 3µm et plus dans l'infra-rouge, mais avec une faible quantité d'énergie.

- Les cellules au silicium amorphe (parfois dénommées « SLAM »), avec leur gap optique plus élevé de 1.77eV, sont quant à elles sensibles dans le visible, de 400 à 700nm et approche d'assez près le rayonnement utile à la photosynthèse, dénommée PAR – Rayonnement Photosynthétiquement Actif - selon la courbe de Mc Cree, 1972. Ces mesures de PAR à l'aide de cellules amorphes ont été initiés par M. Chartier et al. (1989) avec des cellules SOLEMS et exploités depuis par de nombreuses unités INRA, à Dijon, Bordeaux, Lusignan et Avignon notamment, et également CIRAD et chez Météo-France.



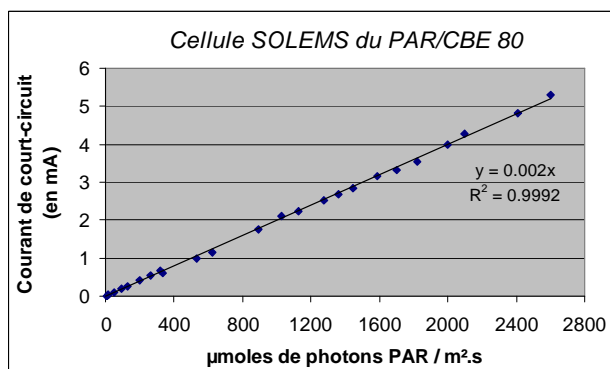
Auparavant, la mise en place d'un réseau de capteurs PAR était difficilement réalisable en raison du coût élevé des appareils de mesure, et donc c'est l'arrivée des capteurs au silicium a permis ce type d'expérimentation avec un grande quantité de points de mesure.

1.3 Proportionnalité du courant de court-circuit

La courbe courant tension d'une photodiode sous éclairement présente différentes valeurs caractéristiques, que nous ne détaillerons pas ici. Le paramètre intéressant est le courant de court circuit (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 $\mu\text{moles de photons PAR/m}^2.\text{s}$. Voir ci-dessous l'excellente linéarité du courant de court-circuit d'une cellule SOLEMS au silicium amorphe en fonction du nombre de micromoles de photons PAR incident.



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 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 W/m^2 , et non plus un nombre de photons/ $\text{m}^2.\text{s}$ 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. Voir plus loin les conditions d'emploi qui en résultent.

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 en particulier, étant déposées sur du verre selon des formats programmables, sont compatibles avec des géométries particulières. Concrètement, il existe aujourd'hui des capteurs PAR ponctuels (de moins d' 1cm^2), des capteurs en ligne avec une

cellule de 30 cm de détection, et des capteurs en ligne composés de plus 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 cablés 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 : électrique, optique, et climatique.

2.1 Adaptation électrique du signal

C'est généralement peu commode et déconseillé de traiter le signal en courant (problème de pertes en ligne, parasites...). On shunte donc les cellules avec une faible résistance de charge à couche métallique (les plus stables en température). Si celle-ci est variable elle peut permettre d'ajuster le niveau du signal. Mais de façon à rester proche du point de court-circuit et conserver la linéarité, la règle à suivre est que le signal pleine échelle (au point le plus haut de la gamme de mesure) doit rester < 100 ou 150mV selon le type de cellule.

Exemple : Si une cellule montée dans son boîtier fournit $30\text{mA}@1000\mu\text{moles}/\text{m}^2.\text{s}$ et qu'elle est destinée à explorer la gamme $0\text{-}2500\mu\text{moles}$, elle donnera donc $30 \times 2.5 = 75\text{mA}$ pleine échelle, on la couplera donc à une résistance de 2 ohms maximum pour ne pas dépasser 150mV .

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 continus. Autre avantage : ce mode de fonctionnement dit « photovoltaïque » ne requiert pas d'alimentation externe, ce qui plus simple, et économe en énergie (intéressant surtout pour les expérimentations en site isolé).

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

2.2 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.

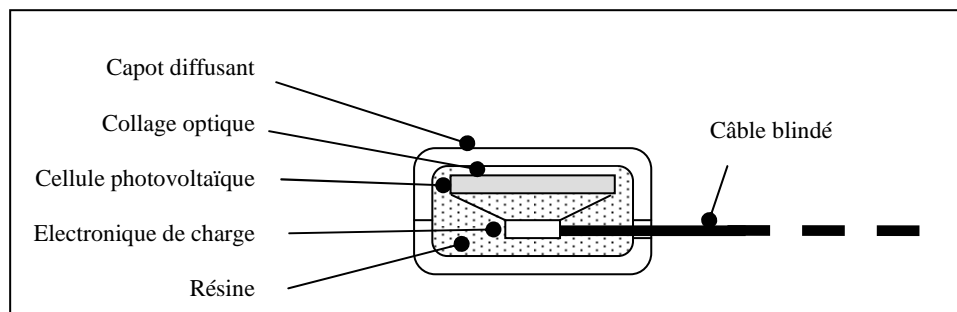
En utilisant une coque en PMMA opalescent, on obtient une excellente réponse en cosinus, jusqu'à 85° d'incidence, et on coupe également la contribution des cellules entre 350 et 400nm . Le PMMA étant réfléchissant dans l'UV, il est totalement insensible à ces radiations et stable dans le temps, contrairement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

2.3 Etanchéité et câblage

La tenue dans le temps de ces capteurs exposés à l'extérieur dans toutes les conditions climatiques doit être particulièrement soignée. Sauf pour les capteurs haut de gamme, qui au contraire sont en général maintenus en laboratoire comme étalon primaire (cf. chapitre 3).

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. Mais c'est impossible lorsque le signal est en courant.

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



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. La seule limitation se situe au niveau de la réponse spectrale qui n'est pas rigoureusement la même que la courbe de Mc Cree. Lorsque l'écart entre ces deux courbes est important, 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, ils doivent être utilisés avec une répartition spectrale figée de la source de lumière. Si le capteur est étalonné par le constructeur pour de l'ensoleillement naturel, il faut l'utiliser uniquement en ensoleillement naturel, dont le spectre varie peu, sauf en tout début et 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 |
|--|-------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|
| Capteurs quantiques de PAR | $\mu\text{moles de photons /m}^2.s$ | OUI | OUI | OUI |
| Capteurs quantiques de rayonnement solaire (RG) | Rayonnement solaire en W/m^2 | OUI * | NON | NON |

* *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 câble généralement sur des centrales d'acquisition dont les caractéristiques répondent aux exigences du protocole

expérimental : nombre de voies, sensibilité, possibilités d'acquisition temporelle. On veillera en particulier à ce que la sensibilité des voies de mesure soit adaptée à la mesure à effectuer.

Exemple : Un capteur qui donne $80\text{mV}@1000\mu\text{moles}/\text{m}^2.\text{s}$ et qui doit explorer la gamme 0-2000 μmoles sortira un signal de 0 à 160mV. Il doit être monté de préférence sur une voie 0-200mV (plutôt que 0-2V) 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 – il faudra en tenir compte pour choisir la sensibilité de la voie – et on déduira la valeur moyenne par division du signal total par le nombre capteurs.

3.3 Etalonnage

La plupart des capteurs sont livrés avec une valeur d'étalonnage avec une tolérance plus ou moins large selon les constructeurs. A SOLEMS cette valeur est donnée par lot de livraison. Une seule valeur est suffisante si 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, (μmoles de PAR ou W/m^2 d'ensoleillement) que l'on placera dans les conditions les plus proches que possible des conditions expérimentales (pas sous une lampe pour des expériences en extérieur). Il faudra que les 2 capteurs soient exactement dans le même plan d'incidence, et soumis exactement au même rayonnement (attention aux ombres portées : 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 un 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 % de bonus en cas de grosses chaleurs (sous fort ensoleillement).

Conclusion

Si on respecte ces consignes d'utilisation décrites dans ce papier, les capteurs quantiques rendent de grand service, puisque vu leur coût, on peut les multiplier sur le terrain. Ils ne dispensent pas d'avoir aussi un capteur plus sophistiqué (qu'on conserve à l'abri 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 déportées avec un grand nombre de points de mesure, et l'intérêt des capteurs quantiques économiques également.

Bibliographie

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