

Les nouvelles cellules solaires nanocristallines

Michael Grätzel

Résumé

En imitant les principes utilisés par les plantes vertes dans la photosynthèse, nous avons développé une nouvelle cellule solaire qui réussit à récolter la lumière de façon très efficace par une couche moléculaire de sensibilisateur attachée à la surface d'un film constitué par des nanocristaux d'un oxyde semi-conducteur de large bande interdite et ayant une grande rugosité. De cette façon, il devient possible de convertir la lumière visible en courant électrique avec un rendement quantique externe proche de 100 %. Le rendement global de conversion d'énergie solaire en électricité est de 11,1 %. En vertu de leur bas coût de production et du large domaine d'application, ainsi que de leur compatibilité avec l'environnement, ces cellules sont devenues des candidats crédibles pour une production d'électricité à grande échelle à partir du rayonnement solaire.

Mots-clés

Cellules solaires à colorant, sensibilisation, oxydes nanocristallins, conversion d'énergie solaire.

Abstract

New nanocrystalline solar cells

Learning from the concepts used by green plants, we have developed a new photovoltaic device which achieves very efficient light harvesting by a molecular sensitizer grafted onto a nanocrystalline semiconductor oxide film of very high internal surface area. In this way it is possible to convert visible light to electric current with an external quantum yield close to 100%. The confirmed overall efficiency for producing electricity from sunlight is 11.1%. Due to their wide range of possible applications, their environmental compatibility, as well as the simplicity and low cost of production, these devices are credible candidates to contribute to large scale electric power production from solar energy.

Keywords

Dye-sensitized cells, sensibilization, nanocrystalline oxides, solar energy conversion.

Les cellules solaires traditionnelles convertissent la lumière en électricité en exploitant l'effet photovoltaïque qui apparaît à la jonction de semi-conducteurs. Ce sont donc des dispositifs proches des transistors ou des circuits intégrés. Le semi-conducteur remplit simultanément les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques résultantes. Pour que ces deux processus soient efficaces, les cellules doivent être constituées de matériaux de haute pureté. Leur fabrication est par conséquent onéreuse, ce qui limite leur emploi pour la production d'électricité à grande échelle. Les cellules que nous avons découvertes dans le cadre de nos recherches fonctionnent selon un autre principe, qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques [1-3]. Par leur simplicité de fabrication, elles offrent l'espoir d'une réduction significative du prix de l'électricité solaire.

La pompe à électrons actionnée par la lumière

Dans notre cas comme dans la photosynthèse naturelle, l'absorption d'énergie solaire met en route une pompe à électrons mue par l'énergie lumineuse absorbée, dont le principe est illustré dans la figure 1. Le sensibilisateur (S) est greffé à la surface d'un oxyde semi-conducteur sous la forme d'une couche monomoléculaire. L'oxyde est composé par des particules dont la taille n'est que de quelques dizaines de nanomètres (figure 2), créant ainsi une structure mésoscopique qui

permet de capter la lumière efficacement. L'absorption des rayons solaires incidents porte le colorant à un état électroniquement excité S^* , d'où il est à même d'injecter un électron dans la bande de conduction du dioxyde de titane. Les électrons ainsi injectés traversent la couche et sont ensuite recueillis par un collecteur de courant qui permet de les diriger vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique. Le retour de l'électron dans la bande de conduction sur le colorant oxydé S^+ (recombinaison) est beaucoup plus lent que la réduction de S^+ par le médiateur D en solution (interception). De ce fait, la séparation de charge

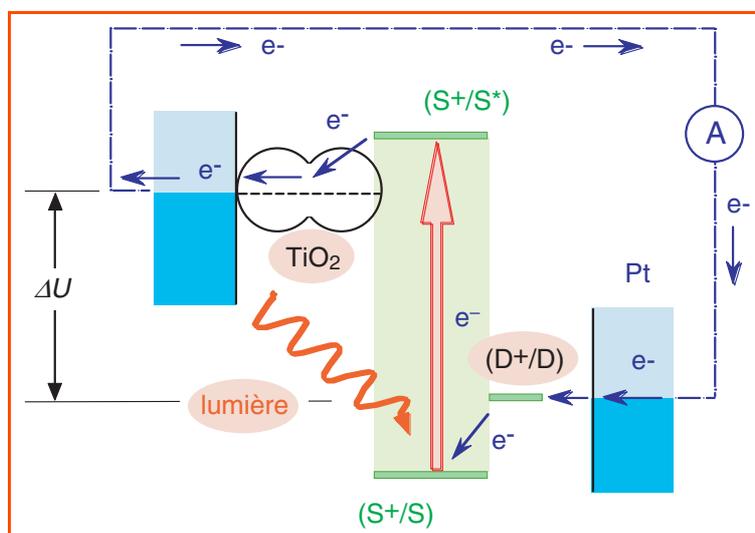


Figure 1 - Schéma énergétique de la cellule solaire nanocristalline à colorant.

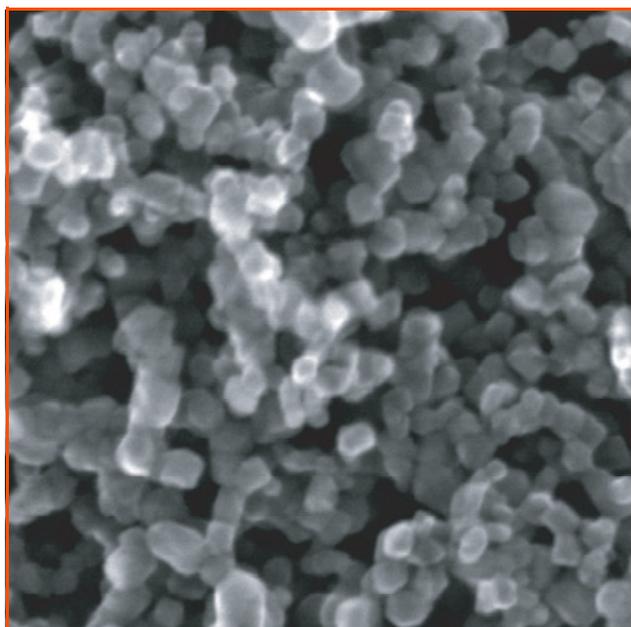


Figure 2 - Image d'une couche mésoscopique du dioxyde de titane déposée sur un verre conducteur. Chaque grain constitue un nanocristal d'une taille d'environ 20 nm.

est efficace. Le médiateur oxydé (D^+) est réduit à la contre-électrode. La tension maximale débitée correspond à la différence entre le potentiel d'oxydoréduction du médiateur et le niveau de Fermi du semi-conducteur. La charge positive est transférée du colorant (S^+) à un médiateur (iodure) présent dans la solution qui baigne la cellule (interception). Ce médiateur, alors oxydé en triiodure, diffuse à travers la solution. Ainsi, le cycle des réactions redox est bouclé, transformant l'énergie solaire absorbée en un courant électrique, sans changement de la composition de quelque partie du système que ce soit.

Le rendement et la stabilité des nouvelles cellules solaires

A ce stade, nous obtenons un rendement global en plein soleil de 11,1 %, rendement confirmé par des mesures au Laboratoire de contrôle et de calibrage des cellules solaires (AIST) au Japon. A la lumière diffuse, l'efficacité augmente jusqu'à environ 15-18 %. La figure 3 donne la performance photovoltaïque d'une telle cellule de laboratoire. Outre la courbe du photocourant en fonction de la tension $I = f(V)$, elle montre également l'effet de la longueur d'onde sur le rendement de conversion de la lumière en électricité, ainsi que la structure du colorant N-719.

Une cellule solaire doit être capable de produire de l'électricité pendant vingt ans au moins sans baisse de rendement significative. Une étude effectuée en commun par plusieurs laboratoires dans le cadre d'un projet européen Joule a confirmé la grande stabilité des cellules à colorant. Notre système a été soumis à une illumination à haute intensité ($2\,500\text{ W/m}^2$) pendant 8 000 h, correspondant à environ 120 000 h ou quinze ans d'exposition sous conditions naturelles. Aucune diminution notable des performances n'a été observée [4], ce qui témoigne de l'exceptionnelle stabilité du colorant et du système dans son ensemble.

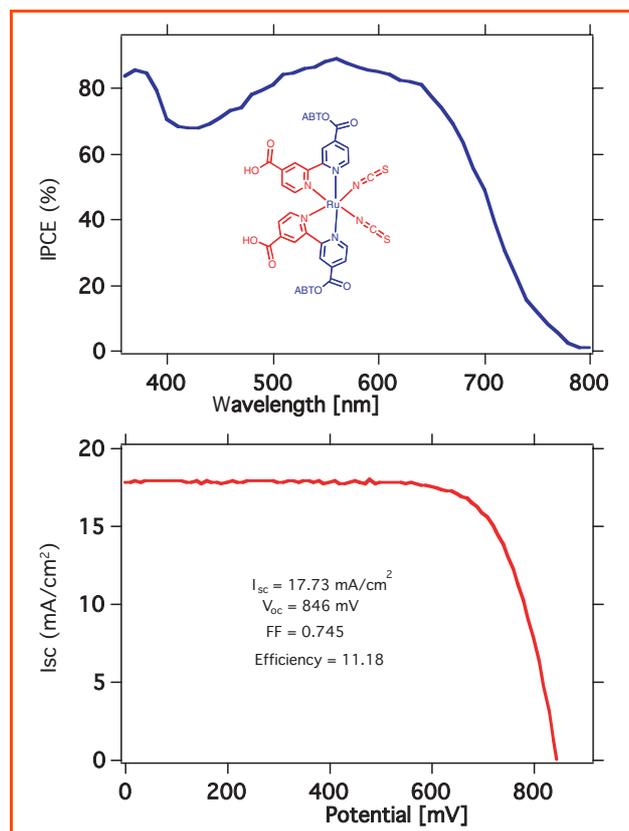


Figure 3 - Performance photovoltaïque de la nouvelle pile solaire nanocristalline.

Le rendement de conversion de photons incidents en courant électrique (IPCE) atteint plus de 80 % dans le visible et le rendement global de conversion en plein soleil ($AM\,1.5^{(1)}\,1\,000\text{ W/m}^2$) est de 11,18 %. I_{sc} : densité de courant de court circuit.

Cependant, il a fallu plusieurs années de recherche pour trouver un électrolyte qui résiste à la dégradation à haute température en donnant en même temps un bon rendement et en ne montrant aucune baisse de performance sous illumination prolongée. Les figures 4 et 5 montrent des résultats récents obtenus avec ce système très robuste [5-6].

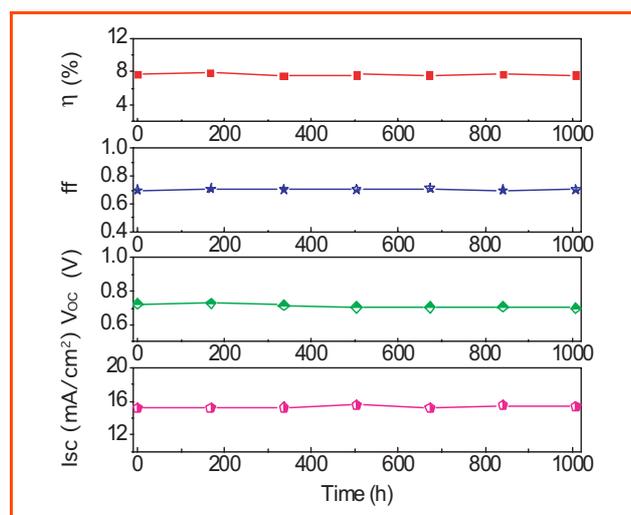


Figure 4 - Effet du vieillissement à 80-85 °C pendant une période de 1 000 h sur les paramètres photovoltaïques de cellules à colorant [5].

Tension de circuit ouvert (V_{oc}), facteur d'idéalité (ff), courant de court circuit (I_{sc}) et rendement η [5].

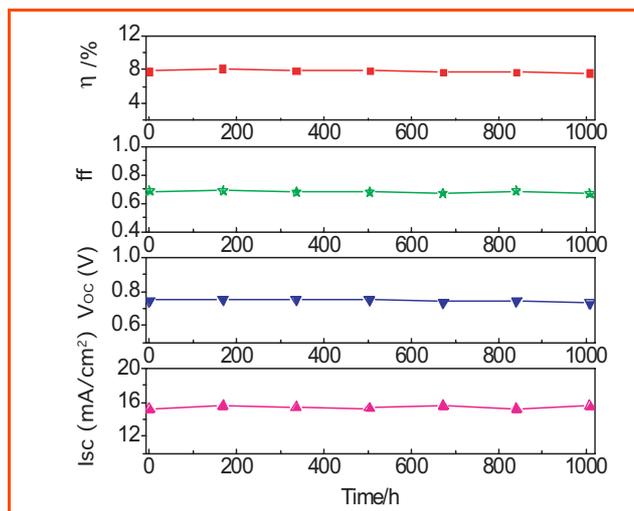


Figure 5 - Effet du vieillissement en pleine illumination (1 000 W/m²) à 60-65 °C pendant une période de 1 000 h sur les paramètres photovoltaïques des cellules à colorant [6].

Tension de circuit ouvert (V_{OC}), facteur d'idéalité (ff), courant de court circuit (I_{SC}) et rendement η.

La commercialisation de la pile solaire nanocristalline progresse

L'invention de la cellule nanocristalline représente un saut technologique considérable par rapport aux technologies existantes, ce qui permet d'envisager de nouveaux domaines d'applications. Par exemple, par le choix de l'épaisseur de la couche nanocristalline et la taille des particules de TiO₂, il est possible de réaliser des verres photovoltaïques transparents. On peut même envisager la fabrication de verres photovoltaïques ayant l'apparence d'une vitre normale, où le sensibilisateur n'absorbe que dans le domaine ultraviolet ou infrarouge du spectre, le rendant invisible à l'œil. Il est impossible de réaliser de tels vitrages photovoltaïques avec des piles existantes basées sur le silicium.

Parmi les avantages de la nouvelle cellule, citons encore son caractère bifacial qui permet de capter la lumière venant de tous les angles d'incidence. Ceci permet d'atteindre de très hauts rendements de conversion à la lumière diffuse (ciel nuageux, albédo⁽²⁾ provenant de l'eau, du sable ou de la neige), ouvrant le chemin à des applications importantes comme élément de façade des bâtiments. Des tests effectués par la société Aisin-Seiki au Japon utilisant de grands modules de cellules photovoltaïques à colorant ont confirmé ces avantages par rapport au silicium (figure 6). Un autre marché potentiel pour la nouvelle cellule concerne l'approvisionnement des appareils électroniques en énergie. Elle peut se servir efficacement de la lumière ambiante pour alimenter par exemple la climatisation des bâtiments. Mentionnons finalement l'invariance de son rendement avec la température, ce qui lui donne un avantage indéniable par rapport au silicium qui perd 0,5 % de rendement par degré Celsius. Or la température des cellules solaires monte inévitablement à 50 ou 60 °C en plein soleil, ce qui réduit le rendement des piles à silicium de 20 à 30 %, alors que l'efficacité de nos cellules ne change guère dans ce domaine de température.



Figure 6 - De grands modules de cellules photovoltaïques à colorant produits par la société Aisin-Seiki-Toyota sont soumis à des tests à l'extérieur pour évaluer leurs performances et leur durabilité dans les conditions climatiques réelles régnant au Japon.

Ces résultats très prometteurs ont suscité un grand intérêt au niveau industriel. La société RWE en Allemagne se charge du développement de modules de 100 Wp et plus. L'entreprise australienne Sustainable Technologies of Australia⁽³⁾ a construit la première usine de fabrication de tuiles photovoltaïques ayant une capacité de production de 500 kW/an, et un premier bâtiment a été équipé par ces vitres électrogènes. Le géant industriel japonais Toyota présente sa future « maison de rêve » (figure 7) équipée avec des parois constituées de cellules photovoltaïques nanocristallines à colorant fabriquées par sa filiale Aisin-Seiki⁽⁴⁾.

En raison de la grande variété de ses applications potentielles, de sa compatibilité avec l'environnement, de sa simplicité de fabrication et de son faible coût, la cellule solaire nanocristalline à colorant devrait permettre d'accroître substantiellement l'exploitation des énergies renouvelables, et contribuer ainsi à l'avènement d'un développement durable pour l'humanité.

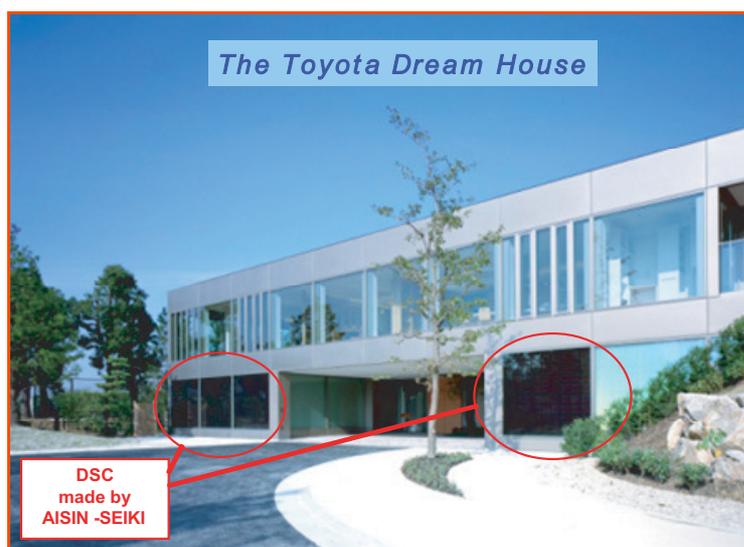


Figure 7 - Photo de la « maison de rêve » (Dream House) construite par Toyota au Japon.

Les panneaux photovoltaïques sont des cellules nanocristallines à colorant (« dye-sensitized solar cell », DSC) produites par la filiale Aisin-Seiki de Toyota.

Notes et références

- (1) L'indication AM (« Air Mass ») rend compte de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires. La valeur de AM dépend de l'angle que font les rayons incidents avec la verticale (position du Soleil au zénith). AM 1,5 correspond aux conditions standards de test des cellules photovoltaïques (angle de 48,19°) et à l'épaisseur de l'atmosphère en Europe.
- (2) Albédo : fraction de la lumière incidente que réfléchit ou diffuse un corps non lumineux. L'albédo de la mer est de 0,05 à 0,15, celui du sable de 0,25 à 0,45 et celui de la neige de 0,75 à 0,90.
- (3) www.sta.com.au
- (4) www.toyota.co.jp/news/04/Dec/nt04_1204.html
- [1] O'Regan B., Grätzel M., *Nature*, **1991**, 336, p. 737.
- [2] Grätzel M., *Nature*, **2001**, 414, p. 338.
- [3] Grätzel M., Millenium special issue, *Progr. in Photovolt. Res. Appl.*, **2000**, 8, p. 171.
- [4] Chiba, Y., Islam, A., Watanabe Y, Komiya R., Koide N., Han L., *Jap. J. of Appl. Phys., Part 2: Letters & Express Letters*, **2006**, 45, p. 24.

- [5] Hinsch A., Kroon J.M., Kern J.M.R., Uhlandorf I., Holzbock J., Meyer A., Ferber J., *Progr. Photovolt. Res. Appl.*, **2001**, 9, p. 425.
- [6] Wang P., Klein C., Humphry-Baker R., Zakeeruddin S.M., Grätzel M., *Appl. Phys. Lett.*, **2005**, 86, p. 123508.

**Michael Grätzel**

est directeur du Laboratoire de photonique et interfaces à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne*.

* École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne (Suisse).
Courriel : michael.gratzel@epfl.ch



OFFRE SPÉCIALE SFC



Les éditions EDP Sciences offrent **30 % DE REMISE**
aux membres de la SFC, sur **TOUS LES LIVRES** du catalogue.

Pour en bénéficier, rendez-vous sur www.edpsciences.org (rubrique Livres, puis Commercial), et imprimez le bon de commande spécial adhérents. Faites votre choix, et retournez-nous votre commande !

Cette offre n'est pas limitée dans le temps et vous permet de commander autant de livres que vous le souhaitez.

Ce bon de commande est également disponible sur le site de la SFC.

www.edpsciences.org