

Zeitschrift:	Revue économique franco-suisse
Herausgeber:	Chambre de commerce suisse en France
Band:	72 (1992)
Heft:	1
Artikel:	La photosynthèse artificielle : conversion de la lumière en électricité par un système photovoltaïque moléculaire de haut rendement
Autor:	Graetzel, Michael
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-887229

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

La photosynthèse artificielle

Conversion de la lumière en électricité
par un système photovoltaïque moléculaire
de haut rendement

**Michael Graetzel, Professeur, Institut de
Chimie Physique, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne**

A l'Institut de Chimie Physique, des recherches dans le domaine de la photosynthèse artificielle sont effectuées qui portent, en particulier, sur l'effet photovoltaïque moléculaire et son utilisation pour la génération d'électricité à partir de la lumière. Notre laboratoire a développé des couches d'oxydes semi-conducteurs ayant une rugosité très élevée. Dérivatisées par des chromophores appropriés, ces membranes minces donnent des rendements extraordinaires de conversion de lumière monochromatique en courant électrique, dépassant 90 % pour certains systèmes. En exploitant cette découverte étonnante, nous avons réalisé un nouveau type de pile photovoltaïque dont le principe est proche de la méthode utilisée par les feuilles vertes dans la conversion de l'énergie solaire par photosynthèse. En lumière directe, nos modules ont déjà atteint un rendement de 10 % à la fin de 1991. En lumière diffuse, ou sous un ciel nuageux, le rendement de nos cellules est étonnamment élevé, dépassant déjà celui des cellules conventionnelles au silicium polycristallin. Leur coût ne devrait pas dépasser le dixième de celui des piles classiques.

LE PRINCIPE DE LA PHOTOSYNTHÈSE NATURELLE

La photosynthèse constitue la route principale par laquelle l'énergie libre de l'univers devient disponible au monde vivant. La survie de notre espèce dépend de cette source d'énergie et de nourriture. Développé par les plantes il y a trois milliards d'années, ce processus utilise l'énergie lumineuse du soleil pour convertir le gaz carbonique en glucides. L'énergie captée par la photosynthèse est phénoménale. Sur toute la terre, 1017 kcal sont convertis par an, ce qui correspond à la génération continue d'une puissance électrique de treize mille gigawatt et à l'assimilation de dix milliards de tonnes de gaz carbonique !

Les recherches très poussées de ces dernières années ont pu éclaircir le mécanisme de ce processus fascinant qui est la photosynthèse. Dans

les feuilles vertes des plantes, les rayons du soleil sont absorbés par un colorant, la chlorophylle, qui est incor-

poré dans une membrane lipidique, les thylakoides. L'excitation lumineuse déclenche une chaîne de réactions d'oxydoréduction résultant en la séparation de charges électriques à travers la membrane. Ces charges sont ensuite utilisées pour la production des glucides et d'oxygène. Le rendement de conversion accompli par les plantes est d'environ 10 % pour l'acte primaire de la séparation de charges, mais il décroît à moins de 2 % pour le processus global de la photosynthèse.

L'IMITATION DU SYSTEME NATUREL, LA PHOTOSYNTHÈSE ARTIFICIELLE

La Fig. 1 juxtapose une feuille verte à notre nouvelle cellule photovoltaïque simulant les principes essentiels de la photosynthèse. Or, les composants du système artificiel doivent être choisis afin de répondre aux critères de stabilité imposés par une application pratique. En effet, un système photovoltaïque doit pouvoir fonctionner pendant 20 ans sans que ses performances présentent une dégradation notable. Dans le cas des systèmes vivants, cette exigence est de moindre importance, car les composants instables pourront être remplacés au fur et à mesure de leur disparition. La chlorophylle, de même que les membranes lipidiques qui la contiennent dans les systèmes biologiques, ne sont pas stables *in vitro*, et ne peuvent donc pas

Figure 1 : Une feuille verte juxtaposée à la nouvelle pile solaire, la feuille artificielle.



être repris tels quels. Ainsi, dans le système artificiel, la chlorophylle sera remplacée par une molécule sensibilisatrice (S), plus stable, dont le rôle est identique à celui de la chlorophylle. Elle吸orbe l'énergie solaire incidente afin de permettre une réaction de transfert de charge.

Une membrane céramique en dioxyde de titane remplace la membrane lipidique des systèmes biologiques. Cette matière est un semi-conducteur qui n'absorbe pas la lumière visible. De plus, elle est totalement inerte et ne présente aucun danger à l'environnement, et sa grande stabilité la rend particulièrement bien adaptée au présent usage. Le TiO₂ existe dans la nature sous forme d'*ilménite*, et est employé en grande quantité comme pigment blanc dans les peintures ainsi que comme additif dans la formulation de pâtes dentifrices. Il s'en produit environ un million de tonnes par an dans le monde, et son coût est de ca. 1.50 SFr./Kg. Comme la membrane utilisée ne mesure que 4 microns d'épaisseur, la fabrication d'un mètre carré de capteur solaire met en œuvre quelque 10 grammes de TiO₂, impliquant un coût de moins de 0,02 SFr/m².

◆ *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 Fig. 2. Le sensibilisateur (S) est lié à la surface de la membrane de TiO₂, sous la forme d'une couche monomoléculaire. Il absorbe les rayons solaires incidents et est ainsi promu en un état électriquement 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 membrane en moins de 100 microsecondes et sont ensuite recueillis par un collecteur de courant, qui permet de les diriger vers un circuit externe ou leur passage produit de l'énergie électrique. Ils sont ensuite réintroduits dans la cellule par le chemin d'une contre-électrode. Cette contre-électrode est séparée de la membrane en TiO₂ par un électrolyte contenant du iodé et son anion, le iodure. Cet électrolyte garantit le transfert de charge entre les deux électrodes. 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. Exposée à la lumière directe du soleil, chaque molécule sensibilisatrice subit environ 20 fois par seconde cette transformation cyclique. La machine moléculaire fonctionne donc à une fréquence de 20 Hz.

◆ *L'absorption de la lumière par des couches moléculaires*

L'absorption de la lumière par un sensibilisateur à la surface de la membrane du TiO₂ se heurte à l'obstacle que représente la faible efficacité d'absorption de la molécule du colorant. Chaque molécule de sensibilisateur occupe une surface 100 fois supérieure à sa section efficace d'absorption de la lumière, ce qui revient à dire qu'une couche mono-moléculaire de colorant sur une surface plane ne pourra jamais absorber plus de 1 % de la lumière incidente. De plus, l'emploi de couches sensibilisatrices plus épaisses ne résout pas le problème, car dans ce cas, les couches de colorants externes ne font que filtrer la lumière incidente, sans participer à la production de courant

électrique. L'emploi de couches monomoléculaires est donc inévitable.

Une stratégie efficace pour la résolution de ce problème est l'emploi de membranes de dioxyde de titane à structure rugueuse. Des membranes transparentes de TiO₂, composées de particules colloïdales de 10 à 20 nm de diamètre, peuvent être réalisées par des méthodes sol-gel. Le contact électrique entre les particules est garanti par un bref frittage à 500°C. La structure obtenue est microporeuse et présente une rugosité énorme. En effet, la surface réelle d'une pareille membrane est, à taille égale, au moins mille fois plus grande que celle d'une membrane plane. En employant de pareilles membranes colloïdales, il est possible de capter toute la lumière incidente par la mono-couche du colorant dans le domaine spectral de sa bande d'absorption.

◆ *Le rendement quantique de l'injection de charge*

Le rendement quantique de l'injection de charge (ϕ_{inj}) représente la fraction des photons incidents donnant lieu à une injection d'électrons dans la bande de conduction de la membrane. Cette injection de charge se déroule en parallèle, et de manière compétitive, avec d'autres processus de

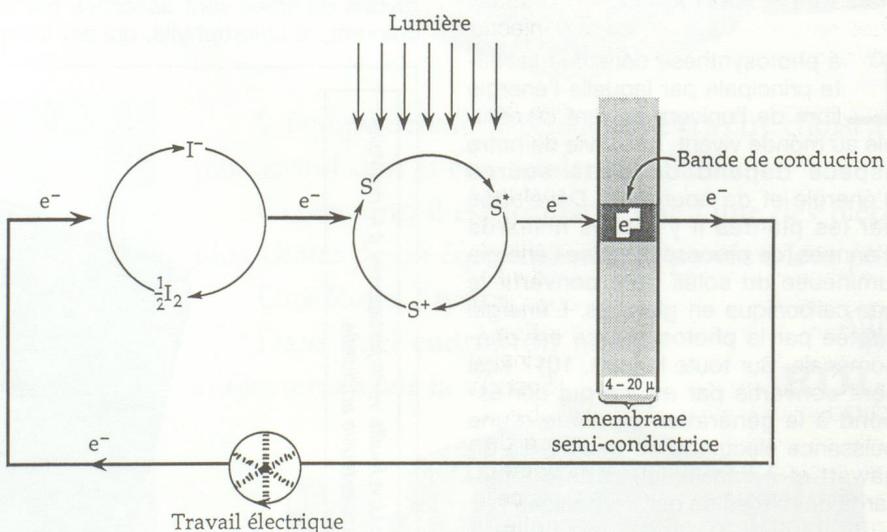


Figure 2 : Photosynthèse artificielle : le sensibilisateur (S) remplace la chlorophylle des plantes vertes et la membrane semi-conductrice remplace la membrane lipidique des chloroplastes. Le couple rédox iodide/iodure joue le rôle de relais d'électron. Cette nouvelle machine moléculaire constitue une véritable pompe à électrons.

Principe de la pile photo-électrochimique

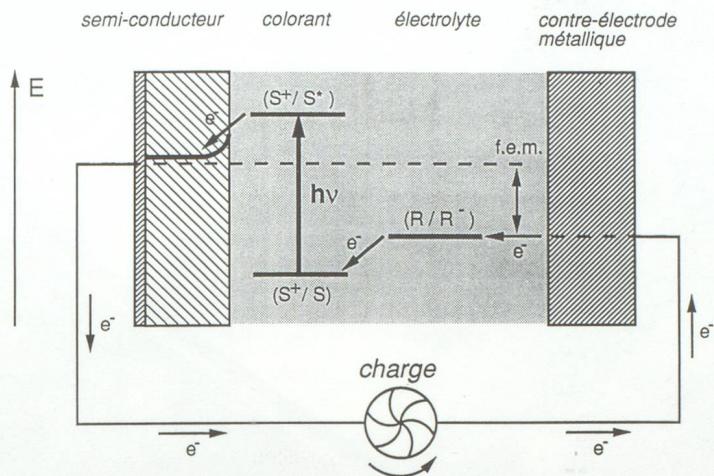


Figure 3 : Représentation schématique d'une cellule photoélectrochimique régénérative afin d'illustrer l'origine du photopotentiel.

désactivation du sensibilisateur excité. Cela signifie que l'injection de charge doit s'effectuer par le colorant en moins d'une picoseconde. De pareils sensibilisateurs ont en fait été développés dans notre laboratoire récemment. Ces colorants sont munis de groupes fonctionnels qui permettent non seulement une bonne fixation du sensibilisateur à la surface du dioxyde de titane, mais qui assurent également un excellent couplage électronique entre le colorant et la bande de conduction du semi-conducteur. De tels colorants permettent en général d'obtenir des rendements quantiques d'injection de charge supérieurs à 90 %.

◆ Séparation de charge induite par la lumière et production de courant

La dernière étape de la transformation de la lumière en courant électrique est une séparation de charge efficace. Le chemin réactionnel thermodynamiquement favorable pour l'électron injecté dans la bande de conduction du dioxyde de titane est la recombinaison avec le sensibilisateur oxydé. Il est clair que cette réaction est indésirable, car elle se produit en lieu et place de la production de courant. Dans notre dispositif, comme dans le cas de la cellule photovoltaïque conventionnelle, un champ électrique auto-généré est présent. Il se forme par transfert spontané d'électrons du semi-conducteur à l'électrolyte lorsque ces deux sont mis

en contact. La présence de ce champ empêche la recombinaison des charges.

Si l'on appelle η_e la fraction des électrons qui échappent à la recombinaison pour arriver dans le circuit extérieur, nous obtenons l'expression du rendement en courant sous irradiation monochromatique :

$$(1) \eta_e(\lambda) = \text{ABS}(\lambda) \times \phi_{\text{inj}} \times \eta_e$$

où ABS correspond à la fraction absorbée de la lumière de longueur d'onde λ . Ce rendement en courant

exprime le rapport entre le courant électrique mesuré et le nombre de photons incidents à une longueur d'onde donnée. L'optimisation de notre système a permis d'atteindre des rendements proches de 1. Ainsi, nous obtenons une transformation quantitative des photons de la lumière incidente en électrons, à condition que la lumière en question se trouve dans le domaine d'absorption du colorant.

◆ Tension de cellule et rendement global

Le photopotentiel de notre pile représente la différence entre le potentiel de l'électron dans le TiO_2 et le potentiel redox de l'électrolyte (Fig. 3). Lors de l'emploi d'une solution alcoolique de iodure comme électrolyte, la cellule développe un photopotentiel de 0.7 à 1 V en circuit ouvert et sous irradiation solaire directe (890 W/m^2). Sous une illumination mille fois plus faible, le potentiel de cellule ne décroît que de quelque 200 mV, c.-à-d. que la diminution relative de la tension n'est que de 20 à 30 %. A titre de comparaison, une cellule au silicium courante verrait sa tension aux bornes décroître d'un facteur de 3 sous les mêmes conditions. Ceci montre bien que notre cellule est moins sensible aux variations de l'intensité de l'irradiation incidente que les cellules photovoltaïques classiques.

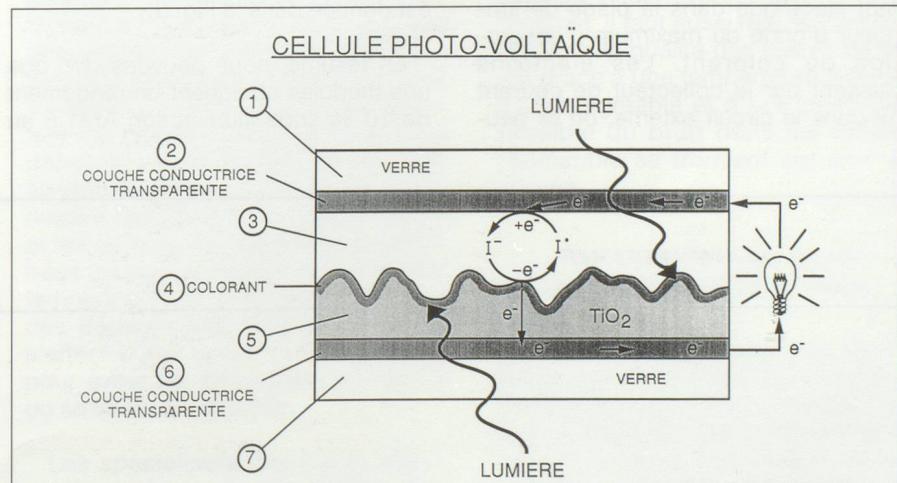


Figure 4 : Construction d'un module sur des électrodes de verre transparent : (1) et (7) plaques de verre ; (2) et (6) couches conductrices transparentes ; (3) électrolyte contenant le couple redox ; (4) couche monomoléculaire de colorant absorbé à la surface de la membrane de TiO_2 ; (5) membrane rugueuse de TiO_2 .

Le rendement global de la cellule photovoltaïque peut être facilement estimé à partir de la densité du photocourant (i_{ph}), le photopotentiel en circuit ouvert (V_{oc}), le facteur d'idéalité de la cellule (ff) et de l'intensité de la lumière incidente (I_s), selon :

$$(2) \eta_{global} = i_{ph} \times V_{oc} \times ff / I_s$$

Sous la lumière directe, nos piles atteignent un rendement de l'ordre de 10-11 %.

DÉVELOPPEMENT ET ESSAIS DES PREMIERS MODULES DE CELLULES, LA FEUILLE ARTIFICIELLE

Le développement ainsi que les essais des premiers prototypes des modules destinés à une utilisation pratique ont déjà commencés. Le module est représenté dans la Fig. 4. La cellule consiste en deux plaques de verre recouvertes d'une couche d'oxyde d'étain conductrice. L'une de ces couches est ensuite recouverte de dioxyde de titane colloïdal produit par une méthode sol-gel, caractérisé par une très grande rugosité, qui sert de piège à la lumière. La lumière visible est absorbée par une couche monomoléculaire d'un complexe d'un métal de transition adéquat qui sert de sensibilisateur. Celui-ci, une fois excité par la lumière incidente, injecte des électrons dans la bande de conduction du dioxyde de titane. De tels systèmes permettent de convertir plus de 80 % des photons incidents en courant électrique dans la plage de longueur d'onde du maximum d'absorption du colorant. Les électrons passent par le collecteur de courant (6) dans le circuit externe, où ils peuvent

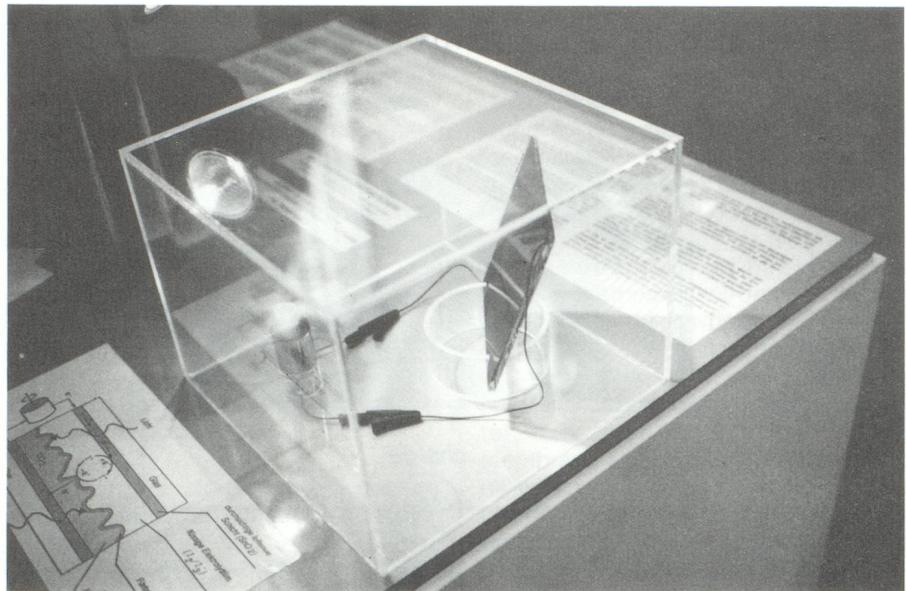


Figure 5 : Vue d'un module tel qu'il se présente au stade actuel du développement. La pile est transparente et de cette façon capte la lumière des deux côtés. Elle se prête surtout à l'application dans l'habitat, par exemple sous forme de fenêtre colorée.

vent accomplir du travail, pour être ensuite réintroduits dans la cellule par le biais de la contre-électrode (2). La couche de sensibilisateur (4) est séparée de la contre-électrode (2) par l'électrolyte (3). L'électrolyte (3) contient un système redox qui assure le transfert des électrons de la contre-électrode à la couche de sensibilisateur, qui est chargée positivement suite à l'injection d'électrons dans le semi-conducteur. Les modules en question ont des surfaces de 20 à 100 cm². Une illustration d'une telle pile est donnée dans la Fig. 5.

En résumé, nous pouvons dire que nos modules atteignent un rendement de 10 % sous illumination AM1.5 au

stade actuel de leur développement, et que des rendements de 15 % devraient être réalisés avant la fin de 1992. Ces progrès seront principalement dus à une amélioration du recouvrement spectral entre le colorant et la lumière solaire. En lumière diffuse, ou sous un ciel nuageux, le rendement de nos cellules est étonnamment élevé, et dépasse déjà celui des cellules conventionnelles au silicium polycristallin. Leur coût ne devrait pas dépasser le dixième de celui des piles classiques. Ces cellules sont particulièrement adaptées pour l'application décentralisée, à savoir dans l'habitat, où elles donneront un appui considérable à l'approvisionnement énergétique des ménages. ■

Suisse de Réassurances

Zurich, Téléphone 01 285 21 21, Téléx 815 722 sre ch, Télécopieur 01 285 29 99

