Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 162 (1982)

Artikel: La conversion de l'énergie solaire par des systèmes photosynthétiques artificiels

Autor: Cuendet, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90851

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: 17.07.2025

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

La conversion de l'énergie solaire par des systèmes photosynthétiques artificiels

Pierre Cuendet

Zusammenfassung

Die Photoanalyse eines sauberen und stabilen Brennstoffs aus anorganischer Materie (wie zum Beispiel Wasser) stellt eine interessante Art der Umwandlung von Sonnenlicht dar. Einige Formen dieser Energieumwandlung werden allgemein diskutiert. Speziell wird auf die Möglichkeiten der bio-photochemischen Energieumwandlung hingewiesen. Zusammenhänge zwischen der Photosynthese und künstlichen Strukturen der Energieumwandlung werden diskutiert. Hybrid-Systeme, biomimetische und künstliche Systeme werden an Hand von Beispielen erklärt.

Résumé

La production d'un vecteur énergétique stockable et propre synthétisé à partir de la lumière et de composés inorganiques tels que l'eau représente une voie intéressante de conversion de l'énergie solaire. Quelques idées générales concernant le rôle possible de ce type de conversion sont tout d'abord discutées. Quelques systèmes biophotochimiques convertisseurs d'énergie sont ensuite décrits, ainsi que les analogies qui peuvent être mises en évidence entre la photosynthèse et les systèmes artificiels. Enfin, plusieurs exemples de systèmes hybrides, biomimétiques et artificiels sont présentés.

Introduction

Ces lignes n'ont pas le prétention de présenter une vision complète du problème de la conversion de l'énergie solaire par les systèmes biophotochimiques. Elles se contentent de donner une idée générale des différentes possibilités qui sont étudiées actuellement, en mettant plus particulièrement l'accent sur les similitudes existant entre nombre de systèmes artificiels et le processus naturel de la photosynthèse. Auparavant, quelques élucubrations tentent de justifier l'importance accordée au sujet présenté, élucubrations qu'on voudra bien me pardonner.

Sous l'influence, en particulier, d'un flux continuel d'énergie provenant du soleil, des systèmes thermodynamiques dissipatifs de plus en plus complexes sont apparus au cours des âges à l'interface terre/atmosphère et ont permis l'émergence de structures organisées qui peu à peu se sont diversifiées et multipliées jusqu'à épuiser les ressources énergétiques alors à disposition. Grâce à la photosynthèse, un processus efficace de conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique apparu à ce moment de l'évolution, le captage du flux photonique solaire s'est considérablement amélioré, assurant ainsi une nouvelle étape de la croissance et de la diversification de ces systèmes, étape pendant laquelle de grandes quantités d'énergie chimique ont été stockées dans le sous-sol de notre planète.

Enfin, il y a peu, des formes supérieures d'organisation basées principalement sur l'utilisation des réserves énergétiques fossiles se sont développées au sein des sociétés humaines sous la forme de structures socio-économiques nouvelles, plus complexes, qui tendent à modifier les conditions de vie et le paysage – même de la planète. Comme pour les systèmes précédents, le maintien et le développement du fonctionnement de ces structures nécessitent un flux continu d'énergie que les réserves fossiles ne pourront bientôt plus assurer. Quelle que soit l'évolution de ce type d'organisations socio-économiques, et leur plus ou moins large implantation à la surface de la terre, il est prévisible que des besoins énergétiques de plus en plus considérables seront nécessaires. Pour répondre à ces besoins, plusieurs options peuvent être envisagées. L'une d'entre elles consiste à accroître encore l'efficacité de la conversion des pho-

tons solaires qui atteignent la surface de notre planète en énergies thermique ou chimique directement utilisables dans les activités multiples qui caracterisent la communauté humaine actuelle.
Il faut remarquer qu'une amélioration du rendement de conversion de l'énergie solaire semble tout à fait réalisable: La consommation annuelle mondiale d'énergie ne représente qu'environ une heure du flux solaire total atteignant la surface de la terre. D'autre part, la conversion naturelle de cette énergie radiante par le monde végétal ne se fait qu'avec un rendement de l'ordre de 0.1 % en moyenne annuelle.
Parmi les moyens qui permettraient d'intensifier le captage de l'énergie photonique incidente, une utilisation plus performante des processus de la photosynthèse reste une voie extrêmement prometteuse.
De nombreuses recherches, dont certaines ne pourront aboutir qu'à long terme, doivent être entreprises, tant dans l'étude d'une domestication plus efficace de ce processus propre au règne végétal que dans le dévelopement de techniques nouvelles s'inspirant de près ou de loin du phénomène naturel. Quelles que soient les voies que la recherche empruntera à l'avenir, il existe de nombreux domaines dans lesquels les sciences botaniques peuvent et doivent apporter leur contribution, afin de se mettre une fois encore au service de la communauté.

Bioconversion de l'énergie solaire

L'apparition de l'agriculture fut le premier pas accompli par l'homme en direction d'une domestication de la photosynthèse. Au cours des millénaires, les techniques culturales se sont affinées, et de nouvelles variétés végétales ont été sélectionnées, ce qui permit l'accroissement des rendements de fixation photosynthétique du carbone et la production differenciée de nourriture, de matériaux (fibres, etc.) ou d'énergie. Il faut cependant remarquer que rarement des plantes ont été cultivées en vue de la seule production d'un vecteur énergétique. La chaleur était obtenue par la combustion de résidus de la biomasse, ou par un prélèvement effectué sur des ressources végétales naturelles, telles nos forêts.
Depuis quelques années, de nombreuses recherches sont consacrées soit au développement d'une agriculture spécifiquement tournée vers la production de composés riches en énergie, soit vers la valorisation de la biomasse par sa transformation en produits plus facilement intégrables dans les circuits énergétiques modernes (production de méthane, d'alcohols, etc.).
Cet «energy farming» est appelé à connaître une extension considerable. Que ce soit par la culture de plantes traditionnelles, tel la canne à sucre, ou par celle d'espèces nouvelles, tel certaines variétés d'Euphorbiacées adaptées aux régions semi-arides, ou encore d'algues, une variété de systèmes bioconvertisseurs sont actuellement étudiés en vue d'une production intensive de biomasse, d'hydrocarbures, d'alcools, d'ammoniaque, etc. Parmis les inconvénients majeurs qui doivent être considérés lors d'une éventuelle application de ce genre de procédés de conversion, il faut noter tout d'abord le risque de compétition entre les différents types d'agricultures pour l'occupation des surfaces terrestres disponibles. D'autre part, il faut s'assurer que les rendements énergétiques globaux soient réellement favorables. De ce point de vue, la photosynthèse réalisée «in vivo» n'est pas un processus d'une très grande efficacité: la quantité d'énergie stockée par les plantes ne dépasse géneralement pas 1 % de l'énergie incidente totale mesurée sur une année. Cette efficacité peut cependant atteindre 3 à 5 % dans des conditions optimales et sur de courtes périodes. Cependant, un tel rendement est encore bien inférieur aux valeurs théoriques que l'on peut escompter d'un processus photosynthétique qui ne serait pas soumis aux contraintes imposées par les mécanismes physiologiques qui réglent la vie et le mort des organismes végétaux. En effet, il peut être montré qu'un rendement de conversion de près de 12–13 % (ou plus, en couplant deux systèmes absorbants dans des régions complémentaires du spectre) peut être envisagé pour la transformation des photons solaires en énergie chimique.
D'où l'intérêt de chercher à développer des systèmes artificiels capables de convertir l'énergie photonique d'une façon plus efficace, plus durable et plus rentable que leur équivalent naturel.
Une des réactions les plus attractives qui puisse être envisagée dans ce but est la décomposition de l'eau en ses constituants à l'aide de la lumière. Une telle réaction, appelée photolyse, présente un grand intérêt tant sur les plans technique qu'écologique. Elle produit en effet à partir d'un substrat abondant, l'eau, et d'une

source primaire d'énergie inépuisable, le rayonnement solaire, un vecteur énergétique stockable de grande valeur, l'hydrogène, dont la combustion, réalisée d'une façon controlée, ne redonne que le produit de départ.
Un effort considérable de recherche doit bien évidemment être entrepris avant qu'une application pratique d'un tel système de conversion puisse être envisagée. Il faut cependant noter que sa généralisation, si elle s'avérait possible, représenterait une évolution nouvelle du fonctionnement des systèmes évoluant à la surface de la terre: A côté des cycles de l'eau, du carbone, de l'azote, etc., qui caractérisent la biosphère, prendrait place un cycle parallèle, basé sur la décomposition de l'eau par les radiations incidentes, qui contribuerait à assurer en même temps que d'autres types de convertisseurs (transformation de biomasse, production solaire d'electricité et de chaleur, etc.) le maintien du flux d'énergie grâce auquel les sociétés humaines pourront continuer à s'organiser, se complexifier et se diversifier.
De remarquables analogies existent entre le processus naturel de la photosynthèse et nombre de systèmes artificiels étudiés actuellement. La première étape de la réaction biologique – dont le siège est la membrane thylakoidale – consiste en effet précisément en cette dissociation de la molécule d'eau sous l'effet de la lumière (figure 1), et en la formation d'espèces de bas potentiel redox qui, dans une deuxième série de réactions biochimiques (B) vont permettre la fixation du gaz carbonique, puis sa conversion en sucres. Huit photons sont utilisés dans le chloroplaste pour l'oxydation de deux molécules d'eau et la production d'une molécule d'O_2:

$$2H_2O \xrightarrow{8h\nu} 4H^+ + 4e^- + O_2$$

La plus grande partie du spectre solaire visible contient des photons suffisamment énergétiques pour effectuer ce type de photodissociation. Dans les systèmes artificiels (figure 2), les équivalents réducteurs formés lors de l'oxydation de l'eau sont utilisés pour réduire les protons par l'intermédiaire de catalyseurs specifiques (B')

$$4H^+ + 4e^- \xrightarrow{B'} 2H_2$$

Ainsi donc, dans de tels systèmes, les mécanismes complexes de la fixation du carbone sont

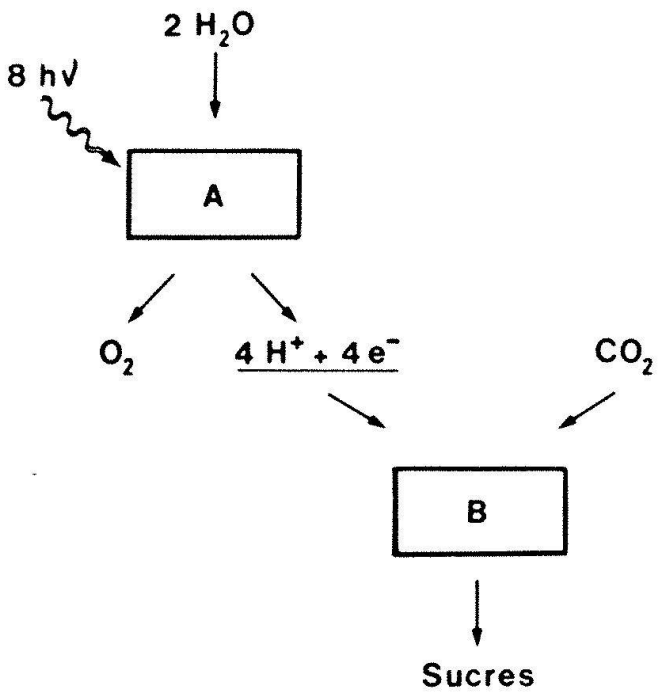

Figure 1. Les deux réactions de la photosynthèse

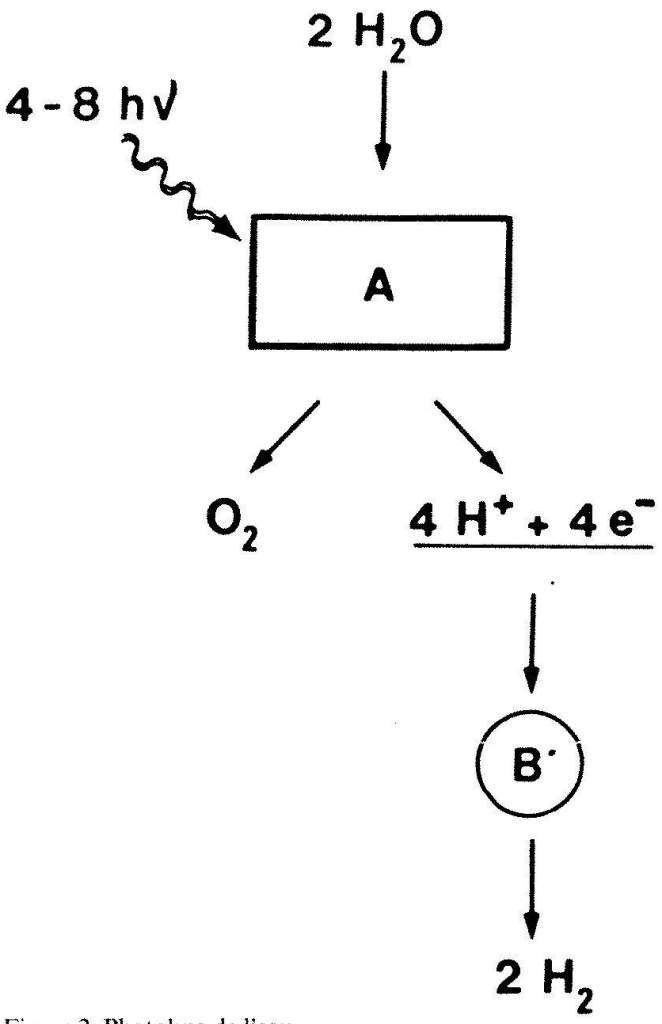

Figure 2. Photolyse de l'eau

remplacés par une réaction redox unique. De plus, la photophosphorylation obtenue dans le chloroplaste par une dissipation contrôlée d'un gradient de concentration de protons n'est pas réalisée.
Il existe des équivalents biologiques au catalyseur B′ dont il est question ci-dessus. Il s'agit des hydrogénases et des nitrogénases que l'on rencontre dans certaines algues ou cyanobactéries. Plusieurs laboratoires étudient actuellement les conditions de cultures qui favorisent une photo-production optimale d'hydrogène par ces organismes.
La photolyse de l'eau n'est pas la seule reaction réalisable grâce aux systèmes artificiels. D'autres substrats que l'eau peuvent être utilisés comme donneurs d'électrons, et d'autres produits peuvent être formés. Differentes applications, qui vont de la synthèse organique à la production d'ammoniaque, en passant par la génération d'électricité s'ouvrent donc pour les systèmes photosynthétiques artificiels.

Quelques exemples de systèmes artificiels

Trois différentes phases réactionnelles, représentées sur la figure 3, peuvent être mises en évidence dans tous les systèmes convertisseurs d'énergie photonique en énergie chimique.

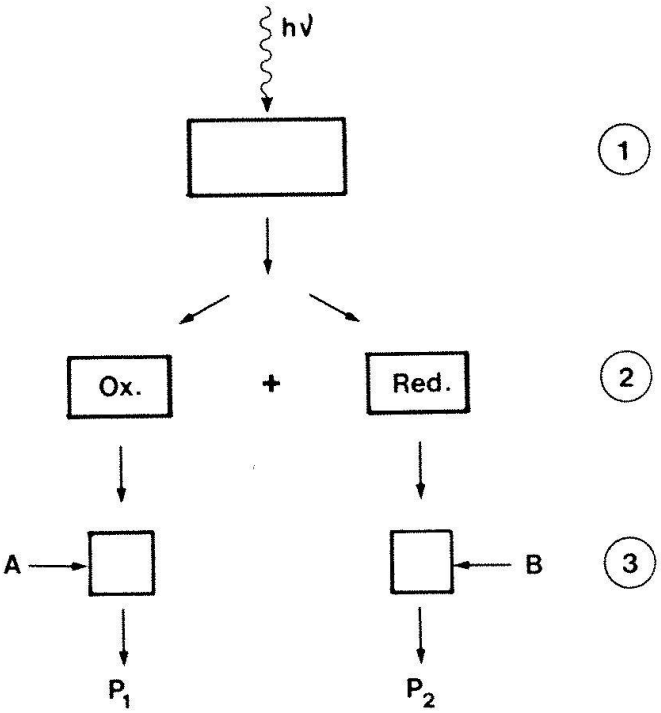

Figure 3. Les trois étapes de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

1. Capture des photons. Cette première étape fait intervenir une espèce chimique colorée, le sensibilisateur S, capable d'absorber une certaine partie du spectre visible. Cette molécule doit posséder d'autre part, des états excités S^* dont le potentiel chimique est tel qu'après absorption d'un photon, elle soit capable d'être soit un donneur, soit un accepteur d'electron.

$$S \xrightarrow{h\nu} S^*$$

L'appareil photosynthétique des plantes supérieures réalise cette capture des photons avec une très grande efficacité. Plusieurs centaines de molécules de chlorophylle associées en un complexe, l'antenne, absorbent la lumière, en compagnie d'autres pigments secondaires, et transfèrent ensuite l'énergie ainsi collectée à des centres réactionnels qui agiront comme donneurs d'électrons. Aucun système artificiel n'est capable actuellement d'imiter un piège à photons d'une telle complexité, mais de nombreux sensibilisateurs, porphyrines ou complexes métalliques par exemple, ont été étudiés en photochimie en vue d'une telle conversion de l'énergie photonique en potentiel chimique, et sont actuellement utilisés dans nombre de systèmes artificiels.
2. Séparation de charge. La deuxième étape du processus est constituée par le transfert de l'électron depuis le sensibilisateur excité à une molécule voisine, appelée relais (R) ou médiateur (seul ce type de transfert, appelé quenching oxydatif sera considéré ici), puis en la stabilisation des espèces chargées ainsi formées:

$$S^* + R \rightarrow S^+ + R^-$$

Cette stabilisation revêt une importance cruciale puisque c'est d'elle que dépend pour une grande part le rendement du système. En effet, l'utilisation efficace dans les étapes ultérieures du potentiel chimique accumulé lors de la séparation de charges (formation d'un couple redox) n'est possible que si la recombinaison de S^+ et R^-, qui occasione la dissipation sous forme thermique de l'énergie captée, est fortement inhibée. Cette stabilisation d'un couple rédox représente en fait une étape tampon entre les processus photochimiques qui se déroulent sur une échelle de temps de l'ordre de la nanoseconde,

et les processus catalytiques dont l'échelle de temps s'étend jusqu'à la milliseconde.
Ici encore, l'appareil photosynthétique est plus performant que les systèmes artificiels développés à ce jour. La séparation de charge est réalisée dans les deux photosystèmes par l'intermédiaire d'une succession de plusieurs composés donneur/accepteur d'électrons associés aux centres réactionnels. Les espèces oxydantes et reductrices ainsi crées sont de plus situées de part et d'autre de la membrane thylakoidale, qui forme écran à la recombinaison.
3. Les phases catalytiques. Enfin, l'énergie stockée sous forme de potentiel redox par le couple donneur/accepteur d'électrons est utilisée, grâce à des catalyseurs spécifiques, pour former des produits P_1 et P_2 dont la stabilité est suffisante pour qu'il y ait stockage d'énergie. Dans le chloroplaste, ces deux réactions catalytiques ont lieu à chacune des extrémités de la chaîne de transport d'électrons. Du côté oxydant, c'est grâce à un complexe encore fort mal connu qu'est opérée la décomposition de l'eau, et du côté réducteur, c'est par l'intermédiaire de la ferrodoxine que s'accomplit la réduction du NADP.
Des catalyseurs redox artificiels, formés généralement d'aggrégats colloidaux de métaux nobles ou de leurs oxydes ont aussi été développés en vue de réaliser les oxydations et réductions par lesquels se termine le processus de la conversion de l'énergie lumineuse.

On peut séparer en trois classes distinctes les différents systèmes artificiels capables de réaliser la photolyse de l'eau en reproduisant de près ou de loin les mécanismes de la photosynthèse. Bien que cette classification soit quelque peu arbitraire, elle permet de dégager la plus ou moins grande parenté qui peut exister entre le système photosynthétique naturel et ses équivalents artificiels.

a) Les systèmes hybrides

Une première approche consiste à extraire une partie de l'appareil photosynthétique de plantes ou de bactéries que l'on couple ensuite avec certains éléments extérieurs. A titre d'exemple, on peut mentionner le système formé de thylakoides isolés de feuilles couplés par l'intermédiaire d'un relais R avec soit un catalyseur artificiel, soit une hydrogénase bactérienne (figure 4). Dans ce cas particulier, tant l'oxydation de l'eau par le «water splitting complex» (WSC) que la capture des photons et la séparation de charges sont assumés par le thylacoide. Seuls le transfert d'électrons et la phase catalytique de réduction des protons dépendent de composés ajoutés à la préparation.
De tels systèmes présentent l'inconvenient d'une durée de vie limitée à quelques heures à cause de l'inactivation de certains composants membranaires. De plus, la production d'hydro-

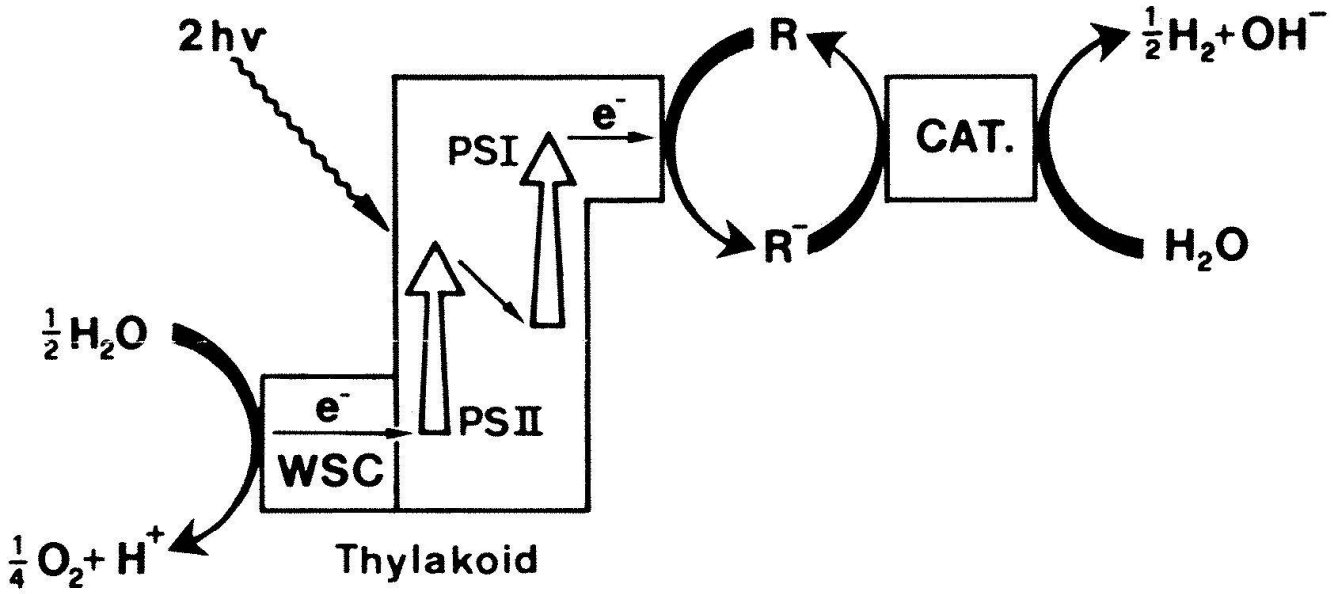

Figure 4. Un exemple d'un système hybride.

gène que l'on peut en tirer reste bien inférieure à la capacité réductrice des thylakoides. Ces systèmes facilitent cependant la compréhension des relations redox entre la surface négativement chargée de la membrane et les différents relais qui sont actuellement étudiés.
D'autres types de systèmes hybrides présentent un grand intérêt. Il ne sera fait mention ici que des essais d'incorporation de centres réactionnels dans des vésicules artificielles, ou de l'adsorption de ces mêmes centres à la surface d'électrodes, en vue de la réalisation de cellules biophotoélectrochimiques.

b) Les systèmes biomimetiques

Sous cette dénomination peuvent être rangés les systèmes dans lesquels on tente de reconstituer l'organisation de l'appareil biologique. En particulier, l'utilisation de molécules amphiphiles permet de réaliser des assemblages moléculaires tels que les micelles, les vésicules ou les microémulsions qui comportent un interface séparant une phase lipophile du milieu extérieur aqueux. Une telle disposition reproduit le micro-environnement caractérisant la membrane photosynthétique. L'incorporation de sensibilisateurs ou de relais adéquats permet de contrôler le transfert d'électrons induit par la lumière, et d'assurer une séparation de charge du même type que celle qui est produite dans le thylakoide.

c) Les systèmes artificiels

Il existe enfin une classe de convertisseurs photochimiques qui présentent peu de similitudes avec les processus biologiques, tout en respectant le schéma réactionnel décrit plus haut. Parmis eux, on peut citer tout d'abord les systèmes homogènes dans lesquels n'existe aucune compartimentalisation. Seuls le jeu d'interactions de type électrostatiques, par exemple, entre les différentes espèces, la diffusion, et l'utilisation de catalyseurs très actifs peuvent alors empêcher la réaction inverse de recombinaison des couples oxydants/reducteurs de dissiper thermiquement l'énergie absorbée.
Une seconde espèce de systèmes totalement artificiels fait actuellement l'objet de recherches intensives. Dans ce dernier cas, la séparation de charge est assurée grâce à un phénomène physique entièrement différent puisqu'il fait intervenir la structure de bande des états électroniques dans les semiconducteurs. Ce type de système se compose donc d'une suspension de particules semiconductrices sur lesquelles ont été déposés les catalyseurs. La figure 5 montre un exemple d'un tel système: un sensibilisateur S injecte un électron dans la bande de conduction du semiconducteur, lequel électron peut alors migrer jusqu'à la surface du catalyseur où se produit la réduction de l'eau. Un second catalyseur peut ensuite reconvertir S^+ par l'oxydation du même substrat. Plusieurs variantes de l'utilisation de particules semiconductrices sont actuellement

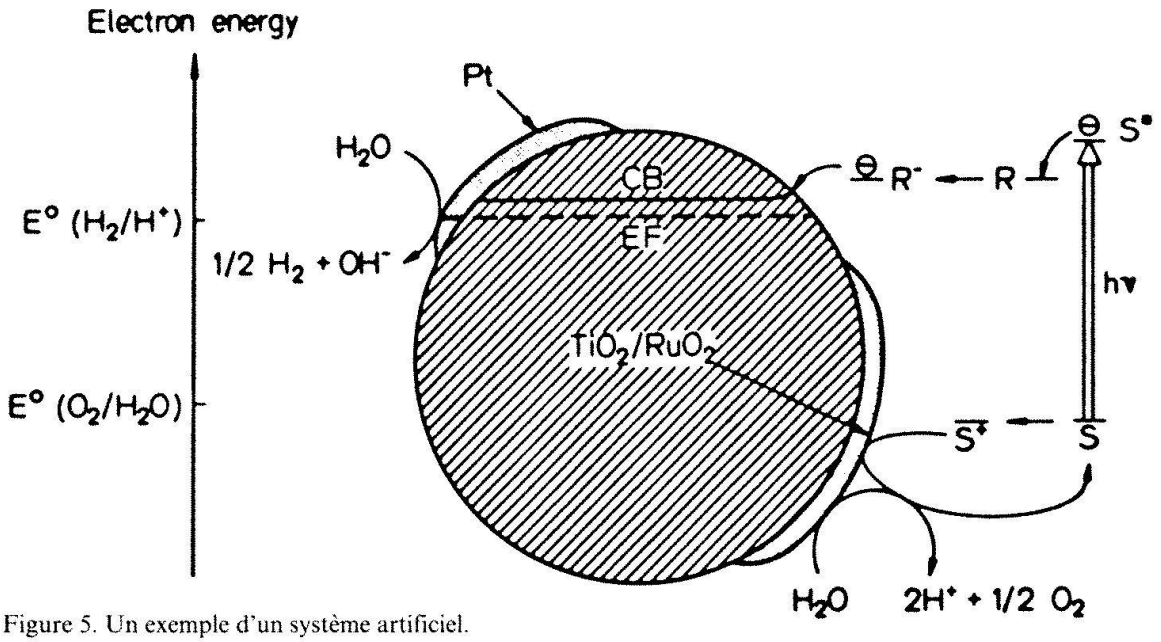

Figure 5. Un exemple d'un système artificiel.

étudiées. Parmis elles, on trouve des systèmes qui ne contiennent rien d'autre que le semiconducteur: le sensibilisateur devient inutile lorsque la largeur de la bande interdite du matériau utilisé est assez étroite pour que les photons visibles puissent induire la créaction de paires électrons/trous directement dans la particule.
De grandes possibilités de développement semblent se dessiner pour ce type de convertisseur artificiel de l'énergie solaire. La simplicité des systèmes, les surfaces importantes d'interface milieu/solide qui caractérisent les suspensions (cette surface peut atteindre plusieurs centaines de m^2 par litre de solution dans le cas de semiconducteurs colloidaux), la variété des réactions qui peuvent être photoinduites donnent de grands espoirs pour l'avenir. La recherche dans ce domaine n'est cependant vraiment active que depuis quelques années. Il est donc encore trop tôt pour prévoir les développements futurs et de décider lesquels des systèmes artificiels, biomimétiques, ou naturels permettront un nouvel essor de la conversion photosynthétique.

Conclusion

Plusieurs méthodes photobiologiques de production d'un vecteur énergétique à partir de la lumière et de composés inorganiques tels que l'eau sont actuellement envisageables. Aucune de ces méthodes n'est cependant mûre pour une application technologique immédiate, tant à cause de notre manque de connaissances fondamentales des processus qui entrent en jeu que du peu de maîtrise technique que nous avons de ce domaine de la photoconversion de l'énergie solaire. Nous nous trouvons, semble-t-il, dans la même situation que celle du monde occidental à la veille de la mise au point de la machine à vapeur par J. Watt, en 1769. A cette époque, une grande partie de la communauté scientifique était convaincue qu'une force énorme pouvait être tirée de la vapeur, mais il a fallu attendre Watt pour que des nombreux systèmes alors étudiés émerge enfin l'engin qui allait être la cause de la révolution industrielle que l'on sait. De même, nous nous trouvons actuellement devant le problème vital de la fourniture d'énergie à l'ensemble des sociétés humaines et nous savons les potentialités que représente le flux solaire. Aucun des types de conversion actuellement connu ne peut cependant prétendre être celui qui sera le plus adéquat. Il n'est donc pas possible de prévoir si les méthodes photochimiques faisant appel soit à des organismes vivants, soit à des systèmes biomimétiques ou totalement artificiels pourront rivaliser avec les processus issus de voies différentes. Mais l'importance du but à atteindre est telle que de nombreux efforts doivent être entrepris dans toutes les directions. Les sciences biologiques ont ici un rôle particulièrement important à jouer. Aussi bien la biochimie, la biophysique, la physiologie, la botanique que la génétique, la microbiologie et un vaste domaine de la chimie sont engagés dans cet effort. La recherche scientifique entreprise dans un tel contexte est une aventure passionnante. Elle fait appel en effet aux connaissances les plus récentes dans les domaines de la biologie, de la physique et de la chimie. De plus, cette recherche d'une production rentable, propre et décentralisée de l'énergie dont nos sociétés ont besoin donne tout son sens au travail du chercheur. En effet, l'accès à cette énergie, ainsi qu'à des ressources alimentaires suffisantes et à la liberté fondent les conditions nécessaires à la dignité de l'homme et à sa survie.

Je tiens à remercier ici le Nationaler Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) qui a subsidié une partie des travaux de l'Institut de Chimie-physique de l'EPFL consacrés à l'étude de systèmes hybrides, ainsi que le Professeur M. Grätzel, directeur de cet institut, qui a bien voulu relire ce travail.

Addendum

Plus de trois ans se sont écoulés entre la rédaction de cet article et sa sortie de presse. Sur le plan scientifique, une telle durée représente une évolution notable des idées, de même que la publication de nombreux résultats expérimentaux nouveaux, particulièrement dans un domaine aussi récent que celui de la photosynthèse artificielle. Le lecteur intéressé par le sujet trouvera une mise au point plus à jour dans «Energy ressources through photochemistry and catalysis», M. Grätzel, ed., Academic Press, New York, 1983, ou dans «Interfacial electron transfer in colloidal metal and semiconductor dispersions and photodecomposition of water», Kalyanasundaram et al., Coordination Chemistry Reviews, in press.

Bibliographie

1. Barber, J., ed., 1979, Photosynthesis in relation to model systems. Topics in Photosynthesis, vol. 3, Elsevier, Amsterdam.
2. Demeyer, A., Jacob, F., Jay, M., Menghy, G. and Perrier, J., 1981, La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies. Techniques et Documentation, Paris.
3. Grätzel, M., Kalyanasundaram, K. and Kiwi, J., 1982, Visible light induced cleavage of water into hydrogen and oxygen in colloidal and microheterogeneous systems, in: Structure and Bonding, vol. 49, Springer Verlag.
4. Mislin, H. and Bachofen, R., eds., 1982, New trends in research and utilization of solar energy through biological systems. Experientia supplementum, vol. 43, Birkhäuser Verlag, Basel.
5. San Pietro, A., ed., 1980, Biochemical and photosynthetic aspects of energy production, Academic Press, New York.

Adresse de l'auteur:

Pierre Cuendet
Dr ès sciences
Institut de Chimie-physique
Ecole polytechnique fédérale
CH–1015 Lausanne