

□ IDÉES DE PHYSIQUE

Des électrons contre du soleil

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique se développe. Mais jusqu'où peut-on augmenter les rendements ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

A l'heure du développement durable, la lumière du Soleil est vue comme une source d'énergie propre et inépuisable. Encore faut-il la transformer en énergie utilisable, notamment en électricité avec des cellules photovoltaïques. Si le principe de ces cellules est simple, leurs performances sont limitées. Pour l'instant...

Des performances médiocres, mais...

Examinons une cellule photovoltaïque type, de 15 centimètres de côté. La notice nous apprend qu'elle peut fournir un courant de huit ampères (5×10^{19} électrons par seconde) sous une tension de 0,6 volt, soit une puissance de 4,8 watts. Par ailleurs, la puissance lumineuse reçue au sol est, avec un bon ensoleillement, d'environ un kilowatt par mètre carré, soit environ 24 watts sur la cellule et, grossièrement, de l'ordre de 7×10^{19} photons par seconde. Ainsi, le rendement énergétique atteint à peine 20 pour cent, tandis que la conversion photon-électron au sein de la cellule dépasse les 70 pour cent.

Or un argument thermodynamique démontre qu'on est loin de l'optimum : en considérant la lumière comme le vecteur d'énergie qui fait fonctionner un moteur entre une source chaude (la surface du Soleil, à 6 000 kelvins) et une source froide (la Terre, à 300 kelvins), on calcule un rendement théorique maximal de 95 pour cent ! Alors, pourquoi une si faible performance ?

Pour le comprendre, il faut se plonger dans le fonctionnement de la cellule. Le principe est simple : dans le domaine visible, les photons, ces grains de lumière, ont

assez d'énergie pour exciter les électrons du solide. L'énergie de ces électrons ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. Elle est limitée à des intervalles bien définis, les « bandes d'énergie ». Les matériaux qui constituent les cellules photovoltaïques sont des semi-conducteurs, tel le silicium, pour lesquels deux bandes sont en jeu : la bande de valence (dernière bande totalement remplie d'électrons) et, un peu au-dessus en énergie, la bande de conduction (première bande non totalement remplie).



1. L'AVION SOLAR IMPULSE, aux ailes recouvertes de panneaux solaires, volant au-dessus d'une « ferme solaire ».

Les semi-conducteurs ont leur bande de conduction entièrement vide et sont donc isolants, car seuls les électrons situés dans la bande de conduction sont mobiles.

Toutefois, dans les semi-conducteurs, l'écart d'énergie entre ces deux bandes, le « gap », est relativement faible : il vaut 1,1 électronvolt (eV) pour le silicium (l'énergie gagnée par un électron soumis à une

différence de potentiel de 1,1 volt). Cette énergie, un photon peut l'apporter. L'énergie de ces grains de lumière dépend de leur longueur d'onde : 1,1 eV correspond à une longueur d'onde de 1,1 micromètre, dans l'infrarouge proche. Les photons d'énergie inférieure (de longueur d'onde supérieure) ne peuvent donc être absorbés. Comme ils représentent au sol près de 20 pour cent de l'énergie solaire, c'est une première raison du rendement limité des cellules photovoltaïques, et cela explique qu'il y a moins d'électrons libérés que de photons incidents.

Tous les photons d'énergie supérieure au gap peuvent être absorbés : un tel photon a l'énergie suffisante pour déloger un électron de la bande de valence, où se crée un trou, et le porter dans la bande de conduction. Comme c'est le cas de toute la lumière visible, les cellules nous apparaissent noires.

Que devient l'excès d'énergie ? Par exemple, un photon « rouge » de 1,6 eV a 0,5 eV de plus que le gap, supplément qui peut servir à créer un trou à 0,3 eV au-dessous du sommet de la bande de valence et porter l'électron correspondant à 0,2 eV au-dessus du minimum de la bande de conduction. Mais très rapidement, les électrons perdent de l'énergie par collisions avec les atomes et se retrouvent au niveau minimal de la bande de conduction. Dans le même temps, par des mécanismes similaires, chaque trou est comblé par un électron de la bande de conduction d'énergie supérieure, électron dont le départ crée un trou, et ainsi de suite : l'énergie du trou finit par remonter au maximum de la bande de valence.

Le reste de l'énergie est passé dans les vibrations du réseau cristallin, c'est-à-dire dans l'élévation de température du maté-

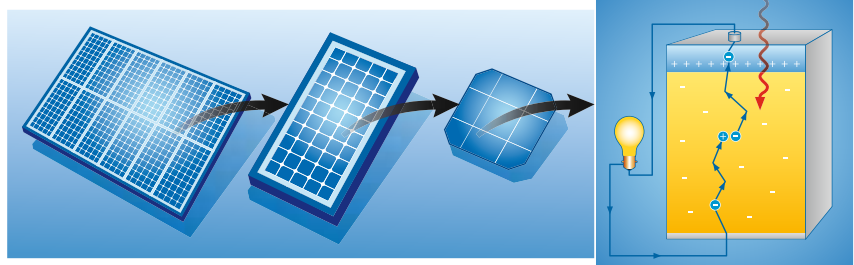
riau. Morale de l'histoire ? Parmi tous les photons incidents, ne sont captés que ceux ayant une énergie supérieure au gap. Ces photons créent une paire électron-trou, et l'énergie que l'on peut espérer récupérer est au mieux égale à celle du gap.

On est face à deux exigences contradictoires : pour augmenter le nombre de photons captés, il faut diminuer le gap, mais on récupère alors moins d'énergie par photon, l'énergie en excès étant transformée en chaleur. Un compromis est donc à trouver, qui dépend de la façon dont sont répartis les photons en fonction de la longueur d'onde. Pour la lumière solaire, l'optimum est un gap de 1,4 eV, qui donnerait un rendement de 33 pour cent. À défaut de trouver le matériau idéal, d'autres pistes existent pour accroître le rendement.

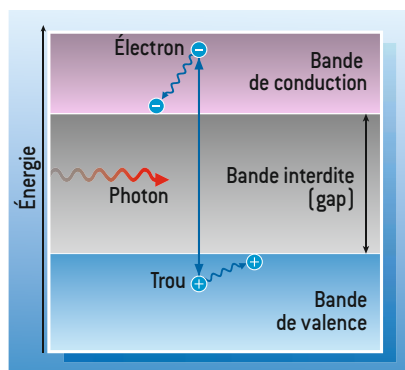
...des espoirs de progrès

La première piste est de manipuler le rayonnement solaire pour mieux l'adapter aux cellules existantes : par exemple convertir les photons les moins énergétiques en photons plus énergétiques grâce à des composants optiques spéciaux, ou au contraire créer à partir d'un photon très énergétique une gerbe de photons d'énergie plus basse (mais supérieure au gap) grâce à des matériaux fluorescents. On reste néanmoins très loin de la réalisation du rayonnement idéal qui serait monochromatique (avec une seule longueur d'onde) et d'énergie égale au gap.

Une autre piste plus prometteuse est d'empiler des couches successives de matériaux à gaps différents. Imaginons par exemple deux couches ayant pour gaps 1,1 et 2 eV : si la lumière arrive sur la couche à 2 eV, seul le spectre visible et ultraviolet sera absorbé, mais il fournira plus d'énergie par photon qu'avec un gap plus bas. Les photons infrarouges passeront à travers cette première couche et une part d'entre eux seront absorbés par la seconde pour fournir autant d'énergie par photon que la cellule au silicium. Il en résultera un gain d'énergie. Avec une structure à trois couches, on s'attend, en concentrant au maximum la lumière solaire sur la cellule, à des rendements maximaux de l'ordre de 63 pour cent.



2. UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE est composé de nombreuses cellules constituées d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Lorsqu'un photon (ligne ondulée rouge) d'énergie suffisante arrive, il est absorbé et crée une paire électron-trou (en bleu) : un électron (de charge négative) quitte la bande d'énergies de valence, où il laisse un trou (de charge positive), et rejoint la bande d'énergies de conduction. Grâce à un dopage avec d'autres éléments, une couche (en jaune) du silicium présente un excès d'électrons et l'autre (en bleu) un excès de trous. Il en résulte au sein du matériau un champ électrique qui déplace l'électron dans un sens et le trou dans le sens opposé. La recombinaison immédiate de l'électron et du trou est ainsi évitée.



À ce jour, on atteint 43 pour cent, un rendement prometteur, mais qui ne s'obtient qu'avec des techniques très élaborées, par conséquent coûteuses et non adaptées à une production de masse. On ne les trouvera donc pas à l'œuvre dans les fermes solaires telles que *Waldpolenz*, près de Leipzig, qui fournit 40 mégawatts pour une superficie totale de 110 hectares, dont 40 couverts par les 550 000 cellules au tellure de cadmium, ou CdTe (soit quatre pour cent de rendement moyen !).

Peut-être des cellules à haut rendement équiperont-elles des avions comme le *Solar Impulse*, développé par Bertrand Piccard et André Borschberg, et qui a volé récemment avec la seule lumière du Soleil. Avec ses 200 mètres carrés de cellules et un rendement global moyen de 12 pour cent, cet avion ne déployait pas plus de puissance (six kilowatts) que celui des frères Wright. Mais, grâce au Soleil (et à de bonnes batteries), il a pu voler nuit et jour sans kérosène.

3. LORSQU'UN PHOTON d'énergie supérieure au gap est absorbé et crée une paire électron-trou, l'énergie en excès est vite perdue sous forme de chaleur : en raison des collisions avec les atomes du semi-conducteur, l'énergie de l'électron se retrouve au bas de la bande de conduction et celle du trou au sommet de la bande de valence.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://idphys.free.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-F. Guillemoles, *The quest for very high efficiency in photovoltaic energy conversion*, *Europhysics News*, vol. 41(2), pp. 19-22, 2010.

B. J. Feldman, *An Introduction to solar cells*, *The Physics Teacher*, vol. 48(5), pp. 306-308, 2010.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr