

de l'électronique expérimentale avec des pérovskites artificielles, mais sans penser à l'utilisation potentielle de ce matériau dans des cellules photovoltaïques.

Enfin, en 2009, une équipe de l'université Toin a transformé une pérovskite à base d'halogénure de plomb, synthétisée pour la première fois en 1978, en cellule photovoltaïque. Les chercheurs ont mis en solution des substances chimiques triées sur le volet, puis ont fait tourner cette solution sur une lame de verre afin de l'étaler, avant de la sécher. Le séchage laisse une pellicule nanométrique de cristaux de pérovskite à la surface de la lame, un peu comme les cristaux de sel apparaissent par évaporation dans les marais salants. Ce film mince libère des électrons quand il absorbe de la lumière du Soleil, mais pas très efficacement. Les chercheurs ont ajouté de minces couches de matériau de part et d'autre des nanocristaux de pérovskite pour améliorer le transfert des électrons à un circuit électrique externe.

Les premières de ces cellules minuscules n'avaient qu'un rendement de 3,8 % et étaient très instables, se détériorant en quelques heures. Michael Lee modifia la composition de la pérovskite et remplaça une couche problématique de la cellule, ce qui a fait grimper le rendement au-dessus de 10 %. Une autre équipe de chercheurs, dirigée par Michael Grätzel, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et Nam-Gyu Park, de l'université Sungkyunkwan en Corée, a réalisé une avancée comparable.

La récente progression vers les 20 % a été rendue possible par quelques innovations astucieuses. La création d'une pellicule cristalline sans défauts fait appel à de délicates méthodes de dépôt. Une équipe dirigée par Sang Il Seok, de l'Institut coréen de recherche en technologie chimique, a ainsi conçu un processus en plusieurs étapes qui produit une pellicule de haute qualité cristalline. En optimisant le traitement, Sang Il Seok a battu successivement trois records de rendement en 2014, passant de 16,2 à 20,1 %.

D'autres scientifiques simplifient l'arrangement en couches des matériaux ajoutés ; les toutes dernières cellules à pérovskite ressemblent davantage à une cellule au silicium, simple superposition de couches planes. Dans le cas du silicium, cette conception a permis une production de masse à bas coût. Récemment, les chercheurs travaillant sur la pérovskite ont également chauffé la solution et la lame de verre sur laquelle elle

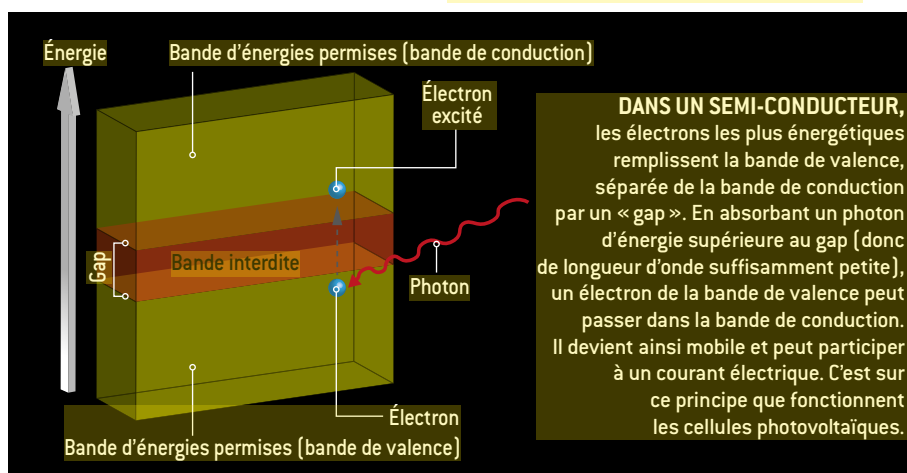
est déposée, produisant ainsi des cristaux beaucoup plus gros que ceux des cellules initiales, signe encourageant indiquant que la cristallinité continue de s'améliorer.

Les scientifiques mettent également au point de nouvelles caractéristiques. En faisant varier les proportions des éléments chimiques, on peut créer des cellules avec une légère nuance jaune ou une touche de pourpre. En déposant la pérovskite sur le verre en îlots plutôt qu'en une seule couche mince, on parvient à créer des pellicules opaques ou transparentes, ou entre les deux (voir la figure page 66).

Toutes ces options (un éventail de choix bienvenu après les cellules au silicium rigides, opaques et invariablement bleu-noir) pourraient aider les architectes à concevoir des lucarnes, fenêtres et façades qui intègrent

cellules sont suffisamment stables pour produire de l'électricité pendant plusieurs décennies, concevoir un produit que les consommateurs peuvent installer chez eux sans crainte et répondre aux critiques qui mettent en garde contre une surestimation des niveaux de rendement.

La stabilité des cellules photovoltaïques à pérovskite est sans doute leur talon d'Achille. Les pérovskites peuvent se dégrader rapidement parce qu'elles sont sensibles à l'humidité. Il faut donc les enchâsser de façon étanche. Les cellules que nous avons fabriquées en atmosphère inerte et encapsulées dans de l'époxy ont fonctionné de manière stable pendant plus de 1000 heures sous une exposition continue à la lumière. Des chercheurs de l'université Huazhong de sciences et technologie,



des films photovoltaïques à pérovskite. On peut par exemple imaginer un gratte-ciel aux fenêtres teintées aux pérovskites, qui protégeraient l'intérieur de la lumière brûlante du soleil en la convertissant en électricité, ce qui réduirait la facture de la climatisation.

Le long chemin vers la commercialisation

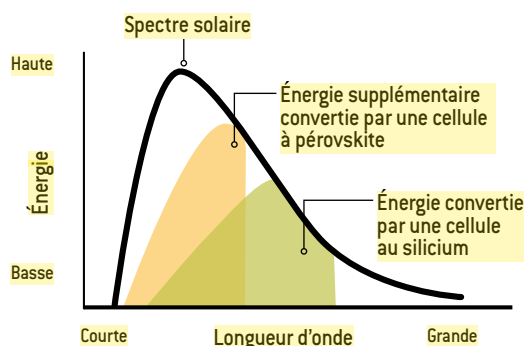
Il reste cependant beaucoup de chemin à faire avant que ces visions ne deviennent réalité. Bien que des chercheurs coréens et australiens aient récemment fait la démonstration de cellules imprimables de 10 centimètres par 10, suffisamment grandes pour des produits commerciaux compétitifs, les cellules aux meilleurs rendements ne sont encore que des prototypes de petites dimensions. Outre augmenter la taille des dispositifs, les laboratoires et les jeunes entreprises technologiques doivent garantir que les

en Chine, en collaboration avec Michael Grätzel, ont également atteint cette durée même sans encapsulation ; et dans des travaux récemment publiés, ils ont déployé des panneaux tests en extérieur en Arabie Saoudite pour montrer que leur concept pouvait fonctionner dans des conditions réelles. Enfin, nous avons récemment rendu publics des résultats d'Oxford Photovoltaics qui montrent que les cellules à pérovskite peuvent produire un courant stable pendant plus de 2000 heures en plein soleil.

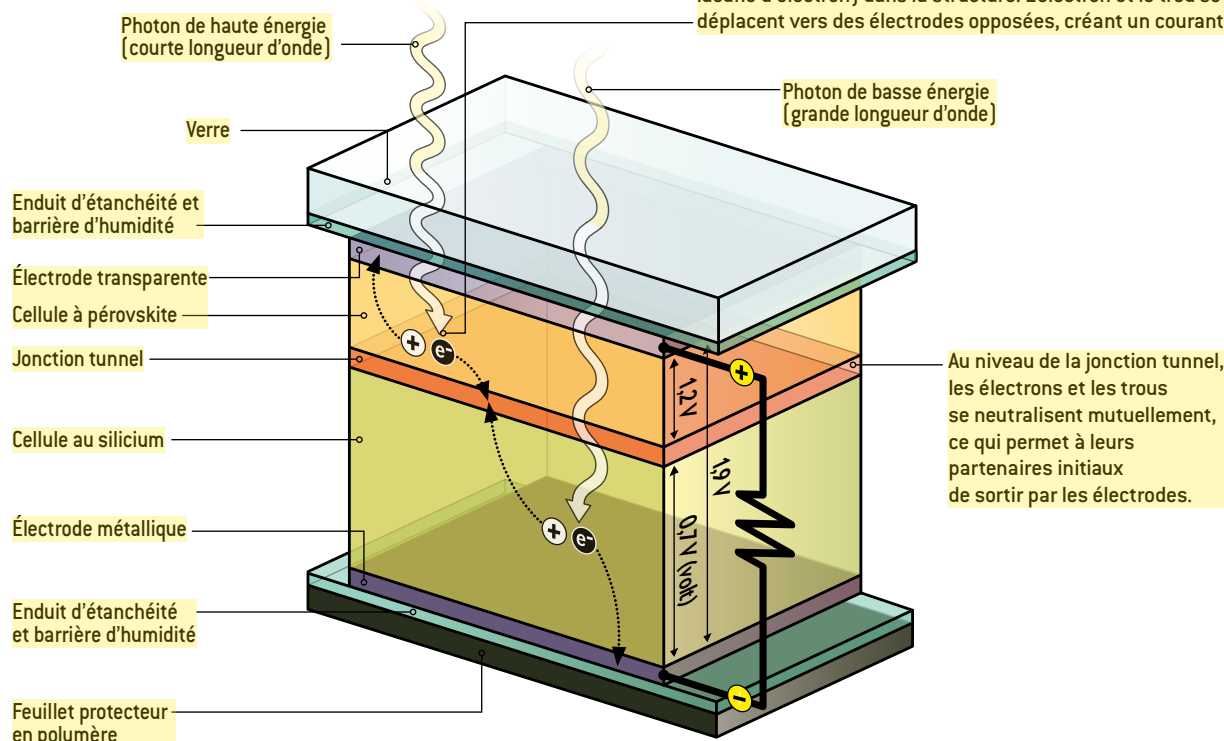
Mais la norme industrielle pour les panneaux solaires est une garantie de vingt-cinq ans. Cela équivaut à 54000 heures sous un soleil intense et constant. Il est essentiel de trouver une protection efficace contre l'humidité, qui résiste sur une telle durée et sur une grande plage de températures. Les fabricants de panneaux au silicium ont résolu le problème en laminant les cellules entre des plaques de verre. C'est parfait pour de grandes installations au

DEUX PROCÉDÉS VALENT MIEUX QU'UN

Plutôt que de se concurrencer commercialement, les cellules photovoltaïques au silicium et à pérovskite pourraient se compléter, convertissant la lumière du soleil en électricité avec un meilleur rendement que celui atteint par ces technologies séparément. Dans une cellule en tandem (ci-dessous,), une couche de pérovskite et une couche de silicium sont connectées, générant des électrons avec une tension et une énergie plus élevées qu'on ne l'obtient avec l'un ou l'autre de ces matériaux utilisé seul. La pérovskite et le silicium convertissent des longueurs d'onde différentes de la lumière solaire (à droite), et leur association exploite donc une plus grande plage du spectre.



Un photon venu du Soleil communique de l'énergie à un électron. Ce dernier devient mobile, laissant un trou (ou une lacune d'électron) dans la structure. L'électron et le trou se déplacent vers des électrodes opposées, créant un courant.



sol. Mais comme on peut fabriquer les cellules à pérovskite sous la forme de films beaucoup plus légers et flexibles que des cellules sur plaques de verre, des stratégies alternatives d'encapsulation donneraient lieu à de plus vastes applications, telles que des vernis pour murs et fenêtres capables de produire de l'électricité.

Des entreprises qui essaient de commercialiser d'autres matériaux solaires flexibles, tels que le semi-conducteur à base de sélénure de cuivre, indium et gallium (CIGS), ont réalisé des progrès. Les technologies d'encapsulation fonctionnent bien, mais ces entreprises peinent à gagner des parts de marché par rapport au silicium, parce que leurs cellules ont

un rendement inférieur et coûtent plus cher. Les pérovskites pourraient profiter de ces progrès dans les techniques d'encapsulation.

Par ailleurs, il ne faut pas seulement empêcher l'humidité de pénétrer dans la cellule. On doit aussi empêcher le contenu des cellules à pérovskite d'en sortir, en raison de la petite quantité de plomb ajoutée à la recette. Le plomb est toxique, et le marché exigera des preuves solides que ces cellules sont sans danger. Pour trouver l'inspiration, les chercheurs peuvent là encore se tourner vers un matériau solaire alternatif, le seul en dehors du silicium à s'être taillé un succès commercial sérieux : le tellure de cadmium (CdTe).

Fabriqués par la société américaine First Solar, les panneaux à tellure de cadmium ont été déployés dans le monde entier et ont largement satisfait aux normes de sécurité malgré la présence de cadmium, élément beaucoup plus toxique que le plomb. Les panneaux de First Solar seraient tellement étanches qu'aucun cadmium ne pourrait s'en échapper, même en cas d'incendie à 1 000 °C. Ces panneaux utilisent un substrat de verre, qui exclut la flexibilité et la légèreté promises par les pérovskites. Mais les entreprises qui font le pari de la pérovskite peuvent s'inspirer du succès de First Solar dans l'étanchéification de leurs produits et dans la rigueur de leurs tests.