

contenant chacune des milliers de bulles analysées localement, c'est-à-dire de millions d'informations locales, nous avons obtenu un petit nombre de mesures moyennes très précises de grandeurs physiques globales intervenant dans la théorie de la mécanique des milieux continus : la vitesse, la déformation et la réponse plastique de la mousse.

D'une portée générale, ces outils statistiques se sont révélés utiles pour décrire bien d'autres systèmes faits de petits objets qui se réarrangent : verres, suspensions colloïdales, émulsions, tissus biologiques.

Un modèle en accord avec les expériences

Les prévisions théoriques et les mesures se sont étonnamment bien accordées, jusque dans les détails (*voir la figure page 57*). Cet accord est meilleur que nous ne l'espérions, compte tenu du fait que le modèle choisi était le plus simple possible. En outre, nous avons mis en évidence des comportements spécifiques de la combinaison triple entre viscosité, élasticité et plasticité. Par exemple, quand l'obstacle se déplace dans la mousse, même à basse vitesse, l'écoulement de la mousse autour de lui montre une nette asymétrie entre l'amont et l'aval. Derrière l'obstacle, la vitesse de l'écoulement passe par un point d'arrêt, change de signe, augmente, passe par un maximum et décroît.

Par ailleurs, lorsque nous avons analysé l'expérience de Georges Debrégeas et de ses collègues sur la mousse entraînée entre deux cylindres, nous avons constaté que l'écoulement dépend de l'état initial de la mousse, en particulier des contraintes mécaniques qui apparaissent au début de l'expérience lorsqu'on remplit de bulles le dispositif. Quand le cylindre intérieur est mis en rotation, la mémoire de ces contraintes initiales disparaît peu à peu, mais jamais totalement. Même quand un écoulement permanent et stable finit par être atteint, il dépend encore un peu de l'état initial de la mousse. Autrement dit, il n'est pas unique, et deux expériences successives peuvent donner des vitesses différentes. Cela justifie *a posteriori* le choix pour nos expériences d'une autre géométrie, en l'occurrence des écoulements dont l'hétérogénéité est forcée, qui eux sont reproductibles.

Ces comportements n'existent pas dans les écoulements visqueux simples, visco-élastiques ou visco-plastiques. L'aspect visco-élasto-plastique joue un rôle essentiel dans la dynamique de la mousse et il n'est pas possible de l'étudier en décomposant le système en sous-éléments plus simples pour isoler les aspects visqueux, plastique et élastique.

La confrontation d'expériences modèles à deux dimensions, d'expériences plus réalistes à trois dimensions, de simulations numériques et de modélisations théoriques montre l'émergence à grande échelle de propriétés de la mousse qui ne se ramènent pas trivialement à celles des bulles individuelles. En l'occurrence, au-dessus de deux ou trois diamètres de bulles, la mousse se comporte comme un milieu continu. Cependant, les expériences montrent que la mousse se distingue d'un fluide. Son comportement est plus riche et complexe. Bien que les bulles soient constituées de deux fluides, la mousse est solide.

Ce triple comportement est similaire pour des mousses de composition ou de taille de bulles très différentes. Cette universalité fait de la mousse un bon système modèle pour comprendre les matériaux complexes constitués d'un assemblage de cellules et, plus généralement, tous ceux qui sont à la fois visqueux, élastiques et plastiques (tels certains fluides d'émulsions ou de polymères). Les non-linéarités qui découlent de ce triple comportement créent une physique d'écoulement complexe et non intuitive, que l'on sait désormais bien prédire à partir d'un petit nombre de paramètres, tels que la viscosité, la rigidité élastique et le seuil plastique.

La physique des mousses dynamiques n'en est qu'à ses débuts. L'origine de ses paramètres, probablement cachée dans les interactions moléculaires, reste à expliciter. En outre, malgré l'universalité du comportement des mousses étudiées, certains effets peuvent varier du fait d'une composition différente, par exemple. Comment expliquer ces variations ? Il faudrait aussi prendre en compte des phénomènes dynamiques spécifiques tels que la rupture des films, le mûrissement par transfert de gaz d'une bulle à l'autre ou le drainage de l'eau vers le bas de la mousse sous l'effet de la gravité.

Quoi qu'il en soit, on comprend mieux maintenant pourquoi la mousse reste coincée dans la bouteille... parce qu'elle est solide ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

I. Cheddadi *et al.*, **Steady Couette flows of elastoviscoplastic fluids are non-unique**, *J. Rheol.*, vol. 56, pp. 213-239, 2012.

I. Cheddadi *et al.*, **Understanding and predicting viscous, elastic, plastic flows**, *Eur. Phys. J. E*, vol. 34, pp. 1-15, 2011.

I. Cantat *et al.*, **Les mousses, structure et dynamique**, Belin, 2010.

N. D. Denkov *et al.*, **The role of surfactant type and bubble surface mobility in foam rheology**, *Soft Matter*, vol. 5, pp. 3389-3408, 2009.

M. Vignes-Adler et F. Graner, **La vie éphémère des mousses**, *Pour la Science*, n° 293, mars 2002.

D. Weaire et S. Hutzler, **The physics of foams**, Oxford University Press, 1999.

DES ÉLECTRODES EN OR ornent une cellule photovoltaïque à pérovskite rouge, fabriquée par l'Institut de technologie du Massachusetts. Cette cellule, moins épaisse que du papier, fait quelques millimètres.

Photovoltaïque le silicium éclipsé ?

Varun Sivaram, Samuel Stranks et Henry Snaith

Des matériaux récemment entrés en lice, les pérovskites, pourraient enfin mener à des cellules photovoltaïques moins coûteuses et de meilleur rendement que les cellules au silicium d'aujourd'hui.

L'ESSENTIEL

- Des cellules photovoltaïques produites à partir de pérovskites approchent les rendements des cellules au silicium.
- Fabriquée à plus basse température, la pérovskite pourrait devenir meilleur marché que le silicium.
- Il reste néanmoins de grands défis à relever : empêcher l'eau de pénétrer dans la pérovskite, garantir le confinement du plomb utilisé, passer à des tailles très supérieures.

À la nuit tombante, dans un bar japonais mal éclairé, l'étudiant en thèse Michael Lee griffonna sur un dessous de verre à bière une liste d'ingrédients chimiques encore fraîche dans sa mémoire. Plus tôt dans cette journée de 2011, des scientifiques de l'université Toho de Yokohama avaient généreusement fait part de leur recette pionnière pour fabriquer des cellules photovoltaïques à partir d'un matériau nouveau, une « pérovskite », en lieu et place de l'habituel silicium. Ces cellules convertissaient la lumière solaire en électricité avec un rendement énergétique de 3,8 % seulement, et personne n'y avait réellement prêté attention. Mais cela a inspiré Michael Lee.

Après être rentré au laboratoire Clarendon de l'université d'Oxford, où nous travaillions tous les trois à l'époque, il apporta toute une série de modifications à la recette. Il obtint ainsi la première cellule à pérovskite dont le rendement dépassait 10 %. Son invention déclencha l'équivalent, pour les énergies propres,

d'une ruée vers le pétrole : des chercheurs du monde entier se sont mis dans la course pour augmenter encore le rendement des cellules à pérovskite.

Le dernier record en date, établi en novembre 2014 à 20,1 % par l'Institut coréen de recherche en technologie chimique, marque une multiplication par cinq du rendement en trois ans seulement. Par comparaison, après des décennies de développement, les meilleures cellules photovoltaïques au silicium plafonnent autour de 25 %, un objectif qui, pour nous autres chercheurs qui travaillons sur les pérovskites, n'est plus très éloigné. Nous anticipons également un lancement commercial, peut-être par l'intermédiaire d'une entreprise dérivée telle qu'Oxford Photovoltaics, cofondée par l'un d'entre nous (Henry Snaith).

Les pérovskites (voir la figure page 62) sont intéressantes pour plusieurs raisons. Les ingrédients en sont abondants, et les chercheurs peuvent les combiner facilement et à bon marché, à basse température,

pour produire des films. Ces derniers ont une structure cristalline proche de celle des couches de silicium obtenues grâce à un coûteux traitement à haute température. Une imprimante spécialement conçue pourrait un jour produire rapidement des rouleaux de films de pérovskite, minces et flexibles, à la place des épaisses et rigides plaques de silicium, dans l'objectif de réaliser des feuilles ou revêtements photovoltaïques légers, souples et même colorés.

Mais pour concurrencer le silicium, les cellules à pérovskite devront surmonter certains obstacles notables. Les prototypes actuels ne dépassent pas la taille d'un ongle, et les chercheurs doivent trouver le moyen de les agrandir considérablement. Ils doivent aussi améliorer fortement la sécurité et la stabilité à long terme de ces cellules.

Gagner la course au rendement

Les meilleures cellules au silicium ont aujourd'hui un rendement de 25,6 %. Pourquoi les cellules photovoltaïques ne peuvent-elles pas convertir 100 % de la lumière solaire ? Et en vertu de quoi les pérovskites seraient-elles capables de dépasser le record du silicium ?

Les réponses à ces questions se trouvent du côté de l'électron, cette particule qui est au fondement du courant électrique. Quand une cellule photovoltaïque est dans le noir, les électrons du matériau restent liés à leurs atomes respectifs. Aucune électricité ne circule. Mais quand de la lumière solaire frappe une cellule, elle peut libérer certains des électrons. Dotés d'énergie supplémentaire, ces électrons « excités » traversent chaotiquement le réseau cristallin de la cellule jusqu'à ce qu'ils en ressortent à une extrémité (happés par une électrode sous forme de courant utile), ou qu'ils rencontrent un obstacle ou un piège, où leur énergie se perd sous forme de chaleur.

Plus la qualité du cristal est élevée, moins il y a de défauts susceptibles de perturber le trajet de l'électron. Les cellules au silicium sont généralement chauffées jusqu'à 900 °C pour éliminer les défauts. Les pérovskites sont largement dépourvues de ces défauts, alors même qu'elles sont traitées à bien plus basse température, autour de 100 °C. Il en résulte que les électrons excités par la lumière réussissent aussi bien à sortir des cellules à pérovskite, et qu'ils risquent moins de perdre autant d'énergie en entrant

■ LES AUTEURS



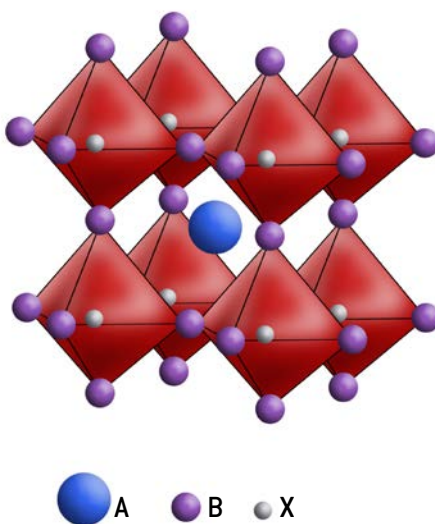
Varun SIVARAM est membre du cercle de réflexion américain Council on Foreign Relations, et s'intéresse aux domaines de l'énergie, de la technologie et de la sécurité nationale.



Samuel STRANKS est chercheur au MIT (Institut de technologie du Massachusetts), où il étudie les applications optiques et électroniques des pérovskites.



Henry SNAITH est professeur de physique à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et directeur scientifique chez Oxford Photovoltaics, entreprise qu'il a cofondée.



LA STRUCTURE CRISTALLINE

d'une pérovskite cubique. Dans les pérovskites intéressantes pour les cellules photovoltaïques, le cation (ion positif) A est généralement l'ion méthylammonium CH_3NH_3^+ , le cation B est du plomb (Pb^{2+}) et l'anion X est un ion halogénure (en général un iode, I^- , mais parfois aussi un chlorure, Cl^- , ou un bromure, Br^-).

en collision avec des obstacles. Comme la puissance électrique d'une cellule est le produit du flux d'électrons sortant de cette cellule (l'intensité du courant) et de l'énergie que transportent ces électrons (la tension), les pérovskites ont un rendement qui peut rivaliser avec celui du silicium, tout en étant plus facile à produire.

Mais il y a une limite à la quantité d'énergie solaire qu'une cellule photovoltaïque constituée de semi-conducteurs tels que le silicium ou les pérovskites peut convertir en puissance électrique. C'est essentiellement parce que les semi-conducteurs ont une bande d'énergies interdites aux électrons, ou gap, dont la hauteur (en énergie) correspond à l'énergie minimale nécessaire pour libérer les électrons (voir la figure page ci-contre). Le rayonnement solaire inclut toutes les longueurs d'onde, mais seules certaines correspondent à des photons d'énergie supérieure au gap, qui peuvent donc être absorbés et exciter un électron. Les photons des autres longueurs d'onde traversent simplement le matériau sans aucun effet.

La bande interdite varie selon le semi-conducteur et définit un compromis fondamental : plus le gap est étroit, plus la cellule peut absorber de lumière solaire susceptible d'exciter les électrons, mais plus l'énergie de chaque électron sera basse. Comme la puissance électrique dépend à la fois du nombre et de l'énergie des électrons, même une cellule photovoltaïque ayant la bande interdite idéale ne pourra convertir que 33 % environ de l'énergie solaire.

Le silicium a une bande interdite fixe qui n'est pas idéale, mais il domine l'industrie de l'énergie solaire parce que les processus de fabrication associés à cette technologie sont bien compris et efficaces. Toutefois, avec des pérovskites, les chercheurs peuvent ajuster la bande interdite en jouant sur le mélange des ingrédients, ce qui donne l'espoir de dépasser les rendements atteints avec le silicium. Les chercheurs peuvent également superposer des pérovskites dotées de bandes interdites différentes. Les pérovskites à deux étages devraient permettre de crever le plafond des 33 % ; selon certaines projections, le rendement énergétique pourrait atteindre 46 %.

Les minéralogistes connaissent depuis le XIX^e siècle les formes naturelles de pérovskite présentes dans la croûte terrestre. De tels matériaux ont fait leur entrée dans le domaine de la supraconductivité à haute température en 1988. Ces deux dernières décennies, les ingénieurs ont également fait

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

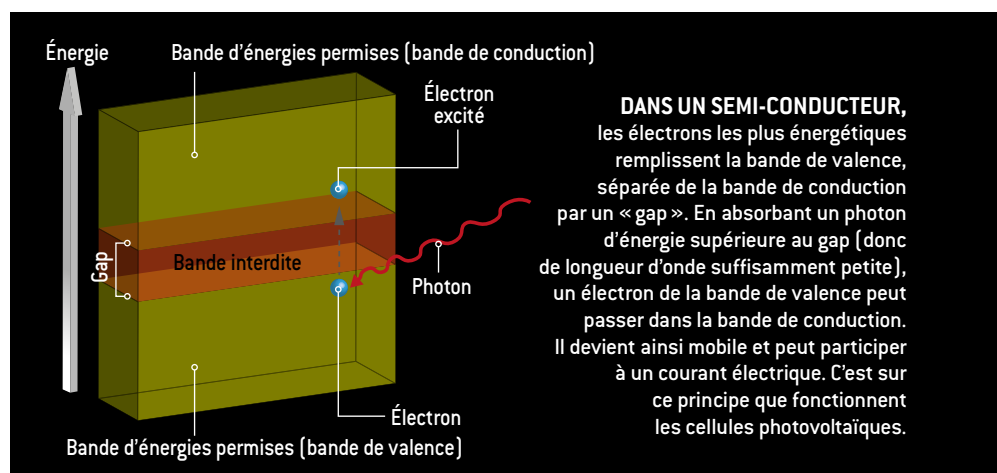
est déposée, produisant ainsi des cristaux beaucoup plus gros que ceux des cellules initiales, signe encourageant indiquant que la cristallinité continue de s'améliorer.

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

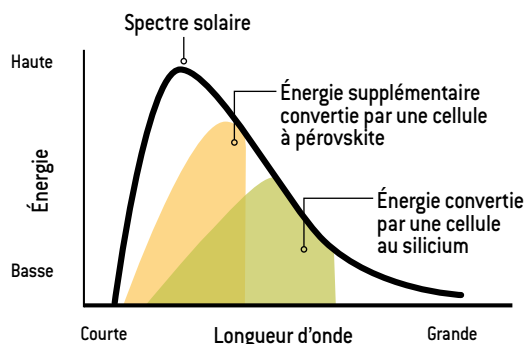
Il reste cependant beaucoup de chemin à faire avant que ces visions ne deviennent réalité. Bien que des chercheurs coréens et australiens aient récemment fait la démonstration de cellules imprimables de 10 centimètres par 10, suffisamment grandes pour des produits commerciaux compétitifs, les cellules 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.

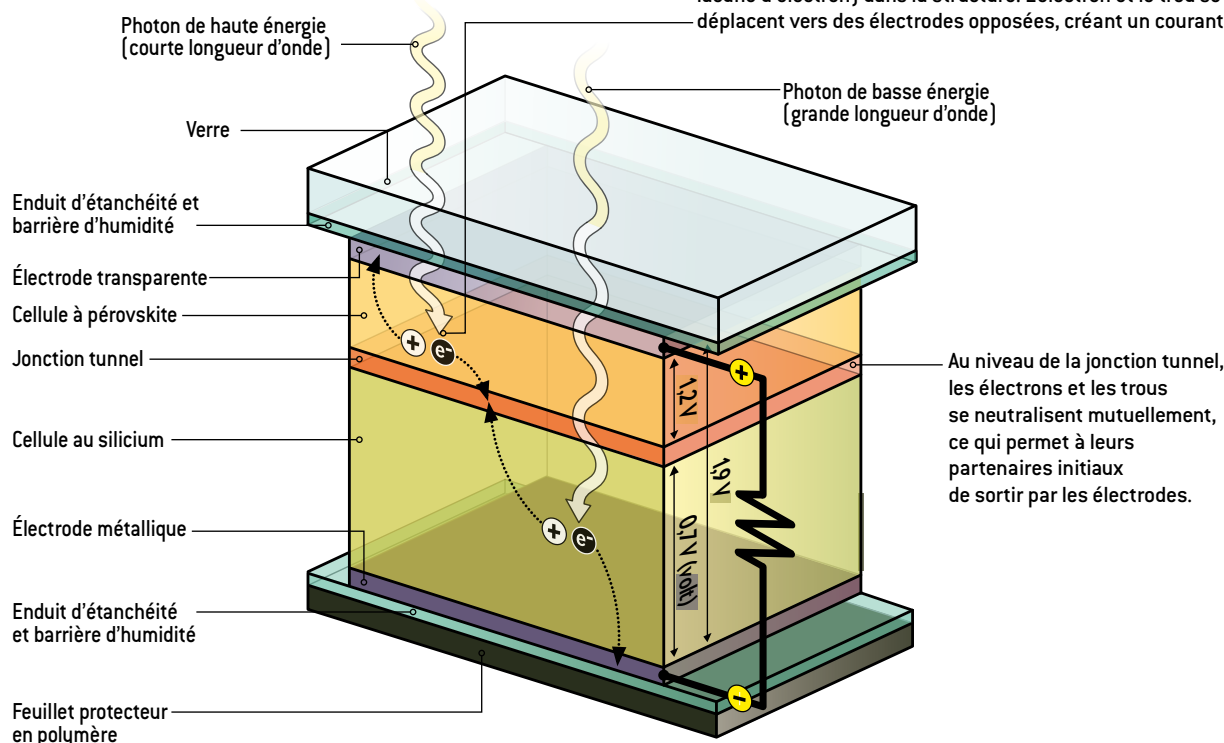
Mais la norme industrielle pour les panneaux solaires est une garantie de vingt-cinq ans. Cela équivaut à 54000 heures sous un soleil intense et constant. Il est essentiel de trouver une protection efficace contre l'humidité, qui résiste sur une telle durée et sur une grande plage de températures. Les 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.

Un autre développement encourageant relatif au plomb a récemment été annoncé par le MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts). Angela Belcher et ses collègues ont montré que les batteries automobiles au plomb peuvent être recyclées en toute sécurité, en récupérant le contenu en plomb pour en faire des cellules à pérovskites. Ce pourrait être un atout environnemental important. Angela Belcher estime que le plomb d'une seule batterie automobile permettrait de produire environ 700 mètres carrés de cellules à pérovskite qui, avec un rendement de 20 %, suffiraient à alimenter 30 maisons individuelles dans un climat chaud et ensoleillé tel que celui de Las Vegas.

Une piste différente serait d'éliminer complètement le plomb. Notre équipe et une autre de l'université Northwestern ont publié des résultats préliminaires sur des cellules utilisant de l'étain à la place du plomb. Mais le rendement et la stabilité sont moins bons, parce qu'avec le temps l'étain a tendance à faire perdre à la pérovskite sa structure cristalline, ce qui réduit la capacité des électrons à sortir de la cellule.

En plus des problèmes cités ici, les chercheurs doivent en résoudre un autre, plus mineur et plus singulier. Certains critiques ont affirmé que les chiffres du rendement des cellules à pérovskites pourraient être gonflés à cause de l'hystérésis, une instabilité de la mesure vraisemblablement due à des molécules chargées qui migrent d'un côté à l'autre de la cellule, créant l'illusion d'un courant plus intense. Mais cette migration des ions est très brève. Les scientifiques recherchent des moyens de la stopper, mais à court terme il y a un remède simple : attendre que cette migration se fasse et mesurer le rendement sur une période plus longue.

Standardiser les mesures

Dans la plupart des cas, ce procédé fournit des valeurs du rendement qui sont comparables aux mesures initiales rapides, mais les chercheurs pourraient être tentés de n'annoncer que le rendement le plus élevé ayant été mesuré. Nous travaillons avec des chercheurs du monde entier afin de standardiser le procédé de mesure, afin que nos résultats soient irréprochables.

Enfin, pour réussir commercialement, les pionniers des pérovskites doivent fournir un scénario économique convaincant pour attirer les investissements nécessaires à une montée en puissance de la production. Bien que les matériaux de base des pérovskites soient abondants et que les cellules puissent être fabriquées à basse température à partir de films produits par des équipements bon marché, les entreprises jouant la carte des pérovskites solaires ne devraient pas tomber dans le piège de la compétition sur le même terrain que le silicium. Il y a en effet peu de marge pour concurrencer les panneaux au silicium, car l'essentiel du coût d'une installation n'est pas dû aux panneaux, mais, entre autres, aux matériaux de l'installation et à la main-d'œuvre, aux permis et inspections associés, ainsi qu'à d'autres dépenses liées à l'installation du système.

En 2014, une installation solaire résidentielle moyenne aux États-Unis revenait à 3,48 dollars par watt de capacité de production électrique, dont seulement 0,72 dollar pour le panneau solaire lui-même. Même si les panneaux à pérovskite parviennent à descendre jusqu'à 0,10-0,20 dollar par watt,

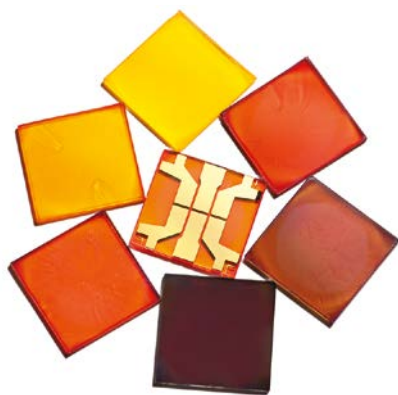


Climat Relever le défi du réchauffement

À la veille de la COP21, nous devons tous prendre conscience des risques, scientifiquement établis, liés au réchauffement climatique : fonte de la banquise arctique, acidification des océans, augmentation de la température moyenne... Peut-on encore agir pour limiter les dégâts ? Oui - et ce numéro donne de nombreux exemples de projets en cours comme la grande muraille verte plantée en bordure du Sahara ou l'alimentation en énergies renouvelables d'une île entière aux Canaries.

120 pages - 7,50€

Disponible en kiosque
et sur www.pouirlascience.fr



LES FILMS DE PÉROVSKITE peuvent prendre diverses couleurs et pourraient être appliqués sur des fenêtres ou des murs, ce qui, en plus de produire de l'électricité, colorerait ces surfaces.

■ BIBLIOGRAPHIE

S. D. Stranks et H. J. Snaith, **Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices**, *Nature Nanotechnology*, vol. 10, pp. 391-402, 2015.

N. J. Jeon et al., **Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells**, *Nature*, vol. 517, pp. 476-480, 2015.

M. A. Green et al., **The emergence of perovskite solar cells**, *Nature Photonics*, vol. 8, pp. 506-514, 2014.

ce que les chercheurs pensent possible, cette amélioration ne ferait baisser que marginalement le prix de l'installation finale.

Les entreprises misant sur les pérovskites peuvent néanmoins multiplier ces petites économies en concevant des produits aux rendements supérieurs à celui du silicium. Un panneau solaire à pérovskite de haut rendement réduit le coût total installé par watt en nécessitant moins de surface (de toit ou au sol) et par conséquent moins de main-d'œuvre et d'équipement. Et l'on aurait intérêt à vendre des produits à pérovskite destinés à des applications pour lesquelles le silicium ne peut pas rivaliser, par exemple des films photovoltaïques pouvant être intégrés directement dans les matériaux de construction des murs, des toits et des fenêtres.

La solution hybride : silicium et pérovskite

Pour le moment, la meilleure chance qu'auraient les pérovskites pour atteindre le marché serait de s'allier au silicium plutôt que de le concurrencer. Les pérovskites pourraient littéralement se greffer sur le succès du silicium, et ainsi accéder à un marché de 40 milliards d'euros.

Une alliance pourrait voir le jour en superposant une couche de pérovskite à une couche de silicium, ce qui créerait une cellule photovoltaïque en « tandem » (voir l'encadré page 64). Les pérovskites sont performantes pour exploiter les couleurs de plus haute énergie de la lumière solaire, tels le bleu et l'ultraviolet, que le silicium ne capture pas, ce qui permet d'obtenir une tension plus élevée. Des chercheurs de l'université Stanford et du MIT ont récemment superposé une cellule à pérovskite à une cellule au silicium hermétique, faisant ainsi passer son rendement de 11 à 17 %. Ils ont également assemblé une cellule en tandem en superposant de la pérovskite à du silicium non étanchéifié, créant une structure unique. Cette combinaison atteignait tout juste 14 % de rendement, mais ce chiffre pourrait certainement être augmenté grâce à une fabrication améliorée. En s'appuyant sur ces deux expériences, les chercheurs ont esquissé un scénario où une cellule en tandem constituée d'un composant au silicium et d'un dispositif à pérovskite, astucieusement combinés, pourraient dépasser les 30 % de rendement, sans changement radical de l'une ou l'autre technologie.

Si un panneau solaire en tandem atteignait un rendement de 30 %, l'impact sur le coût d'équilibre du système serait énorme : il y aurait besoin d'un tiers de panneaux en moins pour produire la même quantité d'électricité que des panneaux à rendement de 20 %, ce qui diminuerait considérablement la surface de toit ou de terrain nécessaire, les matériaux d'installation, la main-d'œuvre et l'équipement. Oxford Photovoltaics s'associe à des fabricants traditionnels de panneaux au silicium pour accroître le rendement de la cellule au silicium grâce à un revêtement de pérovskite ; l'entreprise vise une production pilote cette année. À plus long terme, des revêtements solaires peu coûteux, intégrés aux toitures ou aux vitrages, pourraient transformer toute la structure de coûts d'un bâtiment solaire.

Le rapide essor des cellules photovoltaïques à pérovskite a inspiré les scientifiques et les ingénieurs pour fabriquer d'autres types de produits susceptibles de déboucher un jour sur une commercialisation. Avec nos collègues de l'université de Cambridge, nous avons récemment créé des diodes électroluminescentes (LED) et des lasers utilisant des pérovskites à halogénure de métal, qui émettent efficacement la lumière (au lieu de l'absorber) par un processus dit de luminescence.

Ce renversement n'est pas vraiment étonnant ; quand on la fait fonctionner à l'envers, la cellule photovoltaïque la plus efficace au monde (à l'arséniure de gallium) se comporte comme une LED. Des LED et lasers imprimables bon marché pourraient conduire à des applications intéressantes, depuis l'éclairage à grande échelle jusqu'à l'imagerie médicale.

La recherche sur ces produits innovants en est à ses débuts, bien sûr, mais nous pensons que ces travaux vont se multiplier. Avec les pérovskites, les scientifiques sont comme des enfants dans un magasin de bonbons. Ils ont trouvé un matériau dont les propriétés remplissent presque toutes les exigences de leur cahier des charges, notamment le haut rendement, le bas coût, la légèreté, la flexibilité et l'esthétique. Il faudra un effort concerté et mondial de la recherche, de l'industrie et des gouvernements pour concrétiser pleinement le potentiel des pérovskites à nous emmener au-delà de l'ère du silicium. Mais étant donné l'enjeu – une énergie propre et bon marché et une électronique de nouvelle génération –, les pérovskites nous semblent un bon pari. ■



LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H



© RADIO FRANCE / CHRISTOPHE ABRAMOWITZ

en partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr

