« L'énergie solaire sera au cœur de la transition écologique »

Chercheur au CNRS, **Daniel Lincot** est acteur des recherches dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque depuis 1978, où il a contribué à des avancées significatives. Sa spécialité est l'interface entre la chimie, les matériaux et le photovoltaïque. Il est auteur de plus de trois cents publications et de vingt-deux brevets.

Il est invité pour l'année 2021-2022 sur la chaire Innovation technologique Liliane Bettencourt, chaire créée avec le soutien de la Fondation Bettencourt Schueller.

Daniel Lincot prononcera sa leçon inaugurale, intitulée « Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique », au Collège de France le 20 janvier 2022. Ses cours débuteront le 26 janvier 2022.

Ses enseignements seront disponibles sur notre site : www.college-de-france.fr

Entretien

L'énergie solaire photovoltaïque a le vent en poupe depuis une quinzaine d'années. Pourquoi a-t-elle, avant cela, été si longtemps déconsidérée ?

Daniel Lincot : Je pense que le modèle de consommation instauré par les énergies fossiles biaise la perception de l'énergie solaire par nos concitoyens. Il faut bien comprendre que ce qui a été fait avec le charbon et le pétrole est assez extraordinaire. En effet, depuis la montée des sociétés industrielles, c'est-à-dire depuis le début du XIX^{e} siècle, l'usage de ces sources d'énergie « instantanées » nous a conduits à oublier les contraintes réelles de la nature, avec lesquelles nous avons pourtant vécu pendant des millénaires. L'une d'elles est l'intermittence, et elle est propre aux énergies renouvelables : le vent ne souffle pas partout, pas tout le temps et, la nuit, le soleil se couche. Certains pointent ce problème du doigt comme étant rédhibitoire, alors que ce n'est pas vraiment le cas. Si vous offrez à quelqu'un le choix de cultiver ses propres tomates ou de les acheter, toutes prêtes, en supermarché, il y a fort à parier que la voie du supermarché sera préférée. C'est pareil pour l'énergie, on peut choisir la voie plus contraignante qui va s'adapter à l'intermittence des énergies renouvelables, ou la voie du supermarché « terre » en consommant les réserves, ce qui est fondamentalement moins durable. Alors, pourquoi ne pas imaginer une économie de l'énergie dans laquelle on s'adapte directement à la source, à savoir le Soleil ? Nos sociétés se sont écartées de cette philosophie et en sont parfois arrivées à nier les avantages de l'énergie solaire, alors qu'elle est probablement la plus universelle !

En quoi est-ce une énergie universelle ?

Elle est universelle, et très démocratique même, car, malgré ses contraintes, il y en a partout, en abondance, tout le temps, et à la disposition de tous comme l'air que l'on respire. On a calculé que l'énergie solaire qui nous parvient, après réflexion par l'atmosphère, est de l'ordre de sept mille fois la consommation humaine d'énergie sur terre. On a donc à disposition une véritable fontaine d'énergie, et renouvelable par-dessus le marché. Un plein soleil, comme on en trouve par un jour de beau temps à Paris, c'est environ mille watts de puissance lumineuse qui nous parvient, par mètre carré. Cela signifie que, dans un carré de ciel bleu d'un kilomètre sur un kilomètre, on a l'équivalent de la puissance d'un réacteur nucléaire (1 GW), soit environ cinq cent cinquante mille réacteurs pour toute la France, par un jour de beau temps ! Y avoir recours est une évidence pour moi. Pour cela, il faut avoir les moyens de la capter et les outils pour l'utiliser. C'est une question d'adaptation : il faut en permanence s'adapter aux contraintes imposées. L'utilisation des énergies fossiles – elles-mêmes issues de l'énergie solaire, rappelons-le – couplées aux alternateurs pour produire de l'énergie électrique résulte de la même logique d'adaptation. L'élément nouveau, la « rupture » comme on dit, c'est qu'il existe aujourd'hui une technologie capable de transformer directement l'énergie solaire en électricité, sans passer par des étapes intermédiaires, de se « brancher directement sur le Soleil » : les cellules solaires photovoltaïques. Quand Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque en 1839 et qu'ensuite les premières cellules ont été développées, bien peu y croyaient ; on ne comprenait pas comment un système pouvait produire de l'électricité sans mouvement, sans activité physique visible à l'œil nu. Pourtant, la technologie n'a eu de cesse d'évoluer depuis et, aujourd'hui, on est face à quelque chose de bien plus performant, bien plus exploitable, que ce que les pionniers pouvaient imaginer près d'un siècle en arrière.

Block de silicium

© Ra'ike, GNU F.D. License

De nos jours, les meilleures cellules en silicium atteignent des rendements records de 26,7 %. Peut-on imaginer que ce rendement continue de croître dans les années à venir ?

Pour imaginer cela, il faut comprendre les relations mathématiques derrière ces rendements. La transformation d'une énergie thermique en énergie mécanique ou électrique, dépend de la température de la source et de celle du récepteur. Nous avons, pour cela, la fameuse relation de Carnot, établie pour les machines à vapeur en 1824, qui nous donne un rendement théorique fixé uniquement par ces deux valeurs. Elle consiste à soustraire de 1 le rapport entre la température du récepteur et celle de la source, soit :

Dans cette situation, nous prenons en compte la température en kelvin, c'est-à-dire la température en degrés Celsius, à laquelle on additionne 273. Pour une cellule solaire qui fonctionnerait dans un environnement à 20 °C, donc à 293 K, et avec comme source émettrice le Soleil, dont on sait que la température est de 6 000 K à la surface, on obtient un rendement théorique de 95 %, soit une capacité de conversion en énergie utile – comme l'électricité – considérable. Les théories plus avancées montrent que la limite théorique est plutôt autour de 85 %, ce qui reste élevé.

Si vous mettez un panneau solaire possédant cette capacité à la perpendiculaire face au Soleil, sur les mille watts par mètre carré qui lui parviennent, il sortira huit cent cinquante watts électriques. Le graal des chercheurs est donc de s'approcher le plus près possible de cette valeur et cela prend du temps. Avec la découverte des cellules modernes en silicium dans les années 1950, on est passé de 1 % à 6 % de rendement, et nous voilà aujourd'hui avec un record à 26,7 %. Mieux, en utilisant des technologies beaucoup plus complexes, à base de multijonctions, on a même atteint un record à 47,1 % récemment. C'est toute la beauté de ce domaine : il illustre bien la marche combinée de la recherche et de la technologie. On stagne parfois pendant des années, puis une découverte, un progrès technique va soudain faire grimper les rendements. Il est admis, au sein de la communauté des chercheurs, qu'on devrait dépasser le seuil symbolique des 50 % d'ici quelques années. Cela se répercutera aussi au niveau des technologies utilisables pour tous.

Qu'en est-il des autres types de cellules solaires, comme celles en pérovskite ?

Dans le domaine du photovoltaïque émergeant, on assiste à un foisonnement d'innovations comme le photovoltaïque organique et aussi le décollage spectaculaire d'une nouvelle filière autour des cellules en pérovskite. Cette technologie est née vers 2008 et, en moins de quinze ans, ses rendements ont bondi à 25,5 %, c'est du jamais-vu ! Tout l'intérêt de la pérovskite, c'est que c'est un matériau surdoué. Les chercheurs déploient des trésors de créativité en chimie de synthèse et des matériaux. Cette technologie pourrait se combiner avec la technologie silicium actuelle pour faire des cellules à double jonction dites « tandem » dont le rendement théorique est de 43 %, contre 29 % pour le silicium seul. Ce qui est frappant, c'est que la recherche se fait en même temps que l'industrialisation.

La démocratisation de l'énergie solaire ne elle pas de s'accompagner d'un épuisement des matériaux qui servent à fabriquer les cellules ?

Je n'envisage pas le développement de l'énergie solaire à grande échelle sans qu'il ne s'intègre complètement dans une logique de respect de l'environnement et de la biodiversité, ainsi que dans une logique sociale. Cela ne sera qu'à ces conditions que le photovoltaïque pourra véritablement se développer et qu'on pourra le considérer comme une innovation qui trouve sa place. Certaines personnes pointent le problème de l'exploitation des « terres rares » pour la constitution des cellules, mais, aujourd'hui, une cellule solaire est composée à 99 % de silicium et ce matériau est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre (environ 28 %). On le trouve principalement sous forme de silice, dans le sable, et certains projets visent à fabriquer des cellules en silicium à partir du sable provenant des déserts. Se pose alors la question du coût, car il est plus cher de purifier du sable que d'extraire du silicium pur des mines de silice, mais c'est la bonne voie. Il est vrai que certains types de cellules nécessitent des éléments un peu plus rares ; je travaille notamment avec de l'indium. Mais il s'agit alors d'apprendre à travailler en connaissance de cause : en mettant en place des systèmes qui permettent d'économiser ces matériaux. Du reste, lorsqu'on utilise ces éléments rares (ou non) dans le photovoltaïque, ils ne sont pas « consommés » comme l'est l'essence par un moteur de voiture. La matière reste bien là, réutilisable à l'infini.

ci-contre :

Recyclage de cellules photovoltaïques.

© PV Cycle

Ces éléments constitutifs des panneaux photovoltaïques peuvent-ils être efficacement recyclés ?

La question du recyclage est essentielle, et se pose pour toutes nos technologies. Un panneau solaire, c'est une plaque de verre – matériau qui se recycle très bien – et des plaquettes de silicium qui peuvent être broyées (ou récupérées directement). Ce que vous obtenez alors est une sorte de minerai bien plus pur que celui d'origine, tel qu'il a été extrait des mines. On appelle ça « l'urban mining », le fait de puiser dans un objet de technologie en fin de vie les matériaux nécessaires à la fabrication d'un autre. Certaines entreprises innovent : elles commencent à concevoir leur panneau sans colle, de sorte qu'ils puissent être démontés et que leurs divers composants soient réexploitables. Aujourd'hui, la durée de vie minimale d'un panneau solaire est d'environ vingt-cinq ans, et pourrait aller bien au-delà (quarante ou cinquante ans), c'est une technologie éprouvée et extrêmement résiliente, notamment grâce aux progrès catalysés par la recherche spatiale.

Qu'en est-il du bilan carbone du photovoltaïque, de la fabrication des panneaux jusqu'au stockage de l'énergie ?

Pour savoir cela, on fait des analyses de cycle de vie. Prenons un panneau avec un rendement de 20 %, qui travaille pendant vingt-cinq ans, et pour lequel chaque mètre carré reçoit un mégawattheure (MWh) par mètre carré par an. Ensuite, prenons en compte le bilan carbone et le bilan matière. Il faut alors diviser la quantité en kilogramme de CO_2 nécessaire pour produire le panneau par la quantité en mégawattheure d'énergie produite sur toute sa durée de vie pour obtenir des « grammes de CO_2 émis par kilowattheure (kWh) d'énergie produite ». Aujourd'hui, cette valeur est autour de 15-45 g de CO_2 par kilowattheure pour le photovoltaïque, de 10 pour l'éolien et de 6 à 12 pour le nucléaire. En revanche, du côté des énergies fossiles, les valeurs sont de 0,5 kg (gaz) à 1 kg (charbon). Sans mauvais jeu de mots, il n'y a pas photo ! Le photovoltaïque est une technologie bas carbone exceptionnelle. Du reste, le bilan carbone dépend de la source d'électricité. Si les panneaux sont fabriqués à l'aide d'une énergie électrique provenant elle-même déjà de sources décarbonées, comme le photovoltaïque, l'éolien ou le nucléaire, le bilan sera moins élevé. C'est un cercle vertueux.

ci-contre :

Un champ de panneaux solaire.

Quelle place peut-on espérer attendre du solaire dans le mix énergétique des prochaines décennies ?

Dans le monde, les capacités cumulées installées en photovoltaïque sont en croissance exponentielle depuis des années et atteignent 750 GW, dont 143 GW installés rien qu'en 2020. En Allemagne, l'énergie solaire photovoltaïque représente déjà plus de 10 % de l'électricité produite, et 2,5 % en France. Les énergies renouvelables sont en train de prendre de l'ampleur progressivement, voire de devenir majoritaires dans certains pays, comme au Danemark. La partie urbanisée de la France correspond à environ 50 000 km² – 9 % du territoire sont artificialisés. Pour obtenir l'équivalent de la production électrique actuelle – autour de 500 TWh – il suffirait environ de 5 000 km² de surface équipée en panneaux photovoltaïques ! Quand on dit ça, beaucoup imaginent qu'il faudrait couvrir un département entier.

En réalité, cette surface existe déjà de façon complètement décentralisée avec les toitures et zones artificialisées ! Il faudrait que lorsqu'un architecte imagine un nouveau bâtiment, il intègre d'emblée des panneaux solaires. Les agriculteurs pourraient et devraient devenir des producteurs d'énergie, parce qu'ils ont cette ressource qu'est l'espace ! Alors que le concept d'agri-photovoltaïque se développe rapidement, on pourrait l'étendre à des systèmes de panneaux qui se déploient réversiblement à la fin des moissons pour capter la lumière. J'appelle ce concept la « récolte photovoltaïque ». Le potentiel est aussi considérable pour le photovoltaïque flottant, en passe de devenir une innovation majeure. Son développement en mer offre également de grandes perspectives. On pourrait aussi imaginer du solaire aérien basse altitude (ballons solaires) et des développements plus futuristes encore avec le photovoltaïque spatial. Cette prospective n'est pas une chimère, et son ressort essentiel est aujourd'hui la simple compétitivité économique des systèmes actuels. Les appels d'offre photovoltaïque, en France, sont à environ six centimes le kilowattheure, cinq centimes en Allemagne et même deux centimes en Arabie saoudite. Très peu imaginaient cette situation il y a seulement dix ans. Avec les progrès également spectaculaires du stockage par batteries ou hydrogène vert, des synergies avec l'électrification des usages, l'efficacité énergétique, et demain l'accès à des technologies de transformations chimiques inspirées de la photosynthèse, on peut imaginer un système énergétique mondial basé sur l'énergie solaire. Elle est déjà au cœur de la transition énergétique et, au-delà, sera au cœur de la transition écologique !

Propos recueillis par **William Rowe-Pirra**, journaliste scientifique

Tous droits réservés,
Collège de France, 2022

Entretien

Daniel **Lincot**

Fondation Bettencourt Schueller
Reconnue d'utilité publique depuis 1987

COLLÈGE DE FRANCE
1530

11, place Marcelin-Berthelot – 75005 Paris
www.college-de-france.fr

2022