

Cette énergie pratiquement illimitée qui nous vient du Soleil

Entretien de Daniel Lincot avec Michèle Leduc



© Collège de France

L'entretien présenté ici est destiné à prendre la suite du « dossier photovoltaïque » publié en 2007 dans les numéros 5 et 6 de *Reflets de la physique*. Le contexte a beaucoup évolué depuis quinze ans, tant du point de vue de la recherche que de l'économie et de l'acceptation par la société.

Les cours professés en 2021 et 2022 par Daniel Lincot au Collège de France, où il était professeur invité dans le cadre de la chaire Innovation technologique Liliane Bettencourt [1, 2], constituent la trame du présent entretien.

➔ DANIEL LINCOT

Daniel Lincot est physico-chimiste et directeur de recherche émérite au CNRS.

Il a fondé en 2005, puis longtemps dirigé l'Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP, UMR CNRS-EDF-Chimie Paristech). En 2013, il participe à la fondation de l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF) établi à Paris Saclay, dont il sera directeur scientifique jusqu'en 2019.

Il reçoit en 2004 la médaille d'agent du CNRS, en 2015 le grand prix Pierre Süe de la Société Chimique de France, et en 2020 le prix Ivan Peychès de l'Académie des sciences sur l'application des sciences à l'industrie. En 2021-2022, il est nommé professeur invité au Collège de France dans le cadre de la chaire Innovation technologique Liliane Bettencourt.

Daniel Lincot a fondé en mai 2021 la *start-up* Soleil sur Yvette Photovoltaïque (SOY PV) pour la fabrication de modules photovoltaïques en couches minces.

Michèle Leduc : Merci, Daniel Lincot, d'avoir accepté cet entretien pour *Reflets de la physique*. Commençons par parler recherche : à quel stade en est-on maintenant concernant le rendement énergétique des cellules solaires ? Y a-t-il des pistes d'améliorations significatives ?

Daniel Lincot : Depuis 2007, les progrès du photovoltaïque ont été très importants [3]. Les modules commerciaux à base de silicium ont vu leur rendement moyen augmenter de moitié, en passant de 13% à près de 20% aujourd'hui. Cela veut dire que sous un éclairage solaire standard de 1000 watts de puissance incidente par mètre carré, un module d'un mètre carré produira une puissance électrique de 200 W, le rendement étant le rapport entre ces deux puissances. Une valeur record de 26,7% a été atteinte pour des cellules de silicium de laboratoire, dont les meilleurs modules commerciaux se rapprochent progressivement. Ces 26,7% sont en fait très proches de la limite théorique d'environ 29% pour le silicium. Mais le rendement absolu de conversion des cellules photovoltaïques est situé bien au-delà de ce niveau. Selon les lois de la thermodynamique, le rendement de Carnot entre le Soleil à 6000 K et une cellule solaire à 300 K est de 95%.

Il y a donc une marge de progrès pour les cellules, dont le rendement pourrait aller concrètement jusqu'à 65-70%. Aujourd'hui, en laboratoire, le record toutes catégories est de 47,1% pour des cellules à multijonctions fonctionnant sous concentration lumineuse (contre 40% en 2007) et 39,5% sous éclairage normal. Comment expliquer que dans un cas le



© Alain Janet, Solar Cloth.

(a) **Installation prototype d'agrivoltaïque rétractable**, fabriquée par l'entreprise Solar Cloth (Mandelieu) et expérimentée actuellement par l'INRAE (voir p. 34).
 (b) **Centrale solaire** dans le désert d'Atacama (Chili) (voir p. 36).

© D. Lincot

rendement soit limité à 29%, tandis que dans l'autre il est largement dépassé ? Cela vient du fait que les cellules actuelles sont basées sur des jonctions simples, dont le rendement ne peut dépasser 33%, tout simplement parce qu'elles ne travaillent pas efficacement sur tout le spectre lumineux. Pour aller au-delà, il faut utiliser plusieurs jonctions superposées, faites de matériaux différents, dont chacune est adaptée à une gamme de longueur d'onde particulière. Ainsi, en mettant en « tandem » deux jonctions seulement (voir schéma ci-dessous), une qui convertit très bien le bleu et l'autre très bien le rouge, on obtient un rendement théorique qui monte à 43 %. Si l'on en met trois, on pourrait théoriquement aller à plus de 50 %, et à plus de 60% avec six : on fabrique des cellules « arc-en ciel » ! C'est une formidable piste d'amélioration.

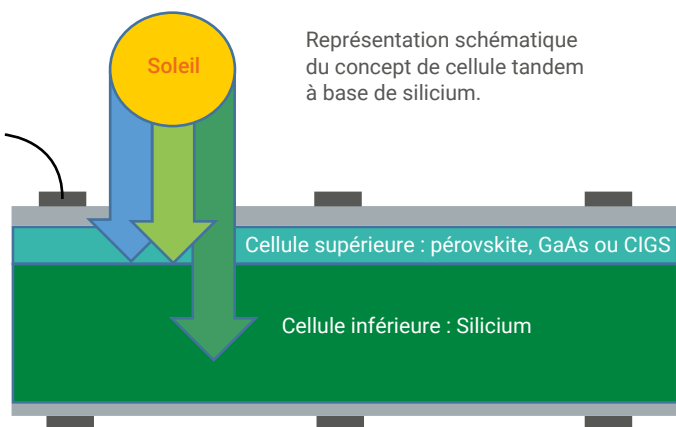
ML : Quelles avancées peut-on atteindre avec des matériaux de base autres que le silicium ?

DL : Il y a des progrès importants faits sur les cellules à couches minces non silicium de type CdTe, avec des rendements de 17% à 22,1%, ou basées sur le composé $Cu(In,Ga)Se_2$ (noté CIGS), de 19% à 23,4%, mais aussi sur des technologies émergentes à base de couches minces organiques, qui atteignent jusqu'à 18 % (partant de 5% il y a 15 ans). Une nouvelle technologie spectaculaire, appelée « pérovskite » en référence au minéral $CaTiO_3$ de même structure cristalline, a fait irruption en 2009. Elle est basée sur des couches minces d'un matériau hybride organique-inorganique noté MAPI, le méthyl-ammonium-iodure de plomb (ou d'étain qui pourrait remplacer le plomb) et de ses nombreuses déclinaisons. Ces cellules sont pratiquement préparées à température ambiante avec des technologies d'imprimerie ! Et les rendements, encore instables dans le temps et limités à de petites surfaces, avoisinent 26 %, du jamais vu dans le photovoltaïque, une véritable révolution. Cette technologie n'existait pas en 2007.

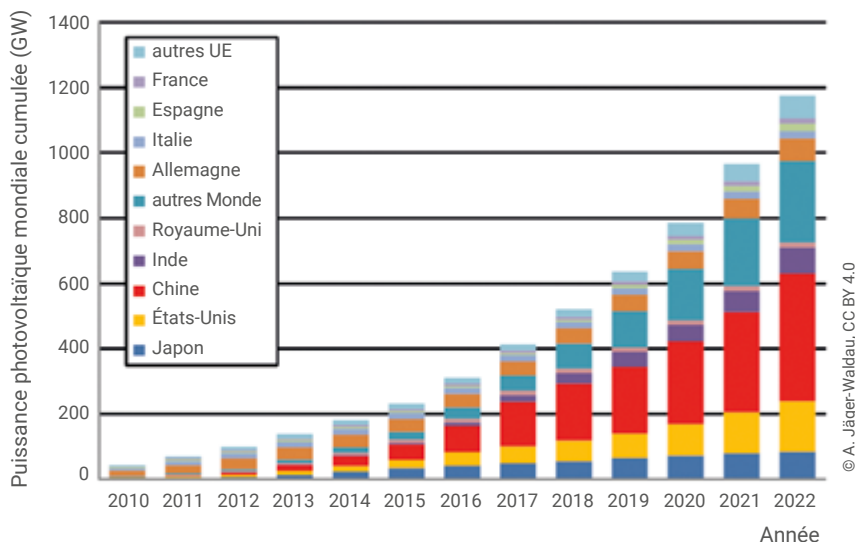
ML : Si les matériaux organiques ou en couches minces ne donnent pas pour l'instant des rendements photovoltaïques supérieurs au silicium, pourquoi pousser la recherche dans ce sens, sachant que le grand avantage du silicium est d'être un matériau abondant sur la Terre ?

DL : Leur avantage est leur coût, fortement réduit par rapport à celui du silicium. Ceci vient de leur procédé de fabrication, en couches minces. Pour le silicium, la fabrication tient de la métallurgie à haute température, avec tirage puis découpe de lingots en plaquettes. Pour les organiques au contraire, la technologie s'apparente à celle de l'imprimerie : des couches minces multiples sont déposées et superposées, sans besoin

>>>



Représentation schématique du concept de cellule tandem à base de silicium.



1. Évolution de la puissance photovoltaïque mondiale en GW (adapté de [4a]).

>>>

de vide ni de haute température. Vous imaginez le potentiel de croissance si on était capable de développer des cellules solaires par impression ou par électrolyse, comme on fait des journaux ? En fait, tous ces progrès sont à l'aube de déboucher sur une rupture majeure en matière de rendement, grâce à l'utilisation des cellules tandem mentionnées ci-dessus, associant une jonction au silicium et une jonction en couches minces, en particulier pérovskite, ou deux jonctions couches minces (CIGS et pérovskite). Plutôt que de lutter les unes contre les autres, les différentes filières s'allient donc aujourd'hui pour réussir à fabriquer des modules tandem, encore plus efficaces (vers les 40%). C'est un formidable défi pour la recherche et l'industrie, afin de combattre le changement climatique.

ML : On dit que le photovoltaïque est la source d'énergie qui progresse le plus vite aujourd'hui. Où en est maintenant le développement du photovoltaïque en France et dans le monde ? Quelle est la marge de progression dans les années à venir ?

DL : Aujourd'hui, le photovoltaïque vient de dépasser le seuil symbolique de 1 terawatt (TW, 10^{12} watts) de puissance installée (850 GW fin 2021) dans le monde, alors qu'elle n'était que de 1,4 GW en 2000 (9,5 GW en 2007), soit 600 fois plus [4], suivant une croissance exponentielle (fig. 1). En comparaison, la puissance globale moyenne de toute l'énergie utilisée par l'humanité est d'environ 17 TW. La puissance photovoltaïque installée n'est donc plus du tout négligeable, comme c'était le cas il y a seulement quelques années. De plus, son réservoir de puissance source est considérable ; en effet, la puissance de la lumière solaire arrivant au niveau du sol sur l'ensemble de la planète, océans compris, est de 120 000 TW, et pratiquement illimitée si on inclut l'espace proche^(a).

Mais ce qui compte vraiment c'est l'énergie fournie, soit la puissance multipliée par le temps. L'unité la plus commode est le kWh et ses multiples, soit la puissance multipliée par le temps de fonctionnement en équivalent à pleine puissance. On considère alors l'énergie produite pendant une année. Pour la production de l'électricité, d'après l'Agence internationale

de l'énergie (AIE) [4b], elle est évaluée à 5% de la production totale à l'échelle mondiale, 15% en Australie, 14,2% en Espagne, mais aussi 11,8% aux Pays-Bas et 10,9% en Allemagne, 3,6% en France. Le solaire (principalement photovoltaïque) est la source d'énergie qui progresse le plus vite dans le monde, comme le montre la figure 2 [5]. Pour faire simple, on passe de la puissance en watts à l'énergie en watts-heure en multipliant simplement par un facteur 1000 (il dépend du rayonnement solaire et donc de la localisation). La croissance du photovoltaïque est exponentielle, de 30 % par an, alors qu'elle est pratiquement stabilisée, voire négative, pour les autres sources d'énergie, à l'exception de l'éolien. À partir des courbes de la figure 2, on peut comprendre que le photovoltaïque, comme l'éolien, n'est apparu de façon visible que depuis quelques années. Si la progression exponentielle continue, elle devrait pouvoir réduire rapidement l'usage des énergies fossiles. Remarquons aussi la simplicité et la rapidité de mise en place des installations photovoltaïques, comparées par exemple à des centrales nucléaires pour lesquelles il faut compter une décennie au moins.

ML : Comment expliquez-vous ce développement rapide ?

DL : Nous avons parlé des progrès dans la technologie, les performances et la fiabilité des systèmes ; mais un critère essentiel de développement est la compétitivité économique liée au coût de fabrication des modules. En fait, l'augmentation exponentielle des capacités découle directement de la réduction des coûts résultant des effets d'échelle associés à une production industrielle en forte croissance : chaque fois que la capacité installée double, le prix des panneaux baisse de 22% (40% ces dernières années). C'est ainsi que le prix de vente des modules a été divisé par dix en dix ans, et atteint aujourd'hui 0,2 à 0,3 € par watt. Il en résulte un coût de production de l'électricité de 40 à 60 € /MWh en France ou en Allemagne, ce qui en fait une source d'électricité très compétitive économiquement.

ML : La France a pris du retard par rapport à d'autres pays européens. Quelles sont les possibilités d'accroître le parc français du photovoltaïque ?

DL : Pour réaliser une production énergétique équivalente aux valeurs actuelles pour l'électricité en France, autour de 500 TWh par an, il faudrait en France environ 2500 km² de panneaux solaires (avec des rendements de 15 %), soit moins de 10% des surfaces actuellement artificialisées (toitures, routes..., environ 50 000 km²). Il existe donc un potentiel considérable pour développer le parc français (qui, en 2021, a produit seulement 14 TWh sur 70 km² pour une puissance installée de 13 GW), en facilitant simplement l'installation du photovoltaïque par les citoyens sur leurs toitures disponibles (l'ADEME, dans son rapport de 2015, indique un gisement d'environ 350 TWh). Un domaine prometteur est aussi le photovoltaïque sur l'eau, en installant des parcs solaires sur les retenues d'eau. Pour aller vers la décarbonation totale de l'énergie primaire en France (environ 2500 TWh), il faudrait mobiliser environ 15 000 km², ce qui n'est pas impossible.

En outre, se développe l'« agrivoltaïque » : il y aurait intérêt à mettre au-dessus des cultures, par exemple des vignes, des ombrières photovoltaïques ajustables (voir figure (a), p. 33), ce qui aurait de plus l'avantage d'éviter le dessèchement des cultures. L'ombre est un peu une bénédiction dans certains pays du Sud et va le devenir plus encore avec le changement climatique. Les systèmes de panneaux pourraient être mobiles, déployables ou rétractables à volonté. Il y a un grand enjeu dans l'harmonisation du photovoltaïque et de l'agriculture : songez aux dizaines de milliers d'hectares où les champs sont disponibles après les moissons au mois d'août. Il faut travailler avec tous les acteurs, en particulier les éleveurs et les agriculteurs.

ML : Il y a certainement un futur très riche, mais le public n'en a pas forcément l'idée. Comment voyez-vous l'éducation au solaire ?

DL : Il faudrait mieux développer l'éducation aux notions et grandeurs liées à l'énergie, en s'appuyant sur des exemples concrets de notre vie quotidienne où l'on parle de calories pour l'alimentation, de tonnes équivalent pétrole pour l'industrie et de kilowatts-heure pour l'électricité. Toutes ces énergies se ramènent à l'unité standard, le joule (J). La différence entre une énergie et une puissance est souvent mal comprise, alors que l'énergie est simplement le produit de la puissance (exprimée en watts) par le temps (exprimé en secondes ou souvent en heures), le joule étant l'énergie produite ou consommée par 1 W pendant une seconde. Un kWh correspond à 3,6 millions de joules. Une toiture permet, avec une petite installation de 3 kW (15 m² de panneaux à 200 W/m²), de produire environ 3000 kWh par an, ce qui satisfait une bonne partie des besoins en autoconsommation. Si l'on équipait les maisons et bâtiments anciens et nouveaux de façon volontariste dans une logique de solarisation de l'urbanisme, on aurait donc une source d'électricité considérable. En l'associant à une gestion intelligente de l'utilisation des équipements électriques de l'habitation (domotique) et au stockage local par batterie, on aurait par exemple la possibilité de décaler en soirée l'utilisation de l'énergie produite en journée.

ML : L'alternance dans le temps et l'espace de l'énergie solaire est en effet une difficulté. Son avenir est-il conditionné par l'arrivée des nouvelles méthodes de stockage, ou bien par une utilisation adaptée en conjugaison avec des énergies continues ?

DL : Qu'est-ce qu'une énergie continue ? C'est l'association d'une énergie intermittente avec un stockage adapté. L'intermittence c'est la vie, l'Homme a toujours réussi à s'y adapter. Pour le photovoltaïque, on a une chance inouïe aujourd'hui grâce à l'irruption du stockage électrochimique avec des batteries qui, en combinaison avec le solaire, permet de niveler l'intermittence à l'échelle de quelques jours. À plus long terme, une solution est la fabrication d'hydrogène à partir d'électricité, réutilisable en inter-saisonnier. Et donc une fois qu'on a de l'hydrogène, qui est produit avec du photovoltaïque ou de l'éolien, on a la possibilité d'avoir ce qu'on appelle un hydrogène « vert » : la question de l'intermittence sera alors réglée à toutes les échelles, en fabriquant de l'hydrogène l'été pour l'utiliser en hiver, par exemple. On pourra ainsi créer une économie qui ressemblera fortement à celle avec du gaz et du pétrole, à la différence qu'elle sera décarbonée et renouvelable à l'infini.

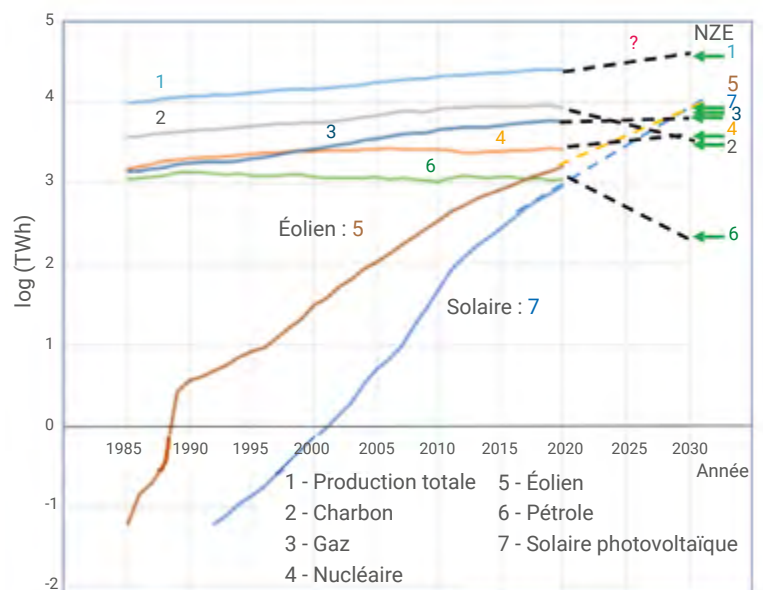
ML : Mais il y a quand même des problèmes avec les batteries : les matériaux de fabrication sont coûteux, la progression technologique ne semble pas très rapide.

DL : Le prix du kWh des batteries lithium-ion est aujourd'hui à hauteur de 150 €, alors qu'il était de 1000 à 2000 € au début des années 2000. Il baisse comme pour le photovoltaïque. Les questions liées aux matériaux et aux procédés font l'objet de nombreuses études [7]. Pour le lithium-ion, on n'est pas en situation de limitation des ressources qui sont bien distribuées, y compris en Europe [8]. Et le sodium-ion est en train d'apparaître ; il prendra le relais du lithium, moins abondant : or le sodium c'est le sel de cuisine ! Donc, en fait, on est dans une situation où il faut percevoir les évolutions des systèmes énergétiques dans leur dynamique, où tout est pris en compte : la substitution progressive des éléments rares, les ressources, l'analyse de leur cycle de vie, jusqu'au recyclage des systèmes. C'est vrai aussi pour les cellules photovoltaïques.

ML : Quel commentaire faites-vous sur le développement de l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur de l'énergie ?

DL : L'hydrogène est un extraordinaire moyen de stocker l'énergie. Nous sommes entourés d'hydrogène, dont la ressource est illimitée, chaque molécule d'eau contenant deux atomes d'hydrogène. Cependant l'hydrogène n'existe pas ou très peu sous forme libre, il faut donc le libérer des molécules d'eau, par électrolyse, comme l'avait imaginé Jules Verne, pour le transformer en carburant. Or l'électricité nécessaire peut venir du Soleil, grâce aux panneaux photovoltaïques. Les moyens de produire de l'hydrogène par électrolyse sont nombreux, de plus en plus performants et... de moins en moins chers ! Le public se méfie de l'hydrogène et pense que c'est dangereux. C'est vrai, mais pas plus que le gaz de ville ou que les hydrocarbures dans les réservoirs des voitures.

>>>



2. Évolution dans le temps de la production mondiale d'énergie électrique (en térawatts-heure) pour différentes sources. (adapté de [5]). Les pointillés donnent la vision prospective de l'AIE, issue des données du scénario NZE (Net Zero Emission) de neutralité carbone en 2050 (flèches vertes) [10].

>>>

ML : Comment fait-on si l'électricité est produite dans les pays du Sud et que ce sont ceux du Nord qui en ont besoin ? Je me souviens du projet Desertec lancé en 2008, visant à produire de l'électricité solaire dans les déserts africains et la transporter en Europe. Quelles sont les idées pour la mise en œuvre des réseaux de distribution aujourd'hui ?

DL : En fait, les progrès récents des technologies utilisant l'hydrogène changent la donne à toute vitesse (ainsi que l'actualité liée à la guerre en Ukraine), et pourraient supprimer l'étape de transport d'électricité en passant directement à la forme stockée. Le système énergétique mondial actuel fonctionne bien avec des réseaux de gaz et du transport avec les méthaniers, des réseaux électriques interconnectés, etc. L'économie de l'hydrogène va se greffer sur ce même principe : l'hydrogène peut être produit sur place, transporté par des hydrogéniers, une grande partie du réseau de gaz européen étant d'ailleurs compatible avec l'hydrogène. Donc il n'est pas nécessaire de tout reconstruire, on peut utiliser les moyens actuels pour l'économie de l'hydrogène en lien avec l'énergie

solaire : ceci peut aussi permettre des productions locales, par exemple à l'échelle d'un village, voire des habitations, d'hydrogène décentralisé en quelque sorte, comme le tas de bois d'antan. Quant au projet Desertec que vous citez, il renait à grande vitesse aujourd'hui, avec des pays possédant de grands gisements solaires comme la Tunisie, l'Algérie, le Chili ou l'Australie. En quelques années, les Chiliens ont mis en place un programme de construction de grandes centrales solaires dans le désert d'Atacama (voir figure (b), p. 33) où l'éclairement est le plus élevé du monde, avec en parallèle la construction en un temps record d'un réseau électrique à haute tension sur des centaines de kilomètres pour alimenter toute la région centrale du Chili qui est très peuplée. L'Australie va produire de l'électricité pour Singapour. L'Europe n'est pas en reste non plus : un projet nommé *HyDeal Ambition* va installer des usines de production d'hydrogène dans des fermes solaires en Espagne et au Portugal. Le Desertec d'aujourd'hui est donc à la fois électrique et hydrogène.

ML : Le prix des panneaux solaires a beaucoup baissé depuis dix ans, mais la France les importe principalement de Chine. Quelles sont les conditions économiques et les perspectives politiques pour une fabrication nationale ou européenne ?

DL : On est en effet très dépendants, à 95%, de la fabrication chinoise des panneaux solaires, comme on l'est dans d'autres secteurs de l'économie, par exemple les médicaments. Pourtant, à l'origine c'est l'Europe, en particulier avec l'Allemagne en 2000, mais aussi la France après le Grenelle de l'environnement en 2006, qui a donné le signal politique du développement à grande échelle du photovoltaïque, avec les tarifs d'achat. Néanmoins, l'Europe n'a pas suivi par la suite, elle n'a pas augmenté les capacités de fabrication du silicium et l'industrie de fabrication, en pensant que cela se ferait automatiquement par la loi du marché. Les Chinois ont fait le contraire : partis de rien en 2008, ils ont embrayé sur l'expérience européenne, mais en classant le photovoltaïque comme un axe stratégique. Ils ont investi des sommes considérables et finalement conquis le marché. C'est seulement maintenant que l'Europe commence à se réveiller, mais il n'est pas trop tard.

ML : Comment se pose la question de la réindustrialisation de façon conséquente au niveau de l'Europe et de la France ?

DL : Dans le cadre du plan de relance européen sur les énergies renouvelables, récemment accéléré suite à la guerre en Ukraine, il est prévu de porter la capacité photovoltaïque installée en Europe à 320 GW en 2025 (plus du double par rapport aux 136 GW en 2020) et d'atteindre 600 GW en 2030 [8]. Cela correspond à une augmentation d'environ 45 GW par an au cours des prochaines années. C'est très ambitieux et ne pourra se faire qu'avec une réindustrialisation profonde en Europe. La France est très bien positionnée en amont, au niveau de la recherche et de l'innovation ; en aval, les grands installateurs français comme EDF, Engie ou Total, ainsi qu'une multitude d'acteurs nouveaux innovants comme AKUO ou Ciel et Terre, Dual Sun, Voltec, Solar Cloth... sont présents. En revanche, il nous manque absolument l'étape industrielle de fabrication des modules, en silicium et couches minces : c'est le trou dans la raquette. Une force montante est celle des collectifs citoyens pour la transition énergétique, comme ceux fédérés par Énergie Partagée [9], qui fleurissent un peu partout pour développer la « solarisation » du pays.

1
2
3

- 1• www.college-de-france.fr/site/daniel-lincot/index.htm
- 2• D. Lincot, *Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique*, <https://books.openedition.org/cdf/14041>, Fayard (2022).
- 3• Évolution des rendements photovoltaïques record en laboratoire pour le silicium cristallin et pour les cellules à multijonctions : www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-crysi.pdf et www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-mjcells.pdf
- 4• a) A. Jäger-Waldau, "Snapshot of photovoltaics – February 2022", *EPJ Photovoltaics*, **13**, 9 (2022), <https://doi.org/10.1051/epjpv/2022010>
b) <https://cutt.ly/snapshotphotovoltaics-reports2022>
- 5• H. Ritchie, "How have the world's energy sources changed over the last two centuries?", *Our World in Data* (2021). <https://ourworldindata.org/global-energy-200-years>
- 6• J.-M. Tarascon, « Les batteries sont-elles une bonne option pour un développement durable », *Comptes Rendus Géoscience*, **352** (2020) 401-414.
DOI : <https://doi.org/10.5802/crgeos.27>
- 7• www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticitelithium180102.pdf
- 8• <https://energy.ec.europa.eu>, « Stratégie de l'UE en faveur de l'énergie solaire », communication de la Commission au Parlement européen le 18 mai 2022, COM(2022)221.
- 9• <https://energie-partagee.org/>
- 10• *World Energy Outlook 2021*, Agence internationale de l'énergie, <https://cutt.ly/pdf-iea-WorldEnergy>

(a) <https://cutt.ly/futura-sciences-premiers-essais-centrale-solaire-espace>

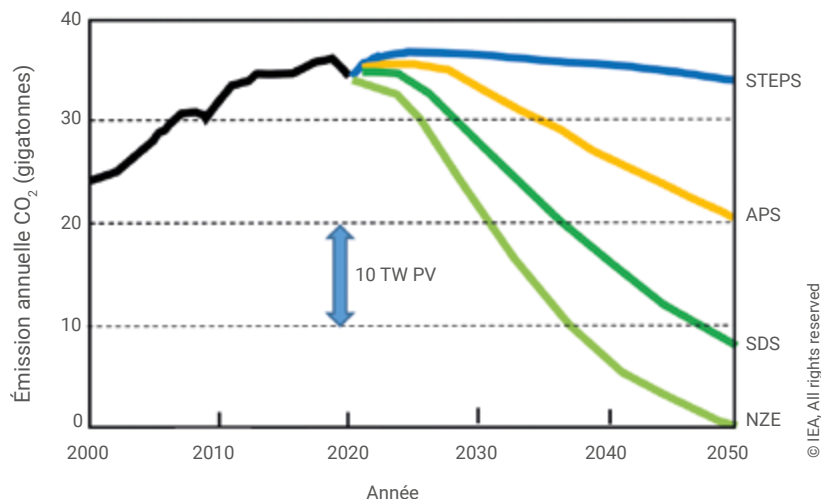
(b) L'énergie solaire reçue en un an par mètre carré en France est en moyenne de 1,3 MWh, un système photovoltaïque à 20% de rendement fournirait 260 kWh par m².

ML : En 2007, il avait été question des grands projets français, par exemple d'une usine de production de silicium de qualité solaire à Saint-Auban en Provence, Tous ces projets semblent avoir été arrêtés. Pourquoi ? Peuvent-ils redémarrer ?

DL : Ce fut une partie de mon engagement. Pour le silicium de haute pureté, où les Chinois ne sont pas très présents, il y avait par exemple en 2009 le projet Silpro (pour Silicium de Provence) avec Arkema (filiale de Total) qui devait le mettre en place. Face à la menace d'abandon, j'ai rédigé avec des collègues un communiqué pour sauver Silpro, mais cela n'a pas été possible. Puis il y a eu la mise en liquidation de Photowatt en 2012, le seul industriel intégré sur toute la chaîne de valeur en France, avec à nouveau un communiqué à l'AFP expliquant l'importance de ne pas lâcher ces savoir-faire. Le résultat, juste avant l'élection présidentielle, a été positif avec la reprise par EDF. Il y a eu aussi NEXCIS en 2015 sur les couches minces, dont nous fûmes à l'origine, qui n'a pas pu être sauvé. Cela illustre pour moi le manque de vision, ou bien le poids d'intérêts opposés, concernant l'importance de faire du photovoltaïque un secteur prioritaire. Cette situation perdure aujourd'hui avec les usines de purification du silicium Ferropem qui sont en train de fermer dans les Alpes, alors que la France possède des gisements de silice de haute pureté. On a bien sauvé Photowatt, mais son développement n'est toujours pas au rendez-vous. Heureusement la prise de conscience est là, et des initiatives de gigafactories photovoltaïques commencent enfin à voir le jour.

ML : Pouvez-vous commenter les avantages souvent avancés pour l'énergie solaire par rapport à la lutte contre le réchauffement climatique, en raison de l'absence d'émission de CO₂ ? Il faut faire le bilan carbone global de la production d'énergie photovoltaïque.

DL : Une fois installée, une cellule solaire en silicium peut fonctionner aujourd'hui de 30 à 40 ans, sans produire de CO₂ puisqu'on est en conversion directe photon-électron. Le bilan carbone d'une installation solaire résulte principalement de sa fabrication, à laquelle s'ajoute le recyclage. Donc, au bilan de la filière, on doit estimer combien de CO₂ est produit, en tenant compte de toutes les étapes de fabrication et du nombre d'années de fonctionnement : on trouve de 15 à 50 grammes d'équivalent CO₂ par kWh, variant selon la source d'électricité pour la fabrication, la technologie, le type et la localisation de l'installation ; le bilan est évidemment meilleur dans les pays les plus ensoleillés. Notons que ces chiffres sont du même ordre que ceux de l'éolien, qu'on peut comparer à ceux des énergies carbonées : environ 1000 grammes pour le charbon, 800 pour le pétrole, 500 pour le gaz. L'intérêt du photovoltaïque sur les énergies fossiles est donc considérable ! Pour le nucléaire, les valeurs données sont autour de 6 grammes par kWh. La figure 3 montre les différents scénarios de l'AIE pour la décarbonation d'ici 2050 et le potentiel du photovoltaïque.



3. Évaluation de la réduction d'émission de CO₂ pour différents scénarios de décarbonation de l'énergie, d'après le rapport 2021 de l'AIE [10] : STEPS (Stated Policies Scenario) sur la base de la tendance actuelle, APS (Announced Pledges Scenario) qui prend en compte les engagements des États, SDS (Sustainable Development Scenario), permettant un développement soutenable (+1,5°C en 2100) et NZE (Net Zero Emission Scenario) permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050 et un réchauffement un peu inférieur à 1,5°C en 2100. La flèche bleue ajoutée par nous correspond au pouvoir de réduction des émissions pour 10 TW installés de photovoltaïque (1 tonne par kW environ).

ML : Pouvez-vous parler des ressources nécessaires à la production, une autre source de préoccupation relative aux conditions d'évolution de la planète ?

DL : Pour les cellules au silicium, la ressource actuelle est du quartz ultra-pur. On part de quartz cristallin déjà ultra-pur à 99,9 %, extrait de mines spécifiques. L'industrie actuelle va au plus simple, pour abaisser les coûts, en allant le rechercher aux meilleures sources, par exemple au Brésil ou en Argentine, ce qui pose d'ailleurs des questions sur le plan écologique. La ressource est de fait limitée, alors que le silicium est le deuxième élément de la croûte terrestre, dans le sable par exemple. Pour moi, il est très important pour le développement à grande échelle d'apprendre à travailler sur de la silice de moins grande pureté par des voies peu polluantes et peu chères : c'est un défi pour les chimistes, un avenir de rêve pour le Sahara, qui a du soleil et du sable !

ML : Après une année de cours au Collège de France, clos par un colloque très suivi le 21 avril 2022, quel message aimeriez-vous faire passer aux scientifiques et au public ?

DL : Un message d'espoir pour les jeunes ! Nous avons la chance inouïe d'être baignés par la lumière du Soleil. Elle échappe en fait à la finitude de nos ressources terrestres. On lui reproche souvent son intermittence et son caractère peu concentré pour s'en écarter. Mais nous avons aujourd'hui, avec le photovoltaïque, des moyens nouveaux pour capter cette énergie à grande échelle, de façon écologique et ce, partout dans le monde. Nous ne manquons pas d'eau pour produire ensuite de l'hydrogène, et les technologies de batteries sont également au rendez-vous. Nous baignons en fait dans un monde où l'énergie est abondante. À nous de l'utiliser à bon escient et de façon éthique pour décarboner nos sociétés et réparer la planète au lieu de la détruire ! ■