

200 ans d'électricité solaire

Daniel Suchet (daniel.suchet@polytechnique.org) et **Jean-François Guillemoles** (jfguillemoles@cnrs.fr)

Institut Photovoltaïque d'Ile de France (IPVF) (UMR 9006 CNRS et École polytechnique)

18 Boulevard Thomas Gobert, 91120 Palaiseau

Centre interdisciplinaire Energy for Climate (E4C), Institut Polytechnique de Paris

Deux-cents ans après la découverte de l'effet photovoltaïque par Edmond Becquerel, les panneaux solaires sont devenus une technologie du quotidien, que l'on croise sur les toits des maisons ou le long des voies de chemin de fer. Cette apparente familiarité cache cependant l'évolution rapide et continue de la filière : les panneaux installés aujourd'hui sont bien différents de ceux mis en place il y a quelques années, en termes de conception, de coûts comme de défis à relever. Le photovoltaïque s'impose maintenant comme un acteur incontournable du paysage énergétique mondial, et son dynamisme exige de suivre son évolution de près.

Cet article se propose de faire le point sur l'état actuel de la filière en présentant les ordres de grandeur typiques, la dynamique du secteur et les perspectives à venir. Il pourra être complété par les questions-réponses élaborées par des chercheurs du domaine et disponibles sur <https://solairepv.fr/>.

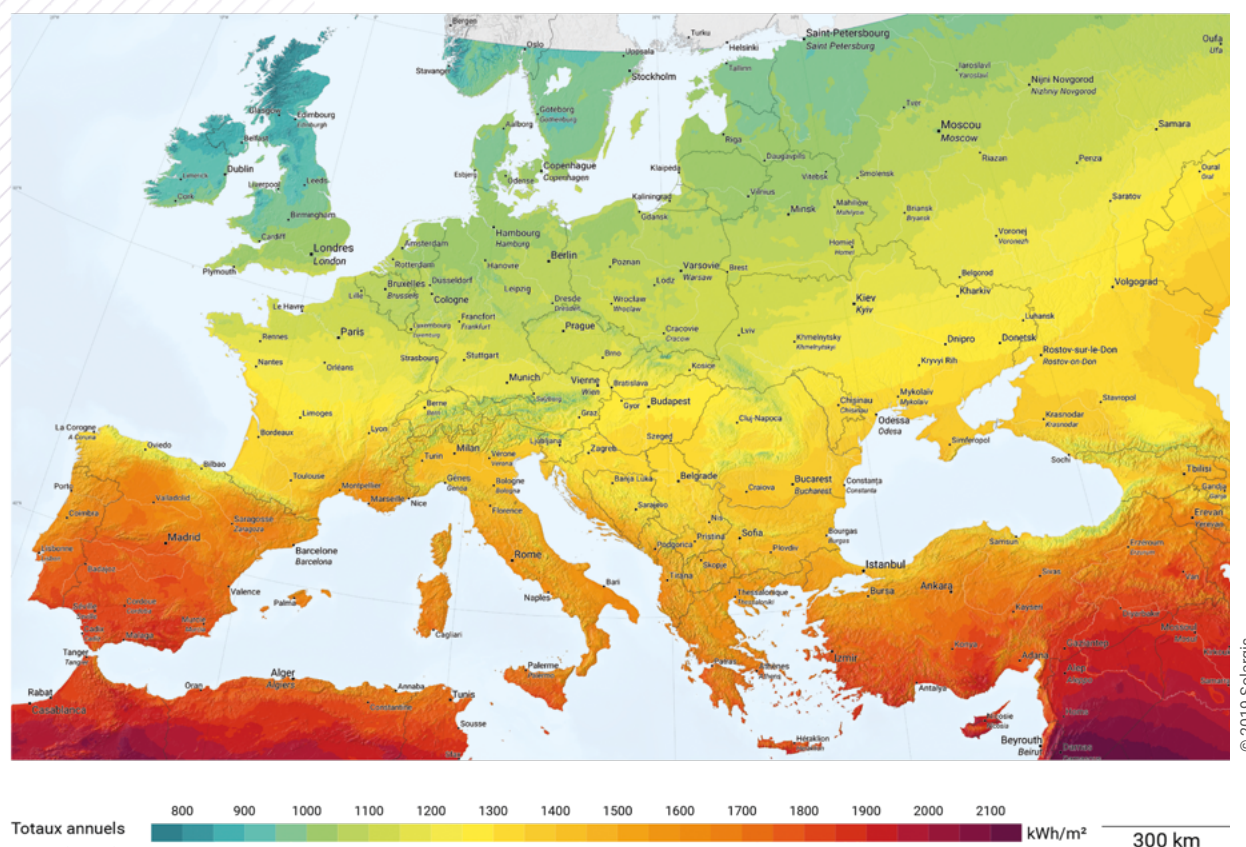
Ressources solaires

Le Soleil est à l'origine de la quasi-totalité des ressources énergétiques de la planète (hors fission et fusion nucléaires, et énergies des marées). Avant de pénétrer dans l'atmosphère, le rayonnement solaire représente 1300 W/m^2 . Une fraction de cette puissance est absorbée lors de la traversée de l'atmosphère, et environ 1000 W/m^2 peuvent atteindre le sol sous nos latitudes — c'est l'illumination standard sous laquelle le rendement nominal des dispositifs est évalué. En tenant compte de l'alternance jour/nuit et des conditions météorologiques, ce sont environ

150 W/m^2 dont nous disposons en moyenne sur l'année en France (fig. 1). À l'échelle du territoire, la puissance solaire représente ainsi près de trois-cents fois l'approvisionnement en énergie primaire du pays. La surface utile des toits, des friches industrielles et des ombrières de parking fournit à elle seule un potentiel d'environ 200 TWh électrique par an sans nouvelles artificialisations du sol. Par comparaison, les « Futurs énergétiques 2050 » du Réseau de transport d'électricité RTE envisagent une production solaire entre 100 et 250 TWh par an dans un mix énergétique entièrement

décarboné. C'est donc une véritable manne énergétique qui tombe littéralement du ciel, certes diffuse et intermittente, mais dont il s'agit de tirer le meilleur parti.

Plusieurs stratégies de conversion peuvent en effet être envisagées. La photosynthèse convertit l'énergie solaire en énergie chimique, avec un rendement typique inférieur à 1% . Le solaire thermique utilise le Soleil pour chauffer de l'eau, produisant une chaleur de faible qualité ($< 100^\circ\text{C}$) adaptée aux usages domestiques. En concentrant la lumière du Soleil à l'aide de miroirs convergents ou de lentilles, le solaire thermodynamique



1. Moyenne annuelle à long terme de l'irradiation solaire reçue par une surface horizontale en Europe (en kWh/m²), calculée sur la période 1994-2018.

(ou thermique à concentration) atteint des températures bien plus élevées, suffisantes pour alimenter une turbine et transformer la chaleur collectée en travail électrique (voir l'article de G. Flamant, p. 63). Le solaire photovoltaïque, enfin, permet également de produire de l'électricité, mais fonctionne en conversion directe et ne nécessite pas de concentration. Cette filière connaît le développement le plus rapide des technologies solaires, et le reste de cet article lui est consacré.

Générer une puissance électrique exige d'un dispositif photovoltaïque quatre propriétés fondamentales. En premier lieu, la lumière du Soleil doit être absorbée efficacement, ce qui impose que les matériaux utilisés ne présentent pas une bande interdite (*band gap*) trop importante. Ensuite, les électrons photogénérés doivent rester excités suffisamment longtemps pour être collectés : les matériaux doivent donc être

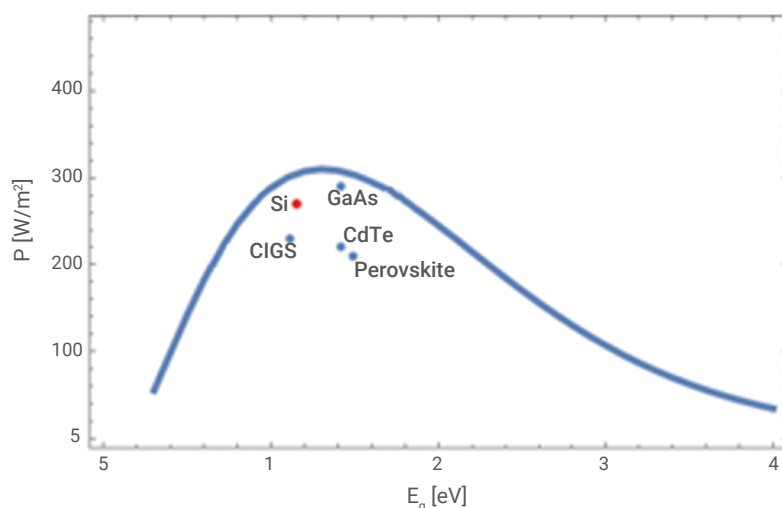
suffisamment exempts de défauts pour limiter les recombinaisons non radiatives. Troisièmement, les porteurs de charge doivent pouvoir se déplacer du centre de l'absorbeur, où ils ont été générés, jusqu'aux bornes du dispositif, exigeant des bonnes propriétés de transport. Enfin, l'extraction des porteurs doit être faite de façon sélective : les électrons sont extraits par un des contacts, et injectés par l'autre contact. L'architecture du dispositif doit ainsi présenter une certaine asymétrie permettant d'imposer le sens du courant — typiquement, cela est obtenu au moyen d'une jonction entre deux matériaux de différents dopages (homojonction) ou de différentes natures (hétérojonction), et d'un *design* des contacts électriques de chaque polarité.

Il existe une grande diversité de filières technologiques permettant d'obtenir ces propriétés pour une variété de matériaux. Cependant, toutes les technologies à simple

jonction sont limitées dans leur efficacité de conversion par le même compromis entre deux exigences contradictoires. D'une part, le courant photogénéré augmente avec le nombre de photons absorbés, ce qui incite à utiliser des matériaux dotés d'une faible bande interdite. D'autre part, la tension obtenue aux bornes du dispositif est d'autant plus grande que la bande interdite est importante. La puissance électrique, produit du courant par la tension, sera donc faible si le matériau présente une bande interdite trop petite (limitée par la tension) ou trop grande (limitée par le courant). Il existe donc une bande interdite optimale, de l'ordre de 1,1 eV pour le spectre solaire, qui permet un rendement maximum de 30 % environ (modèle de Shockley-Queisser) [1].

C'est donc autour de cette bande interdite optimale que se situe l'ensemble des technologies solaires (fig. 2), qui s'approchent déjà de cette limite fatidique. La filière silicium,

>>>



2. Puissance surfacique P sous le spectre solaire standard (1000 W/m^2) en fonction de la largeur E_g de bande interdite du matériau. Le trait plein donne la limite théorique pour un dispositif à simple jonction, les points indiquent les records obtenus en laboratoire pour différents matériaux : silicium, arséniure de gallium (GaAs), tellure de cadmium (CdTe), diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) et matériaux de structure pérovskite tels que $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_3$ [1].

>>>

qui représente 97 % des parts de marché, a réussi à obtenir un rendement en laboratoire de 27 %, et les systèmes commerciaux accessibles au grand public peuvent atteindre 22 %. Ces performances ont permis au photovoltaïque de produire au total plus de 1000 TWh en 2020, soit 3 % de l'électricité mondiale.

Le coût environnemental du photovoltaïque est une question importante. Dans un marché dominé à 97 % par la technologie à base de silicium, l'enjeu des matériaux est peu critique. La production d'une cellule solaire demande essentiellement du silicium issu de quartzite, et dopé par d'infimes quantités de phosphore et de bore. Assembler des cellules en un panneau solaire demande du verre pour l'encapsulation et de l'aluminium pour le cadre. L'élément le plus en tension est sans doute l'argent utilisé par le contact en face avant des cellules — mais les procédés sont de plus en plus économes de ce métal coûteux (réduction d'un facteur 6 en vingt ans [2]) et des rendements supérieurs à 25 % ont déjà été obtenus avec des contacts en cuivre. Si la production d'une cellule solaire exige de l'énergie, notamment pour purifier le silicium,

le temps de retour énergétique d'un panneau installé sous nos latitudes est estimé à moins d'un an. Par comparaison, avec un taux de dégradation typique de 0,5 % par an, le rendement d'un panneau en silicium passe de 20 % à 16 % en vingt-cinq ans environ, et le dispositif reste opérationnel sur une durée beaucoup plus longue [3, 4].

Si ces valeurs relatives à la production des panneaux sont assez bien établies, le passage au concept d'EROI (taux de retour énergétique, voir l'article de G. Bonhomme et J. Treiner, p. 24, et [8]) est beaucoup plus difficile et alimente de larges controverses. En particulier, le périmètre pertinent pour le calcul de l'EROI ne fait pas consensus. Par exemple, en plus du panneau, de son système de fixation et de l'électronique nécessaire à son raccordement, faut-il inclure l'intégralité du coût d'adaptation du réseau électrique, même si cette adaptation n'est pas encore nécessaire aux taux de pénétration actuels ? D'autre part, les estimations des coûts énergétiques des différents ingrédients du calcul sont également entachées de barres d'erreur significatives, et varient sensiblement d'une étude à l'autre. Mises bout à

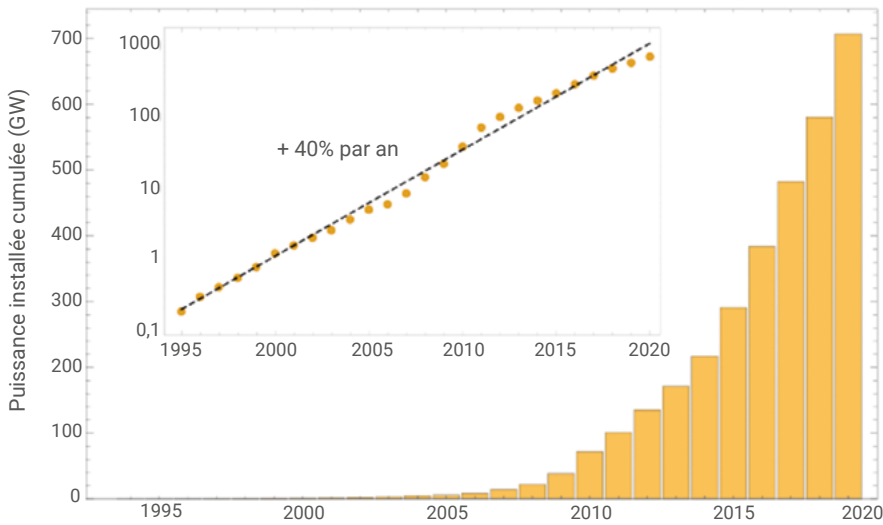
bout, ces divergences étalent les valeurs d'EROI rapportées dans la littérature sur près de deux ordres de grandeur (de 0,6 à 60 selon les sources [5, 6]). Par ailleurs, la rapidité de l'évolution du domaine (voir ci-dessous) interroge sur la pertinence de valeurs calculées sur la base d'informations datant parfois de plusieurs années.

Une filière dynamique

Au-delà des performances actuelles de la filière, il est instructif de regarder son évolution dans le temps. La rapidité de l'amélioration et de la diffusion des technologies solaires souligne en effet la nécessité de suivre de près ses développements, sous peine de s'appuyer sur des données obsolètes.

Le moteur principal de la filière est sans doute l'augmentation continue du nombre des installations, qui tire les acteurs industriels vers l'avant et alimente jusqu'à la recherche fondamentale. Depuis plus de vingt ans, la capacité « installée » dans le monde (i.e. la somme des puissances maximales atteignables par chaque installation) augmente ainsi de près de 40 % par an (fig. 3). Cette dynamique assure pour l'instant un déploiement rapide des nouvelles technologies, et alimente une courbe d'apprentissage qui n'est pas sans rappeler la loi de Moore pour les transistors : le prix de production d'un module est ainsi passé de 100 \$ par watt crête en 1975 à 0,21 \$ en 2021 (fig. 4) [2].

Le coût du panneau en lui-même ne représente certes qu'une fraction de celui d'une installation, qui inclut également les infrastructures, l'ondeleur^(a) pour le raccordement, le foncier, la main d'œuvre et les taxes. Pour être exhaustif, il faut également rajouter les frais d'opération et de maintenance, les effets de la dégradation des panneaux, le coût du capital... À noter que le calcul du coût marginal de l'électricité photovoltaïque, tel que présenté ici, ne fait sens que tant que les volumes d'énergie produite ne conduisent pas à une modification sensible du système électrique global. Néanmoins, la réduction spectaculaire des coûts de production est un indicateur efficace de la maturité de la technologie. Elle

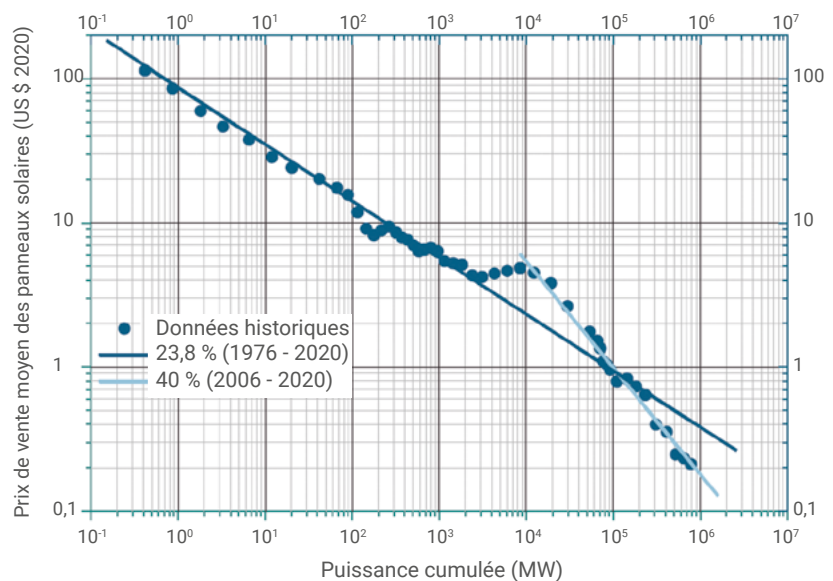


traduit avant tout une augmentation des rendements, mais également une amélioration des procédés de fabrication (*wafers* (plaquettes) de plus en plus fins, diminution des besoins de matière pour les contacts...) qui diminue d'autant l'empreinte énergétique des panneaux.

Dans le domaine du photovoltaïque, comprendre pour faire et comprendre pour comprendre sont intimement liés. On voit ainsi se développer dans l'industrie des techniques inspirées d'approches fondamentales introduites peu de temps auparavant dans la littérature scientifique. Ainsi, l'analyse de la photoluminescence (loi de Planck généralisée), qui permet d'estimer la valeur du photovoltage sans nécessiter de contact électrique, est utilisée pour vérifier à la volée la qualité des *wafers* de silicium sur les chaînes de production. La nanophotonique s'impose pour diminuer l'épaisseur des cellules sans dégrader leurs propriétés optiques. Différentes stratégies peuvent être envisagées pour gagner encore en rendement de conversion, et dépasser la limite donnée par le modèle de Shockley-Queisser (voir plus haut). L'approche la plus répandue consiste à superposer deux jonctions (ou plus) pour convertir séparément les photons de haute et de basse énergie [7]. En laboratoire, ces multijonctions affichent un record de conversion à 47 % (six jonctions superposées, sous

3. Puissance photovoltaïque installée au cours du temps de 1996 à 2020 (source : BP Statistical Review) ; insert : mêmes données en échelle logarithmique.

4. Courbe d'apprentissage de la filière silicium : évolution du prix de vente des panneaux solaires, normalisé par la puissance nominale du dispositif, en fonction de la production cumulée (source : ITRPV 2021).



concentration de flux solaire), et un effort intense est consacré à la réalisation industrielle de dispositifs tandem (deux jonctions) à grande échelle et à bas coût. Plusieurs couples de matériaux peuvent être envisagés, et une attention particulière est accordée à la combinaison du silicium avec une pérovskite halogénée — une structure cristalline caractérisant une famille de matériaux aux propriétés opto-électroniques remarquables, mais que l'on ne sait pas encore bien protéger des dégradations induites par l'environnement. Un point essentiel, qui ressort des avancées scientifiques et technologiques des dernières décennies, est la marge importante de progression des technologies photovoltaïques, à la fois sur la question des performances de conversion, et sur le caractère intensif en matériaux critiques.

Le défi Térawatt

Avec plus d'un TW installés dans le monde, la R&D du photovoltaïque essaie maintenant de relever les défis d'une contribution de grande ampleur au mix énergétique Térawatt. Pour atteindre cet objectif global, c'est une multitude de défis scientifiques et technologiques qui vont devoir être relevés d'un bout à l'autre de la vie des panneaux solaires.

>>>

En amont de la production, comme discuté plus haut, il s'agit en particulier de continuer à gagner en rendement pour réduire le prix de l'énergie.

En aval de leur utilisation, le déploiement massif de panneaux photovoltaïques exige le développement de filières de recyclage et de gestion des déchets. Alors que les installations historiques arrivent en fin de vie, la première usine dédiée au recyclage des panneaux solaires a ouvert ses portes en France en 2018^(b). À l'heure actuelle, les techniques de recyclage permettent de valoriser près de 90 % de la masse des panneaux (cadre en aluminium, encapsulation en verre...), mais le silicium des cellules est le plus souvent voué à des réusages de basse qualité.

Il faut cependant noter la récente réalisation d'une cellule solaire à 20 % de rendement produite exclusivement à base de silicium recyclé.

Pour l'exploitation enfin, l'intermittence et le manque d'inertie de la production apparaissent comme des difficultés majeures pour l'intégration du photovoltaïque sur le réseau (voir l'article de G. Sapy, p. 135). Si les taux de pénétration actuels sont suffisamment faibles pour que les réseaux électriques puissent encaisser sans difficultés les productions solaires, l'Agence internationale de l'énergie (IEA) et RTE estiment que des aménagements spécifiques devront être réalisés à l'avenir. De récents projets européens portés par les gestionnaires du réseau de transport ont fait la preuve de principe de la stabilité d'un réseau construit sur des onduleurs plutôt que sur des machines tournantes, en utilisant des technologies déjà existantes.

En ce qui concerne l'équilibrage du réseau, la difficulté consiste à maintenir la balance entre une consommation variable et une production à la fois variable et intermittente. L'agrégation de sources réparties sur un vaste territoire réduit sensiblement l'intermittence, et la complémentarité entre les ressources éoliennes et solaires lisse les variations saisonnières ; mais ces techniques ne font pas disparaître le problème. Le stockage, la gestion intelligente des réseaux d'énergie, ainsi que le pilotage de la demande représentent assurément les ingrédients essentiels des solutions à mettre en œuvre. Il faut en premier lieu porter une attention particulière à des technologies différentes selon la durée (horaire, journalière, saisonnière) et le volume de stockage considérés. Dans cette optique et pour permettre de décarboner davantage d'usages, une direction de recherche consiste à développer des solutions énergétiques multivectorielles telles que les carburants solaires : il s'agit soit d'utiliser l'électricité photovoltaïque pour alimenter un électrolyseur et générer de l'hydrogène qui pourra servir de base à la production de molécules plus complexes, soit d'opérer directement la réduction de l'hydrogène par photo-électrochimie. Cependant, les solutions reposant

exclusivement sur le stockage risquent d'être insuffisantes.

En complément de ces solutions techniques, il faut sans doute s'interroger sur la possibilité d'accommoder certains usages au caractère intermittent de la production, plutôt que de chercher à faire disparaître l'intermittence pour plier la production à tous nos usages. De telles solutions ont déjà été mises en œuvre, mais dans l'autre sens, pour décaler la consommation de la journée vers la nuit : on pensera par exemple au déclenchement des ballons d'eau chaude.

Une attention particulière peut être accordée à la climatisation, qui est amenée à représenter une fraction significative de la consommation électrique totale (estimée à 6200 TWh en 2050, soit environ 30 % du secteur du bâtiment, principalement en Asie). La demande en climatisation est globalement corrélée à la présence du Soleil, et ne nécessite pas un approvisionnement parfaitement pilotable : le besoin n'est pas tant de pouvoir allumer son climatiseur quand on le souhaite que d'assurer une température confortable dans l'habitat. À condition que les bâtiments climatisés soient correctement isolés, il est donc envisageable de ne les refroidir que tant que le soleil brille. L'usage sera peut-être moins confortable que celui permis par le parfait contrôle actuel, mais il épargne au réseau à la fois l'approvisionnement du climatiseur et l'évacuation du surplus de production.

Cet exemple simple souligne surtout la dimension systémique des problématiques énergétiques et l'impact crucial de l'efficacité énergétique et des comportements sur l'optimisation du mix énergétique. Bien que la tentation en soit grande, car les sources d'énergie abondent, il est en effet essentiel de ne pas se contenter d'un surplus de production pour résoudre les défis de la transition énergétique, mais bien de prendre en compte le problème dans sa globalité. ■

(a) Onduleur : dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue.

(b) En France, c'est l'éco-organisme SOREN, agréé par les pouvoirs publics, qui assure la collecte et le recyclage des panneaux solaires en fin de vie.

1• J.F. Guillemoles et al., "Guide for the perplexed to the Shockley-Queisser model for solar cells", *Nat. Photonics*, **13** (2019) 501-505. doi: 10.1038/s41566-019-0479-2.

2• "International Technology Roadmap for Photovoltaic 2023 results", 10^e édition (2023), ITRPV et l'association VDMA (Francfort, Allemagne).

3• D.C. Jordan et al., "Compendium of photovoltaic degradation rates", *Progress in Photovoltaics* **24** (2016) 978-989. doi: 10.1002/pp.2744.

4• A. Louwen et al., "Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development", *Nature Communications* **7** (2016) 13728. doi: 10.1038/ncomms13728.

5• F. Ferroni et R.J. Hopkirk, "Energy Return on Energy Invested (EROEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation", *Energy Policy*, **94** (2016) 336-344. doi: 10.1016/j.enpol.2016.03.034.

6• W. Chen et al., "Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China", *Journal of Cleaner Production*, **112** (2016) 1025-1032. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.024.

7• Entretien de Daniel Lincot avec Michèle Leduc, "Cette énergie pratiquement illimitée qui nous vient du Soleil", *Reflets de la physique* **75** (2023) 32-37.

8• *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, **111** (juillet 2023).