

PHOTOVOLTAÏQUE

Daniel Lincot et Gérard Creuzet

Membres de l'Académie des technologies

Séance du 24 avril 2024

Résumé

L'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques et la diminution de coût de production des panneaux ont permis, ces dernières années, de faire du photovoltaïque un des piliers de la transition énergétique, avec plus de 1,5 TW installés dans le monde, et une croissance soutenue. De nombreuses technologies sont en présence avec des progrès permanents, qu'il s'agisse de la filière silicium ou de technologies émergentes en couches minces comme les pérovskites, qui peuvent d'ailleurs être combinées sous forme de cellules tandem pour atteindre des rendements plus élevés. Le marché mondial de modules photovoltaïques (400 GW en 2023) est aujourd'hui largement dominé par les entreprises chinoises, avec plus de 95% de parts.

Compte tenu des objectifs de nouvelles installations dans les prochaines années, le marché est en très forte croissance, et reste largement ouvert à l'industrie française et européenne. Compte tenu de l'importance que cette énergie est appelée à jouer, ce n'est pas seulement un enjeu économique, mais une question de souveraineté. Les acteurs impliqués peuvent couvrir une grande variété d'entreprises se positionnant sur différents aspects de la chaîne de valeur et se différenciant par rapport à la concurrence chinoise. C'est le cas par exemple de l'entreprise Voltec, de taille intermédiaire, positionnée aujourd'hui sur les modules silicium, et qui s'engage sur l'innovation avec les cellules tandems. Enfin, le développement du photovoltaïque est étroitement associé au développement d'initiatives locales, portées par des associations citoyennes ou des collectivités, qui s'exprime dans de nouveaux domaines d'application en croissance, qu'il s'agisse de l'autoconsommation en milieu urbain ou de l'agrivoltaïque en milieu rural.

Intervenants

Pere ROCA I CABARROCAS

Directeur scientifique de l'Institut photovoltaïque d'Ile-de-France, directeur de recherche au CNRS et professeur à l'École Polytechnique

Xavier DAVAL

CEO de Kilowattsol, président de la branche « Énergie solaire » du Syndicat des énergies renouvelables, vice-président du Global Solar Council

Diane LESCOT

Directrice de l'Observatoire des énergies renouvelables (Observ'ER), directrice de publication du *Journal du Photovoltaïque*

Lucas WEISS

Directeur général de Voltec Solar

Sommaire

Photovoltaïque : des origines aux grands enjeux de la transition énergétique	2
Panorama de la recherche photovoltaïque et perspectives	3
Contexte de marché et enjeux industriels dans un cadre réglementaire en pleine évolution	4
Impact et diffusion du photovoltaïque dans la société	5
Relever le défi de la fabrication photovoltaïque en France et en Europe	7
Débats	8



Photovoltaïque : des origines aux grands enjeux de la transition énergétique

Daniel Lincot

Edmond Becquerel, père de Henri Becquerel, a découvert l'effet photovoltaïque en 1839, mais c'est seulement dans les années 1950 que Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller, trois chercheurs américains travaillant pour les laboratoires Bell, parviennent à développer des cellules photovoltaïques composées de silicium et obtiennent un rendement de 6%, le rendement étant défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée par cette cellule et l'énergie électromagnétique reçue sous forme de rayonnement solaire ($1\,000\text{ W/m}^2$).

L'essor du photovoltaïque

Dès 1958, cette nouvelle source d'énergie est utilisée pour l'alimentation électrique du satellite américain Vanguard 1. La France qui se préoccupe, elle aussi, de développer des technologies photovoltaïques dans le cadre de ses ambitions spatiales est également à la pointe dans le domaine du photovoltaïque, au silicium ou en couches minces.

Dans les années 1970, certains commencent à s'interroger sur la possibilité d'un usage terrestre du photovoltaïque avec un modèle économique viable et depuis lors le domaine se développe de façon exponentielle. Son essor devient visible à partir des années 2010, porté par l'atteinte de la compétitivité économique et le transfert réussi du laboratoire à l'industrie.

À l'heure actuelle, le rendement des cellules silicium atteint près de 27% en laboratoire, et près de 25% pour modules commerciaux premium et 22% en standard, montrant le chemin parcouru depuis 1958.

Les grands enjeux de l'énergie solaire

Le premier grand enjeu de l'énergie solaire est son pouvoir de décarbonation : 10 TWh d'électricité d'origine photovoltaïque permettent d'éviter 10 gigatonnes d'émissions de CO_2 liées à la production de la même quantité d'électricité à partir de charbon.

Le rôle que peut jouer le photovoltaïque dans la décarbonation est lié à la réduction des coûts de cette technologie. Celle-ci a été constante jusqu'en 2004, date à laquelle l'industrie ne disposait plus de suffisamment de silicium. À partir de 2009, c'est-à-dire du moment où la Chine, mais également l'Europe, ont commencé à se doter d'usines de production de silicium, la courbe des coûts du photovoltaïque a connu une baisse encore plus forte.

Aujourd'hui, le prix de l'électricité photovoltaïque est de 80 euros par MWh en France, et de 20 euros dans plusieurs régions du monde, dont le Portugal. En conséquence de cette baisse des prix, la capacité mondiale installée de photovoltaïque connaît une croissance exponentielle depuis 2010. Elle dépasse désormais 1 TW. L'éolien et le solaire/photovoltaïque ont fait une entrée tardive dans le mix électrique mondial, mais leur courbe de croissance est en train de leur donner une place majeure au sein de ce mix (figure 1).

Evolution historique du mix électrique mondial

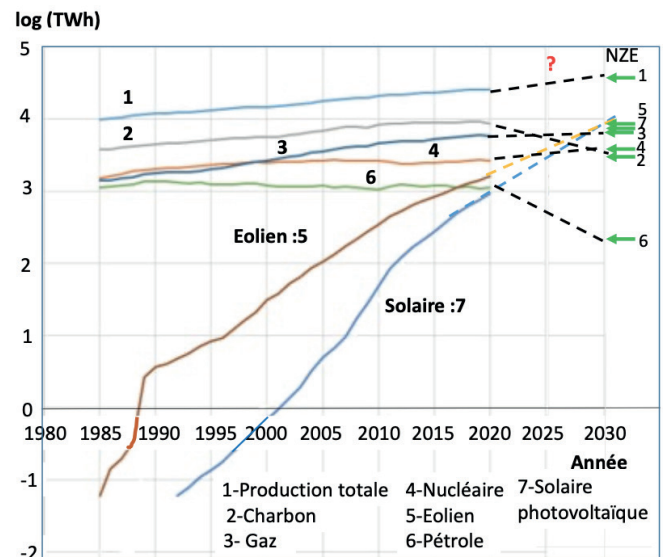


figure 1

Les projections

En 2014, l'AIE (Agence internationale de l'énergie) annonçait que la capacité installée mondiale de photovoltaïque représenterait 50 GW en 2035. Or, pour la seule année 2023, une capacité de 400 GW supplémentaires a été installée à travers le monde. Selon un modèle publié en 2019 dans la revue *Science*, la capacité installée pourrait atteindre de 20 à 70 TW en 2050.



Panorama de la recherche photovoltaïque et perspectives

Pere Roca I Cabarrocas

Le soleil peut être comparé à un réacteur nucléaire suffisamment distant pour ne pas nous menacer. Il nous envoie environ une énergie d'environ 1 kW par mètre carré et les cellules photovoltaïques permettent de convertir cette énergie en électricité de façon stable et durable, compte tenu de l'absence de tout dispositif mécanique. Il existe de nombreuses technologies photovoltaïques : silicium, couches minces, matériaux III-V, photovoltaïque organique, pérovskites, etc. En tant que directeur scientifique de l'IPVF (Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France), j'ai la responsabilité de faire des choix d'allocation des ressources de recherche entre ces différentes filières.

L'effet photovoltaïque est obtenu en assemblant deux couches de matériaux semi-conducteurs, l'une dopée par exemple en atomes de phosphore pour produire des charges mobiles négatives, les électrons (N), l'autre dopée en atomes de bore pour produire des charges mobiles positives, les trous (P), ce qui instaure un champ électrique permanent entre les deux couches, qui forment ce que l'on appelle une jonction P/N (figure 2).

P/N Junction

Dopage N (négatif) atomes de Phosphore → [P*]= concentration d'électrons
 Dopage P (positif) atomes de Bore → [B]= charges positives (trous)

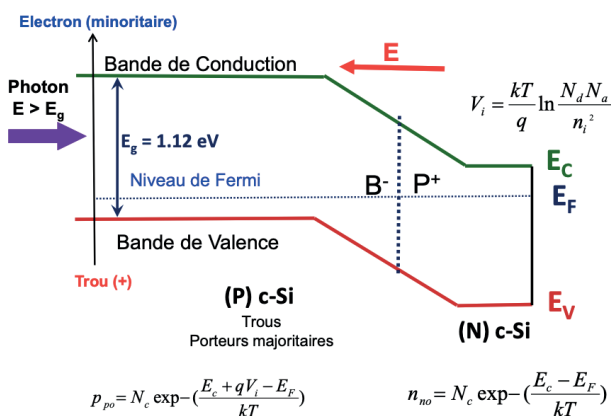


figure 2

Lorsqu'un photon entre en contact avec une cellule photovoltaïque, l'énergie qu'il contient est transférée à un électron du matériau semi-conducteur et, grâce à ce sur-

plus d'énergie, l'électron s'échappe de sa position normale dans l'atome et crée un « trou », il est porté à un potentiel plus négatif tandis que le trou est porté à un potentiel plus positif, l'énergie du photon étant transformée en énergie électrique. Les électrons et les trous se déplacent par diffusion au sein des deux couches. Au voisinage de l'interface P/N, sous l'action du champ électrique, les électrons sont repoussés vers la couche N, les trous vers la couche P. Ce phénomène s'accompagne de l'apparition d'une différence de potentiel électrique entre la zone N et la zone P, à l'origine de la phototension. Les électrons cherchant à se combiner avec les trous sont alors obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous, créant ainsi un courant électrique continu appelé photocourant. La puissance électrique fournie par la jonction est simplement le produit entre le photocourant et la phototension.

Dans sa forme la plus simple, cette technologie permet d'obtenir un rendement de 20%. Pour aller au-delà, on peut améliorer l'architecture des cellules, avec un émetteur passivé à l'arrière de la cellule, qui permet d'atteindre un rendement de 25%. On peut également recourir à l'hétérojonction silicium, pour un rendement de 27%. De son côté, l'IBC (Interdigitated Back Contact) permet d'atteindre près de 28% de rendement.

Dans ses recherches, l'IPVF s'est fixé un triple objectif : atteindre, d'ici 2030, un rendement de 30%, à un coût inférieur à 0,30 euro le watt. Pour parvenir à cette performance, nous misons sur deux technologies de couches minces, les cellules à pérovskites et les matériaux III-V.

La pérovskite est un cristal à base de matières organiques et inorganiques qui a l'avantage de pouvoir être produit à basse température (100 °C). Les cellules à pérovskites donnent d'excellents résultats en laboratoire, avec un rendement de 25%, et permettent d'économiser beaucoup de matière : avec 0,3 microns de pérovskite, on obtient le même résultat qu'avec 250 microns de silicium. Elles peuvent poser un problème de stabilité mais, dans nos expériences, certaines de ces cellules sont en exploitation depuis 14000 heures et fonctionnent toujours correctement. Nous devons maintenant passer à l'échelle et mettre au point des procédés transposables à l'industrie. Pour le moment, nous savons mettre en série une dizaine de cellules seulement.

Les matériaux III-V sont des composites fabriqués à partir d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique (bore, aluminium, gallium...) et d'un ou plusieurs éléments de la colonne V (azote, phosphore, arsenic, antimoine...). L'exemple type est l'arséniure de gallium GaAs. Ils sont très stables, ce qui a permis leur utilisation dans les programmes spatiaux, et peuvent atteindre, en laboratoire, des rendements de 36% sous forme de multi-jonctions, mais ils coûtent très cher. Nos efforts portent sur la réduction de ces coûts, à la fois en utilisant des substrats virtuels et en développant des procédés de croissance par plasma, à basse température.



Contexte de marché et enjeux industriels dans un cadre réglementaire en pleine évolution

Xavier Daval

Le métier de Kilowattsol, la société que je dirige, consiste à calculer le potentiel photovoltaïque d'un toit ou d'une surface au sol, partout sur la planète. L'entreprise emploie quinze personnes et consacre 12% de son chiffre d'affaires à la R&D.

Des prix qui s'effondrent

Il y a quelques semaines, en Espagne, dans un magasin de bricolage, j'ai trouvé des panneaux photovoltaïques de 540 watts en vente au prix de 99 euros, soit 37 euros le mètre carré. Dans ce magasin, on pouvait aussi acheter du parquet, au même prix. En d'autres termes, pour le montant d'un parquet, vous pouvez désormais vous alimenter en électricité.

Jusqu'ici, la France n'a pas su prendre le virage du photovoltaïque, vraisemblablement moins par manque de compétences que faute de volonté politique. Avec des prix de vente aussi faibles, est-il encore temps, pour notre pays, de revenir dans la course ?

Le marché solaire, une dynamique inégalée

En 2023, 400 GW de capacités photovoltaïques ont été installées à travers le monde, dont 175 GW en Chine. Celle-ci fabrique 90% des équipements solaires et en utilise 65%. Ayant compris, il y a vingt ans, que les énergies renouvelables seraient la seule réponse viable à son problème énergétique, elle a commencé par développer l'éolien, puis le nucléaire, puis le photovoltaïque, qui est désormais en passe d'éclipser les autres énergies en termes de kilowattheures produits. La Chine a la chance de disposer de zones désertiques bien ensoleillées et de s'être dotée, il y a longtemps déjà, d'une épine dorsale électrique qui lui permet d'acheminer vers les villes l'électricité issue des grands barrages du Tibet. Elle pourra désormais cesser d'utiliser l'électricité hydraulique dès que l'ensoleillement sera suffisant.

En Europe, le photovoltaïque connaît une croissance de 40% par an depuis trois ans. À la fin de 2023, la puissance solaire raccordée était de 19 047 MW, dont 3 137 MW de puissance installée dans l'année, soit plus de 200 000 installations de toutes tailles.

Par rapport à 2022, la part de l'autoconsommation (c'est-à-dire des installations de 3 à 6 kW) a beaucoup augmenté, ce qui s'explique par l'inflation du prix de l'électricité. Il en va de même du segment des installations de 100 à 250 kW, plébiscitées par les artisans et TPE confrontés à des factures d'électricité trop élevées. En revanche, la part des grands projets a régressé. En France, le pays le plus vaste d'Europe, on manque de terrains pour installer des centrales photovoltaïques au sol...

Le panorama industriel, un club de plus en plus fermé

En 2023, la moitié du marché mondial de modules photovoltaïques (400 GW) a été couvert par une vingtaine de sociétés, parmi lesquelles quatre géants chinois : Jinko Solar, Trina Solar, Longi Solar et JA Solar, qui ne cessent d'investir pour produire toujours davantage (figure 3).

Le marché des modules PV

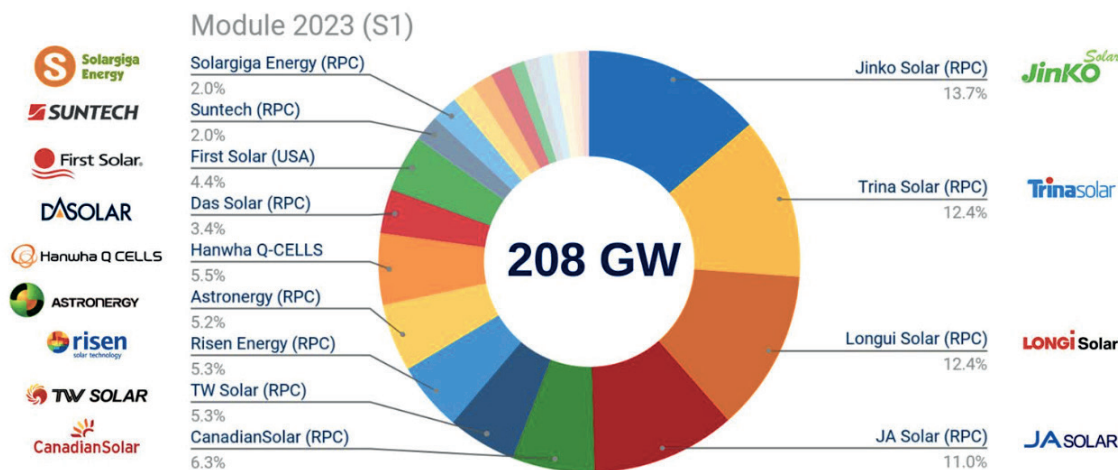


figure 3

Aux États-Unis, dans le cadre de l'IRA (*Inflation Reduction Act*, 2022), un budget de 137 milliards d'euros a été alloué au développement des énergies renouvelables, avec deux types d'aides, l'une en amont pour soutenir la réindustrialisation, l'autre en aval pour compenser par des primes le différentiel de prix avec les produits chinois. Dans ce cadre, la production de modules photovoltaïques devrait passer d'une capacité de 28 GW à 43 GW.

L'Europe n'ayant pas les moyens de mettre en œuvre la même politique, les modules produits en Europe ne représentent qu'une capacité de 14 GW et le nombre d'acteurs diminue de jour en jour - certains, comme le fabricant allemand Meyer Burger, décidant de s'installer aux États-Unis. Le *Net-Zero Industry Act*, qui a été validé en Février 2024, vise à permettre à l'Europe de couvrir à l'horizon 2030 40% de ses besoins d'énergies renouvelables, dont le photovoltaïque, mais cette règle devra encore être retranscrite dans chacun des pays.

Une question de souveraineté énergétique

Je suis néanmoins convaincu qu'il faut garder espoir, car le marché qui s'ouvre est tellement vaste qu'il y aura de la place pour tout le monde. Sans doute faut-il commencer par s'attaquer aux marchés de niche. En France, les deux segments les plus dynamiques sont ceux des installations de 3 à 6 kW et de 100 à 250 kW, pour lesquels la valeur de marque compte: quand on pose des panneaux sur le toit de sa maison, le fait qu'ils soient labellisés de fabrication française peut revêtir une certaine valeur. Par ailleurs, un épisode comme celui du Covid peut se reproduire, ou encore un conflit en mer de Chine. Dans ce type de contexte, les exportations de panneaux chinois peuvent s'interrompre, et sachant que les États-Unis sont loin de l'autosuffisance, ils n'en exporteront probablement pas vers l'Europe. Produire du photovoltaïque en France et en Europe n'est pas seulement un enjeu économique, mais une question de souveraineté énergétique.

Selon un précepte militaire, « *Qui tient les hauts, tient les bas* ». Il serait souhaitable que les industriels français se réapproprient la fabrication non seulement des modules, mais des onduleurs et des transformateurs. Nous pourrions même exploiter nos mines de quartzites, les meilleures d'Europe, pour nous lancer dans la purification du silicium et sa cristallisation. Nous disposons pour cela d'un atout majeur, l'énergie nucléaire, contrairement à la Norvège, naguère bien placée dans ce domaine, mais frappée de plein fouet par la hausse des prix de l'énergie.



Impact et diffusion du photovoltaïque dans la société

Diane Lescot

L'association Observ'ER, fondée en 1980, a pour objet d'étudier et de promouvoir le développement des énergies renouvelables en France et en Europe. D'une part, Observ'ER mène des études, notamment le *Bilan EurObserv'ER*, qui dresse chaque année l'état des énergies renouvelables en Europe, ou encore le *Baromètre des énergies renouvelables électriques en France*. Ces études sont cofinancées par des organismes publics comme l'ADEME, par la Commission européenne ou encore par des partenaires privés. D'autre part, Observ'ER publie trois magazines trimestriels, dont l'un dédié aux énergies renouvelables en général et les deux autres à l'éolien et au photovoltaïque, ainsi que divers ouvrages et des newsletters.

L'année 2023 a été marquée par un essor sans précédent du photovoltaïque. Désormais, en capacité installée, il s'agit de la première énergie renouvelable dans le monde, devant l'éolien et l'hydroélectricité. Cette évolution s'observe également en Europe où, entre 2009 et 2022, la part respective de ces trois énergies est passée de 61 à 28% pour l'hydroélectrique, de 32 à 37% pour l'éolien, et de 7 à 35% pour le photovoltaïque.

Le rythme de développement du photovoltaïque s'accélère aussi en France. Au cours des trois dernières années (de 2021 à 2023), les nouvelles capacités installées ont été plus importantes qu'au cours des neuf années précédentes (figure 4).

Parc total photovoltaïque et production d'électricité annuelle en France

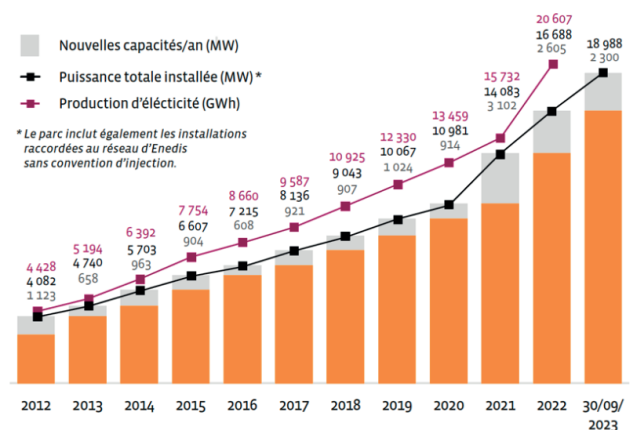


figure 4

Comme cela a déjà été souligné, le segment de l'autoconsommation individuelle, c'est-à-dire des installations inférieures à 9 kW, est le plus dynamique. Ce parc double chaque année (0,5 GW fin 2021, 1,1 GW fin 2022, 2,3 GW fin 2023) et représente 55% des nouvelles installations en 2023. Désormais, 6% des maisons individuelles avec propriétaires occupants sont équipées de panneaux solaires.

La guerre en Ukraine a fait prendre conscience aux consommateurs de l'intérêt d'être indépendants en matière d'énergie et de sécuriser leur accès à une énergie à bas coût. On note d'ailleurs que 3% des installations en autoconsommation individuelle sont combinés avec des moyens de stockage de l'électricité afin d'accroître cette indépendance.

L'autoconsommation est également collective : un ou plusieurs consommateurs et un ou plusieurs producteurs peuvent s'associer pour partager une énergie produite localement. Ce phénomène, qui peut concerner des acteurs aussi bien publics que privés (entreprises, collectivités territoriales, particuliers) se développe rapidement, avec 149 installations dénombrées au début de 2023, 259 à la fin de l'année et 379 actuellement.

Ce dynamisme repose beaucoup sur l'investissement des collectivités territoriales dans la planification régionale, départementale et communale mais également dans le montage des projets. Celui-ci se fait au travers d'EPL (entreprises publiques locales), généralement sous la forme de SEM (sociétés d'économie mixte) mais aussi de SPL (sociétés publiques locales) ou de SemOp (SEM à opération unique). Sur 128 EPL engagées dans la transition énergétique, 71 gèrent des projets photovoltaïques et ceux-ci représentent 5% de la production annuelle de la filière photovoltaïque. C'est donc un phénomène à prendre en compte.

Les particuliers peuvent également s'associer pour monter des projets citoyens, en s'appuyant notamment sur le nouveau statut transposé de la directive Énergies renouvelables : la communauté d'énergie renouvelable. La grande majorité des projets citoyens de production d'énergies renouvelables concernent des centrales photovoltaïques (95% en nombre et 45% en puissance). Ces projets ont de nombreux effets positifs : impact énergétique et écologique, dynamique économique locale, placement financier éthique, création de lien social, forte valeur pédagogique.

Les entreprises disposant de grands bâtiments se sont vu imposer la solarisation de leur toiture par le biais de la loi Énergie Climat de 2019, renforcée par la loi APER (accélération de la production d'énergies renouvelables). Les bâtiments tertiaires neufs dont la surface est comprise entre 500 et 1 000 mètres carrés doivent être solarisés à raison de 40% de leur toiture à compter de juillet 2023, et ceux dont la surface est supérieure à 1 000 mètres carrés à compter de janvier 2026. Pour les bâtiments existants, la solarisation deviendra obligatoire à partir de 2026 pour les grandes toitures et de 2028 pour les parkings d'une surface supérieure à 1 500 m². Les entreprises comprennent de mieux en mieux l'intérêt pour elles de monter des projets photovoltaïques, soit en propre, avec injection sur le réseau ou autoconsommation, soit en autoconsommation avec un tiers se chargeant de l'investissement et vendant la production à l'entreprise.

On assiste également au développement du photovoltaïque dans l'agriculture, à travers l'équipement des toitures de hangars mais aussi le développement de l'agrivoltaïsme, c'est-à-dire d'installations associées à des pratiques agricoles de culture ou d'élevage. L'agrivoltaïsme est autorisé à trois conditions : l'installation doit présenter un bénéfice agronomique, le rendement agricole doit être maintenu, la couverture ne doit pas être supérieure à 40%.

Pour accroître la diffusion du photovoltaïque en France, il reste à lever quelques verrous du côté des Monuments historiques, des préfectures, des communes chargées d'identifier les zones d'accélération des énergies renouvelables. Un effort particulier devrait également porter sur le repowering, le recyclage et le réemploi des modules photovoltaïques, qui font l'objet de rumeurs négatives. La multiplication des projets au sol peut entraîner des problèmes d'acceptabilité et doit être soumise à la concertation. Le principal goulet d'étranglement reste néanmoins le nombre insuffisant d'installateurs et l'absence de qualification professionnelle, problème auquel la filière est en train de s'atteler.



Relever le défi de la fabrication photovoltaïque en France et en Europe

Lucas Weiss

Voltec Solar est le premier fabricant français de modules photovoltaïques. Nous sommes malheureusement devenus aussi le premier fabricant européen, depuis la fermeture de l'usine allemande de Meyer Burger. Notre capacité de production de modules est de 500 MW par an, soit environ un million de panneaux solaires mis sur le marché chaque année. L'entreprise, une société familiale, emploie 110 personnes et connaît une croissance moyenne de 25% par an depuis 2015. Nous visons un chiffre d'affaires de 60 millions d'euros en 2025, en dépit du fait que nos produits ont perdu 30% de leur valeur en 2023. Dans ce but, nous avons réalisé un investissement de 9 millions d'euros qui nous a permis de doubler notre capacité de production.

L'analyse des capacités de production et d'installation dans les différentes régions du monde montre que la production de la Chine est quatre à cinq fois supérieure à ses capacités d'installation, tandis que l'Europe ou les États-Unis sont loin de répondre à leurs propres besoins. Comment rééquilibrer cette situation? Comment rendre pérenne l'industrie européenne du photovoltaïque?

Quel modèle industriel?

Les projets de giga-usines photovoltaïques sont conçus pour tenter de couvrir une grande partie de la chaîne de valeur. Or, lorsque l'on analyse la chaîne d'approvisionnement de Longi Solar, l'un des leaders chinois du secteur, on s'aperçoit qu'il cumule jusqu'à dix-neuf sites de fabrication différents pour une même étape, et que la production est très souvent externalisée. L'efficacité industrielle chinoise repose sur une coopération intra filière (aucun giga-acteur ne produit ses propres cellules à 100%) et sur la mise en concurrence des différentes unités. Si un fournisseur s'avère plus performant que la filiale de l'entreprise, c'est le fournisseur qui sera privilégié. Pour un fabricant de modules européen, chercher à produire ses propres cellules n'est donc pas forcément la meilleure stratégie.

À ceci s'ajoute le fait que les besoins et les tailles critiques d'entreprises peuvent être très différents à chaque étape. Pour la purification du silicium, très énergivore,

la taille critique est de 20 à 50 GW. Pour la cristallisation des lingots, également énergivore, elle est de 10 à 20 GW. Le sciage des plaquettes, pour lequel la taille critique est également de 10 à 20 GW, demande moins d'énergie mais, en revanche, une main d'œuvre qualifiée. En ce qui concerne la fabrication des cellules, la taille critique est de 2 à 5 GW. Dans cette partie de la chaîne de valeur, de petits acteurs peuvent ainsi coexister avec de plus grands. En revanche, les usines, de type Seveso, ne peuvent pas être implantées partout et les technologies mises en œuvre requièrent une main d'œuvre qualifiée. Quant à la production de modules, elle nécessite de grandes surfaces pour la logistique et une main d'œuvre nombreuse. La taille critique est de 0,5 à 2 GW. Les modules étant des objets volumineux dont le prix ne cesse de baisser, il paraît souhaitable de répartir de petites unités de fabrication sur l'ensemble du territoire européen, afin de réaliser des économies sur la partie transport.

Quelle technologie?

Le panneau photovoltaïque est un objet *low tech*, au sens où l'on peut très facilement le poser dans son jardin et le raccorder à une prise électrique, mais il intègre de hautes technologies. Or, dans le cas de produits de haute technologie, les chefs de file industriels sont toujours des chefs de file technologiques. Tongwei et GCL sont devenus les principaux fabricants de polysilicium parce qu'ils ont su innover, l'un sur le recyclage en boucle fermée à l'intérieur de l'usine, l'autre sur la réduction des consommations d'énergie. De même, Longi a innové dans la purification du lingot de silicium, et TCL découpe ses wafers avec des fils diamant de 40 microns d'épaisseur, ce qui lui permet d'économiser énormément de matière. En Europe, plusieurs acteurs ont développé des innovations de rupture, comme Meyer et Enel sur l'hétérojonction, ou comme Oxford PV et Voltec Solar sur le tandem pérovskite.

L'innovation de rupture a cependant ses limites, et l'innovation incrémentale apparaît souvent comme l'une des clés de la réussite. L'Asie a conquis le marché de la plaquette par des évolutions dimensionnelles de quelques millimètres carrés qui ont permis aux modules de progresser d'une puissance unitaire de 330 W à plus de 700 W - et qui ont également rendu incompatibles, de manière systématique, l'ensemble des équipements.

Quelle taille de marché?

La taille du marché français est actuellement de 3 GW, et elle atteindra peut-être 7 GW demain. Le marché européen n'étant pas unifié, il nous est difficile de nous développer en dehors de l'hexagone: 90% de notre chiffre d'affaires sont réalisés en France. Par comparaison, la taille du marché chinois est de 150 GW.

Quelles mesures de soutien?

Pour soutenir une filière comme le photovoltaïque, il existe des mesures efficaces et autorisées (1), des mesures non efficaces et autorisées (2), des mesures efficaces et non autorisées (3), et enfin des mesures efficaces, autorisées mais non souhaitées (4).

Dans le premier quadrant, on trouve, notamment, la mise en place d'Induscore, un outil de transparence pour valoriser les étapes de fabrication en Europe.

Dans le deuxième quadrant, on trouve la Méthode CO₂, basée sur l'analyse de cycle de vie des producteurs, avec des labels tels qu'Écolabel, Écodesign ou Écomodulation. Cet outil a été efficace dans un premier temps, mais nos concurrents chinois savent de mieux en mieux justifier le fait qu'ils recourent à des procédés plus efficaces, moins consommateurs d'énergie et éventuellement plus propres que les procédés européens - en oubliant que la Chine continue à construire des centrales à charbon pour alimenter des usines photovoltaïques. Nous suggérons donc de faire évoluer cette méthode pour qu'elle soit basée sur les mix énergétiques continentaux, condition à laquelle elle pourra redevenir efficace.

Dans le troisième quadrant, on trouve une version de l'Induscore qui serait cette fois un outil discriminant (sachant que certains acteurs prétendent fabriquer en France alors qu'ils se contentent de faire du négoce de panneaux fabriqués en Chine), ou encore une TVA différenciée pour le contenu local des produits.

Enfin, dans le quadrant des mesures efficaces et autorisées mais non envisagées à ce jour, on peut citer l'utilisation du TCTF (*Temporary Crisis and Transition Framework*) pour couvrir l'écart tarifaire, la mise en place d'une taxe douanière anti-dumping ou des mesures de sauvegarde reposant sur des quotas d'import.

La stratégie de Voltec Solar

En partenariat avec l'IPVF, nous avons lancé récemment un projet d'innovation de rupture pour lequel nous avons été lauréats de France 2030 et avons reçu une aide de l'ADEME, ce qui va nous permettre d'installer une ligne pilote à l'IPVF.

Plutôt que de chercher à développer une chaîne de valeur complètement verticalisée, nous avons fait le choix de nous concentrer sur une brique technologique, le dépôt de couches minces de pérovskite sur du verre plutôt que directement sur les cellules (figure 5). Ceci nous évite de devoir maîtriser la chaîne de valeur de la cellule et nous donne accès à une industrialisation beaucoup plus rapide, mais aussi à une réduction de consommation de matériaux, avec notamment la possibilité d'utiliser du silicium provenant du recyclage. Enfin, la différenciation de notre

produit nous permet d'explorer des marchés de niche et de gagner en expérience avant d'attaquer le marché de masse, car il est très difficile d'entrer en compétition directe avec la Chine sur le marché de masse.

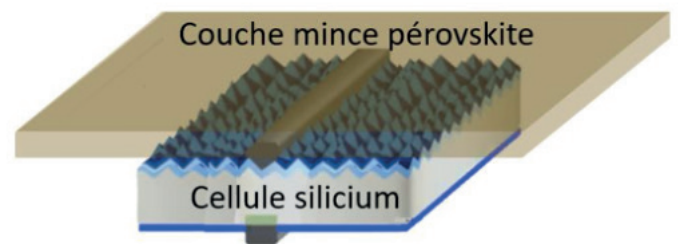


figure 5



Un risque de surproduction?

Avec un tel essor du photovoltaïque, ne risque-t-on pas d'être confronté, en été, à une surproduction d'électricité considérable?

Daniel Lincot : L'économie va s'adapter très vite à cette manne énergétique, qui sera utilisée par des secteurs émergents comme la production d'hydrogène, la transformation du CO₂ ou encore la chimie solaire, sans parler du stockage inter-saisonnier de chaleur. À défaut, en cas de surproduction, des prix négatifs permettront d'équilibrer la situation.

L'état de la recherche en Europe et en Chine

Comment se situe la recherche française et européenne sur les matériaux III-V et les pérovskites par rapport à la recherche chinoise?

Pere Roca I Cabarrocas : En matière de recherche, nous faisons jeu égal. En revanche, nos concurrents chinois sont en avance pour l'industrialisation. Ils sont déjà capables de produire des modules d'un mètre carré, ce qui nous conforte dans le choix de ces technologies. Nous devons accélérer la mise en œuvre de notre ligne pilote et son transfert industriel.

L'amélioration du rendement

Vous combinez trois objectifs, l'accélération de la recherche, l'amélioration du rendement et la baisse des coûts. Ce troisième objectif me paraît indispensable, mais quel marché visez-vous avec l'amélioration du rendement : des niches seulement, ou les marchés de masse ?

Pere Roca I Cabarrocas : Nous visons les marchés de masse. En augmentant le rendement, nous diminuons le volume de matériaux nécessaire.

Commentaire d'une personne de l'auditoire : On peut s'attendre à une évolution des réglementations, qui imposeront des contraintes plus sévères sur la consommation d'énergie et l'émission de CO₂ lors de la production, voire sur l'utilisation des matériaux bruts.

La valeur ajoutée des cellules photovoltaïques

Pour un ingénieur, il est beaucoup plus passionnant de mener des recherches sur les cellules que de travailler à l'industrialisation efficace et à faible coût des modules. Pourtant, dans le coût complet d'une installation photovoltaïque, la valeur ajoutée des cellules ne représente pas grand-chose. N'est-on pas en train de prendre le problème à l'envers ? Ne risque-t-on pas, une fois de plus, de développer des technologies qui seront ensuite industrialisées en Chine, au Japon ou aux États-Unis ?

Lucas Weiss : Je vous confirme que 95% des coûts d'une installation photovoltaïque concernent l'aval de la cellule.

Le souhaitable, le possible, le nécessaire

Gérard Creuzet : En définitive, est-il souhaitable de relancer le photo-voltaïque en France, ou vaut-il mieux abandonner cette industrie à la Chine ? Par ailleurs, à supposer que ce soit souhaitable, est-ce possible ?

Xavier Daval : Nous n'avons pas vraiment le choix. Le photovoltaïque sera l'énergie du XXI^e siècle, non seulement en France, mais en Afrique, par exemple. Les marchés qui s'ouvrent sont immenses. Nous ne pouvons pas en être absents.

Lucas Weiss : Je crois, moi aussi, que c'est tout à fait souhaitable, même si ce sera très difficile, compte tenu de la concurrence exacerbée de la Chine. Nous allons cependant nous heurter à la même concurrence dans tous les autres secteurs industriels. Le cas du photovoltaïque peut constituer un exercice sur la façon dont nous pouvons réussir à protéger notre industrie européenne. Il pourra ensuite servir de modèle pour d'autres industries, comme l'automobile.

Daniel Lincot : L'humanité a désormais à sa disposition une énergie illimitée, et elle a enfin mis au point des outils efficaces pour recueillir cette énergie. Nous ne pouvons pas espérer construire une stratégie industrielle en oubliant l'un des composants essentiels du système.

Mots-clés : autoconsommation, cellules photovoltaïques, communauté d'énergie renouvelable, matériaux III-V, modules photovoltaïques, pérovskite, rendement des cellules photovoltaïques, solarisation des toitures.

Citation : Daniel Lincot, Gérard Creuzet, Pere Roca I Cabarrocas, Xavier Daval, Diane Lescot & Lucas Weiss. (2024). *Photovoltaïque*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Patrick Pélatà. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. n° ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.