

CONTRIBUTION FRANCE 2030

POUR LE DEVELOPPEMENT DE PRODUCTIONS INDUSTRIELLES DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN FRANCE ET EN EUROPE

Le contexte

- Demande : L'électricité photovoltaïque (PV) contribue à l'indépendance énergétique et va jouer un rôle croissant durant le XXI^e siècle. Dans cette optique, un très fort développement de la production d'électricité PV est envisagé par l'AIE sur la décennie à venir. Selon le scénario Net Zero Emission (NZE) cette production serait multipliée par 7 au niveau mondial et par 3 au niveau européen. La production électrique mondiale en 2021 a été de 28 334 TWh dont 1003 TWh de PV, soit 3,5 %. Selon le scénario NZE en 2030, la production atteindra 37723 TWh dont 7552 TWh de PV, soit 20 % et en 2050, 73231 TWh dont 27000 TWh de PV, soit 37 % sont prévues. De plus, la demande liée à une première installation ou à un renouvellement de l'équipement devrait durer largement au-delà de 2050.
- Offre : Aujourd'hui, la production des composants sur la totalité de la chaîne de valeur est très largement dominée par la Chine (80 %) et, dans une moindre mesure, par l'Asie du sud-est (18 %). Une augmentation soutenue de la capacité de production chinoise est prévue pour accompagner la croissance de la demande, et ce, avec les technologies récentes principalement basées sur le silicium, semble t'il. D'un point de vue historique, l'Europe a été un acteur industriel significatif jusqu'à environ 2010. En quelques 10 années, la production européenne a stagné, puis est devenue marginale pour atteindre 0,9 % du total en 2021. Cet effondrement industriel a été d'une rare brutalité.
- La domination chinoise est particulièrement marquée sur l'amont de la chaîne : la production du silicium, sa purification, la production de monocristaux et la découpe en galettes. Elle diminue progressivement vers l'aval (voir Figure 1). La production mondiale de modules était de 175 GW en 2021.

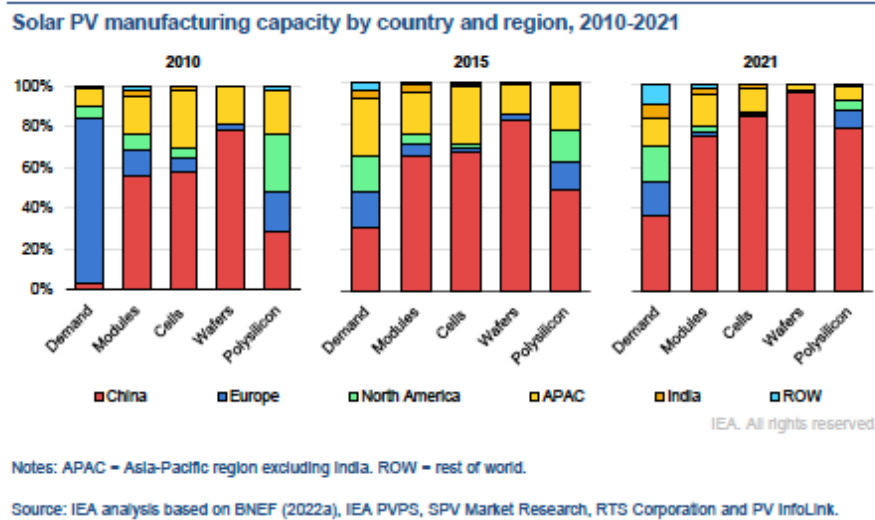


Figure 1 — Répartition géographique de l'industrie photovoltaïque
(d'après Special report on Solar PV Global supply chains, IEA, August 2022)

Les technologies disponibles

Aujourd'hui, les technologies basées sur l'utilisation de galettes de silicium, majoritairement monocristallines, dominent la production à près de 95 %. La recherche de la performance a définitivement imposé la technologie monocristalline pour le marché des cellules photovoltaïques. Les 5 % restant sont occupés par les technologies dites couches minces (CdTe 4,4 %, CIGS 0,8 %). La production de galettes de silicium est complètement maîtrisée à très grande échelle.

Le rendement des modules s'est amélioré de manière continue passant en valeurs moyennes de 14,7 % en 2010 à 20,9 % en 2021, avec 26,7% pour record au niveau d'une cellule. La technologie PERC (Passive Emitter and Rear Cell) est aujourd'hui majoritaire.

Des évolutions technologiques continuent d'apparaître (cellules hétérojonction [HJT] ou TOPCon) — voir Figure 2, toujours basées sur des galettes de silicium (on dit souvent wafer). Elles utilisent essentiellement les mêmes lignes de production. De nouvelles lignes prévues dans les 5 prochaines années visent la production de cellules avec ces technologies.

Parallèlement, une nouvelle technologie en couches minces est apparue ces dernières années, la filière pérovskite, dont les rendements record atteignent déjà plus de 25 % et qui fait l'objet d'efforts d'industrialisation accélérée.



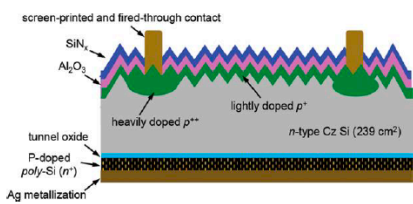
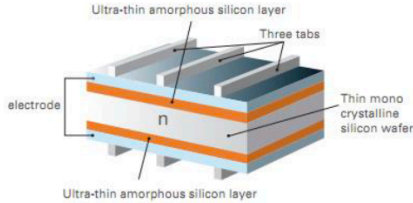
Cell cross-section/schematic (not to scale)	Description and market status
	<p>Full Area Passivated Cell: the bottom of the wafer is given a thin-film structure that passivates and serves as a conductive contact to the cell. This eliminates (i) the need for diffusion or implantation doping of the wafer and (ii) complicated patterning of selective emitter/BSF. This technology is just emerging in large-scale production</p>
	<p>Heterojunction (HJT) Cells: An ultra-thin layer of amorphous silicon is deposited on the front and back surfaces of a mono, n-type wafer. This can also be combined with IBC contacting for the very highest efficiency Si cells. Previously a niche product, but now being developed for large scale production by several manufacturers</p>

Figure 2 : architectures TOPCon (en haut) et HJT (en bas). Les deux sont basées sur de galettes de silicium. (d'après Photovoltaics technology Development report, JRC, EUR 30503 EN, 2020)

Les évolutions à venir présentant des ruptures sont :

- L'émergence de la filière couches minces pérovskite qui pourrait faire l'objet d'une production de modules autonome.
- Des cellules tandem silicium-pérovskite permettant de récupérer une plus grande part du spectre solaire. Il s'agit de l'option actuellement préférée. Ces cellules seraient, à un horizon d'au moins 15 ans, basées sur des galettes de silicium, soit en dépôt direct (technologie dite à 2 terminaux), soit en ajoutant un verre portant une couche mince de pérovskite au-dessus (dite à 4 terminaux). Il est vraisemblable que la technologie à 4 à terminaux puisse être mise en œuvre plus rapidement.
- L'évolution des technologies couches minces photovoltaïques CdTe et CIGS ne nécessitant pas des galettes de silicium.
- Le développement d'une technologie tandem en couches minces du type CIGS-perovskite pouvant être implantée sur des supports flexibles.
- L'utilisation d'autres semi-conducteurs, notamment les III-V (concentration, tandem avec silicium)
- Le développement d'une filière photovoltaïque organique, probablement à plus long terme.
- Il faut être attentif aux ruptures possibles pour l'obtention de galettes de silicium par des voies d'épitaixie. Ceci lèverait les verrous des étapes d'obtention de monocristaux et de sciages.

Les points clés et les contraintes

Pour des technologies basées sur des galettes de silicium, le point le plus critique est la partie amont, de la purification du silicium, au découpage des galettes, en passant par la production de lingots et de monocristaux (voir Figure 3). Une grande partie de la valeur ajoutée est là et, aujourd'hui, la Chine produit 96 % des galettes utilisées, créant une dépendance face à ce pays et une forte fragilité de la chaîne de production. Ainsi, 40 % de la production chinoise de silicium purifié (SOG – polysilicon) est concentré dans la province de Xinjiang. A ces points clés géopolitiques et industriels s'ajoutent des contraintes énergétiques, écologiques et technologiques.



En effet, cette partie amont nécessite une consommation électrique très importante, le point de fusion du silicium étant à 1414 °C. Ainsi, la disponibilité d'électricité abondante, peu coûteuse et peu carbonée est essentielle. En outre, en ce qui concerne les modules, les contacts électriques se réalisent encore avec de l'argent bien que la tendance actuelle serait de le remplacer par du cuivre). Notons enfin l'utilisation de l'indium dans les nouvelles structures de type HJT, qui nécessitera d'être maîtrisée.

A l'inverse, il est important de garder à l'esprit que la contrainte énergétique est nettement réduite pour les technologies purement à base de films minces qui ne dépendent pas du silicium.

La Figure 3 ci-après résume les étapes de fabrications des panneaux et la répartition de la production mondiale.

Chaîne de production : du quartz au module assemblé

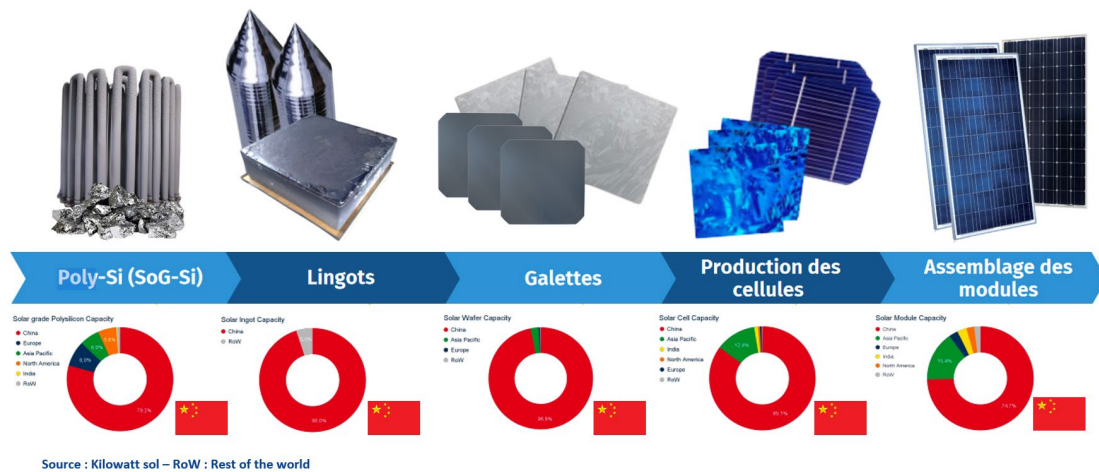


Figure 3 : les étapes du silicium de qualité PV aux galettes avec répartition par pays producteurs (document kiloWattsol)



La situation de l'industrie européenne

	Silicium Solaire	Lingots et galettes	Cellules Solaires	Modules solaires
Expertise				
Part de marché	~11% ~12%	~1% ~4%	<1% ~4%	~3% ~5%
Projet d'expansion jusqu'en 2025 - ETI	<ul style="list-style-type: none"> Wacker 53 GW en 2025(+25.4) 	<ul style="list-style-type: none"> NorSun 53 GW en 2025(+25.4) (lingotières et wafers) Norwegian Crystal 4,1 GW en 2025 (+3,6) (Lingotière) Nexwafe 3 GW en 2025 (+2,8) (Wafers) 	<ul style="list-style-type: none"> Meyer Burger 4,2 GW en 2025 (+3,8) Enel 3 GW en 2024 (+2,8) Oxford PV 2 GW en 2024 (+1,8) Valoe 0,1 GW en 2024 (+0,1) 	<ul style="list-style-type: none"> Meyer Burger 4,1 GW en 2025 (+3,8) Enel 3 GW en 2024 (+2,8) Oxford PV 2 GW en 2024 (+1,8) Voltec Solar 0,5 GW en 2023 (+0,3) SoliTek 0,1 GW en 2023 /2024 (+0,1) SolarWatt 2 GW en 2023 (+1,7)
Projet d'expansion jusqu'en 2025 - Start-ups		<ul style="list-style-type: none"> CARBON 5 GW en 2025(+5) (lingotières et wafers) Astrasun Solar 1,8 GW en 2025 (+1,8) (lingotières et wafers) 	<ul style="list-style-type: none"> CARBON 5 GW en 2025(+5) Astrasun Solar 1,8 GW en 2025 (+1,8) MCPV 5+ GW en 2025 (+5) 	<ul style="list-style-type: none"> CARBON 3,5 GW en 2025(+3,5) Astrasun Solar 3,5 GW en 2025 (+3,5) MCPV 5+ GW en 2025 (+5)
Total annoncé	~30 GW	~15-20 GW	~20GW	~20GW
Besoins en Investissements	~€3bn ~€120m/GW	~€0,8bn ~€85m/GW	~€1,7bn ~€85m/GW	~€1,9bn ~€80m/GW

Figure 4 : les principaux acteurs européens de la purification jusqu'aux modules

Source : McKinsey & Company, Building a competitive solar-PV supply chain in Europe, Dec. 13, 2022

La figure 4 montre que le tissu industriel sur l'ensemble de la chaîne de production du PV, existe encore en Europe, même si ces entreprises sont sous-dimensionnées par rapport aux entreprises chinoises et ne bénéficient pas vraiment d'effet d'échelle. Il faut noter que Wacker est un des leaders mondiaux pour la production du silicium de qualité PV. La production de monocristaux et de galettes est concentrée en Norvège. Pour le production de cellules et modules, on peut citer Meyer Burger, Enel et Oxford PV. Toutefois, il semble qu'au moins une partie de la fabrication des équipements, notamment les creusets et les scies à fil diamantées, reste concentrée en Chine.

Résumé de la situation

A partir des nombreux rapports disponibles, on peut affirmer que :

- Une très forte croissance de la demande est attendue tant pour obtenir de l'électricité bas-carbone que pour contribuer à l'indépendance énergétique. De plus cette croissance sera durable puisque la durée de vie des panneaux est de l'ordre de 20 à 25 ans, créant ainsi un marché de renouvellement.
- Pour la France, partant de 13 GW de solaire en 2021, si l'on vise 100 GW en 2050, hypothèse moyenne dans les scénarios RTE, il conviendra alors d'installer environ 3 GW par an. En outre, le remplacement des panneaux déjà installés augmentera aussi petit à petit. Avec une durée de vie de 20 à 25 ans des installations, on arrive à un besoin moyen de 4 GW/an environ à la fin de la décennie (ceci qui constitue près de 3 EPR en termes de puissance, mais seulement 1/2 EPR environ en termes de production électrique annuelle).



- Sans actions très volontaristes en Europe, comme celles des Etats-Unis (voir appendice 1), c'est l'industrie chinoise qui profitera le plus de cette croissance. Ceci renforcerait la position dominante de la Chine et entamerait fortement la souveraineté de l'Europe. Ainsi, de 2017 à 2021, les exportations de produits PV correspondent à 7 % du surplus de la balance commerciale chinoise alors que les importations de ces mêmes produits correspondent à 2 % du déficit commercial français).
- Pendant au moins 15 ans les technologies dominantes seront à base de galettes de silicium, y compris pour les cellules tandem silicium/pérovskite.

Sur la base de ces considérations, des initiatives européennes et américaines se mettent en place. Il est indispensable que les initiatives européennes aboutissent à l'installation de moyens de production significatifs.

Il faut également signaler que la production chinoise s'effectue à partir d'électricité fortement carbonée. Les panneaux photovoltaïques y sont fabriqués avec une électricité qui contient en moyenne 600 gCO₂/kWh). Dans cette optique, une taxe CO₂ aux frontières européennes pourrait avoir un impact sur la compétitivité de certaines importations.

Atouts et faiblesses européennes

Atouts

- Une puissance d'achat importante, mais non coordonnée.
- Une maîtrise compétitive de la partie amont du processus en Europe du Nord, notamment grâce à une électricité peu coûteuse et bas-carbone (en Norvège 10 gCO₂/kWh par exemple, environ 50 gCO₂/kWh France).
- Un tissu industriel largement en place, mais sous-dimensionné.
- Un écosystème de centres de recherche et d'entreprises compétentes sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Faiblesses

- Pas de stratégie industrielle au niveau de l'Europe.
- Des achats fragmentés ce qui ne permet pas de structurer l'industrie de l'offre.
- Un tissu industriel fragmenté et une absence de grands industriels ayant les moyens d'investir dans de grandes unités de production (de la classe 2 GW/an au moins) largement automatisées, conditions indispensables pour assurer la compétitivité de l'offre.
- Un coût de l'électricité non compétitif (hors Norvège).
- Un risque de dumping des sociétés chinoises dès qu'une offre européenne sera opérationnelle.

Recommandations

A l'échelle européenne

L'Europe doit se doter sans attendre de moyens de production significatifs pour l'amont de la chaîne de production des cellules silicium. Il s'agit de la production du silicium, de son extraction, à sa purification, puis à la production de lingots et de monocristaux, et enfin leur découpe en galettes. Ceci



nécessite un capex important et de l'électricité peu coûteuse, les leaders en Europe se situant en Norvège.

De plus, un tel investissement permettrait aussi de réduire la dépendance de l'industrie des composants électroniques aux importations des substrats qui lui sont nécessaires, ce qui renforce d'autant l'intérêt d'un tel investissement.

Aux échelles nationales, en France notamment

- La partie aval (cellules, modules et panneaux) peut être produite dans plusieurs pays, avec des technologies différentes, sur la base de galettes de silicium. Cependant, pour être compétitives, ces industries doivent produire des cellules à haut rendement, et donc utiliser les technologies de pointe (hétérojonction et TOPCon).
- Sans attendre, il semble important de développer et d'industrialiser les technologies tandem, notamment à base de pérovskite (celles-ci augmentent en effet immédiatement le rendement) sans changements industriels majeurs, associées avec des cellules hétérojonction ou TOPCon. Dans ce cadre, une attention particulière aux projets déposés lors des appels d'offres nationaux et européens actuels semble s'imposer.
- Cela implique également de développer les technologies couches minces qui à l'exemple des pérovskites, peuvent s'avérer décisives dans l'évolution du photovoltaïque et la compétitivité européenne à plus long terme.
- Il faut aussi développer, encourager et structurer la partie post-panneaux, c'est-à-dire les fabricants de composants électriques et de structures, les intégrateurs et assembleurs, les installateurs et les gestionnaires de fermes PV.
- Finalement, en plus de la promotion d'industries de production, il faut maintenir l'effort de R& D, car les technologies continuent à évoluer et le secteur est très concurrentiel.

Ces étapes d'industrialisation peuvent être menées en parallèle. Pour commencer, la partie aval (cellules de dernières technologies) peut être réalisée sur la base de galettes importées. Ensuite, une production européenne pourrait progressivement remplacer ces importations.

Au moins deux conditions semblent nécessaires pour réussir le développement d'une industrie photovoltaïque :

- 1- **A l'instar de ce que font ses concurrents, l'Europe doit envisager de mettre en place des politiques interventionnistes et de protection pour permettre un redémarrage d'une industrie (voir par ex. Appendice 1 sur la démarche des Etats-Unis et Appendice 2 sur les aides en place ou prévues en Chine, en Europe, aux Etats-Unis et en Inde). Ceci signifie spécialement d'agir en termes de subventions, de droits de douanes et de politique d'achats publics. Noter en particulier que les panneaux photovoltaïques sont fabriqués en Chine avec une électricité qui contient en moyenne 600 gCO₂/kWh.**
- 2- **Une politique européenne claire et stable pour l'énergie, associée à un prix compétitif de l'électricité, est une condition nécessaire pour la visibilité des investissements à long terme. Une incitation de la France auprès de grands industriels nationaux de l'énergie et de l'électronique à s'impliquer dans la production des cellules serait très souhaitable.**



Sources principales :

Special report on Solar PV Global supply chains, IEA, August 2022

Taylor, N., Jäger-Waldau, A., *Photovoltaics Technology Development Report 2020*, EUR 30,504 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2020, ISBN 978-92-76-27274-8, doi:10.2760/827685, JRC123157.

Chatzipanagi, A., Jaeger-Waldau, A., Cleret de Langavant, C., Letout, S., Latunussa, C., Mountraki, A., Georgakaki, A., Ince, E., Kuokkanen, A. and Shtjefni, D., *Clean Energy Technology Observatory: Photovoltaics in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/812610, JRC130720.

SolarPower Europe (2021): *EU Market Outlook for Solar Power 2021–2025*

McKinsey & Company, *Building a competitive solar-PV supply chain in Europe*, Dec. 13, 2022

Les sites des instituts de recherche sur le PV sont également particulièrement riches en information

<https://www.ipvf.fr/fr/>

<https://www.ines-solaire.org/en/ines-2s/>

<https://www.ise.fraunhofer.de/en.html>



Appendice 1 – Mesures américaines

Les Etats-Unis ont mis en place une série de mesures permettant un soutien à l'industrie PV et des incitations fortes pour l'achat de cellule « made in USA ». Par exemple :

- Achat local par l'État fédéral : "The United States has also encouraged U.S. PV manufacturing using federal procurement. Part of this is simply increasing domestic solar demand, helped by GW-level commitments by each of the armed forces."
- Soutien direct des Pouvoirs publics à l'investissement dans le Manufacturing via des mesures financières, fiscales et foncières : "At state and municipal levels, policies intended to support domestic PV manufacturing have included grants, tax exemptions, land provision, and consumer incentives for purchasing domestic PV products" (B. L. Smith et al. 2021; Feldman, Smith, and Margolis 2020).
- Obligation de 50 % contenu US pour les projets d'aide au développement : "The United States Agency for International Development (USAID) requires that at least 50% of renewable energy technology procured be manufactured in the United States (CRS 2021)."
- Crédit d'impôt sur l'investissement de production.
- Taxation (imports).
- Withhold release Order.
- Uyghur Forced Labor Prevention Act.

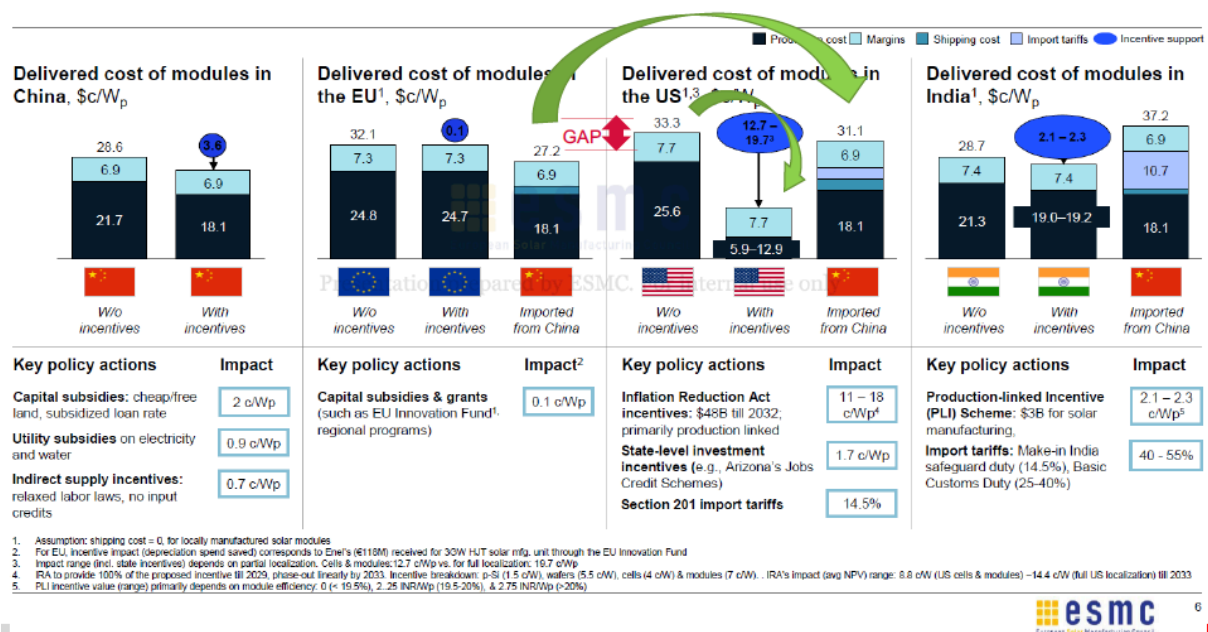
Withhold release Order: US imports from locations and businesses known to use forced labour will be detained at the port of entry under Withhold Release Orders. This means that the goods will automatically go on detention at the time of importation.



Appendice 2– Impact des subventions

Comme le montre la figure ci-dessous, les écarts de prix des modules entre l’Europe et ses concurrents, grâce aux subventions, sont très considérables.

En particulier, on notera qu’en raison de l’Inflation Reduction Act, les subventions à la production et les tarifs douaniers à l’importation, rendent le coût des modules américains très concurrentiels par rapport aux produits chinois, ainsi que par rapport aux produits européens.



L’European Solar Manufacturing Council (ESMC) a soumis des propositions à l’UE fin novembre 2022 pour permettre à une industrie européenne du PV de se développer face aux subventions d’autres pays.

Voir : https://esmc.solar/wp-content/uploads/2020/08/Letter_ESMC-MILESTONE-PROPOSALS-FOR-THE-EU-SOLAR-PV-INDUSTRY-ALLIANCE.pdf

et

<https://esmc.solar/wp-content/uploads/2020/08/ESMC-MILESTONE-PROPOSALS-FOR-THE-EU-SOLAR-PV-INDUSTRY-ALLIANCE.pdf>

Appendice 3– Actions européennes en soutien du photovoltaïque

Dans un premier temps, les programmes et projets semblent surtout viser une recherche amont avec peu de retombées en termes d’industrialisation :

- Horizon 2020
- SOLAR – ERA.NET
- EURAMET, programmes EMPIR et PV-ENERATE
- Actions COST



24/01/2023

- EIT Innoergy
- EIB InnovFin
- NER-300

Plus récemment, il faut signaler :

- REPowerEU
- European Solar Photovoltaic Industry Alliance

REPowerEU est un vaste programme pour réduire l'utilisation de carburant fossile dans l'UE, notamment du gaz naturel d'origine russe. Il comporte un volet sur les énergies renouvelables. Il prévoit en particulier une augmentation du PV nouvellement installé de 320 GW d'ici 2025 et de presque 600 GW à l'échéance de 2030. Un objectif de capacité de production européenne de 30 GW en 2025 est annoncé.

En ce qui concerne ***l'European Photovoltaic Industry Alliance***, les objectifs sont présentés ci-dessous.

It will focus its work on:

- *Ensuring investment opportunities for European solar PVs:* by mapping investment opportunities and creating project pipelines of bankable projects. It aims to attract private investments to develop and commercialize innovative and competitive PV products made in Europe. As a priority, it will work on aligning EU, national and private investments, including the National Recovery and Resilience Plans.
- *An enabling environment for European solar PVs:* by addressing barriers such as the need for simplified permitting procedures for new manufacturing sites or securing the supply of raw materials and components needed in production. The Alliance will also support sustainability and circularity across the value chain, identify leading innovations, including through EU-funded research as well as work on tackling labour and skill shortages in the sector. Finally, it will help to stimulate demand by encouraging the use of non-price criteria in public actions.
- *Diversifying supplies and building resilience in the supply chain:* by finding alternative suppliers, partners and off-takers via existing and future partnerships, dialogues and trade foray to further reduce Europe's current dependencies.