

DOMAINE ÉNERGIE

DÉVELOPPER DES GIGAFABRIQUES DE TECHNOLOGIES SOLAIRES DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Construire des gigafactories de production cellules hétérojonction et tandem
(perovskites hybrides et multi-jonction III-V)

01

La filière photovoltaïque française est aujourd'hui très affaiblie sur les technologies matures (silicium cristallin et couche mince) face à une compétition asiatique écrasante

Les objectifs solaires ambitieux à horizon 2030 (entre 35 et 44 GW pour 2028 contre 13,2 GW en 2021) nécessitent des choix stratégiques entre le rattrapage technologique sur les technologies matures et l'industrialisation des technologies nouvelle génération.

La France est dans une situation de forte dépendance à la fois en termes de ressources critiques (la Chine contrôle 71% de l'extraction / production primaire) et **en termes d'importations de cellules et modules PV** (déficit commercial enregistré en 2020 sur les panneaux solaires de 6,2 milliards d'euros, dont 75% proviennent de Chine).

03

Le manque de partenaires et la nécessité pour ces acteurs d'être protégés d'une concurrence internationale déloyale pèse sur la mise en place de projets d'industrialisation

La chaîne de valeur solaire française est très fragilisée sur la partie aval avec peu d'entreprises leader françaises de panneaux solaires et très peu de producteurs de cellules en elles-mêmes. Les fabricants français seuls n'ont pas les capacités pour mettre en place des projets d'industrialisation à grande échelle des technologies de rupture.

Les acteurs demandent une protection nécessaire de leurs investissements dans la cadre d'une concurrence internationale agressive sur les prix.

02

Un repositionnement sur les technologies de nouvelle génération (cellules hétérojonction et tandem avec notamment l'usage du pérovskite) permettrait de regagner en souveraineté sur la filière photovoltaïque

La France dispose des technologies hétérojonction et tandem grâce à des clusters et programmes de recherche phares (IPVF, INES-CEA). Ces technologies de rupture représentent donc une opportunité de recréer une nouvelle chaîne de valeur compétitive.

Cela passe par la mise en place de **partenariats entre la recherche et l'industrie** pour permettre le passage à l'échelle des technologies de nouvelle génération.

04

Il est crucial de mobiliser un écosystème qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur et a les capacités de soutenir le passage à l'échelle de ces technologies

Le cadre législatif doit évoluer au niveau français mais surtout européen pour valoriser la qualité du processus de fabrication et l'empreinte carbone des technologies produites.

Les fabricants français doivent être soutenus par la mise en place de consortiums d'acteurs de manière à sécuriser les financements. Il est donc nécessaire d'identifier les partenaires potentiels français et européens disposant des compétences pour porter les projets de passage à l'échelle (énergéticiens, acteurs d'autres secteurs (bâtiments) etc.).

UNE INDUSTRIALISATION MASSIVE DES TECHNOLOGIES DE RUPTURE INDISPENSABLE AU REGAIN D'UNE SOUVERAINETÉ FRANÇAISE SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Périmètre technologique

Description : Le marché solaire est dominé par les technologies au silicium cristallin (95% du marché) et couche mince (5%)⁽³⁾. Les limites techniques des cellules en silicium cristallin en termes de rendement (30% max) et la domination de ce marché par la Chine incitent au développement massif de nouvelles technologies solaires : cellules hétérojonction et tandem avec notamment l'usage du pérovskite.

Ces technologies de rupture représentent une opportunité pour la France / l'Europe, qui disposent du savoir-faire, de mettre en place une nouvelle chaîne de valeur compétitive.

Maturité technologique

Stade : **Accélération et passage à l'échelle**

Cellules à hétérojonction (SHJ)	TRL 3-6
Cellules pérovskites hybrides (tandem)	TRL 2-4
Cellules multi-jonction III-V (tandem)	TRL 1-4

ETAT DES LIEUX

- **Engagement politique :** des objectifs ambitieux qui nécessitent des choix stratégiques entre rattrapage technologique et industrialisation des innovations **Objectifs pour le photovoltaïque fixés dans les Programmes pluriannuels de l'énergie (PPE) pour 2023 (20,1 GW) et 2028 (entre 35 et 44 GW)⁽¹⁾ (capacités installées de production photovoltaïque)⁽¹⁾.** Actuellement en France, le solaire représente 2,5% de la production d'électricité (Ministère de la Transition Écologique, 2020). Mécanismes de soutien public à la R&D renforcés avec France 2030 et le Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) pour le développement du photovoltaïque lancé en mai 2022 au niveau européen.
- **Acceptabilité :** une filière photovoltaïque qui jouit d'une bonne acceptabilité **Bonne image auprès de l'opinion publique** (selon le Baromètre les français et l'environnement de l'ADEME 2021, l'énergie solaire est l'énergie renouvelable qu'une majorité de français souhaite voir se développer). **Impact environnemental limité** sur la biodiversité et les paysages et risque moindre de conflit d'usage sur le foncier (agrivoltaïsme).
- **Compétences & savoir-faire :** une technologie développée en France sur laquelle il faut capitaliser et se positionner en tant que leader pour regagner en souveraineté **La France dispose des technologies hétérojonction et tandem grâce à des clusters et programmes de recherche phares** (IPVF, INES-CEA). L'enjeu réside désormais dans la mobilisation des compétences françaises (et européennes) pour industrialiser massivement la production de ces cellules.
- **Réseau existant de partenaires :** un réseau français soutenu au niveau européen pour relancer la filière et retrouver une indépendance technologique **Relations développées entre les acteurs français de la recherche et les réseaux Enerplan** (Syndicat

des professionnels de l'énergie solaire), Syndicat des EnR (SER) ou encore le Comité Stratégique de Filière (CSF) qui regroupe les acteurs français de toute la filière.

Réseaux européens : *European Solar Initiative* initié par EIT InnoEnergy, *SolarPower Europe*, *European Technology & Innovation Platform (ETIP PV)* et *European Solar Manufacturing Council*.

- **Structuration macro de la chaîne de valeur et du territoire :** une filière française affaiblie sur la fabrication de cellules et modules photovoltaïques Ces difficultés ne relèvent pas tant d'un manque en termes d'infrastructures que d'un **essoufflement des acteurs français et européens face à la compétition écrasante asiatique.** **Les difficultés d'approvisionnement** en silicium entraînent également une forte dépendance française aux importations : disponibilité des ressources françaises insuffisante, dépendance forte au silicium chinois.
- **Voies de commercialisation :** des partenariats fondamentaux entre recherche et industrie pour permettre le passage à l'échelle des technologies de nouvelle génération **Partenariats structurés** tel que l'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF) pour innover et tester rapidement les technologies cibles et lancer une dynamique de filière en mutualisant les efforts.
- **Leviers de déploiement et voies d'industrialisation :** une industrialisation des technologies de rupture est en train de se mettre en place. Les fabricants français doivent être impliqués dans l'accélération de l'industrialisation des technologies de nouvelle génération **Manque de lignes d'industrialisation pilotes pour les technologies tandem.** L'identification et l'implication des industriels français qui ont les compétences pour développer ces projets sont en cours. Projets de gigafactories prévus pour 2025.

Capacité solaire installée en France

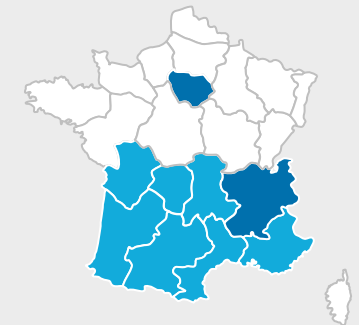
Objectif : 20,1 GW de capacité solaire installée en 2023 et **entre 35 et 44 GW en 2028⁽¹⁾**

Capacité raccordée au réseau à la fin de 2021 : **13,2 GWc⁽²⁾**

Zones d'implantation privilégiées

L'implantation des usines de production sera fonction des conditions d'accueil des régions.

Dans une logique de circularité, possibilité de s'implanter dans les zones à fort déploiement photovoltaïque.



Organismes de recherche et d'innovation

Zones de capacité solaire très développée

UNE FILIÈRE FRANÇAISE TRÈS AFFAIBLIE SUR LA FABRICATION DE CELLULES ET MODULES PV ET UN MANQUE DE PARTENAIRES POUR LA MISE EN PLACE DE PROJETS D'INDUSTRIALISATION

ÉVALUATION DE L'ÉCOSYSTÈME

La chaîne de valeur solaire française est très fragilisée sur la partie aval, en particulier sur l'extraction et l'affinage de silicium et sur la production de cellules et modules photovoltaïques. Cela impacte la souveraineté française sur la filière solaire et limite le choix de partenaires dans la mise en place de projets d'industrialisation.

Des partenariats fondamentaux entre recherche et industrie se mettent en place. Ils sont à consolider pour permettre le passage à l'échelle des technologies de nouvelle génération.

- **IPVF** : cluster de R&D qui est un exemple parfait de collaboration entre la recherche et l'industrie, créé à l'initiative d'EDF et de TotalEnergies. Mise en place de projets d'industrialisation des technologies tandem développées en laboratoire en cours.
- **CEA-Liten** : accord de collaboration avec l'équipementier suisse Meyer Burger pour le développement de la technologie hétérojonction et partenariat avec ENEL Green Power pour le développement de PV hétérojonction (1^{ère} ligne européenne de production industrielle inaugurée en 2019 à Catane, 200 MW/an, objectif de 3 GW/an).

Equipementiers d'extraction des matériaux (silicium) et affinage	Organismes de recherche et d'innovation	Fabricants de cellules et de modules	Intégrateurs – Exploitants de parcs photovoltaïques
<p>La France n'a pas les capacités pour être indépendante sur l'approvisionnement en silicium.</p> <p>La Chine est l'acteur majeur, contrôlant 71% de l'extraction / production primaire(4).</p>	<p>La France dispose de programmes de R&D de référence mondiale (avec l'IPVF - exemple majeur de collaboration entre la recherche et l'industrie) mais peine à industrialiser les technologies de nouvelle génération sur son territoire.</p>	<p>Peu d'entreprises leader françaises de panneaux solaires et encore moins de producteurs de cellules en elles-mêmes.</p> <p>Le marché solaire européen a été mis en difficulté par la concurrence chinoise qui représente environ 70 % de la production photovoltaïque mondiale. D'autres projets européens voient le jour (NEXUS au Royaume Uni sur les technologies HJT/pérovskite)</p>	<p>On retrouve des acteurs historiques et des pure players français avec de grandes capacités ainsi que des petits acteurs / nouveaux entrants. Intégration à la marge de projets par des acteurs étrangers (BayWa. r.e (All), Res (UK)).</p> <p>La majorité des acteurs sont présents sur la fourniture d'électricité.</p>
<p>Exploitants chinois avec de très grosses usines de production : GCL, Xinte Energy, Daqo, Tongwei et East Hope</p> <p>Acteurs actifs en France : Ferropem silicium métal (activités en baisse), Imerys Ceramics France</p> <p>ECM Greentech : fabricant de fours pour la production de lingots de silicium</p>	<p>CEA-Liten et l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) : recherche sur les cellules hétérojonctions et tandem</p> <p>Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF) : partenariat entre l'industrie et la recherche avec 2 programmes de recherche dédiés aux cellules tandem pérovskites et multi-jonction III-V</p>	<p>Leaders chinois : Jinko Solar, Trina Solar, JA Solar, Longi Solar, GCL</p> <p>Producteurs français de panneaux solaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ REcom-Sillia (projet hétérojonction) ▪ Systovi ▪ Voltec Solar ▪ Photowatt ▪ VMH (diversification par rapports aux modèles classiques) ▪ Sunpower 	<p>Acteurs français avec une importante capacité PV</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Engie (Solaire Direct) ▪ Total Energies ▪ EDF ENR ▪ Reden ▪ Akuo Energy ▪ CVE ▪ NEOEN <p>Capacité intermédiaire et petite</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Valorem ▪ Voltalia ▪ Valeco ▪ Technique Solaire ...

IPVF Programme 2 - module tandem industrialisable pérovskite-sur-silicium⁽⁵⁾

Parties prenantes	Partenaires de l'IPVF (EDF, Total, Air Liquide, Horiba, Riber, CNRS, l'École polytechnique); CEA INES
Localisation	Palaiseau (Île-de-France)
Jalons	Phase 1 : prototypage de modules tandem en travaillant sur la performance et la stabilité des petites surfaces Phase 2 : développement de processus pour la fabrication sur de larges surfaces à l'échelle industrielle (taille wafer 15x15 cm2 d'ici fin 2022)
Chiffres clés	N/A
Sources de financement	Agence Nationale de la Recherche (ANR) Membres du partenariat

HAMBACH - gigafactory de panneaux photovoltaïques hétérojonction (production de cellules et assemblage)⁽⁶⁾

Parties prenantes	Rec Solar France, CEA (technologie SHJ)
Localisation	Hambach, site de la ZAC Europole II (Moselle)
Jalons	Décision finale d'investissement initialement prévue pour juin 2021, en suspens depuis le rachat de REC Solar par le conglomérat indien Reliance Industries Ltd
Chiffres clés	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 GW de panneaux par an à partir de 2022 et 4 GW à partir de 2025 ▪ environ 9 millions de panneaux solaires made in France ▪ création de 1 800 à 2 500 emplois
Sources de financement	Investissement de 680 millions d'euros dont prêts bancaires et subvention de l'Union européenne via le Fonds d'innovation (montant non dévoilé).

EVALUATION DU POTENTIEL FRANÇAIS

Positionnement de la France : un retard français (et européen) sur le marché du photovoltaïque qu'il est nécessaire de rattraper en se positionnant sur les technologies de nouvelle génération

S'il existe quelques fabricants français de panneaux solaires (Systovi, REcom-Sillia, VHM, Sunpower, Photowatt, Voltec), il y a actuellement peu de fabricants de cellules photovoltaïques (Photowatt).

A l'échelle mondiale, la Chine domine la production et à su s'imposer avec des usines bénéficiant de fortes économies d'échelle (prix des panneaux jusqu'à 35% inférieur). Le déficit commercial enregistré en 2020 sur les panneaux solaires est de 6,2 milliards d'euros⁽¹³⁾ (dont 75% proviennent de Chine).

Sur les technologies nouvelle génération, la France se démarque dans la R&D avec d'autres pays européens (Fraunhofer, HZB en Allemagne, TNO aux Pays-Bas) mais toujours face à une compétition chinoise qui investit massivement dans la production à grande échelle (tout en contrôlant les matières premières critiques) ainsi que face aux acteurs américains qui se positionnent également sur ces technologies.

Potentiel de décarbonation : La poursuite du développement du solaire PV et la baisse de l'empreinte carbone des différents composants va continuer à permettre des abattements d'émissions de CO₂

Émissions CO₂ évitées :

Etat des lieux : actuellement, le solaire PV à un taux de GES limité entre 20 et 30 gCO₂eq/kWh. 740 ktCO₂eq d'émissions françaises ont été évitées en 2021 grâce au parc solaire (France Territoire Solaire, étude juin 2022).

Prévisions 2030 : 1,4 MtCO₂eq d'émissions évitées pour la filière solaire française (France Territoire Solaire, étude juin 2022) dont 0,07 MtCO₂eq d'émissions évitées par les technologies solaires de nouvelle génération (analyse Capgemini).

Potentiel de création de valeur : une énergie solaire à forte valeur ajoutée et dont l'impact socio-environnemental est favorable

PIB - valeur du marché généré :

- Atteindre les objectifs prévus dans la PPE permettra de générer 7,7 milliards d'euros de recettes directes pour l'Etat sur l'ensemble de la période 2022 – 2030, hors versements, cotisations et fiscalité⁽¹⁴⁾.

Emplois générés :

- La filière solaire photovoltaïque permettra de soutenir jusqu'à 52 000 emplois (ETPs directs et indirects) en France à horizon 2030 dans le cas du respect de la fourchette haute de la PPE (44 GW raccordées en 2028) et de la relocalisation de certains segments de la chaîne de valeur⁽¹⁴⁾.

Potentiel d'accroissement de la souveraineté énergétique et industrielle de la France : une production française / européenne de cellules solaires de nouvelle génération participerait à un regain nécessaire de souveraineté vis-à-vis de l'Asie

Criticité des ressources majeures⁽⁴⁾ :

● Forte | ● Modérée | ● Faible

Ressource	Criticité	Problématique (si criticité forte ou modérée)
Silicium	●	Problèmes de disponibilité en raison de la concentration des acteurs : la Chine contrôle 71% de l'extraction et de la production primaire Disponibilité des ressources en France , mais avec 3% de la production minière et 4% de la production primaire mondiale ⁽⁴⁾ , la France ne peut prévenir les risques de pénurie et d'augmentation des prix. Peu de substituabilité au silicium ⁽⁸⁾ . Autres pays européens producteurs de silicium (Espagne, Norvège). Une utilisation massive de technologies de nouvelle génération réduirait le besoin en silicium. Le silicium est recyclable : s'il perd un peu en efficacité, cela n'impacte pas sa réutilisation pour les cellules tandem.
Cuivre	●	Lié à la production de cellules en couches minces qui requiert du tellure. Cuivre également utilisé en quantité pour les structures de panneaux photovoltaïques, peu substituable.
Plomb	●	Forte toxicité du plomb , utilisé dans les cellules tandem perovskites hybrides.

En dehors du silicium, les matériaux contenus dans les cellules de nouvelle génération (Pérovskites, semi-conducteurs III-V ou chalcogénures) présentent moins d'enjeux sur la criticité de la ressource que le silicium.

Potentiel de circularité

- Réinjecter les pertes issues de la fabrication des panneaux solaires** (la start-up Rosie propose des solutions pour récupérer le silicium ultrapur perdu lors de la production de panneaux solaires).
- Développer la R&D** pour inventer des techniques de séparation des éléments plus efficaces et moins polluantes.
- Développer les activités de recyclage en France** (Projet Photorama regroupant 13 organisations dont le CEA sur la période 2021-2024, éco-organisme Soren agréé par les pouvoirs publics pour collecter les panneaux solaires en fin de vie) via par exemple des appels à projets.

Provenance de la technologie : La technologie existe en France mais n'est pas compétitive en ce qui concerne le silicium cristallin et les couches minces par rapport aux cellules et panneaux solaires produits en Asie (Chine, Corée du Sud). L'enjeu est d'assurer la compétitivité des technologies solaires nouvelle génération (hétérojonction, tandem).

UNE ADAPTATION DU CADRE LÉGISLATIF EUROPÉEN PRIORITAIRE POUR PROTÉGER LES INVESTISSEMENTS D'UNE CONCURRENCE INTERNATIONALE DÉLOYALE

Cadre public de déploiement

Engagement politique : des objectifs ambitieux qui doivent se concrétiser par des choix stratégiques et des financements associés pour industrialiser les technologies de rupture

- **Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE) pour 2023** (20,1 GW) et 2028 (entre 35 et 44 GW⁽¹⁾) de capacités installées de production photovoltaïque).
- Engagement européen via **REPower EU** (EU

Solar Strategy) : plus de 320 GW d'énergie solaire photovoltaïque nouvellement installée d'ici à 2025, soit plus de deux fois le niveau actuel, et près de 600 GW d'ici à 2030⁽⁹⁾. **REPower EU** va accélérer le déploiement du solaire, notamment sur les bâtiments commerciaux et publics.

Dispositifs de financement : un essor des financements en faveur de la R&D et l'industrialisation des technologies de rupture à confirmer

Niveau européen : Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) pour le développement du photovoltaïque officiellement lancé par le European Solar Manufacturing Council (ESMC) en mai 2022⁽¹⁰⁾.

Niveau national :

- France 2030
 - **Soutien à la R&D de plus de 500 M€** (montant partagé avec l'éolien flottant et des réseaux énergétiques). Objectif : faire émerger en France une filière photovoltaïque fondée sur des ruptures technologiques.⁽¹¹⁾
 - **3 AAP de l'ADEME lancés en 2022** dans le cadre de France 2030 (aides ADEME aux dépenses CAPEX/OPEX)
 - PME Innovations (cofinancer des projets de recherche, de développement et d'innovation, dont les coûts totaux sont inférieurs à 1,5 M€).
 - Briques technologiques et démonstrateurs préindustriels.
 - Aide à l'investissement de l'offre industrielle des EnR.
- **Mécanismes de subventions financés par la Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE)** pour assurer une rémunération suffisante au producteur pour couvrir les coûts de production :
 - Appel d'offre de la CRE : Complément de Rémunération pour les installations supérieures à 500 kWc.
 - Guichet unique : contrat d'obligation d'achat d'une durée de 20 ans pour les installations de puissance inférieure ou égale à 500 kWc

Cadre législatif et réglementaire : un cadre réglementaire davantage tourné vers le développement de parcs photovoltaïques que l'industrialisation des technologies

• **Etat des lieux**

Cadre incitatif pour le développement d'installations solaires bien structuré : appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) et guichet unique.

Évaluation carbone des modules dans le cadre des appels d'offres de la CRE.

• **Analyse d'écart entre les besoins et les mesures**

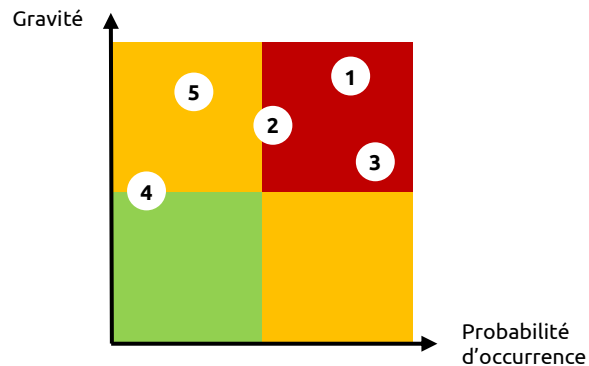
Étoffer le cadre réglementaire pour favoriser les technologies bas carbone et durables et protéger la filière d'une compétitivité internationale déloyale.

Barrières au déploiement

	Faible	Forte	
Approvisionnement (matériaux et technologie)	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Besoins en silicium pour répondre aux objectifs solaires d'ici 2050. Nécessité de renforcer l'indépendance française sur l'extraction et la transformation. Le développement de nouvelles technologies moins consommatrices en silicium réduirait le risque de dépendance à cette ressource critique.
Capacité de développement et infrastructures	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Tissu industriel européen fragilisé : très peu d'acteurs qui fabriquent des cellules photovoltaïques en France. Les fabricants français seuls n'ont pas les capacités pour mettre en place des projets d'industrialisation à grande échelle des technologies de rupture. Il y a un manque de partenaires à adresser. Enjeu d'établir un écosystème, impliquant des acteurs variés , capable de soutenir la construction d'usines pour passer à l'échelle ces technologies.
Compétences & savoir-faire	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Compétences françaises d'excellence et organisées dans la R&D. Deux verrous technologiques identifiés à lever : i. amélioration de la stabilité (sélection des matériaux) et du rendement des cellules ii. procédés de fabrication à grande échelle. Certains métiers de la filière pourraient être en tension dans le cadre d'un développement à grande échelle dans les prochaines années.
Économiques	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Il faut assurer une compétitivité des processus de passage à l'échelle des technologies de nouvelle génération, notamment vis-à-vis de l'offre étrangère (chinoise et autres pays qui se positionnent sur ces technologies). Cela passe notamment par la mise en place de leviers réglementaires (appels d'offres qui reconnaissent un contenu carbone / local de la production).
Financières	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Financements à maintenir pour soutenir la R&D. Pour attirer les investissements, il faut pouvoir apporter des garanties aux potentiels investisseurs d'une concurrence équitable dans le cadre d'une compétition internationale. Cela passe également par la mise en place de leviers réglementaires. Besoin d'accompagner les industriels dans leur financement.
Acceptabilité	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Pas de barrière majeure identifiée en termes d'acceptabilité. Il est cependant important de garder en tête ce sujet en cas de développement à grande échelle.
Législatives et réglementaires	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	Protection nécessaire des innovations françaises d'une concurrence trop agressive sur les prix. Cadre législatif à faire évoluer pour valoriser la qualité du processus de fabrication et l'empreinte carbone des technologies produites. Ces réformes doivent être définies au niveau européen.

RISQUES ET RECOMMANDATIONS

Cartographie des risques majeurs



Recommandations et leviers (publics / privés) à mettre en œuvre

Infrastructures et approvisionnement

- **Réinternaliser l'approvisionnement en ressources au niveau de l'Europe** : se tourner vers les pays européens producteurs de silicium (Espagne, Norvège), évaluer un éventuel investissement dans les mines françaises (activités françaises en difficulté cf. Ferropem) en prenant en compte le potentiel de ces mines, les réformes du code minier nécessaires et les enjeux environnementaux et sociaux.
- **Fixer des objectifs de recyclage** portant sur les matières critiques utilisées dans les cellules PV (silicium).
- **Assurer la traçabilité des matériaux** pour connaître la qualité du silicium des panneaux et déterminer comment le réutiliser.
- **Favoriser l'écoconception et le développement de technologies** plus recyclables et non consommatrices de ressources critiques (cellules pérovskites hybrides pouvant s'affranchir du silicium).

Commandes publiques

- **Fixer des objectifs de capacité installée** dédiés aux technologies solaires de nouvelle génération d'ici 2030.
- **Équilibrer la part des technologies de cellules photovoltaïques du parc français entre le silicium cristallin, les couches minces et les technologies de rupture**, via des choix d'attributions de financement qui favorisent les technologies de nouvelle génération.
- **Favoriser le développement des gigafactories** via des autorisations spéciales pour faciliter l'accès au foncier.

Programmes de recherche et d'innovation

- **Astreindre les programmes de R&D** à avoir une forte composante industrielle.
- **Accélérer la mise en place de lignes de production pilotes** pour consolider les technologies de nouvelle génération.
- **Favoriser la R&D de procédés de recyclage de haute valeur ajoutée** des panneaux en fin d'usage.

Industrialisation et structuration de la filière

- **Identifier les partenaires potentiels disposant des compétences pour porter les projets de passage à l'échelle** : cartographie des capacités tout au long de la chaîne de valeur au niveau français et européen (énergéticiens, acteurs d'autres secteurs qui pourraient vouloir s'impliquer - bâtiments, etc.).
- **Soutenir les fabricants français** en établissant des consortiums d'acteurs de manière à sécuriser les financements.
- **Développer des partenariats européens pour favoriser les effets d'échelle tout en maintenant une implantation des projets en France** (critère de France 2030).
- **Mettre en place des procédures spécifiques pour une mise en œuvre rapide des projets d'industrialisation** : rapidité d'obtention des permis, statut de planification et d'autorisation privilégié (zones économiques franches, exonérations fiscales, etc.).

Financements et investissements

- **Instaurer un soutien financier spécial** sous la forme de garanties de prêt de l'État dédiées à ces nouvelles technologies afin de débloquer des capitaux financiers et réduire les risques d'investissement.
- **Assurer la disponibilité de subventions** pour les projets.

Capital-risque (à ce jour, pas une source de financement notable au niveau des programmes supervisés par les organismes de recherche et d'innovation)

Réglementation

- **Établir des normes environnementales et sociales avec un maintien de l'utilisation du bilan carbone comme critère de sélection** (niveau significatif dans les appels d'offres);
- **Valorisation du contenu européen** et intégration de critères "contenu local" dans les appels d'offres;
- **Valorisation de l'économie circulaire**, des exigences en matière de droit du travail, de la protection de la propriété intellectuelle. Normes à pousser au niveau européen.

1. **Incapacité à mobiliser un écosystème** qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur et qui participe à l'industrialisation des technologies de rupture.
2. **Dépendance accrue** en termes d'approvisionnement de **composants** et /ou de **panneaux** photovoltaïques.
3. **Dépendance accrue** en termes d'approvisionnement en **ressources primaires critiques (silicium)**.
4. **Financements insuffisants** dans la phase d'industrialisation.
5. **Perte des compétences** françaises développées en R&D en l'absence d'industriels en France / Europe pour les passer à l'échelle.

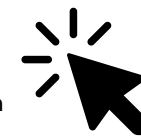
Energie solaire : faire entrer la France dans une nouvelle ère énergétique – Juin 2022 – France Territoire solaire , Syndicat des énergies Renouvelables, Enerplan PV technology vision for 2030, IPVF, 2020
Stratégie Nationale Bas Carbone sous contrainte de ressources, INEC et Capgemini, 2022

Interviews

- Roch Drozdowski-Strehl, Directeur général IPVF et Vice-président ETIP PV et Grégory MARQUE, Directeur des programmes de l'IPVF (Institut Photovoltaïque d'Île-de-France)

Sources détaillées

1. Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE) <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>
2. Ministère de la Transition Energétique, Données et études statistiques <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/412>
3. Ministère de la Transition Energétique, Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan%20ressources%20Photovoltaique.pdf>
4. Rapport STRATÉGIE NATIONALE BAS CARBONE, SOUS CONTRAINTE DE RESSOURCES (INEC et Capgemini)
5. IPVF <https://www.ipvf.fr/fr/jean-rousset-introducing-ipvf-programme-2-perovskite-on-silicon-industrializable-tandem-module/>
6. <https://www.usinenouvelle.com/article/le-solaire-made-in-france-fait-de-la-resistance-et-pas-uniquement-dans-le-panneau-photovoltaique.N1084854;> <https://www.republicain-lorrain.fr/economie/2022/01/06/usine-de-panneaux-photovoltaiques-a-hambach-le-projet-est-il-menace>
7. Liten CEA <https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/CEA-Liten/Financeurs-publics.aspx>
8. Minéral Info <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/chaine-de-transformation-du-silicium-metal-recyclage-montee-de-chine-sur-marche-du;> <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique;> <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticitesiliciummetal-publique20190729.pdf>
9. REPowerEU 2022 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A221%3AFIN&qid=1653034500503>
10. <https://esmc.solar/news-european-solar-manufacturing-pv/ippei-for-pv-launched-in-brussels-eu-member-states-are-invited-to-join-the-framework/>
11. France 2030 <https://www.france-innovation.fr/webinaire/dispositifs-de-soutien-france-2030-pour-lemergence-de-lindustrialisation-des-technologies-de-rupture-pour-les-reseaux-et-la-production-denergie-renouvelable/> <https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/sites/default/files/Guide%20des%20d%C3%A9penses%20ADEME.pdf>
12. ADEME, France 2030 <https://presse.ademe.fr/2022/02/france-2030-trois-nouveaux-appels-a-projets-operes-par-lademe.html;> <https://www.gouvernement.fr/france-2030-le-president-de-la-republique-annonce-2-mdeu-pour-le-soutien-a-l-innovation-de-rupture>
13. <https://www.pv-magazine.fr/2021/12/13/lue-a-enregistre-un-deficit-commercial-de-62-milliards-deuros-sur-les-panneaux-solaires-en-2020/>
14. Energie solaire : faire entrer la France dans une nouvelle ère énergétique France Territoire solaire, Syndicat des énergies Renouvelables, Enerplan <https://franceterritoiresolaire.fr/energie-solaire-faire-entrer-la-france-dans-une-nouvelle-ere-energetique/#:~:text=La%20fili%C3%A8re%20solaire%20photovolta%C3%AFque%20permettra,de%20la%20cha%C3%Aene%20de%20valeur.>



- Cellules à hétérojonction (SHJ) :

Combinaison de silicium cristallin et de couches minces. L'hétérojonction désigne la mise en contact de matériaux différents (silicium monocristallin et silicium amorphe) contrairement à l'homojonction qui repose sur un seul matériau (silicium monocristallin).

Les avantages principaux sont une face arrière de la cellule également active, ce qui représente jusqu'à 30 % de lumière en plus, soit un gain de rendement de conversion de l'énergie lumineuse en électricité de 10 % ; un coefficient thermique des cellules bien meilleur ; et un moindre impact économique et écologique (procédés de fabrication et usage de matériaux).

- Cellules pérovskites hybrides (tandem) :

Combinaison d'une cellule à pérovskite (cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite) **avec une autre technologie, typiquement le**

silicium. Cela permet d'obtenir une cellule avec un rendement plus élevé sur une plage de longueur d'onde plus grande. Des rendements supérieurs à 29 % ont été obtenus pour le tandem de pérovskite et de silicium.

Leur coût de production est faible. L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance aux agents extérieurs (eau, températures...).

- Cellules multi-jonction III-V (tandem) :

Combinaison de silicium cristallin et semi-conducteurs III-V (éléments du tableau périodique). Les cellules solaires à multi-jonction (MJSC) à base de semi-conducteurs III-V font partie de la troisième génération de cellules photovoltaïques et détiennent actuellement les records de taux de conversion de la lumière en électricité (> 47%). **Bien qu'elles aient des rendements plus élevés que les technologies concurrentes, ces cellules solaires sont considérablement plus coûteuses en raison des techniques et des**

matériaux de fabrication actuels. Leur utilisation était donc réservée jusqu'à présent au photovoltaïque à concentration ou au secteur spatial.

Des efforts de recherche actifs visent à réduire le coût de l'électricité générée par ces cellules solaires grâce à des approches telles que le développement de nouveaux matériaux de substrat, de matériaux absorbants et de techniques de fabrication.