

Une nouvelle ère énergétique

Abondante, renouvelable,
locale et compétitive:
l'énergie solaire
incontournable face aux
enjeux climatiques et
géopolitiques

Juin 2022



France Territoire Solaire

LE THINK-TANK DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Nos sponsors :



Nos partenaires :



Appui technique:





La crise énergétique et géopolitique que nous traversons est un rappel à l'ordre : la France ne peut pas se permettre de prendre davantage de retard face aux profondes mutations à l'œuvre dans le secteur de l'énergie. L'urgence du maintien de notre sécurité d'approvisionnement et de notre souveraineté énergétique commande d'accélérer dès à présent le rythme de développement de capacités de production d'électricité décarbonée.

Dans ce contexte, le développement massif du solaire photovoltaïque en France devient une impérieuse nécessité, comme l'a rappelé le rapport « Futurs énergétiques 2050 » publié par RTE. C'est aussi une opportunité, tant les progrès réalisés par la filière à l'international et en France ces dernières années ont été fulgurants, rendant obsolètes de nombreuses grilles de lecture.

L'énergie solaire était subventionnée ? Elle génère désormais des recettes nettes pour l'Etat. La filière délocalisait ? Elle va créer près de 50 000 emplois d'ici 2030.

L'énergie solaire est aujourd'hui non seulement compétitive et bas-carbone, mais elle est plébiscitée par les citoyens et génère de multiples retombées économiques, environnementales et sociétales. C'est la conjonction de ces atouts qui lui permet d'être rapidement déployable sur l'ensemble des territoires, et qui en font par conséquent un pilier incontournable face au défi énergétique et climatique.

Il y a longtemps que la France ne s'était pas trouvée face à l'opportunité d'un projet industriel d'une aussi vaste ampleur, qui va bien au-delà d'une simple transformation de notre système électrique. Les enjeux en matière d'indépendance énergétique, d'aménagement du territoire, de compétitivité de notre énergie, de réindustrialisation de notre pays, sont immenses. C'est afin que ces dimensions soient pleinement prises en compte à l'heure où l'on planifie notre trajectoire énergétique, que la filière s'est réunie afin de proposer une vision globale du rôle et des retombées de l'énergie solaire en France.

Je forme le vœu que cette contribution puisse éclairer les choix à venir, tandis que s'ouvre une nouvelle ère énergétique !

Antoine Huard,
Président de France Territoire Solaire



Le déclenchement de la guerre en Ukraine et les sanctions économiques et financières prises en réaction par l'Europe vis-à-vis de la Russie sont venues amplifier une crise énergétique majeure initiée à l'automne 2021. Cette crise, marquée par une hausse spectaculaire et probablement durable des prix de l'électricité en Europe et un niveau historiquement bas du facteur de disponibilité du parc français, se double aujourd'hui d'incertitudes relatives aux possibilités d'approvisionnement en gaz naturel. Ces différents facteurs questionnent notre sécurité d'approvisionnement à court et moyen terme. Ils ont également des conséquences notables vis-à-vis de la compétitivité de notre tissu économique et de la préservation du pouvoir d'achat des ménages.

Face à cette situation, susceptible d'être exacerbée dans les prochaines années par la hausse annoncée des besoins en électricité résultant du développement de nouveaux usages (véhicule électrique, électrification de procédés industriels, production d'hydrogène vert, etc.), il incombera au Gouvernement de prendre des décisions visant à garantir durablement la sécurité d'approvisionnement du pays tout en respectant les engagements pris par la France face à l'urgence climatique.

Le solaire photovoltaïque est aujourd'hui l'une des filières de production les plus compétitives pour faire face à l'ensemble de ces enjeux, et est d'ores et déjà désignée dans la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) comme la source de production décarbonée dont le rythme de développement fera l'objet du plus fort niveau d'accélération d'ici 2030.

Alors qu'un débat sur une révision de la PPE s'annonce en 2022, le présent rapport s'attache à mettre en exergue les différentes valeurs du développement de la filière sur les plans environnemental, économique, sociétal, ou encore géostratégique et souligne l'opportunité que constitue l'accélération de la dynamique de développement de la filière.

Alexis Gazzo,
Associé EY en charge des marchés de la transition énergétique et climatique



1.

Messages clés de l'étude

- Résumé exécutif

2.

Introduction

- Contexte de l'étude et objectifs
- Approche méthodologique

3.

Analyses des postes de valeurs créés par la filière solaire

- Valeur stratégique
- Valeur économique
- Valeur sociétale
- Valeur environnementale

4.

Conclusions

- Synthèse des constats
- Recommandations



1. Messages clés de l'étude

Résumé exécutif

Synthèse des constats

Compétitive, plébiscitée par les Français et rapidement déployable, l'électricité solaire photovoltaïque peut répondre aux besoins de développement de capacités de production d'électricité décarbonée d'ici 2030 tout en générant de multiples retombées à la fois économiques, environnementales et sociétales sur tous les territoires



Une énergie répondant aux grands enjeux stratégiques de la France

- Dans un contexte géopolitique incertain, le solaire apparaît comme **indispensable pour réduire la dépendance française aux combustibles importés** comme le gaz naturel, pour **sécuriser l'approvisionnement électrique national**, pour **favoriser notre autonomie et indépendance énergétique** et ainsi **garantir notre souveraineté nationale**.
- La **rapidité de déploiement du solaire** est un facteur clé permettant un développement important de cette énergie.
- L'augmentation du rythme d'installations de nouvelles capacités annuelles d'ici 2030 sera **indispensable pour atteindre les objectifs climatiques nationaux**.
- Le solaire offre également à la France une opportunité de **renaissance industrielle** (Une étude ADEME y sera consacrée en fin d'année 2022).



Une énergie compétitive

- Le solaire est une énergie compétitive, son développement massif ainsi que le caractère prédictif de son coût ont vocation à **limiter les effets de hausse des prix de marché**.
- Le **coût net annuel du soutien de l'Etat au solaire PV post moratoire a déjà décliné significativement ces dernières années** du fait de la baisse des niveaux de soutien obtenus dans les derniers appels d'offres. La hausse des prix de marché de l'électricité constatée depuis l'automne 2021 a nettement accéléré ce phénomène, **si bien que ce qui était un coût net auparavant deviendra nul dès 2022, et représentera une recette nette pour l'Etat dans les années à venir** sous certaines hypothèses détaillées dans cette étude.



Une énergie locale et pourvoyeuse d'emplois

- La filière PV 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.
- Cette énergie est **plébiscitée par la population française**, ce qui facilite son déploiement dans les territoires.
- Elle permet de **créer un circuit court d'énergie, de diminuer les pertes et d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles locales de chaque territoire**.
- Son développement est également la **source de nouvelles formes de solidarités locales**, via le renforcement de l'autoconsommation.



Une énergie propre

- Le solaire PV contribue activement à la **décarbonation des mix électriques national et européen**.
- Les progrès accomplis par la filière permettent de **poursuivre la réduction de l'empreinte carbone de l'électricité PV**.
- En France, **94% de la matière des panneaux PV est revalorisée**.
- De nouveaux modèles, tels que l'agrivoltaïsme, s'inscrivent dans une **démarche d'adaptation de l'agriculture au réchauffement climatique**.

Synthèse des constats

Compétitive, plébiscitée par les Français et rapidement déployable, l'électricité solaire photovoltaïque peut répondre aux besoins de développement de capacités de production d'électricité décarbonée d'ici 2030 tout en générant de multiples retombées à la fois économiques, environnementales et sociétales sur tous les territoires



x7 - x22

Multiplication des capacités solaires PV installées à horizon 2050

x8

Multiplication des prix du gaz sur l'année 2021



85 %

Baisse du LCOE depuis 2010

2,7 - 3,6 Md€

Contribution annuelle au PIB de la filière solaire PV à horizon 2030**

x4,2

1€ investi par la puissance publique aura permis de générer 4,2€ de recettes pour l'Etat sur la période 2012 - 2030



86 %

Des français ont une bonne image du solaire

52 Milliers d'emplois

Emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire PV en France en 2030*



20-30 gCO2eq/kWh

De taux d'émission de gaz à effet de serre de la filière solaire PV

740 ktCO2eq

Emissions françaises évitées en 2022 grâce au parc solaire installé (objectifs hauts de la PPE)

94%

Taux de revalorisation des panneaux PV

La hausse des prix de l'électricité constatée depuis plusieurs mois installe un nouveau paradigme dans lequel **le coût net annuel du soutien de l'Etat est en passe de s'annuler** et pourrait même devenir négatif – c'est-à-dire **constituer un flux de recette directe pour l'Etat - dès 2022**.

Dans un scénario – aujourd'hui probable voire conservateur - où les flux de soutien de l'Etat aux projets post-moratoire s'annuleraient durablement entre 2012 et 2030, la pertinence de l'investissement consenti par l'Etat ces dernières années doit être appréciée à l'aune des retombées générées. Nous estimons dans ce scénario qu'**1€ investi par l'Etat aura permis de générer 7€** de contribution au PIB sur la période 2012-2030**.

De même, **1€ investi par l'Etat aura généré 4,2€ de recettes publiques (taxes et cotisations) sur cette période**.

Atteindre les objectifs prévus par la PPE permettra de **générer +7,7 Md€ de recettes directes pour l'Etat sur l'ensemble de la période 2022-2030**, hors versements, cotisations et fiscalité.



2. Introduction

Contexte de l'étude et objectifs
Approche méthodologique

Un développement massif du solaire devient indispensable pour assurer la sécurité d’approvisionnement d’ici 2030 face aux multiples crises que traversent les marchés de l’électricité



Une filière solaire photovoltaïque (PV) en plein développement, pierre angulaire de la trajectoire de transition énergétique fixée dans le cadre de la PPE

Avec un objectif de capacité installée de 20 GW en 2023 et allant jusqu’à 44 GW en 2028 (objectif haut), contre un peu plus de 12,5 GW installés au 30 septembre 2021, la version en vigueur de la PPE acte d’ores et déjà une forte augmentation du rythme de développement du solaire PV en France et accentue le rôle central de la filière dans la transition énergétique française. [1]

Dans son étude sur les futurs énergétiques à horizon 2050, RTE conclut sans ambiguïté sur le caractère indispensable d’un développement soutenu des énergies renouvelables en France pour respecter ses engagements climatiques. La capacité solaire devra être multipliée par un facteur allant de x7 à x22 selon les scénarios d’ici 2050. [2]

Cette ambition renforce l’attractivité du marché français du point de vue des investisseurs, contribue à améliorer la compétitivité de la France sur l’aval de la chaîne de valeur et se traduit par des projets de relocalisation industrielle, comme par exemple le projet de la start up Carbon annoncé le 2 mars 2021 de gigafactory visant à produire 5 GW de panneaux PV en France à partir de 2025.

Une crise du marché de l’électricité observée depuis l’automne 2021 souligne la nécessité d’accélérer le développement de nouvelles capacités de production décarbonée

L’automne 2021 aura été marqué par une crise énergétique majeure. D’un côté, la hausse spectaculaire des prix de marché observée au niveau européen met en péril la compétitivité des entreprises et le pouvoir d’achat des ménages, et a amené l’Etat à prendre des mesures inédites vis-à-vis du fonctionnement de l’ARENH (Accès Régulé à l’Electricité Nucléaire Historique). D’autre part, la réduction appuyée du niveau de disponibilité du parc nucléaire historique du fait d’opérations de maintenance significatives sur au moins 7 réacteurs (Chinon 3, Cattenom 3 et Bugey 4 annoncées en février 2022) a révélé le spectre de difficultés d’approvisionnement électrique.

Cette question de la sécurisation de l’approvisionnement et de la souveraineté énergétique a été ravivée de manière dramatique au niveau européen du fait de l’invasion de l’Ukraine et des tensions économiques et géopolitiques en découlant entre l’Europe et la Russie.

La sécurisation d’un approvisionnement en électricité décarbonée constituera en outre un enjeu dans la décennie à venir du fait des besoins croissants d’électricité anticipés pour faire face aux nouveaux usages électriques (p.ex. électrification des procédés industriels, essor de la mobilité électrique, etc.).

L’accélération du développement du solaire PV s’annonce d’ici 2030 comme l’une des rares réponses envisageables du fait des délais de développement et de construction propres à d’autres filières comme le nucléaire de nouvelle génération.

Un nouveau regard sur le soutien public apporté à la filière

Autre conséquence de l’envolée des prix de marché de l’électricité, le mécanisme de complément de rémunération en vigueur pour la plupart des projets depuis 2016 constitue depuis fin 2021 une source de recettes pour l’Etat.

Cette situation démontre que ce mécanisme n’est pas à considérer comme une subvention de l’Etat, mais bien un moyen pour l’Etat de favoriser l’essor d’une filière compétitive et porteuse de bénéfices environnementaux, économiques, sociétaux ou encore géostratégiques en fournissant aux investisseurs une visibilité permettant d’optimiser le coût du capital des projets et l’effet de levier auprès des financements privés.

Ainsi, ce livrable se fixe pour objectif de démontrer la valeur globale du solaire en France. Pour cela, il s’agira d’identifier et quantifier rigoureusement les valeurs stratégique, économique, sociétale et environnementale associées au développement de la filière solaire PV.

Approche méthodologique

Un exercice mêlant exploitation de résultats existants et conduite de nouvelles analyses



1

Une étude
focalisée sur
le solaire PV

- Le périmètre de l'étude se concentre sur le solaire PV avec quelques éléments qualitatifs sur le solaire thermique.
- Au sein du solaire PV, l'étude couvre l'ensemble des milieux d'implantation, avec dans le modèle socio-économique la segmentation suivante : centrales au sol, petites et moyennes toitures, grandes toitures, ombrières.
- L'agrivoltaïsme fait l'objet d'un développement dédié en fin de rapport.

2

Un horizon
temporel choisi
en cohérence avec
celui de la PPE

- L'horizon temporel couvert est la période 2022 - 2030 pour plusieurs raisons :
 - C'est un horizon temporel cohérent avec celui de la PPE.
 - Les décisions prises par le prochain exécutif national se traduiront directement par la mise en service de projets sur cet horizon temporel.
 - La conduite de projections sur des horizons plus lointains est un exercice très incertain du fait des aléas relatifs aux marchés de l'énergie.

3

Une approche
en trois
étapes

- Une collecte d'informations a été basée sur plus de 60 sources documentaires et la conduite d'entretiens d'approfondissement. Plusieurs sujets d'analyses, pourtant largement documentés, ont dû être analysés sous un nouvel angle, au regard des enjeux énergétiques actuels.
- Des modélisations dédiées ont été conduites avec le soutien du cabinet EY pour plusieurs analyses – notamment (i) l'estimation du niveau de prix moyen de marché venant annuler le coût net du soutien au PV post-moratoire chaque année à partir de 2022, et (ii) l'estimation de la contribution au PIB et du nombre d'emplois directs et indirects soutenus par la filière. Ces modélisations ont fait l'objet d'itérations avec un Comité de pilotage réunissant 21 adhérents de FTS.

4

Des limites
inhérentes
à cet exercice

- L'exercice prospectif est par nature soumis à des aléas et dépend de choix d'hypothèses retenues. L'approche retenue dans ce travail a consisté à retenir systématiquement des hypothèses conservatrices de manière à ne pas surévaluer les différents bénéfices associés au développement de la filière.
- La capitalisation des données à partir de la littérature existante implique selon l'année de publication, des écarts dans les valeurs publiées. Les données les plus récentes ont été conservées.



3. Analyse des postes de valeurs créés par la filière solaire PV

Valeur stratégique

Le développement massif du solaire est la principale réponse envisageable pour notre sécurité d'approvisionnement et la réduction de notre dépendance énergétique d'ici 2030



Le solaire a vocation à constituer le pilier majeur de la transition énergétique française dans la décennie à venir

- Compte tenu de la rapidité de déploiement du solaire, **ce dernier sera inévitablement un vecteur principal du développement massif de la capacité de production électrique d'ici 2030.**
Ce développement massif est particulièrement cohérent et souhaitable compte tenu du **niveau de compétitivité atteint par la filière et des retombées économiques** qu'elle permet de générer sur le territoire.
- Le constat d'un niveau de disponibilité historiquement bas du parc de production nucléaire français depuis plusieurs mois, conjugué aux incertitudes concernant la possibilité d'allongement de la durée de vie de ce parc dans les années à venir et aux perspectives de hausse de la demande en électricité pour faire face à l'électrification de nouveaux usages (p.ex. procédés industriels, mobilité électrique), soulignent la **nécessité de développer massivement de nouvelles capacités de production d'électricité décarbonée** pouvant être mises en service avant 2030.

Ce mouvement s'inscrit dans une dynamique mondiale, source d'opportunités pour les entreprises françaises

- L'accélération du marché français ouvrira également des **opportunités à l'export pour les entreprises nationales**, le marché international étant également amené à connaître une accélération.
- Le renforcement de l'excellence française dans le secteur solaire** est amené à devenir un impératif dans la diplomatie commerciale vis-à-vis des partenaires historiques disposant de bonnes conditions d'ensoleillement et d'enjeux de développement de l'accès à l'électricité.

Le solaire concourt à la souveraineté énergétique nationale

- Le développement du solaire PV permettrait de réduire la dépendance énergétique française au gaz** dont les prix futurs sont inconnus. En un an, le prix du MWh de gaz a été multiplié par plus de 8 en atteignant 194€ ces derniers jours, alors qu'il était à 20 €/MWh en début d'année.
- Dans un contexte géopolitique rendu extrêmement incertain par la guerre en Ukraine et les sanctions économiques et financières prises par l'Europe vis-à-vis de la Russie, **un développement massif du solaire en France a vocation à réduire notre dépendance et celle de l'Europe vis-à-vis du gaz russe** (2^e fournisseur de la France après la Norvège).
- La relocalisation possible de certains maillons de la chaîne de valeur a vocation à accroître les souverainetés industrielles nationale et européenne**, pour que le développement de cette industrie ne génère pas de nouvelle dépendance géostratégique – vis-à-vis de la Chine notamment.



Valeur stratégique

x7 - x22

Multiplication des capacités solaires PV installées à horizon 2050

x8

Multiplication des prix du gaz sur l'année 2021

Une dynamique solaire positive et des perspectives de développement au niveau européen, tirées par une stratégie de réduction des émissions de GES



Plusieurs textes définissent ces objectifs ambitieux

- Le **Pacte Vert pour l'Europe** (2021) : vise la neutralité carbone en 2050. [3]
- Le **Paquet Climat** (2021) : transforme les objectifs en actions concrètes.
- La **loi européenne sur le climat** (2021) : augmente l'objectif d'énergies renouvelables à 40% en 2030. [4]
- La **Nouvelle Stratégie Industrielle Européenne** (2021) : a pour objectif de réduire les dépendances et accélérer les transitions écologiques et numériques, grâce aux énergies renouvelables. [5]
- **Fit for 55** (2021) : regroupe des propositions qui visent à atteindre l'objectif climatique 2030 et l'objectif de neutralité climatique.

La filière solaire PV se mobilise et se structure

- En 2021, l'**Initiative Solaire Européenne** a été créée pour accompagner le développement du solaire PV et la relocalisation européenne de sa chaîne de valeur, tout en stimulant l'écosystème industriel, encourageant les investissements, et développant un cadre réglementaire adapté. [6]
- Le solaire PV a été ajouté au programme de travail 2022 de la Commission Européenne (CE), afin de relever les obstacles actuels à son développement. [5]
- La publication de la stratégie solaire a été présentée le 18 Mai 2022 et met l'accent sur la simplification de la délivrance des permis. [6bis]

Alignement stratégique des Etats membres

- L'énergie solaire fait consensus à l'échelle européenne, et ouvre la possibilité de structurer des projets communs pour avoir davantage de souveraineté européenne.

Chiffres clés



-55%

Objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre en 2030 (Pacte vert pour l'Europe, 2021) [3]

0

Objectif de neutralité carbone en 2050 (Pacte vert pour l'Europe, 2021) [3]

40%

Objectif de part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique européen en 2030 (Loi européenne sur le climat, 2021) [7]

400 000

Emplois indirects qu'une relocalisation européenne de l'offre industrielle devrait créer dans la prochaine décennie

40

Milliards d'€ de PIB qu'une relocalisation européenne de l'offre industrielle devrait générer [8]

En France, la filière solaire PV se positionne comme l'un des moteurs de la transition énergétique



Une stratégie politique en faveur du solaire PV

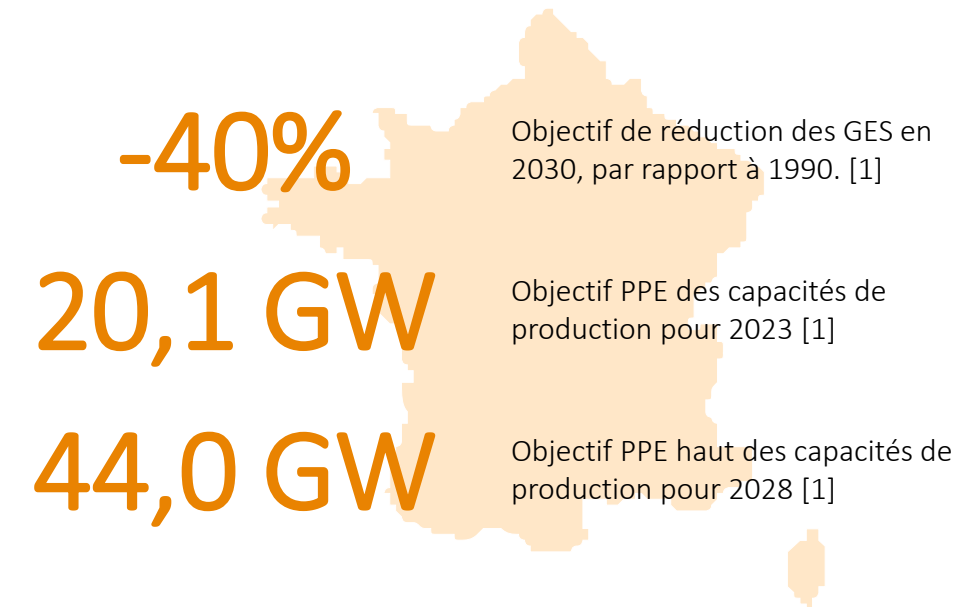
La **Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)**, constitue la feuille de route française, pour lutter contre le changement climatique. Elle donne des orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable.

- Le **Plan National Energie et Climat 2021 – 2030 (NECP)** a été élaboré pour permettre à la France de respecter ses objectifs européens en matière d'énergie et de climat. Il a notamment pour but de faciliter le développement de la filière solaire PV. [9]
- La **Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE)** exprime les orientations et priorités d'action des pouvoirs publics pour la gestion de l'ensemble des formes d'énergie sur le territoire métropolitain continental, afin d'atteindre les objectifs de la politique énergétique. Pour la filière solaire PV, les objectifs sont les suivants : [1]

	2023	2028
Panneaux au sol (GW)	11,6	20,6 à 25,0
Panneaux sur toitures (GW)	8,5	13,5 à 19,0
Objectif total (GW)	20,1	35,1 à 44,0

- Le **contrat stratégique de la filière industrie des Nouveaux Systèmes Energétiques**, vise la maîtrise technologique et industrielle du solaire PV et l'émergence de champions industriels transnationaux sur les grandes étapes de la chaîne industrielle d'ici 10 ans.
- L'ADEME a récemment publié **3 appels à projets** s'inscrivant dans le cadre du plan **France 2030** et de la **Stratégie d'accélération « Technologies Avancées des Systèmes Energétiques »** (TASE), dont le solaire photovoltaïque est l'un des trois axes prioritaires.

Chiffres clés liés aux objectifs français



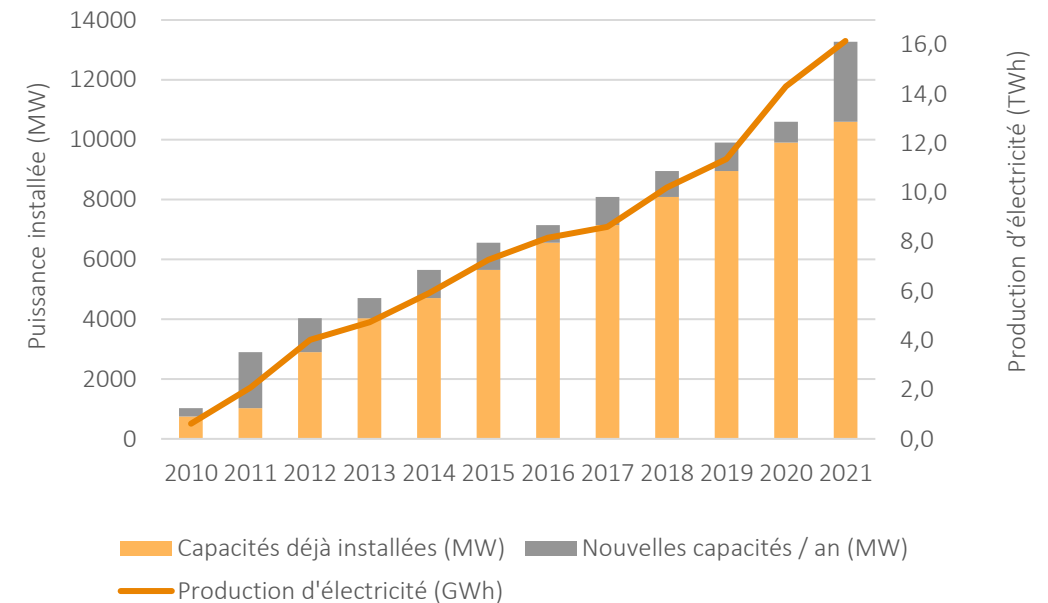
L'accélération du développement de la filière solaire PV est indispensable pour atteindre les objectifs nationaux



Une accélération indispensable du rythme d'installation de nouvelles capacités solaires

- Au rythme d'installation des capacités solaires PV actuel, la France n'atteindra pas ses objectifs PPE.
 - La PPE fixe un objectif de 20,1 GW de capacités solaires PV installées en 2023, et 35,1 GW à 44 GW en 2028. [1]
 - Fin 2021, les capacités installées étaient de 13,7 GW. Il faudrait donc installer plus de 3 GW par an pour atteindre les objectifs 2023, alors que les mises en service effectives n'ont pas excédé 1 GW par an en France ces dernières années. Pour la première fois, 2,7 GW ont été installés en 2021. [10]
- RTE insiste sur le caractère indispensable du déploiement du solaire, dans une étude prospective à horizon 2050 publiée en 2021. [2]
 - Dans l'ensemble des scénarios européens et mondiaux proposés qui atteignent la neutralité carbone, le solaire se développe de manière considérable.
 - Pour la France, ce développement se traduit par une multiplication par 7 à 22 des capacités solaires PV à l'horizon 2050. [2]
- Pour suivre une trajectoire de neutralité carbone et atteindre les objectifs de la PPE, il s'agira donc de **parvenir à accélérer effectivement le rythme de mise en service des capacités solaires PV** par rapport aux tendances récentes.

Evolution des capacités solaires PV installées en France et production électrique PV annuelle [10] [11]



Le développement du solaire est limité par la contrainte foncière, mais des solutions existent (zones délaissées, toitures, autoconsommation, ...)



Un enjeu important subsiste sur la disponibilité du foncier

- L'atteinte des objectifs PPE et climatiques nationaux nécessitera un déploiement massif du solaire PV. Le foncier disponible risque de devenir un paramètre limitant l'accélération de la pénétration du solaire PV.

Un gisement foncier à exploiter sur zones délaissées ou parkings

- Les **zones délaissées ou les parkings** offrent des surfaces exploitables, malgré des concurrences d'usages.
 - Les autres activités économiques visent activement ces zones dans le cadre des objectifs de zéro artificialisation nette.
 - Le développement sur parkings peut fonctionner en parfaite cohabitation avec le développement d'ombrières solaires.
 - Les zones délaissées identifiées peuvent correspondre à : d'anciens dépôts d'hydrocarbures, d'anciens sites d'activités de commerce, d'artisanat, et d'industrie (>5%) ou d'anciens sites de stockage de déchets (> 4%). [12]
- Ce potentiel de développement sur zones délaissées ou parkings est difficile à estimer, et sujet à de fortes contraintes (biodiversité, coûts de terrassement et dépollution).
 - Le Ministère de la transition écologique [MTE] a lancé, en octobre 2020, une étude afin d'établir une liste des friches industrielles et urbaines susceptibles d'accueillir des installations photovoltaïques. A l'issue d'un travail collaboratif entre le groupement CEREMA-TECSOL et les services régionaux et départementaux (DDT(M), DEAL, DREAL, DRIEAT), et après avis des communes concernées, 876 sites propices à l'implantation de centrales photovoltaïques ont été identifiés. Lors d'une intervention au Sénat au mois de février dernier, la Secrétaire d'Etat Bérangère Abba a indiqué que ces sites représentaient un potentiel d'environ 7,8 GW. [13]
 - Enerplan estime que 70% à 80% du solaire PV pourrait être, en 2050, installé sur des toitures, zones délaissées ou parkings. Il ne resterait que 25 à 40 milliers d'hectares à déployer sur des zones aujourd'hui non artificialisées. [14]

Un potentiel de déploiement sur toitures et bâtiments

- Plusieurs potentiels de toitures ont été identifiés.
 - Depuis 2018, l'initiative « **Place au Soleil** » mobilise les détenteurs de grands fonciers artificialisés inutilisés pour qu'ils produisent de l'énergie solaire. Il s'agit de toitures de supermarchés, de bâtiments de l'armée, de toitures de la SNCF, ou de collectivités locales. [12]
 - Le **secteur de l'agriculture** est aussi identifié comme un gisement de bâtiments pour le déploiement du PV à grande échelle (hangars agricoles). [12]
- A l'avenir, comme cela est déjà attendu et favorisé par les politiques énergétiques (PPE, SNBC, mais aussi la réglementation énergétique des bâtiments), l'installation de panneaux sur toitures pourrait devenir la règle pour un nombre croissant de bâtiments. Cette filière pourrait alors s'étendre et se rééquilibrer en faveur de territoires moins ensoleillés, mais disposant de grandes surfaces de toitures disponibles. [12]

Un nouveau modèle économique, l'autoconsommation, permet d'atteindre de nouveaux acteurs

- La baisse des coûts du solaire, conjuguée à la hausse des prix de l'électricité, incitent de plus en plus de consommateurs à se tourner vers **l'autoconsommation**.
- Pour inciter à utiliser ce nouveau modèle, un avantage fiscal a été mis en place. Les installations inférieures à 3 kWc, raccordées en 2 points au plus au réseau public, qui ne sont pas affectées à l'exercice d'une activité professionnelle, permettent de bénéficier d'une exonération d'impôts.
- Ce mécanisme apparaît encore complexe à développer. Il s'agira donc de continuer à accompagner ce mouvement (tarification réseau, market design, cadre réglementaire).

Le développement massif de nouvelles capacités de production d'électricité décarbonée pouvant être mises en service avant 2030 s'annonce crucial



Plusieurs facteurs soulignent la nécessité de développer massivement des capacités de production d'électricité décarbonée pouvant être mises en service avant 2030

- La disponibilité du parc de production nucléaire est historiquement basse en 2021-2022.
 - EDF estime la production 2022 à 295-315 TWh, soit un niveau de production jamais atteint depuis 1991 (à parc de production équivalent). EDF a annoncé l'arrêt prochain de trois réacteurs nucléaires supplémentaires pour des contrôles à la suite de la corrosion des systèmes de sécurité rencontrée sur d'autres unités. Ces contrôles font suite à une revue de l'ensemble du parc nucléaire français à la recherche de problèmes de corrosion déjà confirmés sur au moins quatre réacteurs, actuellement à l'arrêt. [15]

L'automne et l'hiver 2021-2022 ont été marqués par une crise énergétique inédite :

- **Les prix de marché de l'électricité ont subi une hausse spectaculaire.** Cela met en péril la compétitivité des entreprises et le pouvoir d'achat des ménages, et a amené l'Etat à prendre des mesures inédites vis-à-vis du fonctionnement de l'ARENH.
- L'approvisionnement électrique français a été particulièrement sous tension en hiver 2021-2022, à cause de la **disponibilité réduite du parc nucléaire**. Pour éviter un potentiel black-out électrique du pays, le Gouvernement a été contraint d'assouplir temporairement le recours au charbon. La loi énergie-climat de 2019 avait fixé un seuil annuel d'émissions de 0,7 ktCO₂eq/MWh, relevé exceptionnellement à 1ktCO₂eq/MWh, entre janvier et février 2022. [16] [17]
- Pour faire face à une demande en électricité qui continuera à croître d'ici 2030 (électrification de nouveaux usages, procédés industriels, mobilité électrique), **le développement de nouvelles capacités de production d'électricité décarbonée s'annonce crucial** pour éviter toute dégradation de la qualité d'approvisionnement.

Dès 2021, RTE mettait en avant la nécessité de développer les énergies renouvelables à horizon 2030 pour sécuriser l'approvisionnement énergétique

- Dans une étude prospective à horizon 2050, RTE distinguait trois périodes différentes concernant la sécurité d'approvisionnement en électricité :
 - **La période 2021-2024** : un niveau de sécurité d'approvisionnement relativement tendu, lié à une baisse de la disponibilité du parc nucléaire due en partie à la désoptimisation du programme d'arrêts par la crise sanitaire et au délai de mise en service de l'EPR de Flamanville. [2]
 - **La période 2024-2026** : une amélioration progressive de la sécurité d'approvisionnement. La consommation d'électricité retrouve un niveau équivalent à celui d'avant crise sanitaire tandis que la capacité de production augmente par une amélioration de la disponibilité du nucléaire et le développement des énergies renouvelables. [2]
 - **A l'horizon 2030** : un renforcement de la sécurité d'approvisionnement grâce au développement des énergies renouvelables et par des actions de maîtrise de la pointe de consommation. [2]

Les différents éléments d'actualité ultérieurs à la publication de ce rapport (indisponibilité du parc nucléaire français, conflit en Ukraine) renforcent l'urgence de développer de nouvelles capacités de production d'électricité décarbonée.



Le solaire a tous les atouts pour être un des principaux vecteurs de développement des capacités de production électrique d'ici 2030

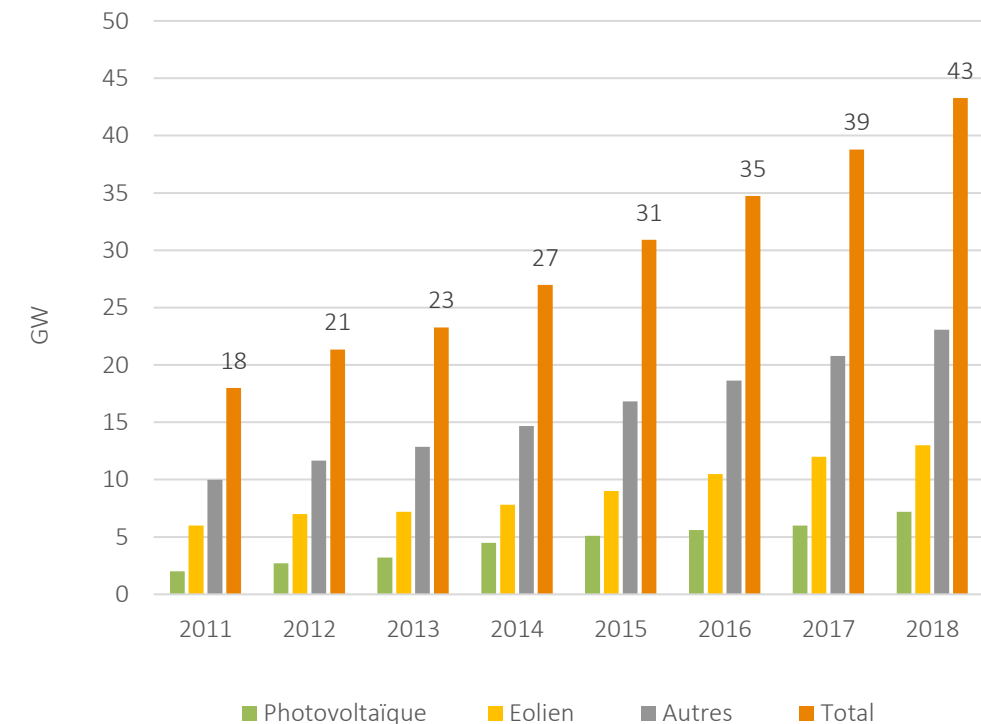


Le déploiement du solaire PV, une solution pour sécuriser l'approvisionnement électrique français

- Le solaire PV s'annonce comme l'une des rares réponses envisageables au développement massif de capacités de productions électriques d'ici 2030, compte tenu :
 - Des délais liés au développement et à la construction des projets des autres filières (comme le nucléaire, puisque les EPR nouvelle génération ne pourront être mis en service avant 2035).
 - De la variété des supports sur lesquels le PV peut se déployer.
- Pour sécuriser l'approvisionnement électrique français, ce développement massif est particulièrement cohérent et souhaitable.

Enedis prépare son réseau à l'intégration croissante d'électricité issue de renouvelables

- Enedis se prépare à la montée en puissance des énergies renouvelables sur son réseau et prévoit des investissements massifs pour les accueillir.
 - Enedis consacre désormais environ **2 milliards d'euros d'investissements par an aux raccordements et extensions de réseau** associées. [18]
 - Au total **13,7 GW de solaire** sont raccordés fin 2021, auxquels s'ajoutent 10,5 GW de projets en file d'attente. [19]
 - La proportion de **raccordement au réseau de distribution est de 86 %**. [20]



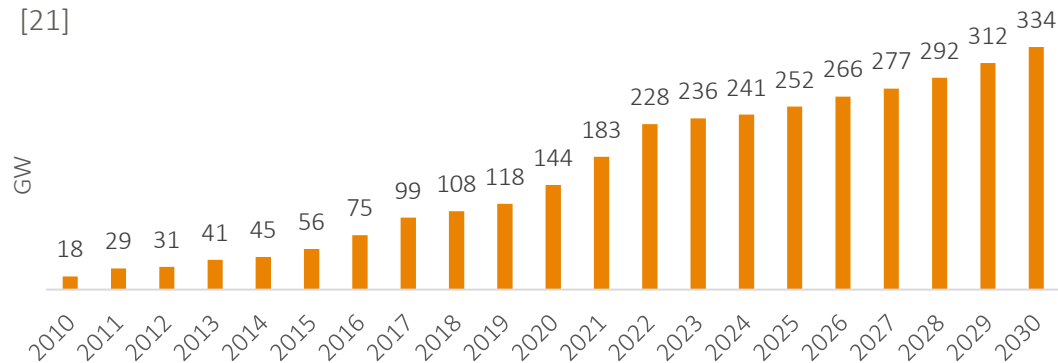
Evolution des installations de production raccordées au réseau Enedis (en GW) [20]

Ce déploiement s'inscrit dans une dynamique mondiale, source d'opportunités pour les entreprises françaises

S 1 2 3 4

Un marché international en pleine accélération

- L'énergie solaire est une énergie peu chère, facilement déployable à toute échelle (que ce soit sur un réseau national structuré ou sur un réseau local beaucoup moins organisé) et nécessitant des compétences relativement accessibles en termes de déploiement.
- Le développement du solaire est donc un enjeu prioritaire pour de nombreux pays, comme les Etats-Unis qui ont annoncé que la filière solaire PV représenterait 40% de son mix énergétique global en 2050.
- Le marché international est en pleine accélération. BNEF (Bloomberg New Energy Finance) estime que plus de 220 GW de capacités solaires seront installées en 2021 dans le monde. Ce chiffre devrait croître et atteindre plus de 330 GW annuels d'ici 2030.
- L'expansion du marché est source d'opportunités pour les entreprises nationales. [21]



Estimation BNEF des installations annuelles de capacités solaires PV à l'échelle mondiale [21]

Développer la filière solaire PV : un sujet de diplomatie économique

- Après avoir organisé la COP21, les One Planet Summit, en tant que co-fondateur de l'ASI, et après avoir montré l'exemple avec sa loi Energie Climat de 2019 qui prévoit une stratégie zéro émission nette pour 2050, la France a tous les atouts pour faire partie du développement massif de cette filière. [22]
- La disponibilité d'une électricité verte et peu coûteuse va constituer un facteur d'attractivité pour la France.
 - Un nombre croissant d'acteurs économiques sont soucieux de réduire leur empreinte carbone et ont recours à un approvisionnement en électricité décarbonée pour atteindre les objectifs de leur stratégie climatique.
- L'hydrogène vert, une alternative à la variabilité du solaire et un potentiel de décarbonation pour de nombreux secteurs.
 - Lorsque la production d'électricité solaire est supérieure à la demande, le surplus peut servir à produire de l'hydrogène vert grâce à l'électrolyse. Cet hydrogène peut ensuite être stocké et reconverti en électricité lorsque la production d'électricité solaire est faible.
 - Grâce à ce processus, l'hydrogène devient une solution clé à la variabilité du solaire PV, et contribue à la flexibilité de la production.
 - La production d'hydrogène vert par électrolyse est amenée à croître de manière significative pour décarboner la mobilité ainsi que certains secteurs industriels (métallurgie, etc.). [23]
- Le renforcement de l'industrie française dans le solaire devient un impératif dans la diplomatie commerciale vis-à-vis des partenaires historiques disposant de bonnes conditions d'ensoleillement (en Afrique par exemple), qui misent sur le solaire et cherchent à se faire accompagner auprès des pays les plus dynamiques et avancés en matière de solaire PV. [24]



Le développement solaire sur l'ensemble de sa chaîne de valeur pourrait réduire la dépendance de la filière solaire PV et renforcer la souveraineté nationale



Le développement du solaire pourrait permettre de réduire la dépendance énergétique française et européenne, en particulier vis-à-vis du gaz russe

- La France dispose d'un ratio d'indépendance énergétique proche de 55% en 2020. Ce taux exprime le rapport entre la production nationale d'énergies primaires et la consommation d'énergie primaire. Il témoigne d'une dépendance importante de notre pays à l'égard des importations, en particulier pour les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel. [25]
- **Le solaire pourrait réduire la dépendance nationale aux combustibles importés** dont les prix futurs sont incertains.
 - Le solaire, une fois en opération, n'utilise plus que le soleil comme intrant pour faire fonctionner ses centrales et produire de l'électricité accessible à moindre coût. Au contraire, la production à partir de gaz ou nucléaire nécessite des combustibles pour l'exploitation des centrales (gaz ou uranium), ce qui rend les prix futurs incertains.
 - En un an, le prix du MWh de gaz naturel a été multiplié par plus de 8 en atteignant 194€ début 2021, alors qu'il était à 20€/MWh en début d'année.
 - Cette situation n'impacte en revanche pas de la même manière les consommateurs français, les fournisseurs d'énergie et l'Etat. En effet, alors que les premiers cités sont protégés par le bouclier tarifaire mis en place par le gouvernement à l'automne 2021, certains fournisseurs d'énergie font eux faillite car ils ne sont pas en mesure de fournir de l'énergie au prix indiqué. Le tarif du gaz étant réglementé et plafonné à son niveau d'octobre 2021, les finances publiques sont également affectées par le contexte géopolitique actuel.
- Le couple solaire stockage constitue un élément essentiel au développement massif du solaire.
 - Le développement de solutions de stockages compétitives sera clé **pour répondre à l'enjeu de variabilité et de flexibilité** de production induit par le solaire (batteries, hydrogène vert).
 - Elon Musk a annoncé fin 2020 une division par deux des prix du kWh stocké d'ici 2023 et le remplacement du cobalt des batteries par des nanoparticules de silicium, abondant et peu coûteux. [26 bis]
- Le solaire PV permettrait de réduire la dépendance internationale et les conséquences géostratégiques qui en découlent.
 - Dans un contexte géopolitique rendu extrêmement incertain par la guerre en Ukraine et les sanctions économiques et financières prises par l'Europe vis-à-vis de la Russie, **le solaire pourrait réduire notre dépendance et celle de l'Europe vis-à-vis du gaz russe** (2^e fournisseur de la France après la Norvège).

La relocalisation de certains maillons de la chaîne de valeur est nécessaire pour réduire la dépendance de la filière solaire PV à la Chine

- La relocalisation de certains maillons de la chaîne de valeur de la filière solaire PV permettrait d'accroître les souverainetés industrielles nationale et européenne, pour que le développement de cette industrie ne génère pas de nouvelle dépendance géostratégique vis-à-vis de la Chine notamment.
- La réduction des chaînes d'approvisionnement au profit de circuits courts, via la création de gigafactories européennes ou françaises, profiterait à l'Europe. En effet, **le coût du transport est une composante significative du prix total des équipements**. De plus, ces prix peuvent augmenter lors de crises
 - Une étude SynapSun indique que le prix des containers de la Chine vers l'Europe a augmenté de 20%, faisant passer le coût des panneaux PV chinois de 0,18 ct€/Wp à 0,23 ct€/Wp, à cause de la situation sanitaire et d'événements isolés, comme le récent blocage du Canal de Suez. [26]



Le développement solaire sur l'ensemble de sa chaîne de valeur pourrait réduire la dépendance de la filière solaire PV et renforcer la souveraineté nationale



Pour pallier au risque de dépendance industrielle, la France dispose déjà d'un tissu industriel innovant, ainsi qu'une R&D de qualité

- **La France dispose d'un tissu industriel innovant sur certains maillons de la chaîne de valeur industrielle du solaire.** Il s'agit notamment de la fabrication de lingots, wafers, cellules et modules, ainsi que d'une R&D publique et privée de qualité positionnée sur les nouvelles technologies hybrides (PV flottant, ...). [4]
 - Avec 17 487 brevets déposés dans le domaine des énergies propres en carbone entre 2000 et 2019, la France se classe au deuxième rang européen et à la sixième place mondiale des pays les plus innovants en matière d'énergies propres en carbone. [27]
 - Parmi les déposants français, Safran se classe premier, avec 1 997 brevets déposés, suivi du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies (CEA) (1 772) et du groupe PSA (1 112).
 - Le CEA est en tête des organismes publics au niveau mondial. L'IFP Energies nouvelles (717 brevets) et le CNRS (568 brevets) se classent par ailleurs dans le top 10 mondial des établissements publics, preuve de l'excellence de la recherche publique française. [27]
 - L'Institut de Transition Énergétique de l'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (ITE IPVF), dont le rôle est de porter la recherche fondamentale sur les compétences clés du solaire et d'être à l'origine d'innovations sur les techniques analytiques, les procédés, les dispositifs, pertinents pour le développement de l'énergie d'origine photovoltaïque, est un acteur clé sur la scène française et européenne.
- En France, l'annonce du norvégien REC entretient également les espoirs d'un renouveau de l'industrie du panneau PV hexagonale.
 - La filière franchit un pas de plus avec son projet solaire Bélénos. Deux fabricants de panneaux photovoltaïques, Systovi et Voltec Solar, se sont rapprochés pour créer le leader du solaire français. Ils prévoient d'investir 20 M€ pour faire naître la filière solaire PV industrielle française et atteindre une capacité de production d'électricité de 1 GW par an.
 - Le projet REC solar, malgré le rachat par le groupe indien « Reliance New Energie Solar Ltd », a maintenu son intention de construire une usine de panneaux solaires nouvelle génération près de Sarreguemines, en Moselle. L'investissement serait de 680 M€ pour une capacité de production annuelle de 2 GW puis 4 GW en 2025. [28]

La relocalisation d'une partie de la chaîne de valeur industrielle de la filière solaire PV permettrait de renforcer la souveraineté nationale

- La filière solaire PV s'est engagée à coconstruire un plan d'action européen pour reconquérir le marché du solaire PV. [4]
 - Dans le contexte de la crise sanitaire, plusieurs grands opérateurs d'énergies renouvelables tels qu'Enel et Engie se sont rassemblés au sein de **Solar Power Europe**, à l'origine de la European Solar Initiative. Cette initiative s'est fixé pour objectif de disposer de 20 GW de capacités de production solaire européenne d'ici 2025.
- Dans le sens d'une plus grande maîtrise de la chaîne de valeur du solaire PV, le comité stratégique de la filière « **Industrie des nouveaux systèmes énergétiques** » (CSF NSE) vise à orienter vers l'industrie solaire les aides du programme d'investissements d'avenir (PIA4) et appelle à mettre en place un IPCEI PV.
 - Ce programme, doté d'une enveloppe de 20 Md€, mise sur l'environnement et plus particulièrement sur la transition écologique et énergétique.
 - Déjà **116 projets ont été proposés depuis octobre 2020**, qui visent également des équipements innovants tels que des panneaux permettant d'intégrer le solaire à l'agriculture.
- Les investissements dans la relocalisation se multiplient.
 - Armor a investi 100 M€ dans le développement de films solaires près de Nantes. Ecosun compte investir 3,5 millions dans une usine de production de centrales précâblées à Colmar. [29]



3. Analyse des postes de valeurs créés par la filière solaire PV

Valeur économique

Une énergie compétitive, aux coûts maîtrisés et présentant un retour sur investissement significatif du point de vue des finances publiques



S 1 2 3 4

Le solaire PV est l'une des sources de production d'électricité les plus compétitives en France

- Le coût de production de l'électricité solaire PV - exprimé au travers de son LCOE - a connu une baisse de près de 85% au cours de la dernière décennie. Ce coût de production, aujourd'hui autour de 54,5 €/MWh en moyenne pour les installations supérieures à 5 MWc en fait **une des sources de production d'électricité les plus compétitives en France aujourd'hui**.
- S'ils peuvent être soumis à des aléas à court terme (du fait de la hausse des cours mondiaux de matières premières en 2022), **ces coûts du solaire PV sont maîtrisés sur l'ensemble du cycle de vie des actifs** (y compris pour la gestion de la fin de vie) et devraient continuer à baisser à plus long terme. La compétitivité du solaire PV s'illustre par le **recours croissant à des solutions d'autoconsommation (individuelle ou collective) ou à des contrats de gré à gré (corporate PPA)**, dont l'essor est amené à se poursuivre d'ici 2030.

Des soutiens publics permettant d'optimiser le coût du capital des projets et de faciliter leur financement

- Le cadre réglementaire en vigueur en France, basé sur des mécanismes de rémunération (obligation d'achat ou complément de rémunération), fournit une **visibilité de long terme aux producteurs permettant un recours significatif aux capitaux privés pour le financement des projets, et contribuant à l'optimisation du coût du capital de ces projets**.
- La maîtrise des coûts de production de l'électricité PV a vocation à **limiter les effets de prix de marché à la hausse**.

Un investissement rentable pour l'Etat

- La hausse des prix de marché de l'électricité observée depuis l'automne 2021 a pour conséquence de **réduire le coût net du soutien versé par l'Etat au titre des mécanismes de rémunération du solaire PV**. Les prix observés ces derniers mois rendent crédible le scénario d'une **annulation du coût net annuel du soutien post-moratoire de l'Etat dès 2022**. Cette situation serait atteinte avec un prix moyen de l'électricité de 108€/MWh en 2022, et pour une valeur inférieure à 90€/MWh en 2030.
- Dans ce scénario, le **coût net du soutien total de l'Etat au solaire post-moratoire sera limité à 4,4 Mds€ sur l'ensemble de la période 2012-2030**. Ce montant pourrait même être partiellement résorbé en cas de prix de marché supérieur.
- Dans ce scénario, l'investissement de l'Etat auprès de la filière post-moratoire aura permis de générer entre 2,7 et 3,6 Md€ de contribution annuelle au PIB à horizon 2030, soit entre 31,5 Md€ et 34 Md€ de contribution au PIB national sur l'ensemble de la période 2012-2030.
- Ainsi, nous estimons dans ce scénario qu'1€ investi par l'Etat aura permis de générer 7€ de contribution au PIB sur l'ensemble de la période 2012-2030. Par ailleurs, 1€ investi par l'Etat se sera traduit par 4,2€ de recettes publiques (taxes et cotisations) sur cette période.**
- Ce retour sur investissement pourrait être encore plus élevé dans le cas où (i) les prix de marché de l'électricité augmenteraient, (ii) le rythme de développement des capacités solaires PV s'avérerait supérieur à celui prévu dans le PPE ou (iii) si la relocalisation d'une partie de la chaîne de valeur de la filière solaire PV serait soutenue.

*Le chiffre ne prend pas en compte les retombées positives de ces investissements.

**Avec les hypothèses hautes PPE, 44 GW en 2028 et relocalisation de 2 gigafactories



Valeur économique

85 %

Baisse du LCOE depuis 2010

2,7 - 3,6
Md€

Contribution annuelle au PIB de la filière solaire PV à horizon 2030**

x4,2

1€ investi par la puissance publique aura permis de générer 4,2€ de recettes pour l'Etat sur la période 2012 - 2030

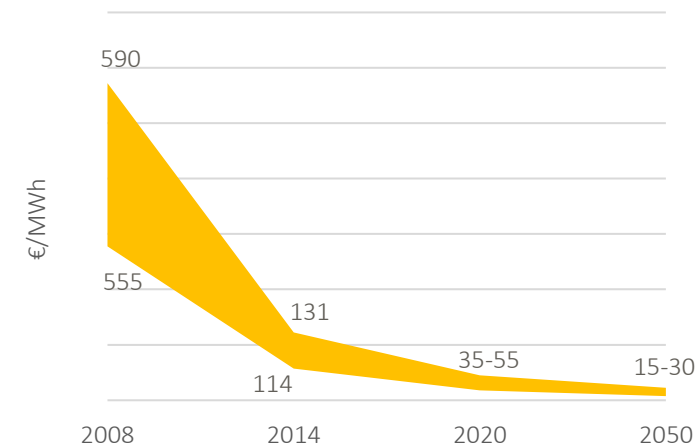
Le solaire est une énergie peu chère, dont le coût de production (LCOE) a chuté de 85% depuis 2010



Baisse du LCOE

- Le solaire est une des sources de production d'électricité les plus compétitives en France aujourd'hui.
- Le coût de production de l'électricité solaire PV, exprimé au travers de son LCOE (Levelized Cost Of Energy) **a baissé de 85% depuis 2010**. [25]
 - Cette baisse est plus importante que celle prévue dans les projections.** Certaines centrales présentent des LCOE presque deux fois inférieurs aux projections d'il y a 5 ans. En 2016, Wood Mackenzie prévoyait un LCOE de 81 €/MWh pour les grandes centrales au sol d'ici 2021. [30] [31]
 - Ce coût de production, autour de 54,5 €/MWh fin 2020 pour les installations supérieures à 5 MWc (et pouvant atteindre 35-55 €/MWh pour les plus grandes centrales au sol) en fait une des sources de production d'électricité les plus compétitives en France aujourd'hui. La France atteint des coûts de production comparables à ceux en Allemagne (48 €/MWh) pour les 30% des projets au sol les plus compétitifs.
- Le LCOE du solaire PV varie selon les régions.
 - Le productible d'une installation est un facteur déterminant dans la rentabilité d'un projet. Les régions les plus ensoleillées du sud de la France constituent à ce titre des zones préférentielles pour l'implantation d'une installation.
 - Cet avantage est compensé par un surcoût sur certains postes de dépenses (location, coûts de raccordement, etc.) et par l'introduction du critère de notation valorisant l'utilisation de terrains dégradés pour l'AO PV au sol qui favorise majoritairement les régions du nord du territoire, au sein desquelles la concentration de friches industrielles est plus importante.

- Le LCOE est susceptible de connaître un sursaut ponctuel en 2022, suite à la hausse des cours mondiaux de matières premières.
- Toutefois, **d'ici 2030, la compétitivité du solaire par rapport aux énergies conventionnelles devrait encore se renforcer.**
 - Le LCOE du solaire PV devrait continuer à baisser et atteindre **15-35 €/MWh pour les grandes centrales au sol en 2050**.
 - Le LCOE des énergies fossiles devrait lui augmenter avec l'augmentation du prix du carbone, afin d'atteindre l'objectif de baisse de 55% des émissions de GES d'ici 2030 à l'échelle européenne.



35-55

€/MWh pour les grandes centrales au sol fin 2020 [14] [32]

Evolution passée et projetée du LCOE des centrales photovoltaïques au sol [14] [32]



Cette baisse du LCOE est due à une diminution des CAPEX de 75% en 10 ans, ainsi qu'à une diminution des OPEX de 81% en 10 ans



Le solaire PV constitue une source d'énergie de plus en plus compétitive, notamment grâce à la baisse des coûts d'investissement (CAPEX)...

- **Entre 2011 et 2019, les CAPEX du solaire PV ont diminué d'en moyenne 75%. [32]**
 - Les coûts de référence des installations mises en service entre 2011 et 2012 se situaient autour de 4 000 €/kWc. Ils sont désormais passés sous la barre des 1 000 €/kWc, et même sous les 600 €/kWc pour les plus grands projets. [32]
 - Cette dynamique est largement due à la baisse du prix des modules photovoltaïques à l'échelle mondiale, qui ont baissé de plus de 80% sur 2009-2019 (plus de 2 €/Wc à environ 0,49 €/Wc) en raison d'évolutions technologiques et de gains de compétitivité à l'échelle mondiale.
- **Une poursuite de la baisse des coûts d'installations est attendue, sur un rythme plus lent.**
 - L'année 2021 présente une hausse des CAPEX. Celle-ci s'explique par une hausse du prix des matières premières des panneaux solaires : polysilicium (+300% entre août et septembre 2021), argent (+50% entre 2019 et 2021), acier (+110% en 2021), cuivre (35% en 2021) et aluminium (+50% en 2021). [33]
 - Une baisse des coûts est attendue sur le long terme, grâce à l'amélioration du rendement des cellules (réduction de la consommation de polysilicium, augmentation de la taille des wafers, développement de cellules à hauts rendements, développement de modules bifaciaux, réduction des pertes) et à des effets d'échelle liés à l'accélération de la filière solaire PV au niveau mondial.
 - La baisse des coûts est ainsi estimée à 4%/an pour le sol et 5 à 7% par an pour les installations sur toitures dans les prochaines années. [32]

...et une baisse des coûts d'exploitation (OPEX)

- La compétitivité du solaire s'explique également par la baisse des coûts d'exploitation.
Les **OPEX ont baissé en moyenne de 81% en moyenne entre 2010 et 2020**, (avec des OPEX moyens de 95€/kW/an en 2010, et qui atteignent 16-18€/kWc sur les AO CRE SOL et BAT de 2020). [32]
- **Baisse des coûts d'opération et maintenance (O&M)**
 - La baisse des O&M impact les OPEX, puisqu'il s'agit du poste principal de dépenses d'OPEX (25-40%). [32] Celle-ci s'explique par plusieurs facteurs.
 - La croissance du portefeuille de parcs pour les entreprises exploitantes, leur permet de bénéficier d'effets d'échelle. Par exemple, cela permet d'optimiser la maintenance en augmentant le volume de parc par opérateur mobilisé. [32]
 - La professionnalisation des acteurs (exploitants, installateurs, développeurs, assureurs ou encore agrégateurs) a permis l'émergence de solutions optimisées pour la filière. Les frais de fonctionnement annuels moyens d'une installation PV sont aujourd'hui passés sous la barre des 20 €/kWc sur la plupart des segments.
 - Des stratégies de maintenance préventive basées sur l'analyse croisée des données électriques, thermographiques et des matériaux pourront abaisser les coûts d'exploitation et bonifier la performance des centrales.
- **Baisse des frais de vente de l'électricité**
 - Les frais de vente de l'électricité ont également baissé.
 - Ces frais ne concernent que les installations bénéficiant d'un contrat de complément de rémunération, à savoir les installations de puissances supérieures à 500 kWc (soit l'intégralité des installations au sol et une portion des installations sur bâtiments et ombrières). [32]

Cette tendance permet à la filière solaire PV de se développer tout en diminuant la contribution du soutien public. Son développement permet également de limiter la hausse des prix de marché et favorise les investissements privés



Avec une baisse des coûts de production, le niveau de soutien public est également amené à décroître

- Dans les années à venir, en raison d'un coût moyen de production qui continue à baisser, le coût de soutien qui sera apporté aux nouvelles installations PV sera beaucoup plus faible que dans le passé. [34]
- Une part significative des grands projets PV au sol présente des coûts de production proches voire inférieurs aux prix de marché actuels. Ainsi, le solaire au sol commence à se développer sans contribution du soutien public.
 - Via des contrats de Corporate Power Purchase Agreements (cPPA) : après un premier PPA solaire signé en 2019, le marché des PPA en France croît et atteint plus de 200 MW signés sur l'année 2020.
 - Via des projets d'autoconsommation : il y a 10 ans, l'autoconsommation représentait une puissance de 1 MW en France. Ce chiffre a connu une progression fulgurante ces dernières années puisqu'elle représente, en 2020, une production de 283 MW. [35]
 - Les projets bénéficiant d'un soutien public sous forme de complément de rémunération, fonctionnent eux-mêmes sans soutien public lorsque les prix de marché sont plus élevés que le prix fixé, et qu'ils reversent la différence à l'Etat. [36]
- De plus, à mesure que les coûts de production des énergies renouvelables diminuent, **ces technologies s'approchent a priori d'un équilibre économique** qui pourrait être assuré uniquement par les rémunérations du marché électrique, sans complément de rémunération. [36]

Le développement massif du solaire permettra de limiter la hausse des prix de marché.

- Le solaire apporte une sécurité contre la volatilité des prix pour les consommateurs et pour les producteurs via les PPA, l'autoconsommation ou le complément de rémunération.
- Le solaire, et les énergies renouvelables de manière générale, sont des énergies dont on connaît parfaitement le prix pour les 20 prochaines années, car la part des coûts d'exploitation est très faible, contrairement aux énergies fossiles, dont le prix des matières premières est variable.

L'alignement du solaire vis-à-vis des critères de la taxonomie européenne garantit durablement un accès privilégié de la filière solaire PV aux investissements privés.

- La taxonomie verte a vocation à être utilisée comme référentiel pour l'émission de green bonds.
- Les actifs solaires font partie de ceux dont le caractère aligné vis-à-vis de ce référentiel est le plus facile à démontrer, ce qui est de nature à renforcer durablement l'intérêt des investisseurs pour cette classe d'actifs, et contribue à garantir un coût du capital maîtrisé.
- Les mécanismes publics encadrant la rémunération des actifs solaires (p.ex. obligation d'achat ou complément de rémunération) sont en outre eux-mêmes financés par des OAT vertes émises par l'Etat à des taux favorables.



La hausse des prix de marché de l'électricité, conjuguée au développement du solaire, permet d'envisager l'annulation du coût net du soutien de l'Etat à la filière solaire PV



Constats initiaux

- La hausse des prix de marché de l'électricité observée depuis l'automne 2021 a pour conséquence de réduire le coût net du soutien versé par l'Etat au titre des mécanismes de rémunération du solaire PV.
 - Le niveau de soutien net apporté par l'Etat à la filière solaire PV est susceptible de baisser chaque année à mesure que la **différence entre le tarif moyen obtenu par le parc en exploitation et le prix de marché moyen s'amenuise**.
- Les projections** des évolutions du niveau de soutien au solaire PV (et plus généralement aux énergies renouvelables) **effectuées avant l'été 2021** sont à présent **obsolètes car basées sur des prévisions de prix de marché trop basses** et déconnectées des tendances observées depuis l'automne 2021.

Approche méthodologique

- Les chiffres de l'observatoire FTS (capacités raccordées annuellement et tarifs obtenus par segment de marché du solaire PV) permettent de reconstituer le portefeuille d'actifs de production mis en service à partir de 2011.
- Il a été possible de mettre en perspective le niveau de tarif moyen obtenu par le parc solaire PV en exploitation une année N et le niveau de prix moyen correspondant au profil de production du solaire PV (MO_{solaire}).
- Une sensibilité sur le niveau de prix de marché moyen (MO) a été réalisée pour **identifier le niveau conduisant à annuler chaque année le coût net** du soutien de l'Etat à la filière solaire PV post-moratoire.

- Le coût net du soutien de l'Etat est calculé en retirant des charges annuelles de CSPE (sous forme d'obligation d'achat et de complément de rémunération) le revenu de l'Etat lié au prix de l'électricité (incluant les tarifs d'injection totale de l'électricité sur le réseau, ainsi que les tarifs de surplus d'autoconsommation). Ce calcul modélise donc le cash flow de l'Etat et ne traduit pas l'entièreté du coût économique.
- De ce fait, il est possible de corroborer ce coût net du soutien de l'Etat au PV post-moratoire au prix marché de l'électricité et ainsi montrer qu'à partir d'un certain niveau de prix de marché MO , le coût net du soutien de l'Etat est neutre, voire devient une recette pour ce dernier.

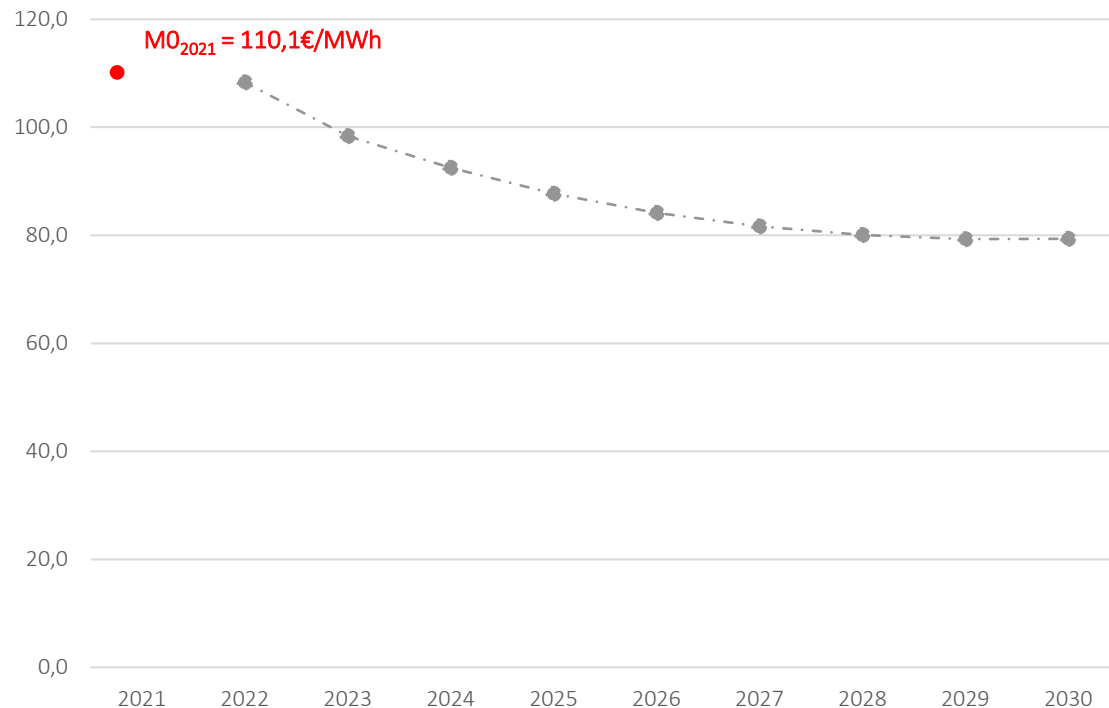
Hypothèses considérées

- La modélisation se limite aux **projets PV post-moratoires**.
- Les capacités raccordées à l'année N produisent à partir de l'année N+1.
- Le facteur de charge utilisé est constant pour l'ensemble des segments de marché et égal à **1,14 GWh/MW/an** au moment de la mise en service d'un actif
- Une **perte de rendement des installations de 0,2%** chaque année est appliquée.
- La simulation prévoit une part croissante de projets sortant du schéma historique de l'injection totale, via l'essor de l'autoconsommation avec injection du surplus pour les plus petites capacités, et des corporate PPA pour les plus grands projets.

Le prix moyen de marché (M0) conduisant à annuler chaque année le coût net du soutien de l'Etat au PV post-moratoire est atteignable



M0 max équilibrant le niveau de soutien public au solaire post-moratoire (€/MWh)



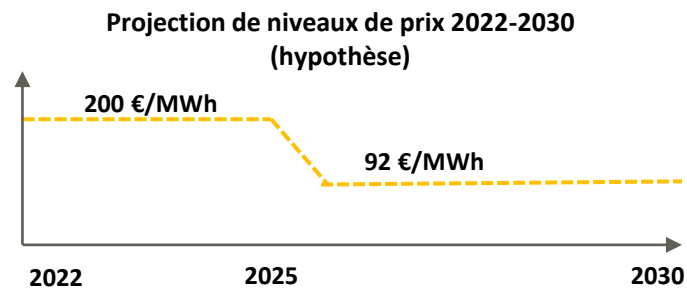
La valeur du $M0_{2021}$ est une valeur réelle, alors que la courbe présentée en pointillés montre les valeurs du M0 venant annuler le soutien public de l'Etat.

Constats et analyses

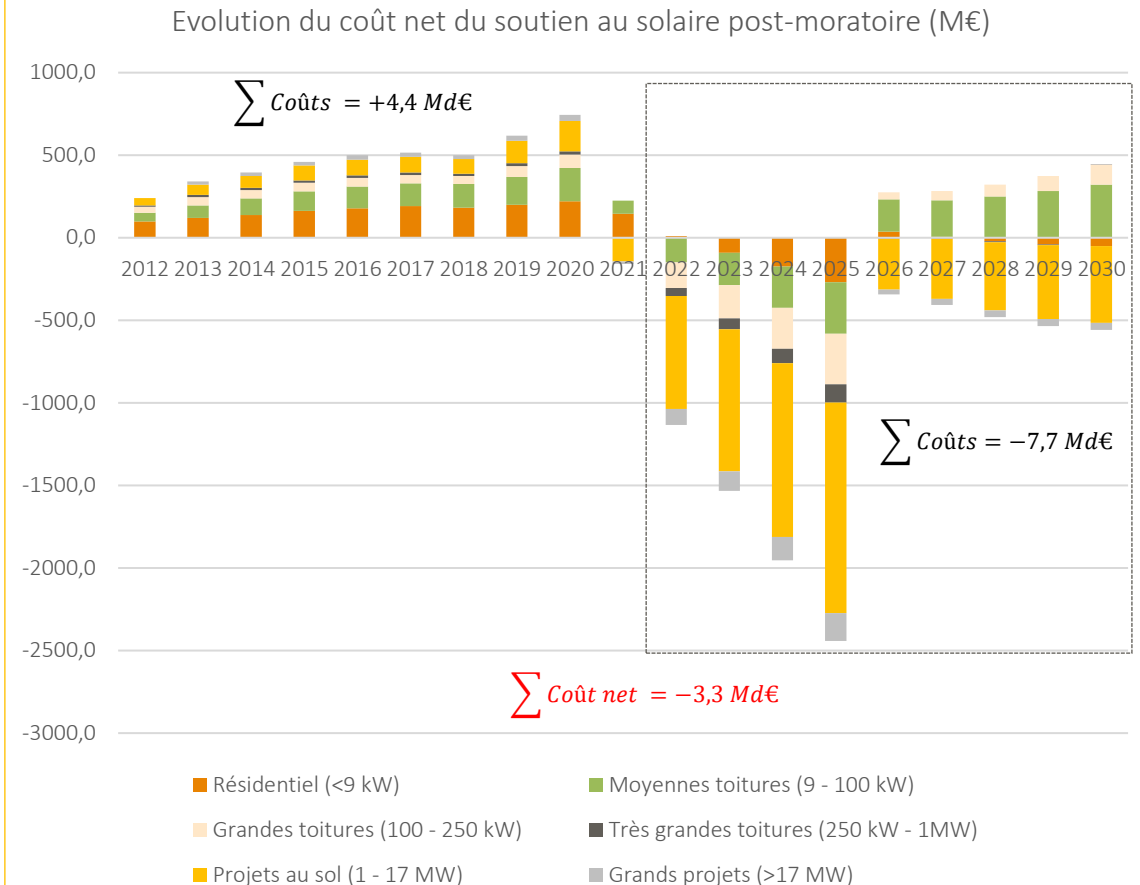
- Les niveaux de prix moyen de l'électricité observés depuis l'automne 2021 rendent crédible le scénario d'une annulation du coût net du soutien de l'Etat au titre des mécanismes de rémunération du solaire PV post-moratoire. Nous estimons que cette situation serait atteinte avec un prix moyen de l'électricité de 108€/MWh en 2022, et pour une valeur inférieure à 90€/MWh en 2030.
- A titre de comparaison, le **M0 moyen a été de 110,1€/MWh pour l'ensemble de l'année 2021, et de 211,42€/MWh pour le mois de janvier 2022.** [37]
- Le coût net du soutien de l'Etat pourrait même devenir négatif – c'est-à-dire constituer un flux de recette directe pour l'Etat – dès 2022 dans l'hypothèse où les prix de marché de l'électricité demeureraient au-dessus de ces niveaux.

Le maintien des prix de l'électricité aux niveaux actuels se traduiront par des recettes directes pour l'Etat, estimées à +7,7 Md€ sur l'ensemble de la période 2022-2030

- Au-delà des niveaux de M0 moyens annulant le coût des différents scénarios envisagés, des prix de marché supérieurs à ces seuils conduiraient à ce que le « soutien » apporté à la filière se traduise en réalité par une recette nette du point de vue de l'Etat.
- A ces recettes s'ajouteraient l'ensemble des versements effectués par les acteurs de la filière à la puissance publique (e.g. taxes, cotisations sociales).
- La hausse des prix de l'électricité s'inscrivant dans une tendance pérenne, la CRE anticipe dans une logique conservatrice, des niveaux de **prix semblables aux niveaux actuels jusqu'en 2025, puis des prix de l'ordre de 92 €/MWh les années suivantes.**
- De tels niveaux de prix se traduiront alors sur l'ensemble du **solaire post-moratoire** par:
 - 7,7 Mds€ de recettes sur la période 2022-2030** (soit 7,1 Mds€ entre 2022-2025 et 0,6 Mds€ entre 2025-2030).
 - 3,3 Md€ de recettes totales nettes** pour l'ensemble de la période 2012-2030.



Evolution du coût du soutien net par l'Etat au solaire PV post-moratoire (M€) selon les projections de niveaux de prix mentionnées



Une modélisation basée sur une table de Léontief permet de calculer la contribution au PIB générée par la filière solaire PV entre 2021 et 2030 selon les hypothèses de la PPE

Objectifs de l'analyse

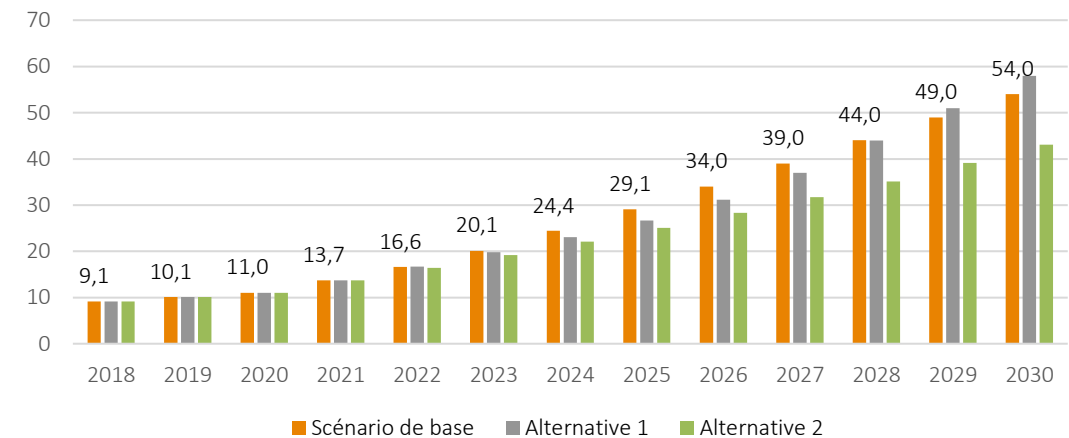
- Une nouvelle modélisation a été réalisée afin **d'estimer la contribution au PIB directe et indirecte générée par la filière solaire PV de 2021 à 2030.**
- Ce modèle se base sur plusieurs hypothèses d'entrée (CAPEX, OPEX, capacités installées).
- Les hypothèses de CAPEX et OPEX ont fait l'objet d'itérations avec un Comité de pilotage réunissant une 21 adhérents de FTS.
- Les hypothèses de capacités installées se basent sur les hypothèses de la PPE jusqu'à 2028, puis plusieurs scénarios ont été envisagés post 2028.
- Le modèle utilise ensuite une table entrée sortie de Léontief. Cette matrice permet de **cartographier les rapports entre les différents secteurs économiques et de déduire le nombre d'emplois soutenus par la filière solaire PV.**

Définitions

- **Contribution au PIB :** exprimée en milliards d'euros.
- **Contribution au PIB directe :** il s'agit de la contribution au PIB issue des acteurs de la chaîne de valeur du solaire : les développeurs, les fabricants d'équipements, les constructeurs, les exploitants, les opérateurs de maintenance.
- **Contribution au PIB indirecte :** il s'agit de la contribution au PIB issue des acteurs indirects de la chaîne de valeur du solaire : l'ensemble des sous-traitants ou fournisseurs de biens et services des acteurs directs.

Hypothèses des différents scénarios

- Plusieurs scénarios ont été élaborés en fonction des hypothèses de capacités installées.
- **Scénario de base :** il reprend les objectifs hauts de la PPE (44 GW en 2028), puis considère une augmentation des capacités installées post 2028 de 5 GW/an.
- **Alternative 1 :** cette alternative consiste à garder les objectifs hauts de la PPE (44 GW en 2028), mais à augmenter les capacités installées annuellement post 2028 de 5 à 7 GW.
- **Alternative 2 :** cette seconde alternative, conservatrice, consiste à prendre comme capacités installées en 2028, les objectifs bas de la PPE, soit 35,1 GW, puis à garder une capacité installée annuellement constante de 4 GW post 2028.



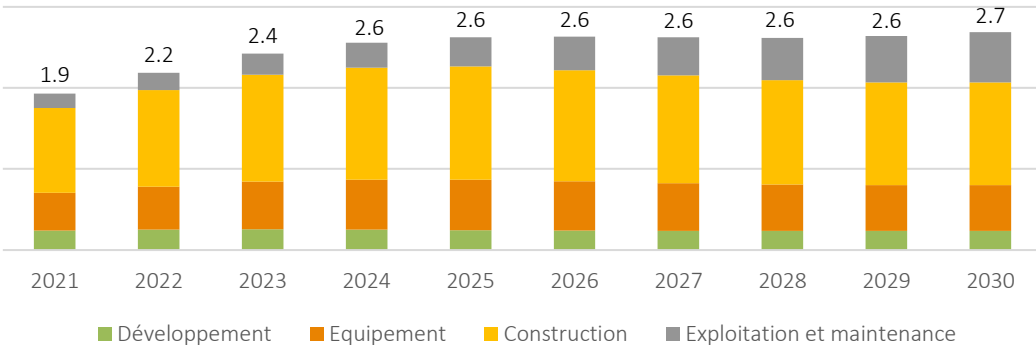
Hypothèses de capacités installées des différents scénarios du modèle (en GW)

Dans le scénario de base, le développement de la filière solaire PV est à l'origine d'un potentiel de 2,7 Md€ de contribution au PIB générée à horizon 2030 (1/2)

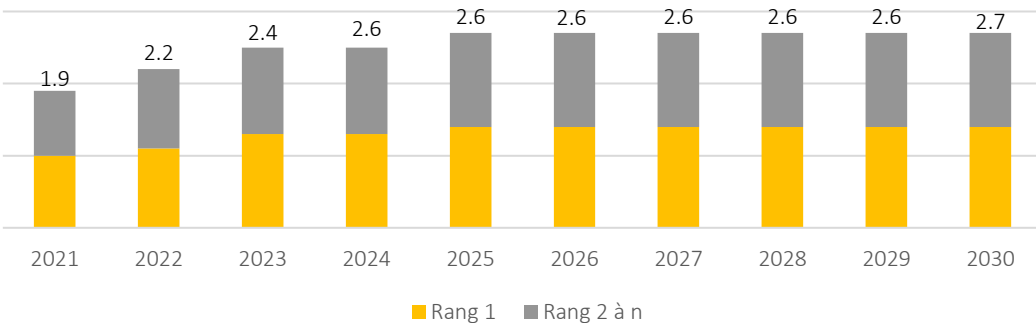


Contribution au PIB par segment de la chaîne de valeur industrielle

- Pour rappel, le scénario de base reprend les objectifs hauts de la PPE (44 GW en 2028), puis +5 GW/an post 2028.
- **Le développement des énergies renouvelables, tel que prévu par la PPE, devrait générer d'importantes retombées économiques sur le territoire.** Pour la France métropolitaine, la contribution au PIB annuelle créée par la filière solaire PV devrait ainsi augmenter de 120% entre 2021 et 2030, pour atteindre 2,7 Md€ annuels en 2030.
- L'évolution globale entre 2021 et 2030 montre une contribution au PIB croissante, en particulier de 2021 à 2024 avec l'accélération des capacités installées annuellement pour atteindre les objectifs PPE de 2028. De 2028 à 2030, les capacités installées annuellement sont constantes dans le modèle, ce qui se répercute sur les années 2024 à 2030, la majorité de la contribution au PIB étant liée à la construction.
- La part relative à l'exploitation des installations est en croissance (22% en 2030), mais demeure moins conséquente que la construction et l'installation qui sont intenses en création d'emplois et donc en contribution au PIB (48%).
- Enfin la production d'équipements représente 22% de la création de valeur, mais il s'agit du segment dont le potentiel de croissance est le plus important, avec des retombées positives pour le développement de l'industrie française PV.
- Les acteurs directement impliqués dans la filière génèrent plus de la moitié de cette valeur économique (52% de la contribution au PIB annuelle totale). Les 49% restants sont générés par l'ensemble des sous-traitants, fournisseurs de biens et services, de ces acteurs (contribution au PIB indirecte).



Décomposition de la contribution au PIB (Md€), de 2021 à 2030, en fonction du segment de la chaîne de valeur industrielle – scénario de base

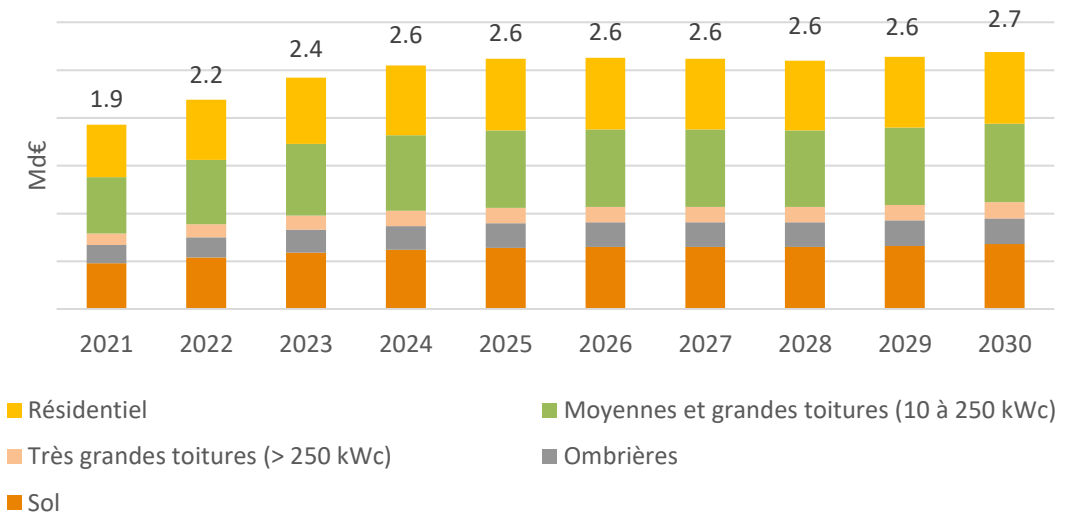


Décomposition de la contribution au PIB (Md€), de 2021 à 2030, par rang direct (rang 1) ou indirect (rang 2 à n) – scénario de base

Dans le scénario de base, le développement de la filière solaire PV est à l'origine d'un potentiel de 2,7 Md€ de contribution au PIB générée à horizon 2030 (2/2)

Décomposition de la contribution au PIB par milieu d'implantation

- La contribution au PIB a également été **décomposée selon le milieu d'implantation**. La segmentation est la suivante : résidentiel (15% des parts de marchés), moyennes et grandes toitures (<250kW, 30%), très grandes toitures (5%), ombrières (10%) projets au sol (40%).
- La contribution au PIB des différents milieux d'implantation est liée à deux facteurs : d'une part leur part de marché respectives, donc à leurs capacités installées, d'autre part aux coûts (CAPEX et OPEX) de chaque milieu.
 - Ainsi, malgré des capacités annuelles plus faibles, les segments résidentiels et moyennes et grandes toitures recensent les plus grandes valeurs ajoutées annuelles en 2030 : 0,8 Md€ annuels chacun (devant les 0,7 Md€ annuels pour le solaire au sol), malgré leur part de marché plus faible.
- La contribution au PIB générée par le développement du solaire PV profite essentiellement à **l'économie nationale**.
 - Jusqu'en 2030, en considérant des taux d'importation d'équipements et de composants actuels constants, **84% de la valeur économique générée par le développement du solaire PV reste localisée en France**. Cela s'explique par le poids des activités ancrées dans les territoires telles que le développement, la construction, l'exploitation et la maintenance.



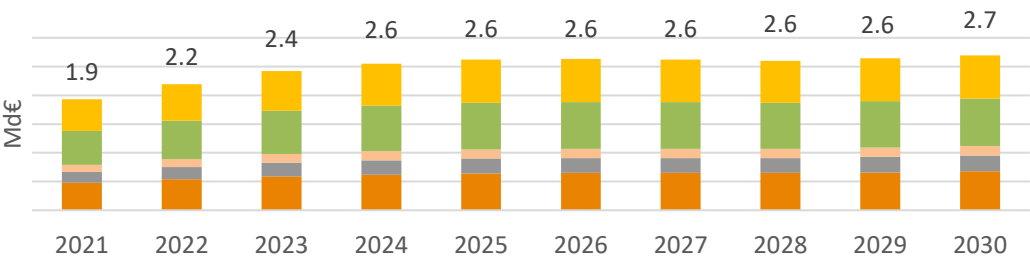
Décomposition de la contribution au PIB (Md€), de 2021 à 2030, en fonction du milieu d'implantation – Scénario de base

Une contribution au PIB à horizon 2030 qui varie de 2,7 Md€ à 3,6 Md€ selon les hypothèses considérées post 2028 (pour 44 GW en 2028)

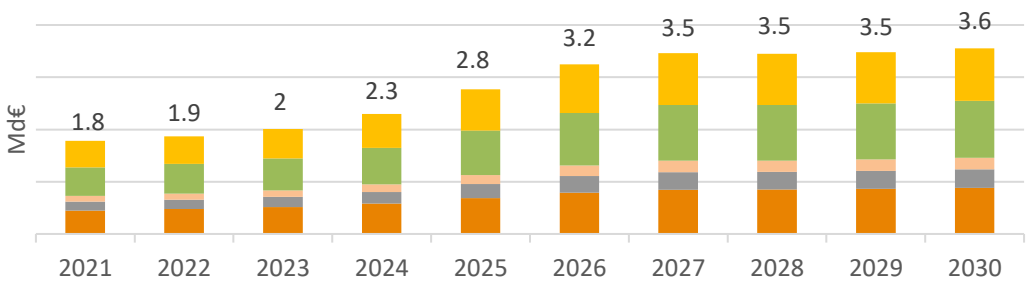
Analyse de sensibilité

- Une analyse de sensibilité a été réalisée en fonction des hypothèses de capacités installées.
- La contribution au PIB générée par le développement du solaire varie de 2,7 Md€ (scénario de base: objectif haut de la PPE en 2028, puis +5 GW/an post 2028) à 3,6 Md€ (alternative 1 : objectif haut de la PPE en 2028, puis +7 GW/an post 2028).
- En considérant l'alternative 2 et donc l'objectif bas de la PPE, cette contribution au PIB est de 2,3 Md€.

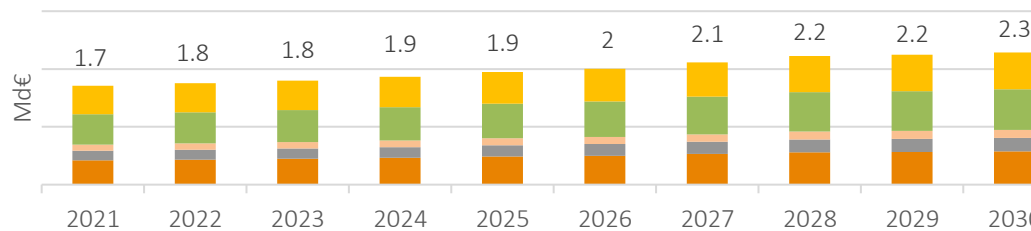
Décomposition de la contribution au PIB (Md€), de 2021 à 2030, en fonction du segment du segment d'implantation



(a) Scénario de base : PPE Haute (44 GW en 2028) et + 5GW/an post 2028



(b) Alternative 1 : PPE Haute (44 GW en 2028) et + 7GW/an post 2028



(c) Alternative 2 : PPE Basse (35,1 GW en 2028) et + 4GW/an post 2028

- Résidentiel
- Moyennes et grandes toitures (10 à 250 kWc)
- Très grandes toitures (> 250 kWc)

La mise en perspective du coût net du soutien de l'Etat avec la contribution au PIB générée au niveau national traduit un taux de rendement interne significatif du point de vue de la puissance publique



Un coût net du soutien public estimé à 4,4 Md€ sur la période 2012-2030

- La dépense nette de l'Etat entre 2012 et 2021 est de 4,4 Md€.
 - Les hypothèses du calcul sont les suivantes : les hypothèses de prix de marché, ainsi que les hypothèses de capacités installées du solaire issues du scénario de base (soit un objectif haut de la PPE en 2028 (44 GW), puis 5 GW/an post 2028).
- **La dépense nette de l'Etat entre 2012 et 2030 est estimée à 4,4 Md€.**
 - Il est tout à fait **envisageable que les coûts de soutien public entre 2021 et 2030 deviennent nuls**, voire négatifs. En effet, les niveaux de prix moyen de l'électricité observés depuis l'automne 2021 rendent crédible le scénario d'une annulation du coût net du soutien de l'Etat au titre des mécanismes de rémunération du solaire PV post-moratoire.
 - Nous estimons que cette situation serait atteinte avec un prix moyen de l'électricité de 108€/MWh en 2022, et pour une valeur inférieure à 90€/MWh en 2030.

Une contribution au PIB générée de 31,5 à 34 Md€ sur la période 2012-2030

- **La filière solaire génère entre 31,5 Md€ et 34 Md€ de contribution au PIB sur l'ensemble de la période 2012-2030.**
 - Les calculs issus de la modélisation permettent d'aboutir, en fonction du scénario pris en compte, à une contribution au PIB générée par la filière solaire PV de 2021 à 2030 de 24,9 Md€ à 27,9 Md€.
 - Une régression linéaire basée sur les capacités annuelles installées permet d'extrapoler cette valeur sur la période allant de 2012 à 2020 et donne 6,1 Md€ à 6,6 Md€ de contribution au PIB générée par la filière solaire de 2012 à 2020.
- **La puissance publique a perçu entre 4,3 Md€ et 4,6 Md€ de taxes générées par la filière solaire PV de 2012 à 2030, et entre 14,1 Md€ et 15,2 Md€ de cotisations sociales et patronales.**
 - En utilisant des données d'entrée du modèle socio-économique du SER de 2019 sur les retombées fiscales associées à la filière solaire, ainsi qu'une étude de l'institut Molinari permettant de déterminer le pourcentage de charges sociales et patronales sur les salaires français, il a été possible de calculer les taxes dont a bénéficié l'Etat grâce à la filière solaire PV. [60]

La filière solaire PV est donc génératrice de revenus, et pourrait même être perçue comme génératrice de revenus pour l'Etat sur les années à venir

- Le coût net annuel du soutien de l'Etat pourrait devenir négatif – c'est-à-dire constituer un flux de recette directe pour l'Etat – dès 2022 dans l'hypothèse où les prix de marché de l'électricité demeureraient au-dessus de ces niveaux.
- Dans un scénario – aujourd'hui probable voire conservateur - où les flux de soutien de l'Etat aux projets post-moratoire s'annuleraient durablement entre 2012 et 2030, **nous estimons qu'1€ investi par l'Etat aura permis de générer 7€ de contribution au PIB sur la période 2012-2030. De même, 1€ investi par l'Etat aura généré 4,2€ de recettes publiques (taxes et cotisations) sur cette période.**



3. Analyse des postes de valeurs créés par la filière solaire PV

Valeur sociétale

Une énergie locale plébiscitée par les citoyens, pourvoyeuse d'emplois et génératrice de solidarités territoriales



La filière solaire PV française est plébiscitée par les Français :

- Le solaire PV bénéficie d'une **bonne image auprès de 86% des Français**, qui apporte des solutions à leurs préoccupations et leur permet d'être impliqués dans la transition écologique.

La filière solaire PV est créatrice d'emplois pérennes et en grande partie non délocalisables

- La filière solaire permettra de soutenir jusqu'à 52 000 emplois (ETPs directs et indirects) en France à horizon 2030**, selon les hypothèses hautes de la PPE (44 GW en 2028) et en prenant en compte la relocalisation d'ici 2030 de deux gigafactories de production de panneaux PV.
- Ces chiffres seraient encore plus élevés dans le cas où les ambitions de la PPE seraient revues à la hausse.
- La majorité de ces emplois sont liés à des **activités non délocalisables** de développement de projets, d'installation et d'exploitation de centrales.

Le développement du solaire PV permet de générer des compléments de revenus pour les agriculteurs ou les collectivités

- Le solaire PV permet une **valorisation économique de surfaces improductives (toitures)**.
- Le solaire permet la création de **revenus complémentaires** pour des différents types d'acteurs (p.ex. agriculteurs, entreprises, particuliers ou collectivités). Il est également un outil de maîtrise des coûts de production pour les entreprises ayant recours à l'autoconsommation ou des corporate PPA. Il concourt ainsi à l'amélioration de la **compétitivité de ces acteurs et à la pérennisation de ces activités**.

Le solaire permet d'inventer de nouvelles solidarités locales

- Grâce au financement solidaire de mécanismes d'autoconsommations, il permet de **lutter contre la précarité énergétique** en faisant baisser les factures des loyers les plus précaires en France.
- Les projets solaires permettent le désamiantage et la réhabilitation de vieux bâtiments, induisant de **nombreux bénéfices locaux** dont le maintien en activité de sites industriels et la préservation d'emplois.

*Avec les hypothèses hautes PPE, 44 GW en 2028 et relocalisation de 2 gigafactories



86 %

Des français ont une
bonne image du
solaire

52
Milliers
d'emplois

Emplois directs et
indirects soutenus
par la filière solaire PV
en France en 2030*

Une filière plébiscitée par les Français qui apporte des solutions à leurs préoccupations et leur permet d'être impliqués dans la transition écologique



Une source d'énergie soutenue à 86% par les Français

- Tous les sondages confirment le **soutien franc et massif des citoyens français au développement de l'énergie solaire**.
 - Près de neuf Français sur dix partagent une bonne image de cette énergie (86%), un quart affirment en avoir une très bonne image (24%). Ce jugement s'avère particulièrement affirmé auprès des français qui ont remarqué des installations solaires PV dans leur commune (27% vs. 15% au sein de ceux qui n'en ont pas remarqué). [38]
 - Le solaire est perçu comme une réponse à plusieurs préoccupations centrales des Français : l'emploi, la qualité de vie et la lutte contre le changement climatique. [38]
 - Cette tendance se confirme et s'accroît également dans les autres pays de l'Union Européenne. 92% des citoyens européens interrogés en mai 2021 considèrent que le solaire aura un impact positif sur les modes de vie au cours des 20 prochaines années, contre 87% en 2010. [39]
- Si les installations de grande taille (supérieures à deux terrains de football) présentent des enjeux d'acceptation plus marqués, la majorité des Français réfractaires à ce type d'installations pourrait changer d'avis si une contrepartie financière individuelle ou collective était négociée (51 %). Ils seraient alors 63 % à accepter ces installations. La priorité est donnée aux usages du sol (agriculture, loisirs, végétations), et non au critère esthétique de l'installation (36%). [38]

Une énergie qui permet d'impliquer les citoyens et territoires dans la transition énergétique

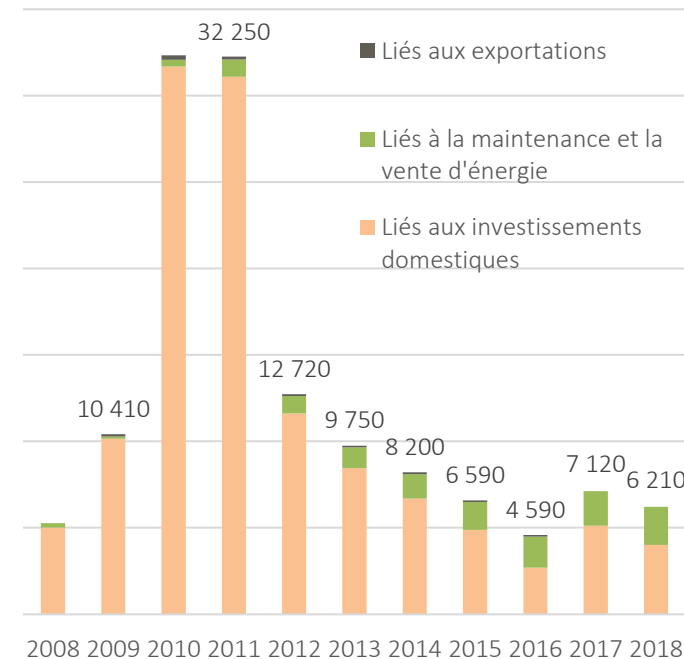
- Les citoyens montrent aujourd'hui une réelle volonté de jouer un rôle dans la transition énergétique, et les énergies renouvelables s'inscrivent dans cette logique.
 - **Le caractère décentralisé des projets solaires PV** permet aux acteurs des territoires d'y participer activement et d'en partager les bénéfices, en particulier via le développement du **recours au financement participatif ou la structuration de projets à gouvernance locale et citoyenne**.
 - Le caractère accessible des projets solaires (sur les plans technique, organisationnel et financier) renforce l'attrait des citoyens et collectivités pour ces projets.
- **L'autoconsommation** répond également à l'attente citoyenne de se réapproprier la production d'énergie et de devenir des consom'acteurs.
 - 63% des foyers français se disaient, en 2016, intéressés par l'idée de produire et autoconsommer leur propre électricité. [38]
 - L'autoconsommation collective permet **de créer de nouvelles solidarités locales et de lutter contre la précarité énergétique**. Plusieurs initiatives portées par exemple par des collectivités locales ou des offices HLM soulignent le rôle que peut avoir le solaire sur toiture notamment pour sortir certains ménages de la précarité.

Après une baisse significative des emplois directs créés par la filière solaire PV après 2011, les emplois sont globalement stables de 2015 à 2018



Etat des lieux des emplois liés au solaire en France

- L'ADEME a réalisé une étude évaluant le nombre d'emplois temps pleins (ETP) directs soutenus par la filière solaire PV de 2008 à 2018. On entend par **emplois directs les acteurs directement impliqués dans la chaîne de valeur du solaire** : les développeurs, les fabricants d'équipements, les constructeurs, les exploitants, les opérateurs de maintenance etc.
- Le nombre d'ETPs directs créés par la filière solaire PV en 2018 est estimé à 6 210 ETPs directs.
- Plus de la moitié de ces emplois sont liés aux activités d'installation, un peu plus d'un tiers à la maintenance et à la vente d'énergie.
- Le nombre d'emplois dans la filière solaire PV est globalement en baisse depuis 2011, puis se stabilise de 2015 à 2018.
 - En 2011, le PV se déployait essentiellement sur le segment des toitures individuelles pour des puissances < 9 kWh, secteur plus intense en emplois ramené aux puissances raccordées. [40]
 - On compte jusqu'à 41 équivalents temps plein (ETP) par MW installé annuellement pour les installations résidentielles. Les installations au sol génèrent quant à elles moins d'emplois par MW installé (environ 10 ETP/MW).
- En termes de positionnement sur la chaîne de valeur aval, **l'industrie française est bien positionnée sur certains équipements comme les onduleurs et trackers**.
 - L'industrie française souffre en revanche de la forte concurrence asiatique dans le domaine de la production de cellules et modules photovoltaïques (qui ne représentent que 4 % de la contribution au PIB d'une installation).



Evolution des emplois directs dans la filière PV française [40]

6 210

ETP en 2018

3 970

Emplois liés aux investissements domestiques

2 240

Emplois liés à la maintenance et à la vente de l'énergie

La modélisation basée sur une table de Léontief permet de calculer le nombre d'emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire entre 2021 et 2030 selon les hypothèses de la PPE



Objectifs de l'analyse

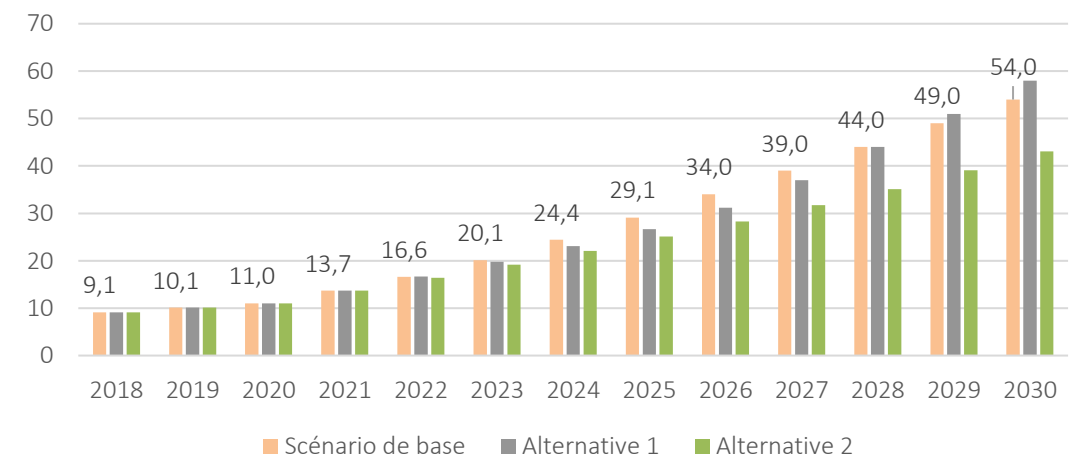
- Une nouvelle modélisation a été réalisée afin d'estimer le nombre **d'emplois directs et indirects** soutenus par la filière solaire de 2021 à 2030. Il s'agit d'une continuité de l'étude ADEME, qui a analysé le nombre d'emplois directs générés par la filière PV française jusqu'à 2018.
- Ce modèle se base sur plusieurs hypothèses d'entrée (CAPEX, OPEX, capacités installées).
 - Les hypothèses de CAPEX et OPEX ont fait l'objet d'itérations avec un Comité de pilotage réunissant 21 adhérents de FTS.
 - Les hypothèses de capacités installées se basent sur les hypothèses de la PPE jusqu'à 2028, puis plusieurs scénarios ont été envisagés post 2028.
- Le modèle suit la même méthodologie que celui établissant la contribution au PIB, à savoir une table entrée sortie de Léontief, qui permet de cartographier les rapports entre les différents secteurs économiques et d'en déduire le nombre d'emplois soutenus par la filière solaire PV.

Définitions

- **ETP directs** : il s'agit des acteurs directement impliqués dans la chaîne de valeur du solaire : les développeurs, les fabricants d'équipements, les constructeurs, les exploitants, les opérateurs de maintenance.
- **ETP indirects** : il s'agit de l'ensemble des sous-traitants, fournisseurs de biens et services de ces acteurs.

Hypothèses des différents scénarios

- Plusieurs scénarios ont été réalisés en fonction des hypothèses de capacités installées.
 - **Scénario de base** : il reprend les objectifs hauts de la PPE (44 GW en 2028), puis considère une augmentation des capacités installées post 2028 de 5 GW/an.
 - **Alternative 1** : cette alternative consiste à garder les objectifs hauts de la PPE (44 GW en 2028), mais à augmenter les capacités installées annuellement post 2028 de 5 à 7 GW.
 - **Alternative 2** : cette seconde alternative, conservatrice, consiste à prendre comme capacités installées en 2028, les objectifs bas de la PPE, soit 35,1 GW, puis à garder une capacité installée annuellement constante de 4 GW post 2028.



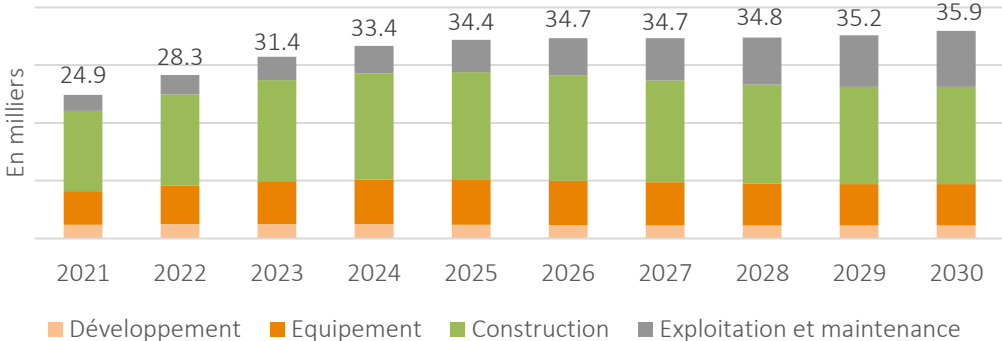
Hypothèses de capacités installées des différents scénarios du modèle

Dans le scénario de base, le développement de la filière solaire PV est à l'origine d'un potentiel de 36k emplois directs et indirects par an d'ici 2030 en France (hors emplois liés à une relocalisation de la chaîne de valeur en France)

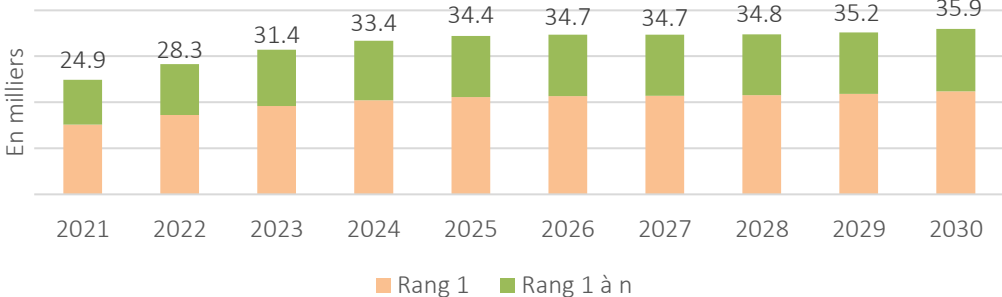


Résultats du modèle : ETP directs et indirects soutenus par la filière solaire PV, selon les segments de la chaîne de valeur industrielle

- Dans le scénario de base, les retombées par segment de la chaîne de valeur sont :
 - Le segment lié à la construction représente 47% des emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire en 2030. Il s'agit du segment le plus intensif en emplois. Le segment de l'exploitation arrive deuxième, avec 27% des emplois, puis le segment des équipements avec 20% et celui du développement avec 6%.
 - Entre 2021 et 2030, les emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire en France devraient passer de 25k à 36k (hors emplois liés à une relocalisation de la chaîne de valeur en France), soit une croissance de 44%.
- Les retombées directes et indirectes sont les suivantes :
 - Les acteurs directement impliqués dans la filière, emplois de rang 1, génèrent 62% des emplois soutenus par la filière : il s'agit des développeurs, des fabricants d'équipements, des constructeurs, des exploitants, des opérateurs de maintenance. Les 38% restants, emplois indirects de rang 2 à n, sont générés par l'ensemble des sous-traitants, fournisseurs de biens et services, de ces acteurs.
 - En 2021, le scénario estime le nombre d'emplois directs et indirects à 24,9k, dont 15.1k emplois directs (contre 6,2k en 2018 selon l'ADEME, augmentation de 143% en 3 ans).
- Cette croissance représente une opportunité de recrutement significative, pour des profils divers et dans des secteurs variés.
 - Les besoins seront importants dans les métiers techniques et les métiers de la construction (techniciens d'installation et de maintenance électrique).
 - De nouvelles compétences seront valorisées, notamment des profils hybrides : ingénieurs ayant des compétences commerciales ou experts juridiques avec des connaissances en droit de l'environnement. Des parcours de formation adaptés devront être mis en place pour accompagner la création de ces nouveaux emplois. [25]



Décomposition de 2021 à 2030, des emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire PV (en milliers), selon les segments de la chaîne de valeur industrielle – scénario de base



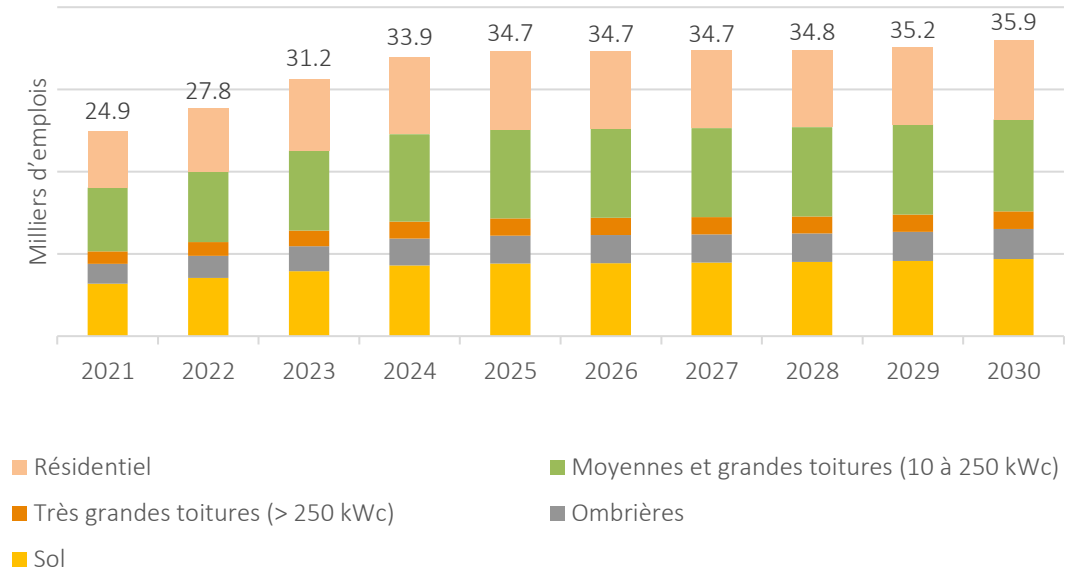
Décomposition de 2021 à 2030, des emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire PV (en milliers), selon le rang direct (rang 1) ou indirect (rang 2 à n) – Scénario de base

Une filière créatrice d'emplois locaux et en grande partie non délocalisables : 80% des emplois soutenus par la filière solaire PV sont localisés en France



Résultats du modèle : ETP directs et indirects soutenus par la filière solaire PV, selon les segments d'implantation

- Le nombre d'ETPs directs et indirects soutenus par la filière solaire PV a été décomposé par milieu d'implantation, selon la même segmentation que pour la modélisation de la valeur ajoutée (contribution au PIB).
 - Le nombre d'emplois soutenus par chacun des milieux d'implantation est lié à leur part de marché respective, donc à la part de capacités installées attribuées à chaque milieu d'implantation, et aux coûts (CAPEX et OPEX) de chaque milieu.
 - Ainsi, malgré des capacités annuelles plus faibles, le segment des moyennes et grandes toitures recense le nombre d'emplois directs et indirects soutenus le plus élevé en 2030 (près de 11 200 emplois), suivi par le résidentiel (plus de 9600 emplois), puis par les installations au sol (près de 9400 emplois).
- Les emplois créés par le développement du solaire PV profitent essentiellement à l'économie nationale.
 - En 2030, en considérant des taux d'importation d'équipements et de composants actuels constants, **80% des ETPs générés par le développement du solaire PV restent localisés en France**. Cela s'explique par le poids des activités ancrées dans les territoires telles que le développement, la construction et l'exploitation.
 - La contribution du solaire PV à l'économie française peut encore se renforcer à travers une stratégie de densification du tissu industriel français, qui pourrait résulter des stratégies à l'échelle nationale et européenne.



Décomposition de 2021 à 2030 des emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire PV (en milliers), selon les segments de la chaîne de valeur industrielle – Scénario de base (hors emplois liés à une relocalisation)

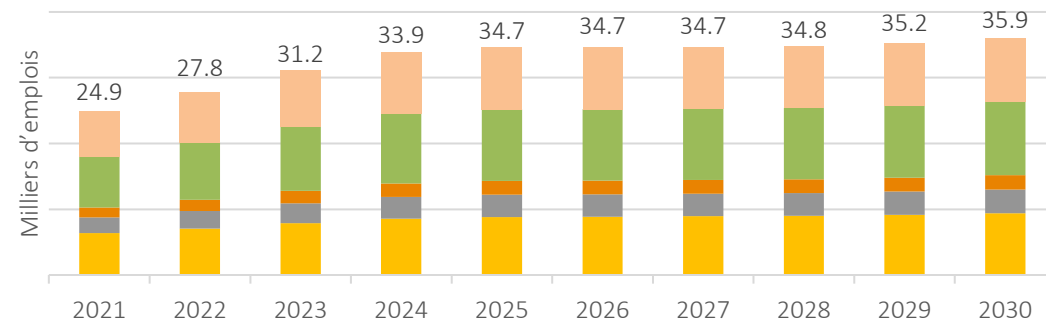
Des emplois directs et indirects soutenus qui varient de 36k à 47k emplois selon les scénarios considérés à horizon 2030 (hors emplois liés à une relocalisation de la chaîne de valeur en France)

S 1 2 3 4

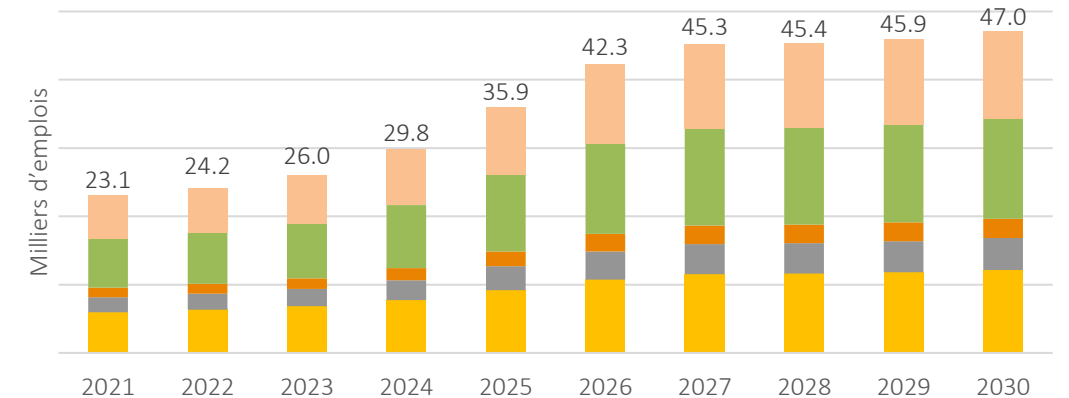
Analyse de sensibilité

- Une analyse de sensibilité a été réalisée en fonction des scénarios étudiés.
- Les emplois directs et indirects soutenus par la filière du solaire varient dans le scénario de base (PPE haute avec +5 GW/an post 2028) de 36k emplois à 47k emplois dans l'alternative 1 (PPE haute avec +7 GW/an post 2028), hors emplois liés à une relocalisation de la chaîne de valeur en France.
- Dans l'hypothèse des objectifs bas de la PPE (35,1 GW en 2028), ce nombre d'emplois n'atteint plus que 29k en 2030.

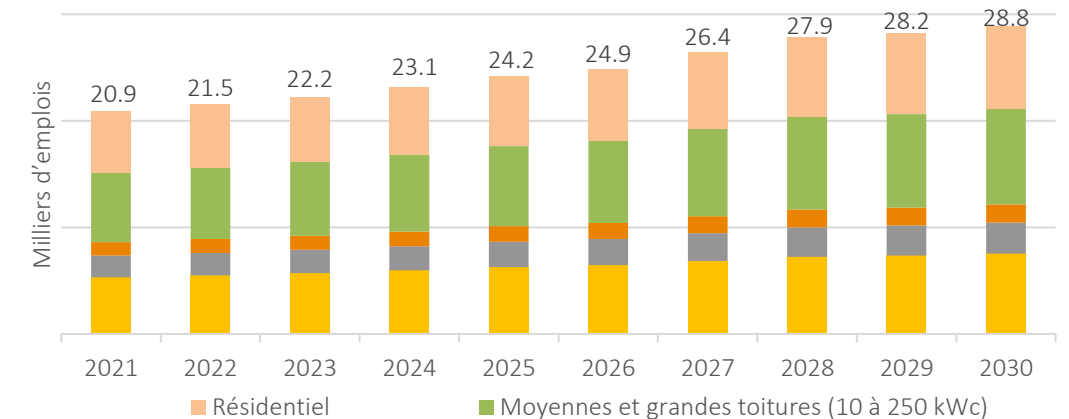
Décomposition du nombre d'emplois soutenus par la filière solaire PV (en milliers), de 2021 à 2030, en fonction du segment d'implantation (hors emplois liés à une relocalisation)



(a) Scénario de base : PPE Haute (44 GW en 2028) et + 5GW/an post 2028



(b) Alternative 1 : PPE Haute (44 GW en 2028) et + 7GW/an post 2028



(c) Alternative 2 : PPE Basse (35,1 GW en 2028) et + 4GW/an post 2028

Le nombre d'emplois soutenus pourrait encore augmenter via une relocalisation de la chaîne de valeur du solaire



Structuration et mobilisation de la filière solaire PV au niveau français et européen

- Des initiatives sont en cours à l'échelle française et européenne pour relocaliser une partie de la chaîne de valeur du solaire PV localement.
- En 2021, l'**Initiative solaire Européenne** a été créée, soutenue par la Commission Européenne, pour redéployer la chaîne de valeur industrielle du solaire PV en Europe et couvrir la demande croissante estimée à 20 GW par an. Cet investissement engendrerait 40 Md€ de PIB annuel et 400 000 emplois directs et indirects à l'échelle européenne sur la prochaine décennie. [40]
- Le **contrat stratégique de la filière industrie des nouveaux systèmes énergétiques** se donne cette fois-ci à l'échelle française l'objectif d'avoir la maîtrise technologique et industrielle du solaire PV et de disposer de champions industriels transnationaux sur les grandes étapes de la chaîne industrielle d'ici 10 ans. [40]

Etat de la chaîne de valeur industrielle en France

Fabricants de cellules et modules ~ 10 entreprises	Fabricants de composants électriques et de structures ~ 100 entreprises	Intégrateurs et assembleurs ~ 20 entreprises	Installateurs ~ 4 500 en 2010 ~ 1 200 début 2020	Développeurs et producteurs d'énergie ~ 100 entreprises
Ex. : Voltec Solar, Reden-Solar (ex-Fonroche), Apollon Solar, Solar Cloth System et Systovi, Photowatt (EDF), Recom-Technologies. [40]	Ex. : Schneider, Leroy-Somer, Huawei Technologies France, Nexans, ainsi que Socomec ou QOS. [40]	Ex. : Altus Energy, Dome Solar, Groupe Solution Energie GSE, DualSun, Gagnepark, Heliowatt et Impact Energie. [40]	Ex. de certifications de ces installateurs : Qualifelec Solaire Photovoltaïque (SPV) et Alliance Qualité Photovoltaïque (AQPV). [40]	Ex. : EDF (via sa filiale EDF Renouvelables), ENGIE ou Total, Akuo Energy Energie, Amarenco, CNR, Urbasolar, Voltalia et Photosol. [40]

En prenant en compte la relocalisation de deux gigafactories, jusqu'à 52 000 emplois seront soutenus par la filière solaire PV à horizon 2030

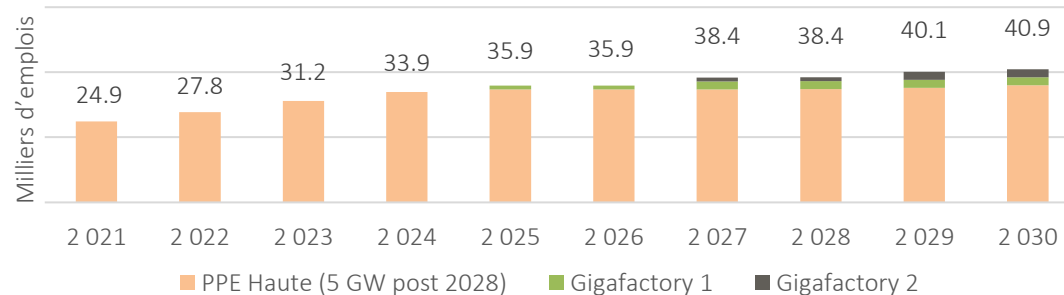
Hypothèses de panneaux PV liés à la relocalisation de 2 gigafactories

- Il est intéressant dans le modèle d'ajouter la perspective de relocalisation d'une partie de la chaîne de valeur, très probable, d'ici à 2030.
- Le modèle ajoute donc aux emplois directs et indirects calculés précédemment, la relocalisation de deux gigafactories de panneaux PV, correspondant chacune à 1 500 emplois directs supplémentaires (soit 2 450 emplois directs et indirects)
- Les années de début de construction sont respectivement 2025 et 2027.

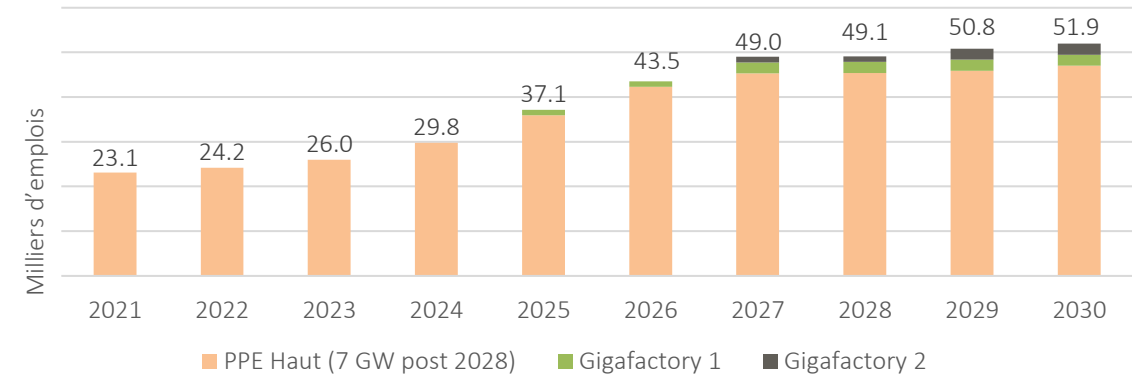
Chiffres clés

- La création de deux gigafactories permettrait de soutenir 4 900 emplois directs et indirects supplémentaires par an à horizon 2030, menant selon les hypothèses hautes de la PPE (scénario de base et alternative 1) à des chiffres allant de 41k à 52k ETPs annuels à horizon 2030 selon les hypothèses post 2028 (+5 GW/an ou + 7GW/an).

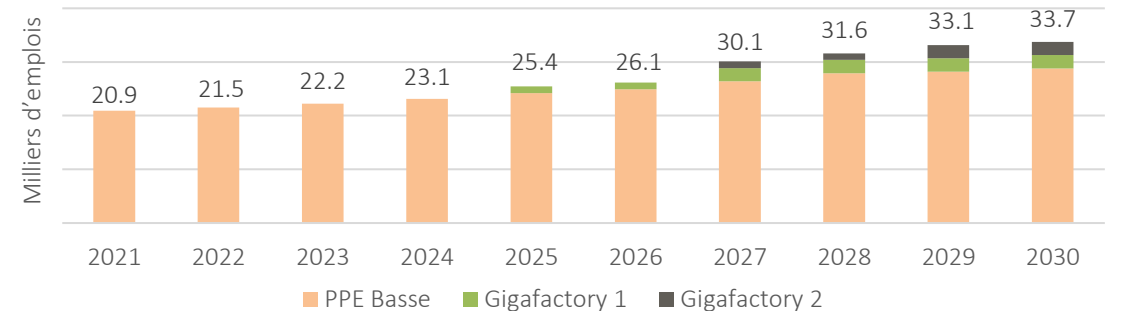
Impact de la relocalisation de deux gigafactories sur les emplois directs et indirects soutenus par la filière solaire PV (en milliers)



(a) Scénario de base : PPE Haute (44 GW en 2028), + 5 GW/an post 2028



(b) Alternative 1 : PPE Haute (44 GW en 2028), + 7 GW/an post 2028



(c) Alternative 2 : PPE Basse (35.1 GW en 2028), + 4 GW/an post 2028



Le solaire PV permet une valorisation économique des surfaces improductives ou peu productives, générant un complément de rémunération précieux pour différents acteurs économiques



Le solaire PV comme levier économique pour la filière agricole

- En France, la **contribution du secteur agricole à la production d'énergies renouvelables** est significative et continuera à croître selon plusieurs scénarios.
 - En 2015, la contribution du secteur agricole à la production d'énergies renouvelables a été chiffrée à 20% de la production d'énergies renouvelables nationale (396 GWh, soit 3,5% de la production nationale d'énergie). [41]
 - Selon les scénarios prospectifs de l'ADEME, de Négawatt ou encore de Solagro, la production PV par le milieu agricole est amenée à croître de manière rapide dans les années à venir pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. L'ADEME estime ainsi que la contribution du secteur agricole dans la production d'énergies renouvelables passera de 20% en 2015 à environ 25% en 2030. [42]
- D'un point de vue économique, **le solaire PV permet une valorisation économique à l'hectare de surfaces improductives (toitures), rend l'agriculture plus résiliente en permettant d'adapter les exploitations au changement climatique et crée des conditions de transition vers l'électrique** (capacités de raccordement pour recharger des engins électriques). Pour chaque type d'implantation, certaines filières ont été identifiées comme présentant un potentiel élevé :
 - Les installations sur bâtiments agricoles : les filières ayant des surfaces de bâtiments importantes et des consommations électriques non négligeables (porcins, volailles). [43]
 - Les serres agricoles photovoltaïques : maraîchage, pépinières, horticulture.
 - Les ombrières photovoltaïques dynamiques : viticulture, arboriculture, maraîchage.
 - Les centrales photovoltaïques au sol : élevages ovins. [41]
- Le solaire PV permet également de **générer un complément de rémunération précieux pour les agriculteurs**.
 - Le développement des énergies renouvelables permet aux agriculteurs de diversifier, renforcer et stabiliser leurs revenus, grâce à des revenus complémentaires issus de l'énergie solaire PV. [41]
 - Ce revenu complémentaire peut être issu de l'autoconsommation directe de l'énergie, de la vente de l'électricité produite, ou de la location des surfaces de toiture à des entreprises de production d'électricité photovoltaïque.

Des co-bénéfices économiques pour les collectivités et acteurs industriels

- Le solaire PV crée des **bénéfices pour les collectivités**.
 - Le solaire PV peut générer un complément de rémunération pour les collectivités. La production d'électricité étant considérée comme une activité commerciale, la collectivité va percevoir des revenus fiscaux locaux (CFE, CVAE, IFER, etc.). De plus, si la collectivité est propriétaire du lieu/terrain, elle percevra également un loyer.
 - Il permet également de soutenir les emplois locaux et créer de la richesse au niveau local grâce à la main d'œuvre nécessaire pour la construction, l'installation et la maintenance des centrales solaires. [44]
- Le recours au solaire PV présente également des **bénéfices pour les acteurs industriels**.
 - Le recours au solaire permet d'améliorer la compétitivité d'une activité économique et de sauvegarder des sites en finançant par exemple la réparation de toitures endommagées.

Des bénéfices pour la filière agricole générés grâce au développement de nouveaux modèles, tels que l'agrivoltaïsme et les autres solutions de couplage PV sur terrain agricole



L'agrivoltaïsme, un nouveau modèle pour optimiser les bénéfices agricoles

- Il n'y a pas à ce jour de définition unique de l'agrivoltaïsme.
 - Une des définitions possibles est la suivante : un modèle dans lequel la production d'électricité décarbonée d'origine photovoltaïque se fait sur des terres agricoles qui peuvent servir à la culture ou à l'élevage. Celle-ci implique la coexistence d'une production électrique significative et d'une production agricole significative, sur une même emprise foncière.
 - Il s'agit principalement de centrales solaires au sol adaptées à l'élevage ovin. Moyennant une réduction significative de la puissance installée par hectare en écartant les rangées de panneaux solaires, et un surcôt de surélévation de structure, la pousse de l'herbe et la productivité du cheptel ovin sont maintenus, tout en apportant des abris bénéfiques au bien être animal. L'institut de l'élevage ayant publié un guide sur ce type d'installation.
 - D'autres systèmes sous la forme d'agrivoltaïsme dynamique, des ombrières solaires protégeant les cultures des aléas climatiques, apportent des services agronomiques très prometteurs pour l'agriculture et commencent leur développement dans les appels d'offres solaire innovants.
- **L'agrivoltaïsme présente des avantages économiques pour la filière agricole**
 - D'un point de vue économique, les panneaux solaires permettent d'améliorer le rendement agricole et génèrent une nouvelle source de revenus pour les agriculteurs (location du terrain et/ou vente d'électricité).
- **L'agrivoltaïsme présente également des avantages pour la filière solaire.**
 - Du point de vue de la filière solaire PV, l'agrivoltaïsme permet d'accéder à de nouveaux terrains, notamment dans les régions ensoleillées qui présentent des enjeux de disponibilité du foncier, avec une meilleure acceptabilité des projets du fait des services rendus. [46]

Il existe aujourd'hui quelques freins au développement de cette filière

- D'un point de vue innovation : le marché est émergent par rapport aux autres milieux d'implantation (sol, bâtiment).
 - L'agrivoltaïsme fait partie de l'AO CRE « Innovation » dont le volume global est limité à 175 MW par an.
- D'un point de vue réglementaire : à ce jour, la politique nationale privilégie les installations PV sur des sites déjà artificialisés (9,3% de la surface du territoire) plutôt que sur terrains agricoles.
 - L'objectif est d'éviter une concurrence directe avec les pratiques agricoles (51% de la surface du territoire français est occupée par des sols agricoles). [45]
 - Les territoires agricoles subissent une importante pression due à l'artificialisation, qui connaît un rythme de 25 000 ha/an d'espaces naturels et forestiers, dont 68% pour la construction d'habitats. [46]
 - Le **cadre réglementaire** pour les projets inférieurs à 500kVc est à **clarifier**.
- D'un point de vue économique : il s'agit d'un modèle axé sur la rentabilité des terres agricoles. Il **peut induire une perte de 15-25% de revenu** pour le projet solaire, du fait des contraintes agricoles et coûts liés aux structures spécifiques.



Enfin, le développement du solaire PV permet de développer de nouvelles solidarités locales



Lutte contre la précarité énergétique

- Le solaire permet de **lutter contre la précarité énergétique**.
 - Le solaire PV permet de faire baisser les factures des loyers les plus précaires grâce au financement solidaire de mécanismes d'autoconsommations,
 - Par exemple, l'association Sol Solidaire (réunissant l'ADEME, De Gaulle Fleurance & Associés, Enerplan, BPCE, Tecsol et l'Union sociale pour l'Habitat) s'inscrit dans cette démarche en prenant en charge une partie de l'installation des panneaux PV et leur exploitation. L'énergie solaire produite est ensuite distribuée directement et gratuitement aux habitants des logements sociaux équipés. [48]

Opportunité pour la réhabilitation de vieux bâtiments

- Les projets solaires permettent **une revalorisation des bâtiments**.
 - Les projet solaires peuvent soutenir le financement d'une opération de désamiantage de toitures, une mise aux normes de désenfumage, une rénovation d'étanchéité ou encore la mise aux normes ISO 9001 et ISO 14 001.
 - Cela permet de réhabiliter de vieux entrepôts, de maintenir des sites industriels en activité. Ainsi cela libère du foncier et maintient des emplois menacés par une fermeture de site.
 - Le désamiantage par les projets solaires permet également de faire des économies pour le bénéficiaire (sur les aides au désamiantage, sur les tarifs sociaux de l'électricité, sur les emplois préservés).
- Pour des particuliers, des bénéfices comme le renforcement de la charpente ou la réfection de la toiture peuvent également être considérés.

Electrification de sites isolés ou non interconnectés

- Le solaire permet de **renforcer l'accès à l'énergie en zones rurales et non interconnectées**.
 - Aujourd'hui, 840 millions de personnes dans le monde vivent sans avoir accès à l'électricité. L'extension des réseaux électriques est souvent onéreuse, lente, et pas toujours faisable dans les zones rurales isolées. Dans de telles situations, la mise en place de réseaux locaux peut alimenter des communautés, mais trouve également des applications dans l'industrie (usines en sites isolés). [49]
 - A l'échelle française, le budget national propose une ligne dédiée à la production en site isolé, avec un budget de 1,9 M€ en 2019. L'objectif est d'électrifier les territoires d'outre-mer et en haute montagne, là où des habitations ou des hameaux d'accès difficile ne disposent d'aucun réseau ou sont approvisionnés par des mini-réseaux alimentés au fioul. [50]
- La France s'est également engagée aux côtés de l'Inde pour soutenir le développement du solaire dans les pays tropicaux.
 - L'Alliance solaire internationale (ASI) est une initiative conjointe de la France et de l'Inde, lancée lors de la COP 21, aux fins d'un effort en faveur de l'énergie solaire. [22]
 - Le principal objectif est de **réduire massivement les coûts de l'énergie solaire** et accélérer son développement dans les pays tropicaux.



3. Analyse des postes de valeurs créés par la filière solaire PV

Valeur environnementale

Le solaire PV est une énergie propre, aux incidences environnementales maîtrisées, et contribuant activement à la décarbonation des mix électriques français et européen



S 1 2 3 4

La valeur environnementale du solaire se situe dans l'évitement d'émissions de CO2

- Le solaire PV, fort d'un taux d'émission de GES limité à 20 à 30 gCO2eq/kWh, a contribué à la réduction du recours aux énergies carbonées (notamment au charbon) et à la réduction du contenu carbone des mix électriques national et européen. La poursuite du développement du solaire PV, l'amélioration continue du rendement des panneaux PV, la baisse de l'empreinte carbone des différents composants intervenant dans les centrales (notamment les structures métalliques), et la décarbonation des mix électriques des pays de production des modules, va continuer à permettre des abattements d'émissions de CO2.
- Le solaire se situe ainsi largement en dessous du seuil défini par la taxonomie verte (<100 gCO2eq/kWh), qui s'inscrit dans l'objectif de neutralité carbone en 2050 de l'Union Européenne.
- Le solaire PV contribue à décarboner le système électrique français : en 2030, chaque kWh de production PV additionnel au sein du système électrique permettra une diminution des émissions nettes de CO2 de 240 à 310 gCO2eq/kWh.
- Ainsi en 2022, en suivant la trajectoire haute de la PPE, le solaire permettra d'éviter quelques 740 ktCO2eq en France, et près de 1,4 MtCO2eq en 2030 (soit presque 25% des émissions annuelles de la ville de Paris, qui sont de 5,5 MtCO2eq/an).

Des effets secondaires sur la biodiversité maîtrisés et limités, qui tendent à diminuer

- La production d'énergie PV peut avoir des conséquences négatives sur l'environnement, même si celles-ci sont à modérer comparées à d'autres filières de production d'énergies conventionnelles (charbon, pétrole par exemple).
- Les progrès accomplis par la filière, les bonnes pratiques sectorielles et le renforcement de la réglementation ont permis de réduire et de maîtriser les impacts environnementaux des dispositifs photovoltaïques.
- La filière solaire PV présente un caractère non permanent. Ses installations sont faciles à démanteler pour un retour du site à l'état initial sans altération du milieu, contrairement à d'autres filières pour lesquelles le retour à l'état naturel est plus complexe.

Cycle de vie des panneaux et des matières premières

- La filière présente un taux de revalorisation des panneaux de 94% (taux de recyclage de 85%), particulièrement haut au regard des autres appareils soumis à la réglementation européenne des déchets issus des équipements électriques et électroniques.
- Des investissements conséquents seront nécessaires pour recycler et revaloriser 50 000 tonnes de panneaux photovoltaïques en fin de vie en 2030, mais une filière de recyclage est déjà en place en France.



Valeur environnementale

20-30
gCO2eq/
kWh

De taux d'émission de gaz à effet de serre de la filière solaire PV

740
ktCO2eq

Emissions françaises évitées en 2022 grâce au parc solaire installé (objectifs hauts de la PPE)

94%

Taux de revalorisation des panneaux PV



Le solaire PV est une source d'énergie peu émettrice de gaz à effet de serre et dont l'empreinte carbone sur l'ensemble du cycle de vie continue de diminuer



Une électricité peu émettrice de gaz à effet de serre (GES), qui contribue à réduire le contenu du mix électrique

- Le solaire dispose d'un taux d'émissions de GES faible, bien en dessous du seuil de la taxonomie verte.
- La réduction des émissions de GES permise par le recours au solaire PV est la raison principale de l'émergence et du développement de la filière solaire PV au niveau international.
- En prenant en compte le cycle de vie complet des installations, la filière solaire PV dispose d'un taux d'émissions de gaz à effet de serre **de 20 à 30 gCO₂eq/kWh en moyenne**. [51]
- Le solaire se situe donc bien en-dessous du seuil de la taxonomie verte.** Seules les activités de production d'électricité émettant **moins de 100 gCO₂eq/kWh** sont considérées comme alignées dans le cadre actuel, ainsi que celles considérées comme activités de transition (comme le gaz). [52]
- Le solaire permet de réduire le recours aux énergies carbonées et de réduire le contenu carbone du mix électrique français.
 - Artelys a étudié l'impact d'un passage de 41,5 à 54 GW (+12,5 GW) de capacité solaires PV installées à horizon 2030 sur le système électrique français* :
 - Un kWh de solaire supplémentaire vient ainsi diminuer le recours aux centrales thermiques au gaz (8%), de plus il permet une augmentation des exports nets, c'est-à-dire plus d'exports vers les voisins et moins d'imports (42%), et une utilisation supplémentaire des STEPs (2%). [28]
 - Les émissions évitées brutes sont de l'ordre de 270 à 330 gCO₂eq/kWh. Le taux d'émission de GES du solaire PV étant de 20 à 30 gCO₂eq/kWh en moyenne, **chaque kWh supplémentaire au sein du système électrique permet une diminution des émissions nettes de CO₂ de 240 à 310 gCO₂eq/kWh**. [28]

- En se basant sur ce facteur de diminution d'émissions nettes de 240 gCO₂eq/kWh et sur les capacités annuelles installées supplémentaires d'ici à 2030, **le développement de la filière solaire PV a permis d'éviter 740 ktCO₂eq en France en 2021, et l'équivalent de 1,4 MtCO₂eq en 2030**. (soit presque 25% des émissions annuelles de la ville de Paris, qui sont de 5,5 MtCO₂eq/an). Considérer ce facteur d'émissions nettes évitées de 240 gCO₂eq/kWh en 2021 est conservateur, le mix électrique étant plus carboné en 2021 qu'il ne le sera en 2030.

Le taux d'émissions de GES de la filière solaire est amené à diminuer

- Le contenu carbone de la filière solaire PV ou taux d'émission de GES continuera à s'améliorer dans les années à venir.
 - La réglementation en vigueur assure que cette diminution de contenu carbone continuera à s'améliorer grâce au développement de la filière. L'impact carbone est pris en compte dans le choix des projets en AO CRE. Depuis octobre 2021, seules les installations solaires supérieures à 100 kWc présentant un **bilan carbone inférieur à 550 kgCO₂eq/kWc peuvent bénéficier d'un contrat d'achat dans le cadre des mécanismes de soutiens publics**. [53]
 - Le recours aux matériaux bas carbone dans les structures PV permettra d'optimiser encore davantage l'empreinte carbone de la production PV.
 - La relocalisation d'une partie de la chaîne de valeur du solaire, très probable d'ici 2030, permettra de réduire l'empreinte des transports dans l'analyse du cycle de vie de la filière, de bénéficier d'une électricité largement décarbonée pour les processus de production.
 - Le rallongement de la durée de vie des panneaux PV participera activement à la réduction de l'empreinte carbone dans leur cycle de vie.

[28] Artelys [51] Mines ParisTech [52] Union Européenne [53] Actu Environnement

*Artelys se place dans l'hypothèse des conditions de demande d'électricité et d'offre de flexibilité du scénario PPE.



Des effets secondaires sur l'environnement limités, qui tendent à diminuer grâce aux progrès accomplis, aux bonnes pratiques sectorielles et au renforcement de la réglementation



Des effets secondaires limités qui diffèrent selon le type d'implantation

- La production d'électricité solaire peut avoir des conséquences négatives sur l'environnement, même si celles-ci sont modérées comparées à celles d'autres filières de production d'énergies conventionnelles (charbon, pétrole par exemple).
- Les effets diffèrent selon le type d'implantation :
 - Le **solaire au sol** présente des enjeux environnementaux principalement liés à la **biodiversité du site d'implantation, aux conflits d'occupation des sols ainsi qu'à l'usage des matériaux**. [54]
 - **Le solaire sur toiture et ombrières a des impacts environnementaux très limités.** Des enjeux subsistent concernant l'insertion architecturale et paysagère, qui seront mieux intégrés dans les prochaines années grâce aux innovations du secteur. [1]
 - Le développement de nouveaux modèles, tels que **l'agrivoltaïsme**, s'inscrit dans la recherche d'impacts positifs sur son environnement, comme la protection de la biodiversité, de l'agriculture et de l'adaptation au changement climatique.
 - D'un point de vue des ressources et du changement climatique : les panneaux solaires protègent les cultures contre les aléas climatiques et les nuisibles, réduisent les consommations d'eau grâce à l'ombre des panneaux, stabilisent la température de l'air et de l'eau, l'humidité et l'oxygénation, et enfin réduisent l'évaporation et la prolifération d'algues pour la pisciculture.
 - L'agrivoltaïsme rend l'agriculture plus résiliente en permettant d'adapter les exploitations au changement climatique et en créant des conditions de transition vers l'électricité (capacités de raccordement pour recharger des engins électriques).

Des impacts sur les sols qui peuvent être maîtrisés

- L'installation d'une centrale au sol peut favoriser l'érosion du sol.
 - Elle nécessite une gestion de la végétation présente (contrôlée généralement par herbicides) et des travaux préparatoires : défrichage, terrassement et tassement du terrain. [54]
- Les parcs solaires peuvent influencer le stockage de carbone par le sol.
 - Les parcs PV modifient l'albédo de surface, ombrent les sols, interceptent les pluies et les dépôts atmosphériques et influencent la vitesse du vent ainsi que la turbulence à la surface du sol. Il en découle des changements de température, de précipitations et d'évapotranspiration (et donc d'humidité du sol), qui peuvent modifier le stockage de carbone par le sol. [54]
- La production de la filière solaire PV peut générer une pollution des sols.
 - Le silicium contenu dans les panneaux est susceptible de générer une pollution des sols en fluorure et en chlorure près des sites où il est raffiné. Cet impact est toutefois négligeable à l'échelle française. [54]
- L'impact sur les sols est toutefois limité du fait de son **caractère non permanent**.
 - La facilité de démantèlement d'une centrale solaire PV permet un retour à l'état initial limitant les altérations du milieu, contrairement à d'autres filières dont le retour à l'état naturel est plus complexe. [55]



Des impacts sur la faune et la flore limités, qui dépendent du contexte et des taxons



Des impacts sur la faune et la flore

- Les parcs solaires peuvent induire une fragmentation des habitats, notamment en raison des clôtures, qui constituent des enjeux à la circulation de la grande faune terrestre.
- Les panneaux peuvent modifier la végétation, avec l’ombrage qu’ils engendrent, ainsi que l’écoulement des eaux. [54]
- Enfin, les panneaux solaires peuvent constituer des pièges écologiques pour les oiseaux et insectes aquatiques, la lumière polarisée réfléchiée par les panneaux engendrant une confusion entre la surface des cellules et une surface aquatique. [54]

Toutefois, l’altération du milieu est limitée

- Grâce à la réalisation de pré-diagnostic environnementaux et d’un suivi régulier faunique et floral, les impacts sur la faune et la flore sont limités.
 - Ils permettent une meilleure connaissance des effets du solaire sur son environnement et une mise en place de mesures d’évitement. [55]
 - Le SER et Enerplan ont analysé l’impact des parcs solaires sur la biodiversité avant/après la construction et pendant la mise en service. **Les impacts dépendent ainsi du contexte et des taxons*** (tendances plutôt positives pour la flore, neutres pour les oiseaux et négatives pour les reptiles) (cf. tableau ci-contre). [56]
- De plus, les acteurs solaires mettent en place des pratiques pour améliorer leur impact environnemental.
 - Une étude de l’ADEME réalisée en 2021 sur 119 acteurs dont 83% français, indique que **88% des répondants ont déjà mis en place ou envisagent de mettre en place des pratiques permettant d’améliorer leurs impacts environnementaux.** [55]

Type d’analyse		Tendances d’évolution générales	Précisions	Tendances d’évolution
Type d’effet	Richesse spécifique	N/A	Avant/Après construction	Plutôt négatif
			Pendant la mise en service	Positif
	Patrimonialité / valence écologique	N/A	Avant /Après construction	Plutôt négatif
			Pendant la mise en service	Neutre à positif
Composants biologiques	Composants biologiques	Variables	Flore	Positifs (en part. la richesse spécifique)
			Papillons de jours ou oiseaux	Neutres
			Reptiles	Négatifs (en part. pdt la construction)
Temporalité	Avant / Après construction	Variables selon le contexte et les taxons	Cortèges d’espèces	Neutres (cortèges similaires et récurrents)
	Après la mise en service	Globalement positives (rythmes variables suivant le contexte)	Milieus avec réponse rapide	Positives sur le court terme
			Milieus avec réponse lente	Positives à partir de 5-10 ans



La gestion de la fin de vie des panneaux est un nouvel enjeu crucial de la filière avec 50 kt de panneaux en fin de vie par an à horizon 2030



Un approvisionnement en matières premières maîtrisé

La fabrication de panneaux solaire fait débat sur deux points : **l'approvisionnement en matières premières et l'utilisation de métaux rares**. La construction de panneaux PV ne nécessite pas de terres ou de métaux rares contrairement aux idées reçues.

- Les matériaux couramment utilisés pour la construction de panneaux et de systèmes solaires sont : l'acier, le béton, le verre, le plastique, l'aluminium et le cuivre. Ces matériaux sont abondants, et produits en fonction de la demande.
- Les modules PV de technologie « monocristalline » et « polycristalline » (96% du marché) contiennent également du silicium, 2^e composant le plus abondant de la couche terrestre, ne posant pas de problème d'approvisionnement. [57]
- L'argent contenu dans ces modules PV peut présenter un approvisionnement plus difficile. Toutefois, la teneur moyenne en argent des cellules solaires a diminué de 75 % entre 2009 et 2016 et devrait encore diminuer de 60% entre 2017 et 2027.
 - Des ingénieurs de SunDrive Solar ont remplacé l'argent de leurs cellules solaires par du cuivre, ce qui a amélioré ses performances énergétiques et fait baisser les coûts de production. [58]

Bonnes pratiques

- La directive 2012/19/UE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) a étendu le champ de la responsabilité élargie du producteur aux modules PV. La France a transposé cette réglementation en droit français par le décret 2014/928. En conséquence, **les metteurs sur le marché doivent assurer le financement de la gestion de leurs équipements usagés et de leur recyclage**. [1]
- Les technologies énergies renouvelables sont majoritairement réversibles, démontables, et recyclables. 177 points d'apport volontaire existent en France.

Fin de vie des panneaux, un volume en forte croissance

- SOREN, l'éco-organisme en charge de collecter et traiter les panneaux PV en fin de vie, dispose de 5 sites de traitement de panneaux en France. [59]
- **SOREN estime que près de 50 kt de panneaux PV arriveront en fin de vie en 2030, contre 5 kt en 2020.**
- Le recyclage des panneaux solaires constitue une opportunité de continuer à structurer une véritable filière industrielle française, innovante et source d'emplois (à 40% des emplois en insertion). [59]

La gestion de la fin de vie des panneaux, un nouveau segment de marché prometteur

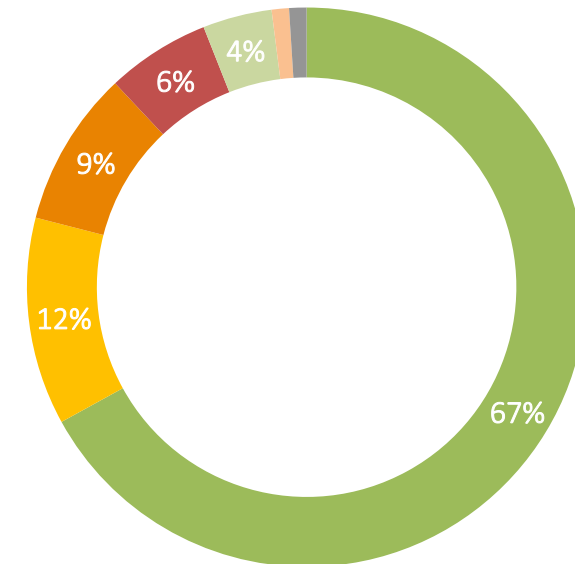
- Des solutions de reconditionnement de panneaux pourront permettre l'allongement de la vie des centrales et donner une seconde vie aux panneaux moins performants démantelés.
- 1% du chiffre d'affaires de l'éco-organisme est affecté à des projets de R&D visant à améliorer en permanence la qualité du recyclage des panneaux.
- L'augmentation des volumes de panneaux en fin de vie dans les années à venir **nécessitera l'ouverture de nouvelles unités de traitement au plus près des parcs susceptibles d'être démantelés**, et donc des financements importants. [59]



Un taux de valorisation élevé des panneaux PV qui atteint 94% et un taux de recyclage de 85%, supérieur au taux de recyclage moyen de l'électroménager qui est de 76%

Un taux de valorisation des panneaux PV qui atteint 94% [59]

- En France, **94% de la matière des panneaux PV est revalorisée (85% recyclée et 9% revalorisée)**.
 - La France est l'un des pays les mieux structurés pour faire face au défi du recyclage: L'écosystème est en place, avec un organisme bien implanté (SOREN) et des acteurs industriels omniprésents (notamment Veolia).
 - Ce taux de recyclage est particulièrement haut par rapport aux autres appareils soumis à la réglementation européenne des déchets issus des équipements électriques et électroniques (DEEE). Par exemple, le taux de recyclage moyen dans le secteur de l'électroménager était de 76% en France en 2020.
- La composition d'un panneau PV est la suivante :
 - **Fraction verre** : 67% du module. Le verre est recyclable à l'infini. Il est récupéré sous forme de poudre, en deux granularités différentes. Cette poudre de verre peut être réinjectée dans des panneaux ou utilisée pour la fabrication d'isolants.
 - **Fraction aluminium** : 12% du module. L'aluminium est également recyclable à l'infini, sans perte de qualité. L'aluminium est broyé, puis envoyé vers une fonderie qui procède à l'affinage et à la fusion.
 - **Fraction composite** : 9% du module. Elle est composée de polymères qui sont transformés en combustible solide de récupération (CSR) afin d'être valorisée énergétiquement.
 - **Silicium cristallin** : 4% du module. Un traitement aval est nécessaire pour le séparer de l'argent. Il peut être réutilisé jusqu'à 4 fois. Il peut servir à fabriquer de nouvelles cellules photovoltaïques ou servir d'agrégat.
 - **Cuivre / cuivre étamé** : chacun 1%. Le cuivre est envoyé chez un affineur de métaux afin d'être fondu et réutilisé.
 - **Argent** : < 1%. Il est séparé avant d'être fondu et réutilisé.
 - **Refus de traitement/Rebus** : 6% du module, non valorisé. Les matières non recyclées sont principalement des poussières emprisonnées dans les filtres après broyage.



■ Verre
■ Aluminium
■ Composites

Répartition des différentes fractions composant un panneau solaire PV [59]



4. Conclusions

Synthèse des constats
Recommandations

L'énergie solaire est une énergie propre, peu chère et répondant aux enjeux énergétiques et stratégiques de la France



Une énergie répondant aux enjeux stratégiques de la France

- Le solaire est l'une des principales sources de **production d'électricité décarbonées** pouvant être déployée de manière massive à un **coût compétitif** pour assurer la **sécurité d'approvisionnement de la France d'ici 2030**, dans un contexte de hausse de la demande en électricité et de dégradation du niveau de disponibilité du parc nucléaire historique.
- Dans un contexte géopolitique rendu extrêmement incertain par la guerre en Ukraine et les sanctions économiques et financières prises par l'Europe vis-à-vis de la Russie, un développement massif du solaire en France a vocation à **réduire notre dépendance et celle de l'Europe vis-à-vis du gaz russe** (2^e fournisseur de la France après la Norvège).
- Le caractère décentralisé et éminemment territorial des projets PV permet de **créer des solidarités territoriales**, notamment via l'essor de l'autoconsommation collective.
- Le solaire s'affirme de plus en plus comme un **incontournable de la diplomatie économique**, en particulier vis-à-vis des Etats bénéficiant de forts taux d'ensoleillement.

Une énergie présentant des bénéfices environnementaux, économiques et sociétaux

- Le développement du solaire en France **contribue activement à la réduction du contenu carbone des mix électriques français et européen**. Les progrès de la filière permettent de poursuivre l'amélioration de l'empreinte carbone de l'électricité PV.
- Le coût de production du solaire PV a connu une baisse de près de 85% en dix ans, amenant le solaire à devenir **l'une des sources de production d'électricité décarbonée les plus compétitives en France**.
- Cette compétitivité croissante a permis de **réduire le coût net du soutien octroyé par l'Etat via les mécanismes d'encadrement de la rémunération des projets** (obligation d'achat, complément de rémunération).
- La hausse des prix de l'électricité constatée depuis plusieurs mois installe un nouveau paradigme dans lequel **le coût net annuel du soutien de l'Etat est en passe de s'annuler et pourrait même devenir négatif – c'est-à-dire constituer un flux de recette directe pour l'Etat – dès 2022**.
- Dans un scénario – aujourd'hui probable voire conservateur - où les flux de soutien de l'Etat aux projets post-moratoire s'annuleraient durablement entre 2012 et 2030, **nous estimons qu'1€ investi par l'Etat aura permis de générer 7€ de contribution au PIB sur l'ensemble de la période 2012-2030. De même, 1€ investi par l'Etat aura généré 4,2€ de recettes publiques (taxes et cotisations) sur cette période**.
- **La filière solaire PV 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.

CONTACTS

France Territoire Solaire

Antoine Huard, Président de France Territoire Solaire

Email : a.huard@verso.energy

EY

Supervision

Alexis Gazzo, Associé

Email : Alexis.gazzo@fr.ey.com

Equipe de rédaction

Jean-Gabriel Robert, Senior Manager

Email : jean-gabriel.robert@fr.ey.com

Florian Soilly, Consultant

Charlotte Gerard, Consultante