



EXPERTISES

Mai
2022

LES AVIS DE L'ADEME

L'énergie photovoltaïque

À retenir	2
Enjeux	3
Description	4
Chiffres clés	4
L'économie du photovoltaïque	5
Bilan environnemental	6
Les différentes modes de déploiement du photovoltaïque	7
Appropriation sociétale	10
La place du PV dans le réseau électrique français	11
Actions de l'ADEME	12

L'énergie photovoltaïque

À retenir

La neutralité carbone visée en 2050 nécessite l'accélération des dynamiques actuelles de **sobriété et d'efficacité énergétique**. Parallèlement **l'électrification des usages énergétiques (transport, chauffage, procédés industriels) est un levier fort de la décarbonation de la société, en profitant du mix de production électrique peu carboné de la France qu'il faudra renforcer. Le développement massif du photovoltaïque (PV) est indispensable à cet objectif.** La filière PV tient en effet une place significative dans la plupart des scénarios prospectifs, dont le travail de l'ADEME, Transition (s) 2050, dans lequel le PV doit atteindre entre 92 et 144 GW installés en 2050.

Malgré une accélération en 2021, la France est en retard sur ses objectifs de déploiement et compte fin 2021 une puissance installée de 14 GW¹. **Le rythme annuel de déploiement du PV doit donc à minima conserver le rythme de 2021**, en concertation avec les collectivités locales et les citoyens, et en cherchant à minimiser les impacts potentiels sur l'environnement. Pour atteindre les objectifs de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), 3 GW de capacité PV devra être installés chaque année d'ici 2028, soit une multiplication par 3 du rythme moyen observé sur la dernière décennie.

- **Le PV est compétitif économiquement** en comparaison aux moyens conventionnels de production d'électricité et est passé sous la barre des 50 €/MWh pour les projets les plus compétitifs en France. Ces coûts devraient continuer à diminuer du fait des évolutions technologiques et des panneaux de nouvelles générations.
- **La filière PV dans son ensemble est créatrice de valeur ajoutée, d'emplois locaux et d'innovations techniques et sociales.** Elle représente 20 000 emplois en 2021, dont la majorité est liée à l'installation et à la maintenance des capacités, ce qui les ancre **fortement dans les territoires**. Le PV apporte par ailleurs de nouvelles opportunités industrielles et de relocalisation d'une partie de la production des composants de base ou d'applications spécifiques (agrivoltaïsme, PV flottant, etc.), en s'appuyant notamment sur l'excellence de la recherche française dans ce domaine.
- **Grâce au caractère très modulaire des installations, le PV bénéficie d'une bonne appropriation citoyenne.** Pour pérenniser ce constat, l'ADEME insiste sur l'importance de la concertation lors du montage de projets et sur l'intégration environnementale et paysagère. Les projets PV citoyens ou participatifs, l'autoconsommation PV individuelle (domestique ou professionnelle) et collective sont nécessaires à l'accélération de la transi-

tion énergétique.. Pour améliorer cette appropriation et réduire les coûts d'intégration du PV au système électrique à long terme, une adaptation des soutiens publics favorisant une meilleure répartition territoriale des projets sera utile.

- **Le bilan environnemental du PV est largement positif.** Avec un bilan carbone en constante amélioration, aujourd'hui estimé entre 23 et 25 gCO₂eq/kWh² pour les modules les plus récents, **l'électricité photovoltaïque est une source d'électricité décarbonée.** Renforcer la capacité de production française permettrait d'abaisser encore les émissions de CO₂ des panneaux sur leur cycle de vie. Le PV utilise par ailleurs très peu de ressources rares, stratégiques ou polluantes³.
- Lorsqu'il n'est pas réalisé sur bâtiment, le déploiement de l'énergie photovoltaïque utilise des surfaces au sol de manière réversible, les panneaux et structures étant démontables. Dans le scénario le plus ambitieux de l'ADEME, le PV au sol occuperait jusqu'à 124 000 ha en France⁴. Pour minimiser l'impact d'un tel déploiement, **l'ADEME promeut l'installation du PV en priorité sur les toitures, sur les sols déjà artificialisés ou en co-usage, puis sur les sols naturels.**
- **Les impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages des projets PV devraient rester limités** par une mise en œuvre efficace de la séquence Eviter-Réduire-Compenser. Des travaux scientifiques sont en cours pour continuer à les atténuer.
- Les heures de production de l'électricité photovoltaïque correspondent aux périodes de consommation des activités économiques et résidentielles et **permettent d'accompagner le développement de nouveaux usages diurnes de l'électricité** (production de froid, charge des véhicules électriques). La **variabilité** de la production est aujourd'hui bien gérée, sans besoin additionnel de centrales thermiques, et sera dans le futur facilitée grâce au **développement des interconnexions**, au **pilotage de la demande**, et à plus long terme, par **des capacités de stockage.**
- L'avènement de projets financés de gré à gré - c'est-à-dire sans subvention publique - couplé à l'émergence de nouveaux vecteurs de déploiement (agrivoltaïsme, PV flottant...) pose de nouveaux défis concernant **la réglementation et la planification du déploiement du PV en France**⁵. L'ADEME souligne le besoin d'adapter les textes en vigueur afin **d'assurer un déploiement vertueux des nouvelles capacités.**

¹ DONNÉES ET ÉTUDES STATISTIQUES – TABLEAU DE BORD : SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE, MTE, QUATRIÈME TRIMESTRE 2021.

² FTHENAKIS V, LECCISI E. UPDATED SUSTAINABILITY STATUS OF CRYSTALLINE SILICON-BASED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: LIFE-CYCLE ENERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION TRENDS. PROG PHOTOVOLT RES APPL. 2021;1-10

³ TERRES RARES, ÉNERGIES RENOUVELABLES ET STOCKAGE D'ÉNERGIES, ADEME, 2020

⁴ A titre de comparaison, cela représente 0,5 % de la surface agricole utile française

⁵ Les projets se développant sans soutien publics étant moins contraints de répondre aux contraintes réglementaires ASSEZ EXIGEANTES PERMETTANT DE LES OBTENIR

ENJEUX

Pour limiter le réchauffement climatique en deçà des 2°C, la neutralité carbone doit être atteinte d'ici la deuxième moitié du 21^{ème} siècle. En cohérence avec cet objectif, la France, via la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), vise la neutralité carbone en 2050. Pour y arriver, une transition énergétique est nécessaire et elle passera par la sobriété, l'efficacité énergétique et une électrification progressive de nos usages, afin d'éliminer les énergies fossiles du mix énergétique.

Quel que soit l'orientation du mix énergétique à l'horizon 2050, **il est urgent d'accélérer le développement de toutes les filières des EnR électriques**. Elles participent à la diversification du mix, à la sécurité d'approvisionnement en énergie et sont un moyen d'améliorer la résilience du système électrique. En France, la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) prévoit que 40 % de la production d'électricité se fera à partir d'EnR en 2030 (elle est d'environ 24 % en 2020).

Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque offre, pour le système électrique français, un potentiel technique important et encore très largement sous-exploité. La France a pris du retard sur les objectifs nationaux fixés par la PPE avec 14 GW installés fin 2021, ne parvenant pas pendant presque une décennie à dépasser 1 GW de capacité installée chaque année. Le taux de pénétration de l'électricité photovoltaïque en France en 2020 était

de 2,6 %, sensiblement en-deçà de nos voisins européens, malgré un ensoleillement moyen plus important. **Le déploiement semble s'accélérer et s'approche de la barre des 3 GW installés pour l'année 2021, cadence minimale requise pour atteindre les prochains objectifs** : 20 GW en 2023 puis entre 35 et 44 GW en 2028.

A plus long terme les scénarios prospectifs de l'ADEME, Transition(s) 2050, prévoient une capacité PV installée allant de 92 GW à 144 GW. Il faudra donc maintenir une cadence d'installation de 3 à 4 GW /an sur le long terme. Ces objectifs élevés, partagés avec la plupart de nos voisins européens, créent une triple opportunité : relocaliser une partie de l'industrie PV en Europe, conquérir notre indépendance énergétique et baisser l'empreinte carbone des modules PV.

Le développement massif à venir du PV en France, couplé à l'émergence de modèles économiques hors subventions publiques, pourrait faciliter l'accélération du déploiement mais fait émerger certaines préoccupations sur l'environnement, la biodiversité et les paysages. Pour y répondre, **des progrès sont attendus sur la conception et l'intégration environnementale et paysagère des centrales PV au sol**. De même, **des outils de planification** devront être développés pour encadrer au mieux le déploiement de ces capacités.

Pays	Taux de pénétration du PV en 2020 ⁶ (en %)	Capacités installées par km ² (kW _c /km ²)	Productible moyen ⁷ (kWh/kW _c)
Allemagne	9,9	151	978
Espagne	9,0	27	1646
Italie	8,0	72	1176
Pays-Bas	8,8	239	994
Belgique	6,7	178	925
France	2,6	20	1180
Source : AIE PVPS - Trends 2021			

⁶ TAUX DE COUVERTURE DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE ANNUELLE.

⁷ PRODUCTION ÉLECTRIQUE PAR CAPACITÉ INSTALLÉE.

DESCRIPTION

L'énergie solaire photovoltaïque permet la production directe d'électricité. Elle est à distinguer de l'énergie solaire thermique, visant à produire de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire ou le chauffage. Elle diffère également des centrales solaires thermodynamiques qui emploient des miroirs pour chauffer des fluides alimentant une turbine et un générateur électrique.

L'effet photovoltaïque permet de convertir l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Concrètement, sous l'effet de la lumière, le matériau semi-conducteur composant la cellule génère des charges électriques qui se déplacent et créent un courant. Le semi-conducteur le plus communément utilisé est le Silicium, deuxième élément le plus abondant sur Terre⁸. On distingue plusieurs technologies de cellules selon les procédés de fabrication utilisés : les cellules en Silicium cristallin, qui représentent à ce jour plus de 95 % du marché et les cellules en couches minces, à base de Silicium amorphe, de Tellurure de Cadmium (CdTe) ou de Diséleniure de Cuivre, d'Indium et éventuellement de Gallium (CIS ou CIGS). Les modules photovoltaïques actuellement sur le marché présentent des rendements compris entre 15 % et 18,5 % pour les « couches minces », et dépassent aujourd'hui 22 % pour les meilleures technologies Silicium cristallin. D'autres technologies de cellules, basée sur l'utilisation de matériaux organiques, apportent de la versatilité applicative et de meilleurs bilans énergétiques, mais restent encore en retrait en termes de performances et de durabilité. La dernière décennie a vu apparaître les pérovskites, une technologie de rupture qui, couplée au Silicium dans

des cellules "tandem", devrait permettre à moyen terme d'atteindre des rendements supérieurs à 30 %.

L'effet photovoltaïque peut être utilisé pour diverses applications, qui se distinguent notamment par leur raccordement ou non au réseau électrique, mais aussi par le mode d'installation utilisé.

Les **systèmes raccordés** injectent sur le réseau une partie non-autoconsommée ou la totalité de leur production électrique. Ils représentent aujourd'hui la quasi-totalité des installations. Ces systèmes peuvent être intégrés au bâtiment, posés en toiture ou au sol. Avec une tension croissante sur le foncier en France et la mise en place de politiques de conservation des sols, une diversification des installations émerge, permettant un co-usage des sols : l'agrivoltaïsme – installation conçue pour générer une synergie entre la production agricole et la production électrique – et le photovoltaïque flottant sont les deux exemples les plus emblématiques de ces nouveaux modes d'installation.

Les **systèmes autonomes** sont en autoconsommation totale, c'est-à-dire qu'ils consomment sur place la totalité de la production électrique et ne sont pas connectés au réseau. En France, ils contribuent notamment à l'électrification de sites dits « isolés » car éloignés du réseau, comme les refuges et les bergeries, ou encore des postes de télécommunication en zones montagneuses. Dans certaines régions du monde, principalement rurales, les systèmes autonomes pallient un réseau électrique parfois peu développé.

CHIFFRES CLÉS

Contexte international

La capacité installée de production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante au niveau mondial depuis plusieurs années. La tendance a résisté à la pandémie du coronavirus, avec un marché annuel de 160 milliards de dollars et une augmentation de capacité installée de 145 GW en 2020⁹ (en augmentation de 32 % par rapport à 2019), ce qui fait du photovoltaïque l'énergie la plus installée au monde pour la production d'électricité. La puissance mondiale cumulée fin 2020 atteint 767 GW, ce qui a permis de

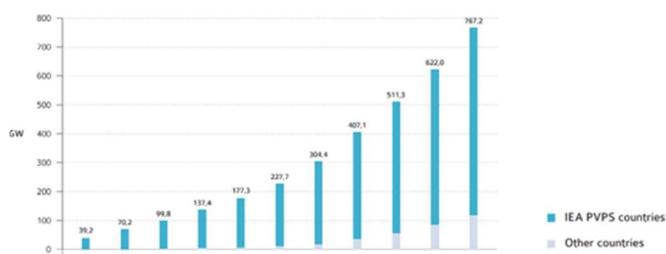
produire 4 % de la demande mondiale en électricité et d'éviter l'émission de 860 millions de tonnes de CO₂. Les prévisions d'installation annuelle de capacités au niveau mondial dépassent les 200 GW pour 2022 et atteignent jusqu'à 334 GW en 2030¹⁰. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), les capacités installées en 2021 ont été de 160 GW¹¹. La croissance du marché est portée par la Chine (48 GW installés en 2020), l'Union Européenne (19,8 GW) et les États-Unis (19,7 GW).

⁸ [HTTPS://WWW.MINERALINFO.FR/FR/ECOMINE/SILICIUM-UN-ELEMENT-CHIMIQUE-TRES-ABONDANT-UN-AFFINAGE-STRATEGIQUE](https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique)

⁹ TRENDS 2021, IEA PVPS

¹⁰ [HTTPS://ABOUT.BNEF.COM/BLOG/SOLAR-10-PREDICTIONS-FOR-2022/](https://about.bnef.com/blog/solar-10-predictions-for-2022/)

¹¹ [HTTPS://WWW.IEA.ORG/REPORTS/RENEWABLES-2021/EXECUTIVE-SUMMARY](https://www.iea.org/reports/renewables-2021/executive-summary)



L'électricité photovoltaïque en France

En France et depuis 2011, le marché du PV peine à atteindre 1 GW installé chaque année. La tendance semble cependant s'accélérer, portée par le raccordement de centrales de grande puissance, pour atteindre 2,8 GW installés en 2021 (+133 % par rapport à 2020) et s'approche des 3 GW/an nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés par la PPE. Au 31 décembre 2021, la capacité totale installée

était de 14 GW soit une augmentation de 25 % par rapport à l'année précédente. La production énergétique annuelle est estimée à 14,8 TWh et couvre en moyenne 3,1 % de la consommation nationale d'électricité¹², contre 2,6 % en 2020.

La plus grande partie des installations du parc correspond à des petits systèmes en toiture de puissance inférieure ou égale à 36 kW, avec 530 713 installations au 31 décembre 2021 (soit 93 % du nombre total d'installations), qui ne représentent toutefois que 2,4 GW soit 17 % de la puissance totale. Malgré la croissance importante de ce segment (+ 184 % par rapport à 2017), la tendance est aujourd'hui au déploiement de grandes installations, au sol ou en toitures. Ainsi, les installations de plus de 250 kW représentent, fin décembre 2021, 55 % de la puissance totale du parc PV français et 66 % de la puissance installée en 2021.

L'ÉCONOMIE DU PHOTOVOLTAÏQUE

Une technologie rentable

Si les installations PV de grande puissance et les centrales au sol fournissent déjà l'électricité parmi les moins chères, ce n'est pas encore le cas pour toutes les installations. Les deux grandes variables impactant le coût de l'électricité PV sont la puissance totale de l'installation et l'ensoleillement du site. Dans le Sud de la France, on peut estimer que le coût de revient du kWh varie entre 20 c€ pour une petite installation intégrée au bâti d'une toiture résidentielle et 4,9 c€ pour une centrale au sol¹³, alors que pour une même installation le coût de revient du kWh produit dans le Nord de la France est 40 % plus élevé que celui produit dans l'extrême Sud. A titre de comparaison, le prix moyen de l'électricité pour les ménages était de 18,9 c€ TTC en 2020.

A la suite d'une baisse spectaculaire des coûts des systèmes PV (CAPEX) et des coûts d'exploitation (OPEX) au début de la décennie 2010, nous assistons depuis 2016 à un ralentissement de cette tendance, allant jusqu'à une stagnation pour les petites installations¹⁴. Des innovations technologiques de ruptures seront nécessaires à la poursuite de la baisse des coûts du PV. A titre d'illustration, le coût des modules a été divisé par 5 entre 2011 et 2020. A l'inverse, le prix de l'électricité pour les ménages a augmenté d'environ 60 % entre 2009 et 2020¹⁵. En 2022, le coût de production de l'électricité PV produite dans les

grandes centrales sous complément de rémunération est largement inférieur au prix de gros de l'électricité, qui a augmenté dans le contexte très particulier lié à la crise énergétique, permettant ainsi à l'Etat de dégager des revenus. France Energie Eolienne estime à 6 milliards d'euros les gains nets que percevra l'Etat grâce aux installations solaires et éoliennes sur l'année 2022¹⁶.

Un secteur générateur de valeur ajoutée et d'emplois locaux

Les emplois de la filière PV en France sont majoritairement portés par l'aval de la filière PV (installation, maintenance...) et sont directement liés au rythme d'installation annuel et à la capacité totale installée en France.

En 2020, la hausse du nombre des installations (petites et grandes centrales au sol) et des prix de l'énergie ont entraînés une hausse du marché photovoltaïque et des emplois associés par rapport à 2018 : 5 780 M€ et 11 980 ETP en 2020, contre 4 187 M€ pour 6 440 ETP en 2018, soit des hausses respectives de 38 % et 86 %. Le marché de l'emploi a atteint 20 000 ETP en 2021 grâce à une année exceptionnelle en termes d'installation (2,8 GW)¹⁷

¹² MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (MTE), 2022, TABLEAU DE BORD : SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE - QUATRIÈME TRIMESTRE 2021

¹³ ADEME, À PARAÎTRE, COÛTS DES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN FRANCE 2022

¹⁴ ITRPV, 2021

¹⁵ MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, 2021, PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ EN FRANCE ET DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2020

¹⁶ <https://fee.asso.fr/actu/les-revenus-de-leolien-francais-reverse-a-letat-des-milliards-comme-bol-dair-pour-protger-le-pouvoir-dachat/>

¹⁷ SER, 2022, LE LIVRE BLANC DU SYNDICAT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, ACTE 2

¹⁸ ADEME, À PARAÎTRE, MARCHÉ ET EMPLOIS DANS LE SECTEUR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE RÉCUPÉRATION, SITUATION 2018-2020

Dans le contexte des crises sanitaires et énergétique notamment liée à l'invasion de l'Ukraine, la perspective de relocalisation d'une production PV en France pourrait significativement impacter à la hausse les emplois directs de la filière. Par ailleurs, la production de modules ou de cellules représente une opportunité de diversification ou de relais de croissance pour de nombreuses entreprises françaises œuvrant dans le développement de technologies de fabrication

innovantes (cellule, module ou électronique de puissance) ou les fabricants de produits connexes (câbles électriques, verre, aluminium...).

Le positionnement stratégique de certaines entreprises françaises - les équipementiers notamment - leur permet, par ailleurs, de viser des marchés en croissance à l'export.

BILAN ENVIRONNEMENTAL

Une industrie responsable de certains impacts environnementaux sur la phase amont du cycle de vie

A l'instar du secteur de la microélectronique, l'industrie du photovoltaïque requiert l'utilisation de gaz et de produits chimiques pour la fabrication des cellules et génère un certain nombre de déchets de fabrication, malgré une amélioration continue des procédés. L'étape de purification du silicium, réalisée principalement par voie chimique, fait notamment l'objet de travaux de recherche afin de la remplacer par des procédés physiques à faibles impacts environnementaux. D'autres actions visent à récupérer le silicium présent dans les boues de sciage après l'opération de fabrication des plaquettes, ou bien encore à recycler les bains chimiques utilisés dans certaines technologies de couches minces. Chaque technologie est caractérisée par des impacts très différents qu'il convient de prendre en compte dans leur globalité. A titre d'exemple, les filières couches minces peuvent se prévaloir d'un faible impact carbone liée à un procédé de fabrication peu consommateur d'énergie ; leur développement massif aurait toutefois un impact en termes d'utilisation de métaux rares (Tellure, Indium). Cette diversité des technologies permet toutefois à la filière PV d'envisager un développement pérenne sans risquer d'arrêt ou de ralentissement lié à une contrainte particulière d'approvisionnement en matériaux.

Impacts sur l'aval du cycle de vie

L'exploitation d'une centrale PV ne génère pas de déchets liés à la consommation de combustibles (en dehors de la gestion de fin de vie des installations), ni de

pollution de l'air. Il s'agit là de réels atouts pour le PV d'un point de vue environnemental. L'énergie photovoltaïque contribue ainsi aux objectifs énergie-climat et à l'indépendance énergétique du pays, car elle injecte sur le réseau une énergie produite localement, sans importation de combustible. Son développement permet d'éviter la consommation de combustibles fossiles et fissiles en France et en Europe, et joue un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique¹⁹.

Sur l'ensemble de sa durée de vie (de sa fabrication à la gestion de sa fin de vie), un système PV installé en France métropolitaine émet en moyenne entre 23 et 25 g de CO₂ équivalent par kWh produit²⁰ dans le sud de la France, pour les modules les plus récents²¹ (et pour une fabrication en Chine). Ces résultats dépendent fortement du mix électrique du pays dans lequel les cellules et modules sont produits. Une fabrication en France de tout ou partie des modules et composants permettraient d'abaisser encore significativement ce bilan carbone en profitant du mix électrique français très peu émetteur de CO₂ (36 g CO₂éq/kWh²², 528 gCO₂éq/kWh au niveau mondial²³).

Les émissions évitées grâce à l'installation de PV en France sont toutefois bien plus conséquentes. En France, le PV - tout comme l'éolien - vient en effet se substituer en premier lieu aux capacités de production fossiles (historiquement gaz et charbon). Le photovoltaïque décarbone donc efficacement le mix électrique français. Sur la base d'une modélisation solide, France territoire solaire estime l'économie de CO₂ à hauteur d'environ 300 gCO₂éq/kWh produit²⁴, alors que selon RTE, **le PV et l'éolien français ont permis d'éviter, à eux deux, l'émission de 22 millions de tonnes de CO₂ en France et en Europe en 2019**²⁵.

¹⁹ ADEME, ARTELYS, CARPENÉ L., CHAMMAS M., HUMBERTS L., MICHELET A., PERAUDEAU N. 2022. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DES BÉNÉFICES LIÉS AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE RÉCUPÉRATION EN FRANCE ENTRE 2000 ET 2028.

²⁰ FTHENAKIS V., LECCISI E. UPDATED SUSTAINABILITY STATUS OF CRYSTALLINE SILICON-BASED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: LIFE-CYCLE ENERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION TRENDS. PROG PHOTOVOLT RES APPL. 2021;1-10

²¹ LA BASE CARBONE ADEME DONNE UNE VALEUR MOYENNÉE SUR LES 15 DERNIÈRES ANNÉES COMPRISE ENTRE 24 ET 44 gCO₂éq/kWh EN FONCTION DU LIEU DE FABRICATION

²² RTE, 2021, BILAN ÉLECTRIQUE

²³ IEA, 2022, WORLD ENERGY OUTLOOK 2021

²⁴ FRANCE TERRITOIRE SOLAIRE, 2020, ANALYSE DE L'IMPACT CLIMAT DE CAPACITÉS ADDITIONNELLES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES EN FRANCE À HORIZON 2030

²⁵ RTE, RAPPORT TECHNIQUE DU BILAN PRÉVISIONNEL 2019

Ces résultats permettent de corriger une vision trop réductrice du système électrique selon laquelle chaque incrément de production éolienne et solaire se ferait au détriment du nucléaire et n'aurait pas d'influence sur les émissions de gaz à effet de serre.

La gestion des déchets liée à la fin de vie des modules PV va devenir sous peu un réel enjeu pour la filière. Les premiers systèmes PV ont été installés dans les années 90 et le recyclage de modules en fin de vie interviendra à grande échelle dans les années à venir. En application de la directive européenne sur les DEEE²⁶, les producteurs de modules PV ont d'ores et déjà l'obligation de prévoir leur recyclage. SOREN, l'éco-organisme unique en charge de la collecte des modules en fin de vie, a ainsi déjà collecté 15 000 tonnes de modules entre 2015 et 2020 ; et le gisement est estimé entre 50 000 et 200 000 tonnes en 2030²⁷. Le développement rapide de l'économie circulaire du photovoltaïque permettra de réduire significativement la consommation de ressources de la filière. Par ailleurs, ce gisement représente également un actif économique non négligeable. Les procédés actuels permettent de recycler plus de 95 % de la masse des systèmes photovoltaïques. Néanmoins, cette donnée massive, bien qu'importante, ne permet pas forcément d'atteindre une forte valeur ajoutée des matières ainsi récupérées, ni de traiter de façon satisfaisante les éléments les plus stratégiques (argent, silicium, cuivre). Des progrès récents ont néanmoins été réalisés et de nouveaux procédés à haute valeur

ajoutée devraient rapidement se positionner sur le marché.

Par ailleurs, avec l'augmentation constante des rendements des modules couplés à une relative difficulté de trouver des terrains pour de nouvelles centrales, un mouvement de repowering – remplacement prématuré de panneaux anciens, moins performants mais encore fonctionnels – est à prévoir. Cette situation pourrait aboutir à une opportunité de redéploiement dans le secteur résidentiel. Une réflexion stratégique devra néanmoins être menée sur la structuration d'une filière de seconde main, en anticipant notamment des ajustements législatifs et réglementaires.

Temps de retour énergétique

L'énergie nécessaire à l'ensemble des étapes du cycle de vie des systèmes PV est restituée après un an d'exploitation²⁸ en moyenne selon la technologie de module et sa région d'installation en France. Les avancées techniques attendues dans les prochaines années permettront de réduire ce "temps de retour énergétique" à moins d'un an pour les principales catégories de modules, quel que soit la région d'installation en France. Pendant les 30 ans de sa vie, un système PV produira donc plus de 30 fois l'énergie dépensée tout au long de son cycle de vie.

LES DIFFÉRENTS MODES DE DÉPLOIEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE

PV sur bâti

- **Les toitures photovoltaïques**
Les installations photovoltaïques sur toitures individuelles, tertiaires ou industrielles (en surimposition ou intégrées au bâti) sont les installations les plus vertueuses du point de vue environnemental, valorisant des surfaces artificialisées et évitant largement les conflits d'usage. Bien que plus onéreuses à l'installation, elles doivent donc être privilégiées. La loi Climat 2021-1104 du 22 août 2021 prévoit l'obligation, pour toute construction ou rénovation lourde de bâtiment de plus de 500 m², de couvrir de panneaux photovoltaïques au moins 30 % de leur surface de toitures (ou de toiture végétalisée).

De façon générale, la pose des systèmes nécessite une bonne coordination des différents corps de métier (isolation, couverture, électricité) et le recours à des professionnels bien formés, notamment les professionnels bénéficiant de la mention RGE (Reconnu Garant de l'Environnement).

- **Intégration dans l'enveloppe du bâtiment**
Les modules photovoltaïques intégrés au bâti se substituent aux éléments de construction traditionnels des maisons et immeubles. Ils ne sont pas montés en surimposition. Ils sont alors considérés comme matériaux de construction produisant de l'électricité. Ce mode d'intégration présente un surcoût par rapport aux panneaux surimposés, plus simples à installer mais moins esthétiques.

²⁶ DÉCHET D'ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

²⁷ IRENA – PVPS, 2016, End-of-life management of solar photovoltaic panels

²⁸ PHOTOVOLTAICS REPORT, FRAUNHOFER ISE, 2021

Toutefois, dans le neuf, certains modules intégrés en toiture présentent une rentabilité équivalente aux systèmes surimposés car ils viennent se substituer aux matériaux de couverture traditionnels. Une prime d'intégration paysagère, en vigueur jusqu'au 8 octobre 2023, permet d'encourager l'installation de certains de ces systèmes. Enfin, le marché des produits de construction PV est un marché stratégique sur lequel les industriels français du bâtiment et du photovoltaïque peuvent se positionner en valorisant leur savoir-faire à l'international.

Les centrales PV au sol

Les projets les plus rentables restent aujourd'hui les grandes centrales photovoltaïques au sol. Ces projets, qui nécessitent actuellement une surface de 1 à 2 ha/MW installé, sont donc amenés à se développer fortement dans les années à venir et questionnent sur leurs incidences sur la consommation d'espaces naturels, agricoles ou forestiers (ENAF), l'artificialisation des sols, la biodiversité, et les paysages.

- **Usage des sols**

L'objectif zéro artificialisation nette (ZAN) du plan biodiversité de 2018 ainsi que la politique de préservation des espaces agricoles posent la question de la comptabilisation des surfaces impactées par les centrales PV au sol. Un amendement à l'article 49 de la loi Climat résilience a été adopté par le Sénat en 2021 statuant qu'une installation photovoltaïque n'est pas comptabilisée comme de l'artificialisation sous réserve qu'elle « n'affecte pas durablement les fonctions écologiques du sol » et « ne soit pas incompatible avec l'exercice d'une activité agricole ou pastorale ». Un décret doit venir préciser les modalités d'application de ces conditions. Dans l'attente, l'ADEME a chiffré, dans le cadre des quatre scénarios Transition(s) 2050, les besoins surfaciques du déploiement du PV au sol selon trois catégories de consommation d'espace : l'emprise totale au sol (délimitée par le périmètre extérieur de la centrale), les surfaces imperméabilisées et les zones strictement incompatibles avec des activités ENAF (locaux techniques et voies d'accès, surface sous panneau pour les centrales avec une forte densité de modules).

En milliers d'ha	2020	2050
Emprise totale	6	75 - 125
Imperméabilisation	0,009	0,06 - 0,2
Strictement Incompatible ENAF	0,5	3 - 40
<i>Consommation surfacique au sol du parc PV en France</i>		

Dans ces scénarios, qui diffèrent en termes de niveau de déploiement et de densité des centrales, l'emprise au sol ne dépasserait pas 125 000 ha au total (0,2 % de la superficie de la France métropolitaine) en 2050 dans le scénario le plus ambitieux et l'imperméabilisation des sols resterait très faible.

La compatibilité avec un usage ENAF est un point d'attention, mais des solutions existent pour Eviter-Réduire-Compenser (ERC) les impacts négatifs. Il est à noter que la dynamique actuelle de consommation d'ENAF en France est estimée entre 20 000 et 30 000 ha par an, principalement portée par la construction neuve et le développement du réseau routier²⁹.

Quoi qu'il en soit, afin de prévenir les conflits d'usage des sols et limiter les impacts sur les habitats naturels, **le choix d'implantation doit se porter en priorité sur des surfaces déjà artificialisées et/ou dégradées** (friches industrielles, anciennes carrières, sites présentant une pollution antérieure, zones industrielles ou artisanales...). Les projets de centrales photovoltaïques peuvent, par ailleurs, intégrer une mixité des usages, en particulier avec l'agriculture (cf. § suivant).

Afin d'encadrer le développement des centrales au sol, les projets d'une puissance supérieure à 250 kW sont soumis, depuis 2009, à un permis de construire, une étude d'impact et une enquête publique. Plusieurs mesures ont été annoncées pour alléger les démarches administratives encadrant les petites installations³⁰. Le permis de construire devrait ainsi ne plus être nécessaire pour les petits projets (inférieurs à 500 kW). Les projets d'ombrières sur parking et sur bâtiments existants ne devraient quant à eux plus être soumis à autorisation environnementale. Le développement des connaissances devrait permettre d'améliorer la prise en compte des incidences dans l'évaluation des impacts et le dimensionnement des mesures ERC. En complément de cette réglementation spécifique, on peut souligner que les appels d'offres lancés par le gouvernement pour les centrales au sol octroient une notation préférentielle pour les projets proposant la réhabilitation ou la valorisation de friches.

- **La préservation de la biodiversité**

L'impact des centrales PV au sol n'a fait l'objet de travaux scientifiques que sur un nombre limité de sites et il est encore difficile d'en généraliser les résultats. En l'état actuel des connaissances scientifiques³¹, l'installation et la gestion de parcs photovoltaïques (PV) au sol ainsi que de leurs dispositifs connexes (pistes, réseaux de câbles enterrés, plateformes techniques, clôtures, etc.) peuvent engendrer des incidences sur la biodiversité et les sols en modifiant l'usage et la gestion des terres sur le site équipé (ex : défrichement),

²⁹ ADEME, À PARAÎTRE, TRANSITION(S)2050, QUELS ENJEUX POUR UNE GESTION DURABLE DES SOLS À L'HORIZON 2050

³⁰ PLAN D'ACTION POUR ACCÉLÉRER LE DÉVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE, MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, 2021

³¹ LPO, À PARAÎTRE, Centrales photovoltaïques & Biodiversité. Synthèse des connaissances sur les impacts potentiels et les moyens de les atténuer.

les conditions environnementales (ex : microclimat) et les continuités écologiques (ex : clôtures). La nature et l'ampleur des incidences varient toutefois au cas par cas, en fonction de l'état initial du site (ex : forêt, pâture, sols dégradés), de la conception des parcs (ex : modalités de terrassement, hauteur et densité de modules, types d'ancrage au sol) et de la gestion de la végétation au sein du parc.

Des solutions permettant de limiter les impacts des projets PV sur la biodiversité et les sols sont connues. Des guides sont disponibles pour rendre efficace leur mise en œuvre effective au sein de la séquence ERC à toutes les étapes d'un projet^{32,33}. Dans un contexte de massification à venir, les travaux scientifiques et les suivis environnementaux sont à généraliser pour s'assurer de l'efficacité des mesures sur le long terme et pour promouvoir les conceptions de centrales les plus vertueuses. Le développement de l'écoconception des centrales est une opportunité de création de valeur ajoutée pour les fabricants et développeurs français, qui pourraient ainsi se démarquer favorablement de la concurrence.

- **De la bonne intégration paysagère du photovoltaïque**

Bien que l'évaluation des incidences des projets photovoltaïques sur le paysage soit demandée dans les études d'impact réglementaire, des progrès pourraient encore être accomplis. Il apparaît pourtant important de prendre en compte ces incidences le plus tôt possible. En amont des projets, la réalisation d'un plan de paysages pour la transition écologique et solidaire qui favorise la concertation et les méthodes participatives permet d'aller bien au-delà de la seule intégration paysagère du photovoltaïque, avec une prise en compte globale de l'ensemble des autres déterminants du paysage (bâtiments, infrastructures de mobilités, industrie, agriculture et forêts). Les enjeux paysagers soulevés par le photovoltaïque sont aussi à mettre en perspective avec les effets du réchauffement climatique et les pertes de biodiversité associées, si aucune action concrète n'est mise en œuvre. Ainsi, il est particulièrement important d'accompagner le grand public dans son appropriation de la transition écologique, pour donner aux énergies renouvelables et au photovoltaïque une place dans les paysages de demain. Le charbon, le pétrole et le gaz, qui disposent d'une forte densité énergétique et qui sont extraits pour l'essentiel hors de France (avec un impact paysager souvent important), ont

eux aussi radicalement transformé nos paysages et nos modes de vie par le passé : étalement urbain, zones industrielles et commerciales exclusives, intensification et spécialisation de l'agriculture, etc., tout en faisant l'objet aujourd'hui d'une appropriation sociale forte.

Le photovoltaïque sur terrains agricoles

- **PV et activité agricole**

Au-delà du déploiement sur les toitures et sur les surfaces dégradées ou artificialisées, des installations sur terrain agricole pourraient contribuer à l'atteinte des objectifs fixés dans la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). **Pour autant, un développement sur les sols agricoles pose un double enjeu de recherche d'espace et de préservation des terres agricoles.** Il est ainsi important de veiller à la préservation de la qualité des sols et de prendre en compte les impacts sur les activités agricoles, qu'il s'agisse des interactions directes entre ces deux productions (alimentaires et énergétiques) mais également des potentielles conséquences économiques, sociales, territoriales et environnementales d'une telle association.

- **Agrivoltaïsme**

En réponse à ces différents enjeux, et afin de préserver la vocation agricole des sols, la notion « d'agrivoltaïsme » a émergé au sein de la filière photovoltaïque en France, notamment grâce à l'appel d'offre du gouvernement, opéré par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), portant sur la "réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire" dont le premier cahier des charges a été publié en 2017. Dans cet appel d'offre, les installations agrivoltaïques sont définies comme des « installations photovoltaïques permettant de coupler une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale en permettant une synergie de fonctionnement démontrable ». Cette filière agrivoltaïque, bénéficiant ainsi d'un soutien financier de l'Etat, éveille l'intérêt des porteurs de projet et tend à prendre de l'ampleur. Au regard de la grande variété des solutions techniques présentes sur le marché, la justification de la synergie agricole de ces systèmes n'est pas toujours évidente ou démontrable et a priori, tous les systèmes ne répondent pas forcément aux prérequis de l'agrivoltaïsme.

³² MEDDTL, 2011. INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL. GUIDE DE L'ÉTUDE D'IMPACT. 138P.

³³ ECOMED, IMBE, TOTAL QUADRAN. 2020. GUIDE PIESO – GUIDE TECHNIQUE D'ÉCO-CONCEPTION DE CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES, UN OUTIL D'AIDE À L'INTÉGRATION ÉCOLOGIQUE.

Ainsi, au regard de l'intérêt croissant lié à ce nouveau secteur de marché pour le photovoltaïque, une étude de l'ADEME³⁴ a permis de proposer un éclairage sur les équilibres à trouver entre production photovoltaïque et agricole, sur la base des connaissances à date et d'une large consultation. Les réflexions menées ont ainsi permis d'établir une classification de tous types de projets photovoltaïques sur terrains agricoles et d'aboutir à une définition approfondie de l'agrivoltaïsme, caractérisant les synergies entre production photovoltaïque et agricole et tenant compte de l'ensemble des enjeux soulevés par cette nouvelle notion.

Pour autant, ce travail a également démontré l'existence de projets moins synergiques que les projets agrivoltaïques, mais pouvant toutefois être pertinents pour l'agriculture, sous réserve qu'ils respectent eux aussi un ensemble de critères. Ces projets, dénommés « couplages d'intérêt pour l'agriculture », permettent néanmoins un équilibre appréciable entre production photovoltaïque et agricole et offrent ainsi de nouvelles opportunités pour les exploitations agricoles.

Pour autant, cette étude est la première réalisée à l'échelle nationale sur ce sujet complexe et les connaissances des incidences des systèmes photovoltaïques sur la production agricole sont aujourd'hui encore lacunaires et variables selon les types de projets. **La recherche, le partage des retours d'expérience et la capitalisation des suivis agricoles seront donc indispensables pour permettre l'approfondissement des connaissances.**

APPROPRIATION SOCIÉTALE

Dans un contexte national qui fait de la transition énergétique un des enjeux forts des années à venir, l'implication des citoyens et des collectivités dans des projets de parcs photovoltaïques présente de nombreux atouts. En 2015, la LTECV a notamment facilité l'implication des citoyens et des collectivités dans les projets d'énergie renouvelable et deux directives européennes encouragent les Etats-Membres à soutenir ces initiatives³⁶.

Leviers de financement de la production d'énergie renouvelable, les projets participatifs et/ou à gouvernance locale concourent à un meilleur ancrage dans les territoires, participent au développement local

Le photovoltaïque flottant

Le photovoltaïque flottant, qui consiste à assembler sur des plans d'eau des modules sur des structures flottantes, est un nouveau mode de déploiement des centrales solaires. En 2021, le parc photovoltaïque flottant mondial a atteint 3 GW de capacité installées, et 668 MW pour la seule année 2020³⁵. S'il permet de s'installer sur du foncier peu ou moins de conflits d'usage que pour les centrales au sol (lacs de carrières, anciens canaux, retenue de barrage, etc.) et de créer une synergie entre production PV et préservation de l'eau (amélioration de l'efficacité de conversion électrique par abaissement de la température de fonctionnement des panneaux ; diminution de l'évaporation, notamment dans le sud de la France), **il est nécessaire de mieux évaluer les impacts avant de massifier le déploiement.**

En effet, la connaissance des modifications engendrées par les centrales PV flottants sur les écosystèmes lacustres reste à développer ; ceci afin de veiller notamment à la cohérence du développement de cette filière avec les engagements de la France en matière de non-dégradation supplémentaire de l'état chimique et écologique de ces masses d'eau. **Un taux de recouvrement trop élevé pourrait également perturber les cycles biogéochimiques (carbone, azote) au sein de la colonne d'eau, et aboutir à de fortes émissions de gaz à effet de serre.** Des préconisations visant à limiter le taux de recouvrement ainsi que l'orientation du déploiement vers des bassins artificiels pauvres en biodiversité (réserve d'eau pour l'irrigation, plan d'eau de carrière, etc.) permettraient d'éviter ces impacts en attendant de mieux connaître les interactions complexes qui sont en jeu.

en optimisant les retombées économiques et sociales localement, et permettent aux habitants de s'approprier la question énergétique.

Pour ce faire, les collectivités et citoyens peuvent :

- Participer au financement de ces projets grâce à un investissement sous la forme d'un prêt accordé au porteur de projet. Cette participation, qui ne donne pas accès aux décisions prises dans le projet, peut notamment s'effectuer via les plateformes de *crowdfunding* ;

³⁴ ADEME, I CARE & CONSULT, CERESCO, CÉTIAC. 2021. CARACTÉRISER LES PROJETS PHOTOVOLTAÏQUES SUR TERRAINS AGRICOLES ET L'AGRIVOLTAÏSME – GUIDE DE CLASSIFICATION DES PROJETS ET DÉFINITION DE L'AGRIVOLTAÏSME.

³⁵ ANNUAL REPORT, SOLAR ENERGY RESEARCH INSTITUTE OF SINGAPORE (SERIS), 2021

³⁶ DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL DU 11 DÉCEMBRE 2018 RELATIVE À LA PROMOTION DE L'ÉNERGIE PRODUITE À PARTIR DE SOURCES RENOUVELABLES, JOURNAL OFFICIEL DE L'UNION EUROPÉENNE, 21.12.2018.

- S'impliquer dans la gouvernance du projet (se matérialisant par un investissement financier au capital des sociétés de projet) assortis d'un **pouvoir de décision conférant aux collectivités et citoyens une réelle maîtrise du projet**. Dans ce cas, les collectivités agissent souvent via des Fonds Régionaux ou des Sociétés d'Economie Mixte tandis que les particuliers peuvent se rassembler localement pour constituer des sociétés d'investissement locales ou investir via l'outil national développé par Energie Partagée.

Un bonus de notation dans les appels d'offres nationaux a notamment été instauré par le Ministère de la Transition Ecologique afin de

favoriser le développement de parcs photovoltaïques citoyens par rapport aux projets portés par des développeurs seuls. Pour accélérer la dynamique de ces projets à gouvernance locale et les accompagner, une feuille de route a également été mise en place avec « 10 mesures en faveur des énergies renouvelables citoyennes »³⁷ et une campagne de communication du Ministère sur les énergies citoyennes³⁸ a été lancée.

Si le PV bénéficie d'une bonne appropriation citoyenne aujourd'hui, **l'ADEME insiste sur l'importance de la concertation lors du montage de projets et sur l'intégration environnementale et paysagère**, réfléchi le plus en amont possible des projets.



LA PLACE DU PV DANS LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE FRANÇAIS

Variabilité de la production photovoltaïque et impact sur l'équilibre offre-demande

La quantité d'électricité produite par un système photovoltaïque varie au cours de la journée, d'une journée à une autre et au cours des saisons. Or, dans tout système électrique, la production et la consommation d'électricité doivent à tout moment être équivalentes pour assurer l'équilibre du réseau. Le gestionnaire de réseau doit donc anticiper et compenser ces variations à tout instant pour assurer cet équilibre. Les outils de prévision permettent aujourd'hui de prédire la production photovoltaïque à court, moyen et long terme avec une précision similaire aux prévisions de la demande électrique du gestionnaire de réseau (en 2019, l'écart moyen entre la prévision de RTE à J-1 et la consommation réelle était d'un peu moins de 800 MW, soit entre 1 et 2 % de la demande effective). Ainsi pris en compte, le photovoltaïque ne perturbe pas les opérations d'équilibrage du réseau. Toutefois, avec un déploiement massif des énergies renouvelables électriques, cet équilibre deviendra plus difficile à tenir sans dispositions complémentaires. Le développement des réseaux intelligents intégrant développement des interconnexions, déploiement du pilotage de la consommation, et des solutions de stockage

permettra à terme de garantir l'équilibrage en temps réel de la demande et de la production massive des énergies électriques variables, telles que le PV.

Grâce à sa variabilité prévisible, le PV peut contribuer à réduire la pointe de mi-journée de demande d'électricité. Des études menées par l'ADEME sur la modélisation du réseau français métropolitain montrent ainsi que le développement du photovoltaïque jusqu'à 20 GW réduit le besoin de flexibilité journalière au niveau national, car il permet de contribuer à couvrir la pointe de consommation méridienne. Par ailleurs, au niveau local, dans beaucoup de cas, l'électricité produite par un système PV installé sur le toit d'un bâtiment peut être consommée localement ou à proximité, par exemple lorsque l'air conditionné fonctionne pleinement à midi en été. Ce taux d'autoconsommation³⁹ peut être augmenté grâce à des dispositifs de stockage, qui font actuellement l'objet de nombreux développements, et ainsi limiter le besoin d'investissement sur le réseau de distribution (renforcement ou création de lignes électriques).

³⁷ 10 mesures en faveur des énergies renouvelables citoyennes, Ministère de la Transition Ecologique, Novembre 2021.

³⁸ [HTTPS://WWW.ECOLOGIE.GOUV.FR/ENERGIES-CITOYENNES](https://www.ecologie.gouv.fr/energies-citoyennes).

³⁹ PART DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE CONSOMMÉE SUR PLACE, À DISTINGUER DU TAUX D'AUTOPRODUCTION QUI CORRESPOND À LA PART DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE LOCALE SUR LA CONSOMMATION TOTALE

L'impact local sur le réseau de distribution

En cas de fort déséquilibre local entre la production et la consommation d'électricité, la production PV peut avoir un impact sur le « plan de tension »⁴⁰ assuré par le gestionnaire du réseau de distribution, en générant des surtensions temporaires. Ces contraintes nécessitent de recourir à un renforcement du réseau de distribution, présentant un surcoût pour le producteur ou le gestionnaire de réseau. Dans ce contexte, une répartition des installations PV sur l'ensemble du territoire français apparaît comme une mesure d'optimisation économique faisant baisser le coût de renforcement des infrastructures réseau. Il est ainsi parfois plus intéressant d'installer une grande centrale dans une région moins ensoleillée, mais ayant une meilleure capacité d'accueil réseau. Ce surcoût réseau peut également impacter les petites installations et mettre en péril la faisabilité d'un projet. Pour

encourager ces petits projets, souvent meilleurs d'un point de vue environnemental, la Loi Climat et Résilience prévoit de porter le taux de réfaction⁴¹ de 40 à 60 %. L'émergence de nouvelles solutions techniques alternatives permet également de résoudre ces problèmes, comme la fourniture de puissance réactive, l'installation d'équipement d'absorption du réactif, ou encore le développement des ORI (opération de raccordement intelligente) permettant de raccorder les installations à moindre coût en échange de limitations ponctuelles de production en période de contrainte sur le réseau. Néanmoins, si ces solutions sont d'ores-et-déjà utilisées dans certains pays, elles ne sont pour la plupart qu'au stade de l'expérimentation en France. Pour les grandes installations raccordées en HTA, le gestionnaire de réseau peut envoyer des ordres aux producteurs pour régler à distance le niveau de puissance réactive des installations et ainsi mieux réguler le niveau de tension.

ACTIONS DE L'ADEME

Les actions de l'ADEME visent à lever les freins au déploiement du photovoltaïque en travaillant notamment sur la concertation, l'intégration environnementale et paysagère ou la baisse des coûts tout en veillant à la qualité des installations. Elles portent sur trois volets :

- le **soutien à la R&D et à l'innovation** : A travers ses Appels à projet Recherche et le financement de bourses de thèse, l'ADEME soutient des programmes de recherche visant à améliorer l'efficacité de conversion des systèmes, réduire leurs impacts sur l'environnement, augmenter leurs fiabilités et baisser les coûts de fabrication. L'Agence intervient également dans les appels à projet « France 2030 » en tant qu'opérateur de l'Etat⁴². Les trois AAP (DEMO TASE, PME TASE et Indus EnR) visent à soutenir les acteurs innovants de la filière photovoltaïque française. Les projets retenus ont pour objectifs globaux d'améliorer l'articulation R&D-industrie afin d'aider à la structuration de la filière industrielle et d'accroître sa compétitivité. La recherche de solutions techniques et économiques permettant une meilleure intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique est également au cœur des activités de l'Agence ;
- Le **développement d'une filière de qualité** : L'ADEME travaille de concert avec les acteurs de la filière du

photovoltaïque (ministère de la transition écologique, syndicats professionnels, organismes certificateurs notamment) dans le but d'assurer la qualité des installations photovoltaïques en France. Depuis plus de 20 ans, l'ADEME a construit ou soutenu des formations techniques et des labels qualités, destinés aux professionnels du PV, pour étudier et diffuser les bonnes pratiques d'installation du photovoltaïque en France, au sol ou sur bâti, dans le respect des dispositions réglementaires ;

- **L'appropriation des projets** : L'ADEME a mené et soutenu des travaux sur la concertation autour des projets photovoltaïques, notamment à travers l'édition de guides, l'organisation de formations, d'actions d'accompagnement et de communication⁴³. De plus, afin de diversifier les modèles de développement et d'appropriation sociétale, l'ADEME accompagne des projets d'initiative locale à travers le financement d'études de faisabilité ou la mise au point d'outils juridiques ou financiers. Elle soutient différents réseaux dédiés au PV participatif, qui mettent en contact les acteurs du photovoltaïque et leur fournissent des informations, des conseils et une assistance⁴⁴. Enfin, l'ADEME travaille à l'intégration environnementale et paysagère des énergies renouvelables au travers de nouveaux partenariats associatifs et institutionnels.

⁴⁰ SUR UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE, CHAQUE POINT DE CONSOMMATION A POUR EFFET DE FAIRE BAISSER LE NIVEAU DE TENSION LOCALEMENT. POUR GARANTIR QUE LA TENSION RESTE EN TOUT POINT DU RÉSEAU DANS UN INTERVALLE DE +/- 10% PAR RAPPORT À SA VALEUR NOMINALE, LE GESTIONNAIRE DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION A DONC MIS EN PLACE UN « PLAN DE TENSION ». OR, LES GÉNÉRATEURS PV PRÉSENTS SUR LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION PEUVENT INDUIRE DES SUR-TENSIONS LOCALES QUI N'ÉTAIENT PAS PRÉVUES DANS LE PLAN DE TENSION INITIAL.

⁴¹ LE TAUX DE RÉFACTION CORRESPOND À LA PART MOYENNE DES COÛTS DE RACCORDEMENT COUVERTE PAR LE TARIF D'UTILISATION DU RÉSEAU PUBLIC (TURPE). IL EST

⁴² [HTTPS://AGIRPOURLATRANSITION.ADEME.FR/](https://agirpourlatransition.ademe.fr/)

⁴³ MISSIONNÉE PAR LE MTE, L'ADEME A MIS EN PLACE UN RÉSEAU, « LES GÉNÉRATEURS », POUR ACCOMPAGNER LES COLLECTIVITÉS DANS LEUR TRANSITION ÉCOLOGIQUE

⁴⁴ [HTTPS://ENERGIE-PARTAGEE.ORG/OUTILS/LES-RESEAUX-REGIONAUX/](https://energie-partagee.org/outils/les-reseaux-regionaux/)