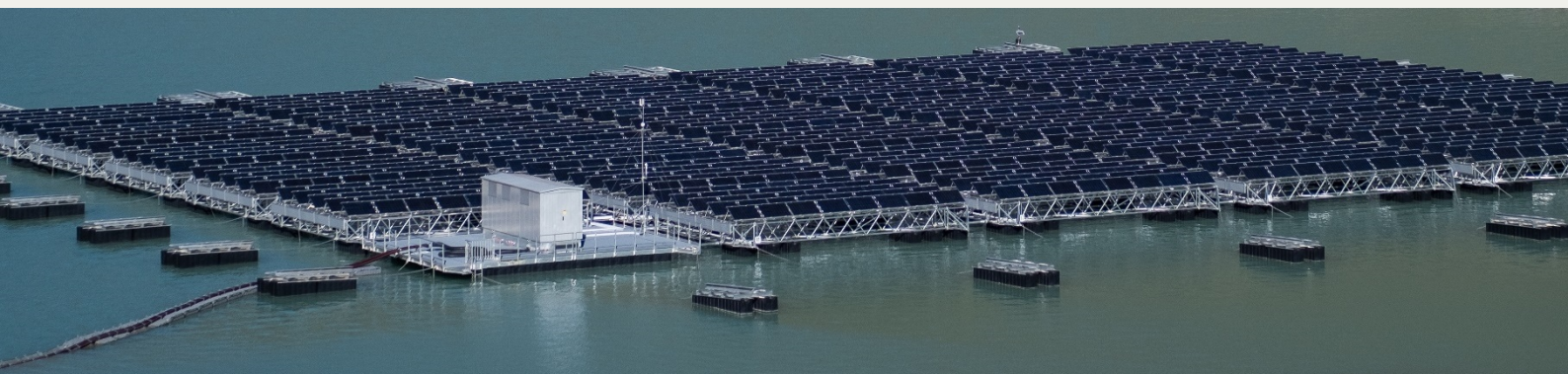




CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES & BIODIVERSITE

Synthèse des connaissances sur les impacts potentiels
et les moyens pour les atténuer



CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES & BIODIVERSITE

Fiche de présentation

Citation Centrales photovoltaïques et biodiversité : synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer. Marx G, LPO, Pôle protection de la Nature (2022).

Date de publication Octobre 2022

Mots-clés Photovoltaïque, solaire, biodiversité, ERC

Nombre de pages 73

Site web https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/2022_pv_synthese_lpo.pdf

Résumé Cette synthèse bibliographique passe en revue les publications scientifiques françaises et internationales les plus récentes afin de fournir aux acteurs de la filière photovoltaïque, aux services de l'Etat et aux différents organismes engagés pour la protection de l'environnement un état des lieux le plus complet possible sur le niveau de connaissance des incidences potentielles sur les milieux naturels des centrales photovoltaïques au sol et flottantes, les mesures d'atténuation des incidences existantes et leurs modalités de suivi.



**Agir pour
la biodiversité**

CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES & BIODIVERSITÉ

Rédacteur principal

Geoffroy MARX, LPO, Pôle Protection de la Nature, Service études, développement durable, international et Outre-mer.

Comité de relecture

Véronique de Billy et Philippe Gourdain, Office français de la biodiversité (OFB) ;

Thomas Eglin, Pierre Rale et Céline Mehl, ADEME ;

Bertrand Schatz, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE-CNRS) ;

Brian Padilla, MNHN ;

Jérémy Froidevaux, Université de Stirling ;

Raphael Gros, Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie Marine et Continentale (IMBE – Aix Marseille Université) ;

Clémentine Azam et Isabella Rubini, Comité français de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN).

Ainsi que le **Conseil scientifique et technique de la LPO**.

Cette étude a reçu le soutien de l'ADEME et de la Direction Appui aux Stratégies pour la Biodiversité (DASB) - Direction générale déléguée Mobilisation de la société de l'Office Français de la Biodiversité (OFB).



Photographies de couverture :

Christophe Finot, Philippe Gourdain, Urbasolar, Optimum Tracker, Jean-Luc Westphal, Christian David.

Table des matières

Table des matières.....	5
Messages clés.....	6
1. Introduction.....	8
2. Méthode.....	10
2.1 Choix des ressources bibliographiques étudiées.....	10
2.2 Limites de l'étude.....	11
3. L'énergie photovoltaïque en France.....	12
3.1 Programmation pluriannuelle et perspectives de développement.....	12
3.2 Modalités de déploiement territorial.....	13
3.3 Rappels législatifs et réglementaires.....	16
4. Cas des centrales photovoltaïques au sol.....	20
4.1 Modalités de conception et d'installation.....	20
4.2 Incidences sur les composantes physiques des milieux naturels.....	23
4.3 Incidences sur les composantes biogéochimiques des milieux naturels.....	27
4.4 Incidences sur les composantes biologiques des milieux naturels.....	31
5. Cas des CPV flottantes.....	46
5.1 Modalités de conception, d'installation et d'exploitation des CPV flottantes.....	46
5.2 Incidences sur les composantes physiques.....	46
5.3 Incidences sur les composantes biogéochimiques.....	48
5.4 Incidences sur les composantes biologiques.....	48
6 Mesures d'atténuation et de suivi.....	50
6.1 Mesures d'évitement.....	50
6.2 Mesures de réduction.....	54
6.3 Mesures de compensation.....	59
6.4 Mesures de suivis.....	61
7. Points de vigilance.....	64
7.1 Planification.....	64
7.2 Comparaison avec d'autres activités anthropiques.....	64
7.3 Effets des panneaux, de l'absence de panneaux ou des mesures de gestions.....	64
7.4 Des impacts pas toujours correctement pris en compte.....	65
8. Conclusion.....	66
9. Bibliographie.....	69

Messages clés

Du fait de ses faibles émissions de CO₂, de sa rapidité de déploiement et de ses coûts en constante diminution, l'énergie solaire photovoltaïque est amenée à jouer un rôle majeur dans la transition énergétique en cours en France et dans le monde.

Lorsqu'elles sont implantées sur des toitures existantes ou sur des surfaces imperméabilisées (parking, tarmac, etc.), les centrales solaires photovoltaïques (CPV) sont réputées engendrer peu ou pas d'impacts sur la biodiversité en phase de construction, d'exploitation et de démantèlement. Ces projets doivent donc de fait être encouragés en priorité. Mais force est de constater que la construction de CPV en milieux naturels se développe également, parfois sur des surfaces conséquentes (> 100 ha) et dont certaines présentent de très forts enjeux écologiques (ZNIEFF de type I ou II, sites Natura 2000, zones humides, etc.).

Ces CPV nécessitent une emprise foncière importante en comparaison des autres sources de production d'électricité peu carbonées. Elles peuvent entraîner l'altération, la dégradation voire la destruction des milieux naturels sur lesquels elles sont implantées (défrichements puis gestion de la végétation au plus près du sol ; terrassement et compactage des sols ; instauration de microclimats différenciés au-dessus et en dessous des panneaux ; création d'exclos par les clôtures, etc.). La modification des fonctions hydriques, climatiques ou biologiques qui peut en résulter conduit à l'artificialisation d'une partie parfois importante des sols au sein des emprises des CPV.

Au regard des résultats issus de la littérature scientifique, les incidences sur la biodiversité des CPV installées en milieux naturels (au sol ou sur plan d'eau), se traduisent par une modification des cortèges d'espèces végétales et animales comparés à ceux initialement présents, pouvant conduire à une altération des fonctions écologiques voire des services écosystémiques associés. La nature, l'ampleur et la durée de ces modifications varient entre CPV, selon leur situation biogéographique, leurs modalités d'installation et de conception, et l'état initial des milieux naturels équipés. Les incidences exercées par les CPV sur la biodiversité peuvent être classées selon les trois catégories suivantes :

1. altération, dégradation voire disparition des conditions initiales d'habitats pour la faune et la flore ;
2. dérangement de certaines espèces animales, engendrant des comportements d'aversion (et donc de perte d'habitats) ou d'attrait (avec risque d'effet "puits" compte tenu du piège sensoriel que peuvent constituer les panneaux pour certaines espèces comme les insectes aquatiques dits polarotactiques ou les chauves-souris, pouvant conduire à des échecs de reproduction, des blessures voire des mortalités) ;
3. altération voire interruption des mouvements migratoires, par création d'exclos sur de grandes surfaces et fractionnement des milieux naturels.

En conséquence, l'installation de CPV devrait être évitée en milieux naturels, notamment au sein ou à proximité de zones humides ; ceci d'autant plus que des alternatives sont possibles et encouragées :

1. en sites dégradés (sites pollués, anciens sites industriels, etc.), la mise en œuvre de mesures pérennes d'atténuation des incidences permettant de respecter l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité inscrit au code de l'env. (article L. 110-1 du code de l'env.) sont d'autant plus faciles à déployées que les enjeux environnementaux sont limités ;
2. en milieux agricoles, les expérimentations agrivoltaïques mettent en lumière la possibilité d'un co-usage, sur une même parcelle, d'une activité agricole principale avec une activité photovoltaïque complémentaire. Ceci sous réserve d'adapter les

installations photovoltaïques aux besoins de production agricole, à l'aide de dispositifs limitant les emprises au sol et l'ombrage des panneaux sur les cultures.

Il est également nécessaire d'améliorer la réglementation qui encadre ces projets, les études d'impacts ne donnant pas lieu à une autorisation au titre du code de l'environnement, mais au titre du code de l'urbanisme, rendant de fait certaines prescriptions environnementales peu voire pas contrôlables en phase d'exploitation.

Il y aurait lieu également de mettre à disposition des méthodes adaptées à ce type de projet afin d'améliorer la connaissance de leurs incidences sur les milieux naturels dans le temps, et donc de mieux les anticiper et atténuer. Un suivi standardisé et généralisé des cortèges d'espèces présents, basé sur l'approche « BACI » (before/after control impact), permettrait notamment d'obtenir des éléments de comparaison scientifiquement robustes avant/après projet, ainsi qu'entre parcs.

Enfin, de nombreux travaux de recherche scientifique restent encore à mener pour i) améliorer la compréhension des incidences des CPV sur les milieux naturels terrestres ou lacustres, les fonctions écologiques des sols et de la biodiversité et les services écosystémiques associés ; et ii) identifier les différentes mesures de remédiation possibles permettant la conception de parcs de « moindre impact » et une application vertueuse de la séquence ERC. Les alternatives technologiques développées en milieux agricoles pour diminuer certaines pressions sur les conditions physiques des milieux (notamment l'ombre portée et les emprises au sol), auraient avantage à être testées en milieux naturels dès lors que la sensibilité environnementale de ces derniers s'y prête.

1. Introduction

En 2019, la Commission européenne présentait le pacte vert pour l'Europe (Green Deal), une feuille de route pour rendre l'Europe neutre sur le plan climatique d'ici 2050. En 2021, la Commission a dévoilé un paquet climat avec l'objectif de transformer l'ambition de neutralité climatique en action politique concrète. Il s'agit d'un ensemble de textes nommé « Paré pour 55 » (« Fit for 55 ») en référence à l'objectif de l'Union européenne (UE) de réduire ses émissions carbone de 55 % d'ici 2030 par rapport à 1990.

Pour se conformer à ces objectifs, la France s'est engagée à réduire de 20 % sa consommation énergétique finale et à atteindre une part de 33 % d'énergies renouvelables dans sa consommation d'énergie finale brute d'ici 2030.

La trajectoire de chaque EnR est fixée par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui couvre actuellement la période 2023-2028. Le photovoltaïque au sol se voit attribuer un objectif compris entre 20,6 et 25 GW à l'horizon 2028 (tandis que le photovoltaïque sur toiture devrait atteindre entre 14,5 et 19 GW).

Par leur contribution à l'atteinte des objectifs climatiques – dont ceux de neutralité Carbone 2050, les centrales solaires photovoltaïques (CPV) sont considérées comme une composante essentielle de la transition énergétique, participant à l'atténuation des effets du changement climatique (GIEC 2011 ; IPBES 2016). Cependant, dans leur rapport conjoint, le GIEC et l'IPBES (2021) relèvent que, comme les autres investissements dits « verts » – tels que les agrocarburants, les installations éoliennes, hydroélectriques et géothermiques – les centrales solaires peuvent avoir des effets négatifs sur leur environnement, notamment si les enjeux sociaux et la sensibilité environnementale des milieux équipés ne sont pas suffisamment pris en compte.

En effet, les CPV ont une emprise foncière relativement importante, même avec les technologies les plus récentes. Alors que l'objectif de réalisation de projets de « moindre impact » et l'application de la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) devraient conduire à privilégier l'installation des CPV sur des milieux d'ores et déjà artificialisés ou à très faibles enjeux écologiques, Rehbein *et al.* (2020) constatent que 12 % des CPV de plus de 10 MW en exploitation dans le monde sont implantées dans des aires protégées ou des Zones clés pour la biodiversité¹ et que cette pression s'accroît avec les projets en cours de développement. Malgré les mesures de gestion qui peuvent être mises en œuvre au sein de certaines centrales pour en réduire ou en compenser les impacts, nombre d'ONG et de scientifiques commencent à s'inquiéter de l'empreinte foncière de ces installations sur des milieux naturels ou semi-naturels et de leurs conséquences environnementales.

Les publications scientifiques portant sur les impacts potentiels des CPV et les moyens pour les atténuer, souvent issues de travaux de recherche à l'international, sont chaque année plus nombreuses. En France, le développement de la filière photovoltaïque a été relativement tardif (environ 80 % des installations ont été raccordées après 2011) et s'est basée initialement sur une multitude de projets en toitures de petite puissance ; le premier appel d'offre de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) portant sur des centrales au sol a été lancé en 2016. Cela explique sans doute que les premières études scientifiques commencent tout juste à être publiées et qu'aucune synthèse des connaissances sur le sujet n'ait encore été réalisée en français.

Aux États-Unis, la revue de littérature publiée par Turney et Fthenakis (2011) passe en revue 32 impacts environnementaux potentiels des CPV sur des thématiques aussi diverses que l'atteinte aux paysages, l'empreinte foncière, le bien-être et la santé humaine, les sols, la biodiversité et les habitats naturels, les ressources hydrogéologiques et le climat. En comparant ces incidences avec celles du mix électrique états-unien (composé à 69 % d'énergies fossiles), ces auteurs concluent globalement au bienfait des CPV pour

¹ [Key biodiversity areas](#)

l'environnement. Un tel résultat n'est toutefois transposable en France que dans la mesure où la production photovoltaïque se substitue à une production d'origine fossile, ce qui est actuellement largement le cas. Plus récemment, Moore-O'Leary *et al.* (2017) ont rapporté 5 catégories d'impacts potentiels sur les espèces animales et végétales liées aux CPV américaines, parmi lesquelles la fragmentation de l'habitat, les effets des panneaux, les effets des clôtures, les nuisances sonores et les effets des champs à haut flux énergétique.

Cette synthèse bibliographique se propose de passer en revue les publications scientifiques françaises et internationales les plus récentes afin de fournir aux acteurs de la filière photovoltaïque, aux services de l'Etat et aux différents organismes engagés pour la protection de l'environnement un état des lieux le plus complet possible sur le niveau de connaissance des incidences potentielles des CPV et des centrales agrivoltaïques sur les milieux naturels (dont leurs composantes physiques, biogéochimiques et biologiques), les mesures d'atténuation des incidences existantes et leurs modalités de suivi.

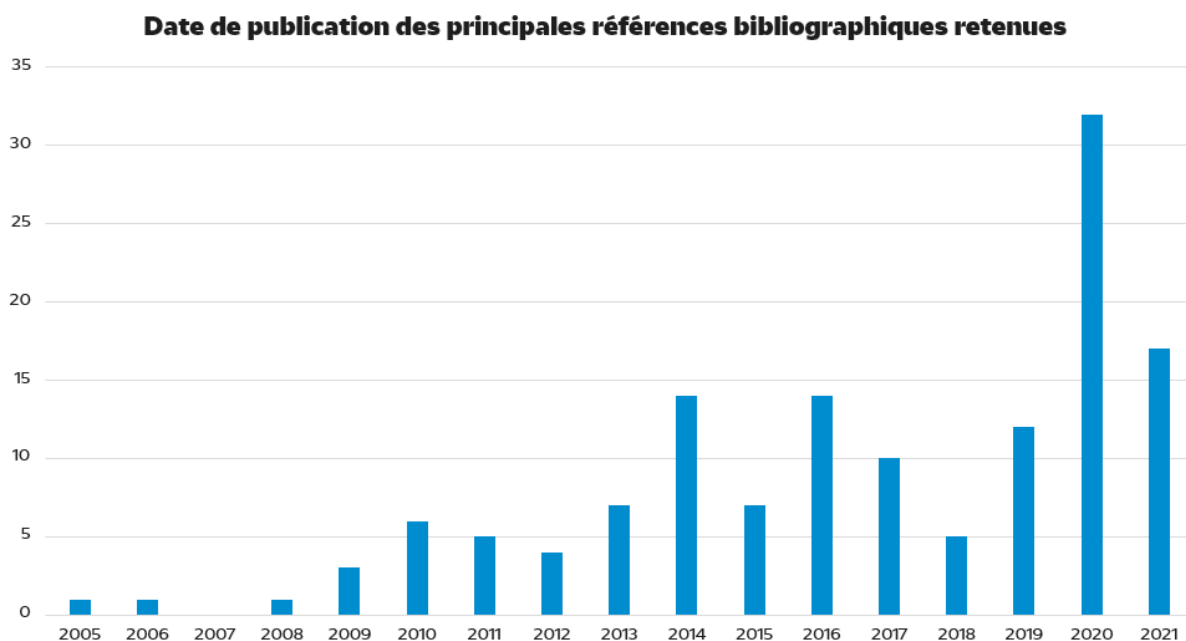
Cette synthèse porte sur les parcs photovoltaïques au sol et flottants ; elle ne s'intéresse ni aux projets en toiture, réputés avoir peu d'impacts sur la biodiversité (lorsque les toitures préexistent), ni aux centrales solaires à concentration dont le déploiement n'est pas prévu en France. Cette étude ne traite pas non plus des impacts exportés (extraction des minéraux) ni de ceux induits par le recyclage des matériaux utilisés et évoqués par plusieurs auteurs (Usman 2020 ; Vidal *et al.*, 2020).

2. Méthode

2.1 Choix des ressources bibliographiques étudiées

Un premier recensement des ressources bibliographiques a été effectué de manière automatisée jusqu'au milieu de l'année 2021 avec l'outil de veille bibliographique de Google Scholar en utilisant des mots clés volontairement très généraux pour obtenir un maximum de résultats en français et en anglais (photovoltaic, photovoltaïque, impact, impacts). Les milliers de résultats obtenus ont ensuite été passés en revue un par un afin de ne conserver que ceux qui portaient sur les centrales photovoltaïques (et non sur les centrales solaires à concentration) et sur leurs incidences sur l'environnement ou une de ses composantes. Les membres du comité de relecture ont ensuite pu enrichir cette base bibliographique en proposant des documents se rattachant à leurs domaines d'expertise (insectes, chauves-souris, botanique, etc.). Enfin, les références bibliographiques citées dans l'ensemble de ces publications ont également été recherchées.

Au final, 151 références bibliographiques ont été retenues. La publication la plus ancienne traitant directement des CPV date de 2005 mais quelques publications plus anciennes, portant sur des espèces ou des impacts similaires à ceux rencontrés au sein des CPV ont également été considérées.



Les éléments présentés dans cette synthèse résultent de l'analyse de ces 151 références, essentiellement des publications scientifiques issues de revues à comité de lecture et des rapports publiés par des établissements publics. Cette synthèse ne porte pas sur les suivis réalisés par les exploitants lorsque ceux-ci n'ont pas été effectués dans un cadre contrôlé de manière scientifique ; toutefois quelques rapports compilant de tels suivis sont cités, par exemple celui du BNE² allemand (2019) ou celui d'Enerplan³ (2020).

² Bundesverband Neue Energiewirtschaft (BNE), association qui représente les professionnels de l'énergie en Allemagne.

³ Syndicat représentant et défendant les intérêts des professionnels de l'énergie solaire en France.

2.2 Limites de l'étude

Une des difficultés rencontrées est que certaines publications ne traitent pas directement des impacts des CPV sur les sols et la biodiversité, mais se concentrent plutôt sur leur capacité à accueillir des espèces végétales ou animales une fois ces dernières mises en services ; la plus-value apportée par ces mesures de gestion de la végétation étant rarement confrontés aux incidences causées par la construction de la CPV elle-même.

Aussi, nous nous sommes attachés à différencier les résultats issus de publications présentant des comparaisons avant/après installation d'un parc photovoltaïque, ou entre sites équipés et non équipés (ou témoins), de ceux issus de publications ou rapports analysant la biodiversité au sein des parcs sans pour autant la comparer à des situations « témoins ». Ceci afin de garder à l'esprit les différents biais qui peuvent conduire à des résultats non conclusifs ou à une mauvaise interprétation des effets observés sur la biodiversité. Certains biais peuvent en effet contribuer à surévaluer des impacts, par exemple lorsque les suivis environnementaux ne sont pas réalisés sur une durée suffisamment importante pour rendre observable une éventuelle résilience de la biodiversité après travaux. A contrario, d'autres peuvent avoir tendance à surévaluer les gains écologiques des CPV pour la biodiversité, par exemple :

1. Lorsque l'évolution temporelle des différents cortèges floristiques et faunistiques en phase d'exploitation est comparée à la situation après chantier (*i.e.* une fois le site défriché et terrassé) plutôt qu'à la situation initiale avant chantier ;
2. Lorsque les suivis portent sur les effets des mesures d'évitement ou de gestion de la végétation mises en œuvre plutôt que sur ceux des infrastructures elles-mêmes ;
3. Lorsque la présence de certaines espèces animales s'explique uniquement par un « effet de lisière », donc par les écosystèmes situés autour des CPV.
4. Lorsque l'évaluation de ces gains écologiques porte seulement sur les espèces en négligeant les habitats naturels et les fonctions écologiques dans la diversité de leurs composantes.

Aussi, il importe de ne pas sur-interpréter ou généraliser des résultats issus de publications anciennes, et qui portent sur des technologies ou des méthodologies de mise en œuvre qui ont pu évoluer depuis, sur des environnements spécifiques ou des mesures de gestions très particulières.

Il est bien sûr acquis que les zones préservées de l'implantation de panneaux photovoltaïques (à l'intérieur ou à l'extérieur de CPV) et faisant l'objet d'une gestion conservatoire de la végétation peuvent être favorables au développement de certains groupes d'espèces floristiques et faunistiques typiques des milieux ouverts. Cette synthèse bibliographique vise à aller au-delà de ces évidences et à se concentrer sur ce qui fait la spécificité des infrastructures photovoltaïques au sol et flottantes.

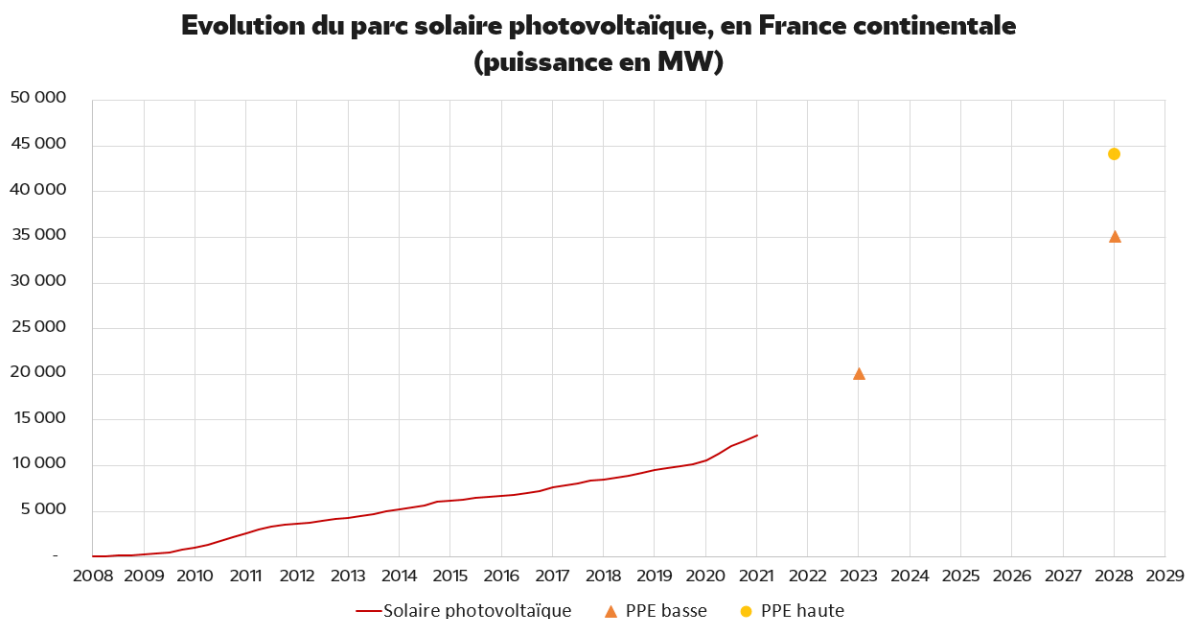
La bibliographie est encore peu fournie comparativement à celle existant sur l'éolien terrestre, mais elle est en évolution permanente et il est donc possible que certains ouvrages récemment publiés n'aient pas été pris en compte dans la présente synthèse. Ainsi, les informations que contient ce document pourront être complétées au cours du temps, notamment en fonction de l'évolution des connaissances acquises à la fois sur les espèces et sur les méthodes de suivi et de réduction des impacts à partir d'analyses de nouvelles données à l'échelle nationale et internationale.

3. L'énergie photovoltaïque en France

3.1 Programmation pluriannuelle et perspectives de développement

Avec une croissance moyenne d'environ 900 MW par an depuis 10 ans, la puissance installée du parc solaire photovoltaïque national atteint 14 GW à la fin de l'année 2021 (Figure 1) (Service des données et études statistiques du MTE, 2021) ; pour une production électrique de 14,8 GWh en 2021.

Figure 1 : Evolution du parc solaire photovoltaïque, en France continentale, et objectifs de la



Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) (Service des données et études statistiques du MTE 2021)

La Programmation pluriannuelle de l'énergie⁴ (PPE) fixe un objectif de déploiement de l'énergie solaire photovoltaïque compris entre 35,1 GW et 44 GW à l'horizon 2028 (soit une multiplication par 3 ou 4 de la puissance totale installée comparée à 2020). Programmation qui pourra être amenée à évoluer compte tenu du besoin de souveraineté énergétique justifié par le nouveau contexte géopolitique (cf. Sommet de Versailles, 10 et 11 mars 2022).

À plus long terme, plusieurs scénarios envisagent un développement massif de cette filière à l'horizon 2050. Le scénario 100 % EnR de l'association négaWatt, qui suppose une réduction drastique de notre production et de notre consommation d'énergie, envisage ainsi une puissance installée de 140 GW à cette échéance : 120 GW répartis entre des petites installations sur maisons individuelles, des installations de taille moyenne sur des bâtiments plus importants, des ombrières de parkings et 20 GW dans de grands parcs au sol sur des friches industrielles ou des terrains délaissés impropres à l'agriculture, soit une surface d'environ 200 km² de panneaux au sol (Association négaWatt 2018). Atteindre les 120 GW pour les installations petites et moyennes nécessiterait une réorientation de l'effort d'installation (effort actuel surtout centré sur les CPV) mais permettraient de limiter fortement les pertes associées au transport de l'électricité. (Figure 2).

4 Décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie.

RTE étudie également plusieurs scénarios prospectifs à l'horizon 2050 qui respecteraient les objectifs des Accords de Paris de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C. A cette échéance, la puissance maximale installée en énergie photovoltaïque varierait de 70 GW – dans l'hypothèse d'investissements importants dans le nucléaire – à 208 GW dans une hypothèse de sortie totale du nucléaire (RTE 2021).

De son côté, l'ADEME (2022b) évalue la puissance photovoltaïque nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 entre 92 et 144 GW en fonction du scénario retenu.

L'ADEME (2022) évalue également les surfaces nécessaires au déploiement du photovoltaïque au sol dans ces différents scénarios de transitions énergétique à l'horizon 2050 entre 75 200 et 124 640 ha, dont 2 700 à 39 900 ha strictement incompatibles avec les usages d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF). A titre de comparaison, les surfaces à équiper sur du bâti sont estimées entre 28 500 et 61 740 ha.

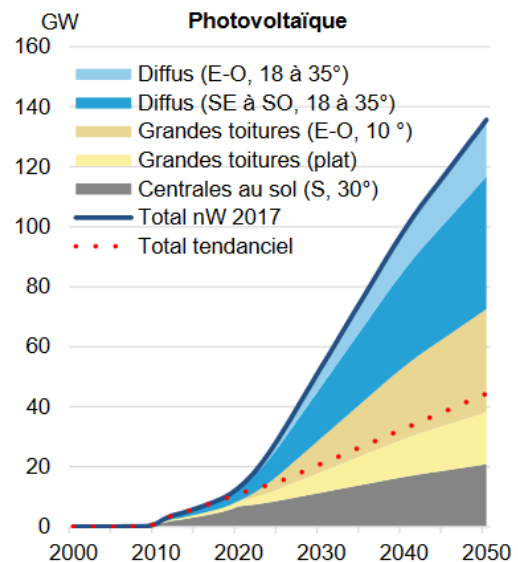


Figure 2 : Photovoltaïque : évolution de la puissance installée et de la production selon le scénario négaWatt 2017-2050

3.2 Modalités de déploiement territorial

A l'heure actuelle, la répartition territoriale des CPV en France métropolitaine dépend du gisement solaire (plus important au sud) et, surtout, de la disponibilité des zones propices à leur installation (Figure 3). Ces deux conditions sont hétérogènes sur le territoire et ne se chevauchent que partiellement, sauf pour les régions Nouvelle-Aquitaine et Corse ainsi que le sud du couloir rhodanien.

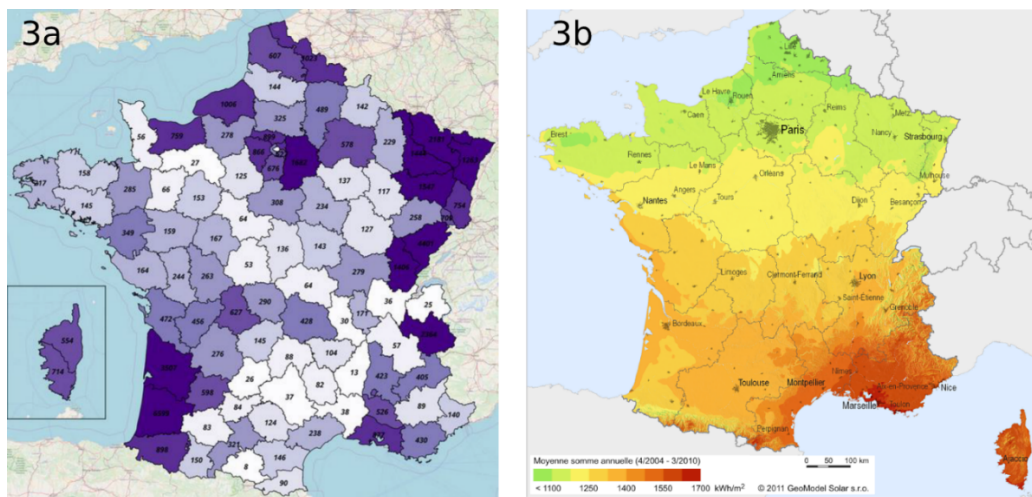


Figure 3 : 3a) Carte des gisements potentiels des sites délaissés et artificialisés, en puissance (MWc) selon l'Ademe (2019). 3b) Carte de l'irradiation globale horizontale en France métropolitaine (SolarGIS © 2011 GeoModel Solar s.r.o.).

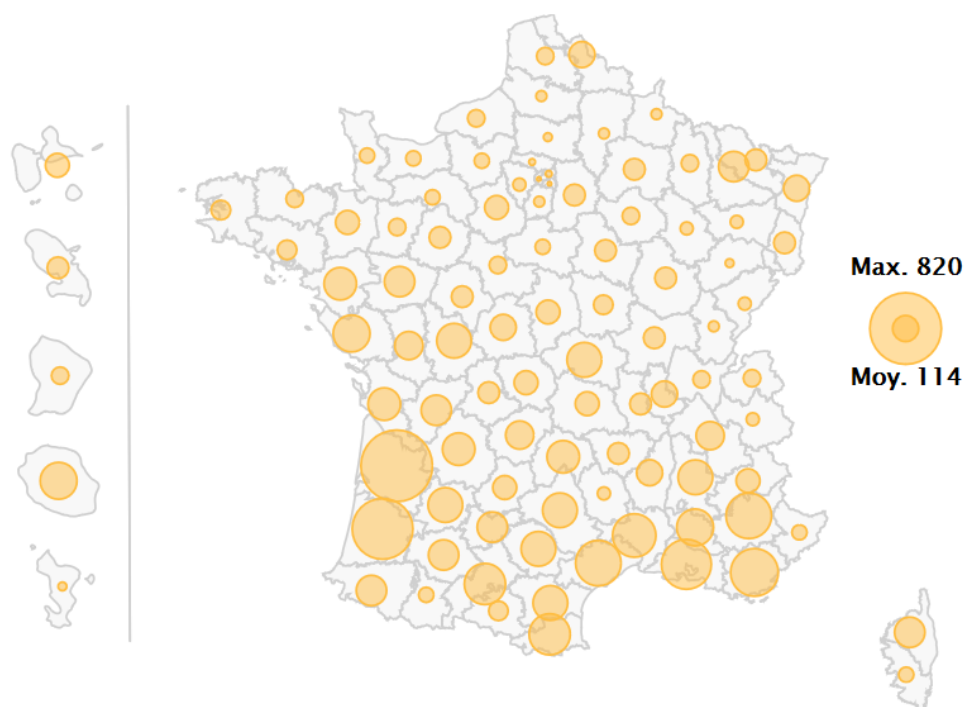


Figure 4 : Puissance solaire photovoltaïque totale raccordée par département au 31 mars 2021 (en MW) (Service des données et études statistiques du MTE 2021)

Au niveau national, aucun exercice de planification n'a été réalisé à l'heure actuelle pour orienter les choix des sites d'implantation des CPV vers les zones les plus appropriées, c'est-à-dire à moindre enjeu environnemental et veiller ainsi à l'évitement de celles présentant un intérêt écologique élevé.

La plupart des développeurs de CPV, ceux souhaitant concourir aux appels d'offre de la Commission de régulation de l'énergie (CRE), doivent toutefois respecter les critères d'éligibilité mentionnés dans son cahier des charges⁵ de manière à « préserver les espaces boisés et agricoles et à minimiser l'impact environnemental des projets ». Ces projets doivent ainsi être envisagés dans un secteur correspondant à un des cas suivants :

- Cas 1 : zone urbanisée ou à urbaniser ;
- Cas 2 : zone naturelle dont le règlement d'urbanisme autorise explicitement les installations de CPV à condition que le projet soit compatible avec l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière (hors zone humide et hors zone ayant fait l'objet d'un défrichement au cours des cinq années précédentes) ;
- ou Cas 3 : sites « à moindre enjeu foncier », défini comme suit :
 - site pollué ou friche industrielle ;
 - carrière en activité dont la durée de concession restante est supérieure à 25 ans ou une ancienne carrière, sauf lorsque la remise en état agricole ou forestière a été prescrite ou une ancienne carrière sans document administratif ;
 - ancienne mine, dont ancien terroir, bassin, halde⁶ ou terrain dégradé par l'activité minière, sauf lorsque la remise en état agricole ou forestière a été prescrite ;
 - ancienne Installation de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) ou ancienne Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) ou

⁵ Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « Centrales au sol ». AO PPE2 PV Sol. [Version octobre 2021](#).

⁶ Tas constitué avec les déchets de triage et de lavage d'une mine métallique.

ancienne Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI), sauf lorsque la remise en état agricole ou forestière a été prescrite ;

- ancien aérodrome, délaissé d'aérodrome, ancien aéroport ou délaissé d'aéroport ;
- délaissé fluvial, portuaire, routier ou ferroviaire ;
- site situé à l'intérieur d'une Installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) soumis à autorisation, à l'exception des carrières et des parcs éoliens ;
- plan d'eau ;
- site est en zone de danger d'un établissement SEVESO ou en zone d'aléa fort ou très fort d'un Plan de prévention des risques (PPRT) ;
- terrain militaire, ou ancien terrain faisant l'objet d'une pollution pyrotechnique.

A noter que les conditions d'éligibilité à l'un de ces trois cas présentent des risques élevés d'incohérence des politiques publiques, compte tenu des possibilités de contournement qu'elles procurent. Ainsi :

- les critères prévus au sein des 3 cas ne s'appliquent pas aux autres cas, ce qui permet, par exemple, d'implanter une CPV en zone humide dès lors que cette dernière répond au cas 1 ou 3 ;
- dans le cas 3, les « plans d'eau » sont considérés par défaut comme des sites « à moindre enjeu foncier » donc équipables, sans intégrer le fait que ces derniers puissent présenter de forts enjeux écologiques, un statut de protection pris au titre de différentes politiques publiques, des objectifs de maintien en bon état chimique et écologique des eaux (cf. Directive cadre sur l'eau, 2000), constituer un réservoir d'alimentation en eau potable, etc.

Une évaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de CPV a été réalisée par l'ADEME en 2019. En excluant les sites grevés de contraintes rédhibitoires et en appliquant des pondérations de 10 à 80 % en fonction de la nature des « contraintes handicapantes » recensées, le potentiel national de sites équipables a été estimé à 49 GWc pour les zones délaissées et 7 GWc pour les parkings (ADEME 2019). Ces premiers résultats ont fait l'objet d'une étude complémentaire par le CEREMA et l'ADEME, au regard du productible éventuel des sites inventoriés et des enjeux ou contraintes éventuelles associés.

Aux niveaux régional et départemental, certains documents ou chartes visent à cadrer, à l'échelle de leur territoire, les modalités de caractérisation et de hiérarchisation des sites en fonction des enjeux présents, dont des enjeux écologiques (DREAL PACA 2019, 2020; DDT de l'Isère 2021). Certains d'entre eux vont jusqu'à définir des zones d'exclusion, en cohérence avec la stratégie de création d'aires protégées de l'Etat (SCAP). Ces documents n'ont toutefois pas de valeur réglementaire.

3.3 Rappels législatifs et réglementaires

Le Ministère de la transition écologique et solidaire et le Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales ont publié un Guide relatif à l'instruction des demandes d'autorisations d'urbanisme pour les centrales solaires au sol (MTES et MCTRCT 2020). Il a pour objectif de préciser chacune des étapes et des exigences de la procédure d'autorisation d'un projet de centrale solaire installée au sol.

3.3.1 Règles d'implantation par type de zone et secteur

La circulaire du 18 décembre 2009 relative au développement et au contrôle des CPV réaffirme la priorité donnée à l'intégration du photovoltaïque aux bâtiments et sur les sites déjà artificialisés. Ainsi, pour les implantations au sol, il convient de privilégier les zones urbanisées (U) et à urbaniser (AU) des plans locaux d'urbanisme (PLU), par exemple dans les « dents creuses » et friches industrielles. L'implantation en zones agricole (A) et

naturelle (N) constitue une dérogation au principe de préservation de ces espaces, encadrée par le code de l'urbanisme.

Dans les zones agricoles, naturelles ou forestières, le règlement du PLU peut autoriser les constructions et installations nécessaires à des équipements collectifs, comme les CPV, à la condition qu'elles ne soient pas incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière du terrain sur lequel elles sont implantées et qu'elles ne portent pas atteinte à la sauvegarde des espaces naturels et des paysages.

La LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, précise qu'un espace naturel ou agricole occupé par une installation de production d'énergie photovoltaïque n'est pas comptabilisé dans la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers dès lors que les modalités de cette installation permettent qu'elle n'affecte pas durablement les fonctions écologiques du sol, en particulier ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques ainsi que son potentiel agronomique et, le cas échéant, que l'installation n'est pas incompatible avec l'exercice d'une activité agricole ou pastorale sur le terrain sur lequel elle est implantée. A contrario, une CPV implantée en espace naturel, agricole ou forestier qui affecterait durablement les fonctions écologiques du sol, en particulier ses fonctions biologiques, hydriques, climatiques ou son potentiel agronomique doit être comptabilisée dans les surfaces artificialisées. Il en est de même si l'implantation de cette CPV rend impossible l'exercice d'une activité agricole ou pastorale sur le terrain sur lequel elle est implantée.

Les modalités de caractérisation des CPV artificialisant - ou non - les sols seront précisées par décret en Conseil d'Etat.

3.3.2 Au titre du code de l'environnement

Contrairement aux parcs éoliens, les CPV ne sont pas considérées comme des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

- **Cas particulier des CPV dont la puissance installée est égale ou supérieure à 1 MWc.**

Ces CPV sont soumises à l'application de la Loi n°76-663 du 12 juillet 1976 dite de protection de la nature. Elles font partie intégrante de la nomenclature « énergie » annexée à l'article R. 122-2 du CE. A ce titre, elles sont soumises à une procédure d'évaluation environnementale comprenant la réalisation d'une étude d'impacts conformément au décret 77-1141 modifié du 12 octobre 1977. Pour autant, même si cette procédure d'évaluation environnementale ne donne pas lieu à un arrêté d'autorisation pris au titre du code de l'environnement, l'arrêté de Permis de Construire ordonne des prescriptions visant le respect des mesures environnementales prises dans une étude d'impact, voire, quand elles sont requises, dans une déclaration relative à la loi sur l'eau ou une dérogation relative aux espèces protégées. En outre, un projet soumis à Autorisation au titre de la loi sur l'eau, sera soumis à octroi d'une Autorisation Environnementale. Les mesures ERC et de suivis prévues au titre de cette procédure bascule dans l'arrêté d'autorisation de permis de construire prévu au titre du code de l'urbanisme.

- **Cas particulier des CPV dont la puissance installée est égale ou supérieure à 300 kWc et inférieure à 1 MWc.**

Ces CPV sont soumises à un examen au cas par cas par l'autorité compétente pour déterminer si elles doivent faire l'objet d'une évaluation environnementale.

- **Cas de l'ensemble des CPV au sol ou flottantes**

Les dispositions suivantes ne sont pas spécifiques aux CPV, elles sont communes à tout type d'aménagement (projets, plans, programmes) ayant pour effet des incidences sur ces éléments.

Quelles que soient leurs dimensions et leur puissance, lorsqu'une CPV est susceptible d'affecter de façon notable un site Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de certains habitats ou espèces d'intérêt communautaire ayant justifié son intégration au réseau Natura 2000, les CPV doivent faire l'objet d'une évaluation appropriée des incidences, dont les attendus sont définis à l'article L.414-4 et précisé par l'article R.414-19 du code de l'Environnement.

Lorsqu'elles sont susceptibles de porter atteinte à des espèces végétales ou animales protégées, une demande de dérogation « espèces protégées » peut être effectuée par le développeur de CPV auprès de services instructeurs de l'Etat, et ce conformément aux dispositions prévues aux articles L. 411-1 et L.411-2 du code de l'environnement.

Dans le cas de la présence de plants d'une espèce végétale protégée, au droit ou à proximité immédiate de l'emprise d'une CPV (emprise du chantier comprise), une demande de dérogation « espèces protégées » s'impose au développeur, sauf si l'emprise du projet (chantier compris) évite totalement la zone où les plants de l'espèce sont présents et les conditions de réalisation du projet garantissent le maintien des conditions physiques indispensables à leur développement : taux d'ensoleillement, conditions édaphiques dont pH, modalités de circulation de l'eau et degré d'hydromorphie, absence de traitements par des produits phytosanitaires, etc.

Dans le cas de la présence d'une espèce animale protégée, le développeur de CPV doit également demander une dérogation à l'interdiction de destruction d'espèces protégées, selon les modalités de leur protection fixées par arrêté ministériel (ex. arrêté du 29 octobre 2009 fixant la liste des oiseaux protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection : Article 3 ou Article 4), dès lors que son projet risque d'engendrer les atteintes suivantes :

- Soit risque d'atteinte aux spécimens de la ou des espèces animales présentes (œufs, larves, individus adultes, etc.). Dans ce cas, la réglementation ne prévoit pas de conditions suspensives, et le déclenchement de la demande de dérogation est automatique. Les risques d'impacts ici considérés peuvent aller du dérangement à la destruction d'individus ;
- Soit risque d'atteinte aux « aires de repos » ou aux « sites de reproduction » des espèces animales présentes. Dans ce cas, la réglementation prévoit deux conditions nécessaires et cumulatives au déclenchement de la demande de dérogation « espèces protégées » :
 - Les habitats concernés constituent les « éléments physiques ou biologiques réputés nécessaires à la reproduction ou au repos de l'espèce considérée » ;
 - Et les incidences du projet sur ces habitats remettent « en cause le bon accomplissement des cycles biologiques » de l'espèce concernée.

3.3.3 Au titre du code forestier

Dans certaines conditions définies par Arrêté préfectoral, le défrichement peut nécessiter l'obtention d'une autorisation préalable, accordée par le préfet, au titre des articles L.311-1 et suivants du code forestier :

- Dans le cas de défrichements portant sur une superficie supérieure ou égale à 25 hectares : une étude d'impact doit être effectuée (cf. article R.122-8 du code de l'environnement), accompagnée d'une enquête publique ;
- Dans le cas de défrichements de superficie inférieure à 25 ha : la réalisation d'une notice d'impact peut être demandée (R.122-9 du code de l'environnement).

L'autorisation de défrichement doit être obtenue préalablement à la délivrance de l'autorisation administrative pour la réalisation des travaux (L.311-5 du code forestier).

Les défrichements de superficie inférieure peuvent être soumis à cette procédure d'évaluation environnementale après examen au cas par cas (rubrique n°47 de l'annexe à l'article R.122-2 du code de l'environnement).

3.3.4 Obligation Légale de Débroussaillage (OLD)

Les CPV peuvent être à l'origine de départs de feu. Au cours de l'année 2018, plusieurs débuts d'incendie ont été observés dans des CPV et se sont propagés dans le massif forestier des Landes de Gascogne. En 2020, ce sont plusieurs dizaines d'hectares de forêt qui ont ainsi disparu suite à un départ de feu dans une CPV des Pays-de-la-Loire.

Afin de prévenir ces incendies et d'en limiter la propagation, les exploitants de CPV font l'objet de d'Obligations Légales de Défrichage (dites bandes « OLD ») autour de leurs parcs, dont les modalités techniques de réalisation et d'entretien sont fixées par arrêté préfectoral. La largeur de ces bandes OLD varie entre départements, de 5 à 50 m selon les cas. Ces règles peuvent être modifiées localement par un arrêté municipal ou préfectoral.

Cette mesure constitue un élément fondamental de la politique nationale de défense des forêts contre l'incendie (DFCI) pour les zones réputées particulièrement exposées à ce risque. Le débroussaillage réglementaire, en assurant une rupture de continuité horizontale et verticale de la couverture végétale, permet de réduire la vitesse de propagation des incendies, de protéger la forêt et de faciliter les accès en cas de feu (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation 2019). Elle s'applique dans les 32 départements réputés particulièrement exposés aux risques d'incendie. Sont actuellement concernés les bois et forêts des régions de Nouvelle-Aquitaine (sauf Corrèze, Creuse et Haute-Vienne), d'Occitanie, de Provence-Alpes-Côte d'Azur, de Corse et des départements de la Drôme et de l'Ardèche. Cette liste aura sans doute tendance à s'allonger avec les effets du réchauffement climatique.

Les OLD ont un double objectif :

- réduire l'impact des incendies se propageant de la forêt vers les zones d'activités anthropiques ;
- protéger la forêt des incendies éclos aux abords des zones habitées et des infrastructures linéaires (routes, voies de chemin de fer, lignes électriques aériennes).

4. Cas des centrales photovoltaïques au sol

4.1 Modalités de conception et d'installation

4.1.1 Design des CPV

Les CPV sont composées des installations photovoltaïques elles-mêmes, des câbles de raccordement reliant chaque groupe de panneaux à un local technique contenant un onduleur (transformant le courant continu en courant alternatif), un transformateur (qui élève la tension électrique), un compteur qui mesure l'électricité envoyée sur le réseau extérieur depuis le poste de livraison électrique. Le site est généralement sécurisé par une clôture et est parcouru par des voies carrossables utiles pendant la construction et permettant d'assurer la maintenance des installations en phase d'exploitation (Figure 5). S'ajoutent parfois des locaux techniques, bases vie (temporaire ou permanente), cuves anti-incendie et plateforme de stockage de l'énergie.

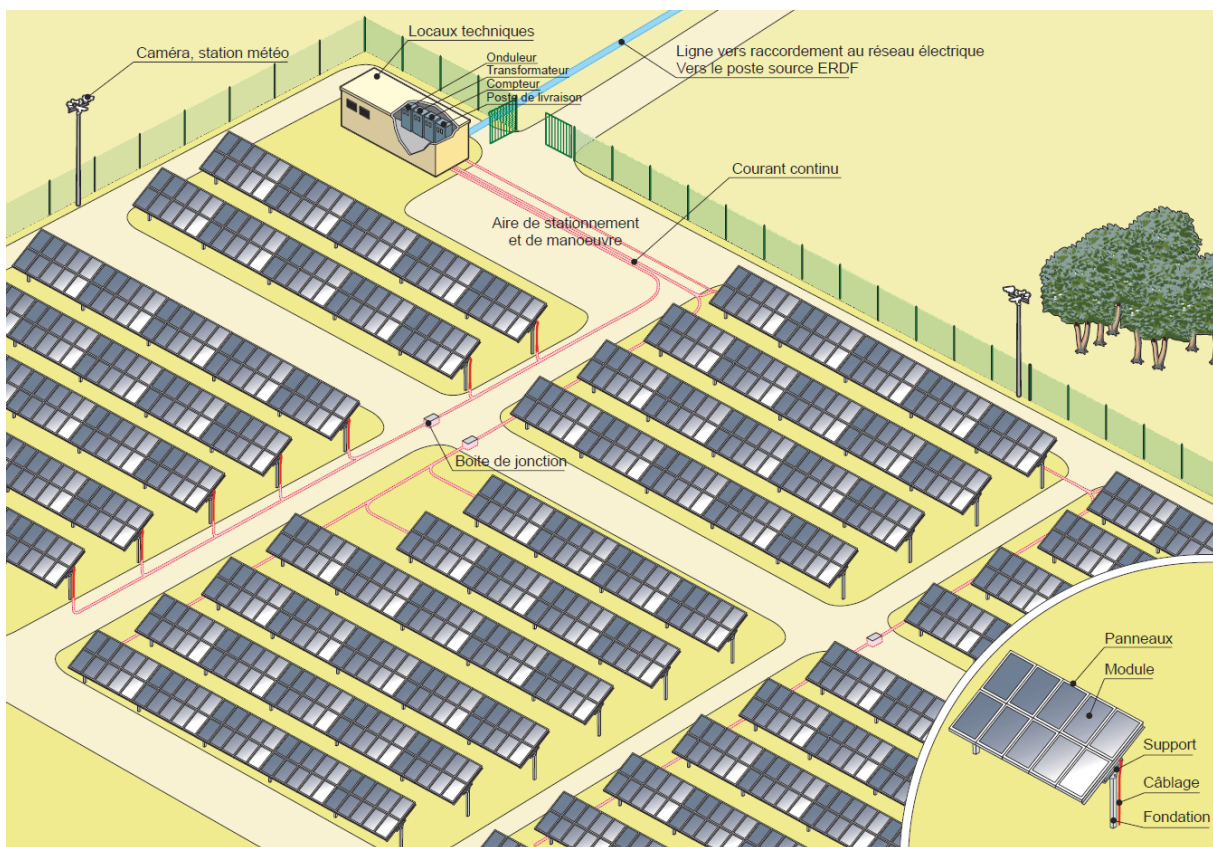


Figure 5 : Schéma de principe d'une CPV (DGE 2011)

Les installations photovoltaïques sont constituées de rangées de panneaux alignés, montés sur des châssis généralement métalliques qui peuvent être fixes ou mobiles et qui couvrent en moyenne 30 à 50 % de l'emprise d'une CPV. La densité de panneaux, leur hauteur, le mode d'ancrage (pieu vissé ou battu ; blocs béton ; gabions ; etc.) et l'espacement des rangées peut varier d'une CPV à l'autre.

Les installations fixes peuvent présenter soit i) une seule orientation, généralement au sud selon un angle d'exposition pouvant varier de 25 à 30° en fonction de la topographie locale ; soit ii) deux orientations (Est-Ouest). Dans ce dernier cas, les panneaux peuvent présenter un angle d'exposition équivalent à ceux précédemment évoqués ; voire être posés à la verticale (panneaux bifaciaux).

Les installations mobiles, appelées suiveurs ou « trackers », sont équipées d'une motorisation leur permettant de suivre la course du soleil pour optimiser leur exposition et donc leur rendement. Elles nécessitent une emprise foncière, un investissement et un entretien plus importants pour une productivité supérieure.

Il existe deux grandes catégories de suiveurs. Les suiveurs à rotation mono-axiale orientent les capteurs en direction du soleil au cours de la journée : de l'est le matin à l'ouest le soir. Les suiveurs à rotation bi-axiale peuvent également s'orienter suivant la direction nord-sud. Cette solution est la seule permettant d'utiliser des panneaux sous concentration, où la lumière est focalisée sur une petite surface d'un matériau semi-conducteur deux fois plus efficace que les cellules standards.

4.1.2. Cas de l'agrivoltaïsme

Selon l'ADEME, une CPV peut être qualifiée d'agrivoltaïque lorsque les modules sont situés sur une parcelle agricole et qu'ils l'influencent en lui apportant directement (sans intermédiaire) un des services ci-dessous, sans induire ni dégradation importante de la production agricole (qualitative et quantitative) ni diminution des revenus issus de la production agricole :

- Service d'adaptation au changement climatique ;
- Service d'accès à une protection contre les aléas (météorologique ou de prédation) ;
- Service d'amélioration du bien-être animal ;
- Service agronomique précis pour les besoins des cultures (limitation des stress abiotiques etc.).

Au-delà de cette définition, l'agrivoltaïsme doit conduire au maintien de la vocation agricole des parcelles équipées, en permettant notamment i) à l'exploitant agricole de s'impliquer dans la conception de la CPV, voire dans son investissement, ii) de garantir la pérennité du projet agricole tout au long de l'exploitation de la CPV (y compris s'il y a un changement d'exploitant : il doit toujours y avoir un agriculteur actif), et iii) de veiller à sa réversibilité et son adéquation avec les dynamiques locales et territoriales (notamment pour la valorisation des cultures), tout en maîtrisant ses impacts sur l'environnement, les sols et les paysages. Enfin, en fonction de la vulnérabilité possible des projets agricoles, l'installation agrivoltaïque doit pouvoir s'adapter et répondre à des évolutions possibles dans le temps (modification des espèces et variétés cultivées, changement des itinéraires de culture, etc.).

Les systèmes agrivoltaïques sont généralement des technologies photovoltaïques dans lesquelles les panneaux sont montés à une hauteur suffisante du sol permettant de maintenir les pratiques de cultures ou d'élevage conventionnelles initialement présentes en dessous. En théorie, les systèmes agrivoltaïques visent non seulement à préserver les terres agricoles, mais aussi à favoriser la production végétale ou animale en améliorant l'efficacité de la consommation d'eau et en réduisant le stress hydrique. Cela peut passer par un rehaussement ou un espacement plus important des panneaux par rapport à une CPV conventionnelle ou par la mise en place de structures mobiles qui permettent de déplacer les panneaux au gré des besoins. Du fait de la recherche d'un co-usage gagnant-gagnant pour les deux parties prenantes, l'intérêt pour les systèmes agrivoltaïques augmente, mais l'absence d'une analyse environnementale et économique approfondie de ces systèmes limite encore actuellement leur déploiement. Quelques expérimentations sont en cours, intégrant pour certaines la dimension écologique, mais elles n'ont à ce jour pas livré leurs résultats.

A noter que les études scientifiques abordant l'agrivoltaïsme se limitent souvent à des considérations techniques ou économiques (conséquences sur les rendements agricoles ou sur ceux des panneaux) et analysent peu ses incidences sur la biodiversité. Toutefois, certaines pratiques ou technologies mises en œuvre dans ce cadre, notamment pour limiter les incidences des installations photovoltaïques sur les cultures, pourraient être

transposées plus largement à d'autres projets de CPV pour limiter leurs impacts sur la biodiversité.

4.1.3 Construction, exploitation et démantèlement

À partir de l'étude des dossiers de demande de dérogation de destruction d'espèces protégées, Martinez (2020) a identifié les différentes installations et activités nécessaires aux phases de vie des CPV au sol, de leur construction jusqu'à leur démantèlement en région Provence-Alpes-Côte d'Azur :

Phase travaux

- Défrichement (lorsqu'il est requis): celui-ci se déroule en 3 étapes : le déboisement, le débroussaillage et le dessouchage ;
- Sondages archéologiques : cette opération n'est pas systématique (moins de 2 % des projets d'aménagements sont concernés par des fouilles archéologiques). Elle dépend en effet de la sensibilité archéologique du site, des prescriptions de la DRAC, et consiste en des forages ou décapage des couches superficielles de la terre sur environ 10 % de l'emprise du projet ;
- Création ou aménagement éventuel d'accès (lorsque ceux-ci sont inexistantes ou de gabarit insuffisant) ;
- Nivellement/aplanissement : lorsque cela est nécessaire, un terrassement est réalisé (déblai, remblai, tassement, etc.) pour rendre favorable le site à l'implantation des panneaux et à la circulation des engins ;
- Mise en place des plateformes techniques dont des zones de stockage des matériaux/matériels et base-vie (généralement temporaire) pour les intervenants du chantier ;
- Construction :
 - Installation des clôtures et du portail d'accès (dont l'objectif est avant tout d'empêcher l'accès aux personnes non habilitées à pénétrer sur le chantier puis sur la CPV en exploitation) ;
 - Pistes de circulation des engins au sein de la CPV ;
 - Pose des fondations des modules. Selon la qualité géotechnique des terrains, des structures légères (pieux en acier battus ou vissés dans le sol) ou des fondations plus lourdes (semelles en béton par exemple) seront mises en place respectivement en profondeur ou en surface ;
 - Montage des supports des modules ;
 - Pose des modules photovoltaïques sur les supports ;
- Installation des équipements électriques (onduleurs et transformateurs, poste de livraison) ;
- Raccordement électrique au sein de la CPV : les panneaux sont reliés entre eux puis à l'onduleur par des câbles enfouis dans un réseau de tranchées ;
- Raccordement au réseau électrique : pour relier la production électrique du parc au poste source géré par le gestionnaire de réseau, celui-ci procède à la création de tranchées souterraines de raccordement électrique.

Phase exploitation

En phase d'exploitation, les interventions sur site sont réduites aux opérations :

- d'inspection et de maintenance technique qui se déroulent sur quelques journées dans l'année :
 - Entretien des panneaux et des postes électriques, et nettoyage éventuel ;
 - Entretien / traitement des infrastructures associées : pistes, fossés, etc. ;
- et de gestion de la végétation par pâturage ou par fauchage régulier à l'intérieur du parc et dans la bande d'Obligation Légale de Débroussaillage (OLD). Les objectifs sont de limiter la hauteur de la végétation au plus près du sol et d'éviter sa densification, ceci afin de ne pas créer d'ombrage sur les panneaux ni de générer pollens préjudiciables à leur fonctionnement ; de réduire le risque de propagation du feu en cas d'incendie ; et de faciliter l'accès aux panneaux.

Fin d'exploitation

- Démantèlement du parc et des clôtures. La durée d'exploitation d'une CPV est généralement d'environ 30 ans. À l'issue de cette période, la CPV est soit remplacée par de nouveaux équipements ; soit démantelée et le site remis en état. Il existe encore peu de retour d'expérience sur cette dernière étape.

4.2 Incidences sur les composantes physiques des milieux naturels

4.2.1 Cas du microclimat au niveau des panneaux photovoltaïques

4.2.1.1 Conditions microclimatiques au-dessus des panneaux

Barron-Gafford *et al.* (2016) montrent l'existence d'un effet « îlot de chaleur » des CPV comparable à ceux observables en milieu urbain. Une augmentation de la température de 3 à 4 °C est observée la nuit au-dessus d'une CPV de 1 MW implantée en milieu semi-aride composée d'un mélange clairsemé de graminées, de cactus et d'arbustes ligneux occasionnels. Cette augmentation est comparable à celle mesurée sur un parking de taille similaire utilisé comme site témoin. Cet effet est accentué lorsque l'implantation de la CPV nécessite des opérations de défrichage ou réduit la hauteur ou la densité de végétation sur le site (Figure 6).

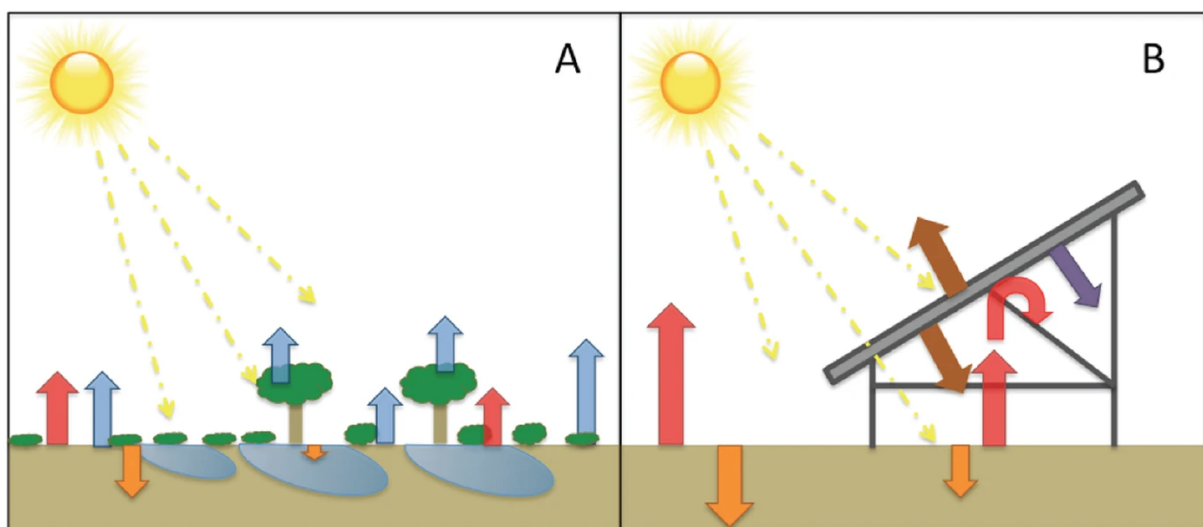


Figure 6 : Illustration des échanges d'énergie à la mi-journée (Barron-Gafford *et al.* 2016).

En supposant des taux équivalents d'énergie solaire entrante, le passage d'un écosystème végétal (A) à une CPV (B) modifiera considérablement la dynamique du flux énergétique du site. Au sein des écosystèmes naturels, la végétation réduit le captage et le stockage de la chaleur dans les sols (**flèches orange**), et l'eau infiltrée et la végétation libèrent des flux d'énergie latents dissipant la chaleur lors de la transition de l'eau à la vapeur d'eau vers l'atmosphère par évapotranspiration (**flèches bleues**). Ces flux de chaleur latente sont considérablement réduits dans les CPV classiques, ce qui entraîne des flux de chaleur sensiblement plus importants (**flèches rouges**). Le rayonnement énergétique des panneaux photovoltaïques (**flèche marron**) et l'énergie transférée à l'électricité (**flèche violette**) sont également indiqués.

4.2.1.2 Conditions microclimatiques sous les panneaux

L'étude des impacts des CPV sur le microclimat et les fonctions écologiques et services écosystémiques associés constitue un domaine de recherche relativement récent. Toutefois, il existe de nombreuses publications, plus anciennes, traitant de divers

dispositifs comparables par certains aspects, à la couverture offerte par les panneaux photovoltaïques, notamment les bâches destinées à protéger les cultures qui peuvent réduire l'apport de lumière.

Une étude de terrain menée dans une prairie tempérée du Royaume-Uni a montré que les températures de l'air et du sol sous les panneaux étaient plus fraîches pendant la saison de croissance de la végétation que dans les inter-rangs entre les panneaux photovoltaïques (Makaronidou 2020).

Sur un autre parc solaire implanté dans une ancienne prairie agricole au Royaume-Uni, Armstrong *et al.* (2016) ont étudié le microclimat, la végétation, les échanges gazeux et la pédologie en comparant des quadrats sous les panneaux photovoltaïques, entre les panneaux et à plus de 7 mètres de tout panneaux. L'étude a montré une différence significative entre le microclimat sous les panneaux solaires et les sites témoins avec des températures au sol inférieures de 5,2°C en moyenne en été et 1,7°C en hiver. En outre, la variation diurne de la température et de l'humidité en été a été réduite sous les panneaux.

La création de microclimats au niveau des panneaux photovoltaïques est également un effet relevé par Gibson, Wilman et Laurance (2017). Ceux-ci soulignent que, les incidences sur la biodiversité dépendant du milieu, ces nouvelles conditions microclimatiques peuvent être favorables ou défavorables au maintien des espèces initialement présentes, selon leurs traits bioécologiques. Certaines bénéficieront de nouvelles conditions favorisant leur développement, d'autres au contraire, régresseront. Par exemple, en milieu aride, les panneaux peuvent avoir un effet défavorable aux plantes héliophiles (avec des besoins d'ensoleillement fort) et xérophiles (adaptées à des milieux très pauvres en eau), les panneaux photovoltaïques créant des zones d'ombre et de concentration d'eau (Tanner, Moore et Pavlik 2014 ; Corcket *et al.* 2003).

Cependant, la création de microclimats dépend du type d'installation utilisé (panneaux rotatifs ou non), de leur hauteur au sol et de la distance inter-rang. Dans une étude italienne portant sur des parcs européens, Semeraro *et al.* (2018) montrent une absence de différence significative de température au sol au niveau des panneaux photovoltaïques et sur le site témoin, pour des panneaux rotatifs installés à plus de 1,50 m du sol.

4.2.2 Couverture du sol et modification des conditions édaphiques associées

Si les CPV constituent l'une des énergies renouvelables les plus compétitives en termes de coûts, elles ont également une emprise au sol directe plus importante que la plupart des autres technologies de production d'électricité renouvelable malgré une amélioration progressive des rendements (ADEME, 2019). Les CPV au sol nécessitent une emprise par unité de puissance nettement supérieure au nucléaire et à l'éolien mais inférieure aux agrocarburants ou énergies fossiles. Les études les plus anciennes évoquent entre 2,5 et 3,5 ha par mégawatt (MW) (Ong *et al.* 2013 ; Hernandez *et al.* 2014 ; Fthenakis et Kim 2009 ; McDonald *et al.* 2009). En France, où le développement de la filière a été plus tardif, le parc photovoltaïque au sol représentait environ 5 GW à la mi-2021 (installations sur ombrières de parkings non incluses) et occupait au total de l'ordre de 5 000 à 8 500 ha, avec une densité moyenne actuelle estimée entre 1 et 1,7 ha/MW (RTE 2021).

Notons que la surface nécessaire dépend de la technologie déployée. Des panneaux fixes occuperont de 1 à 2 ha/MW tandis que des panneaux mobiles (trackers) nécessiteront de 2 à 2,9 ha/MW (ADEME, 2022)

Seule 25 à 40 % de cette surface est couverte de panneaux, soit environ 0,5 ha/MW, tandis que les surfaces fortement artificialisées, voire imperméabilisées (voies d'accès, poste de livraison électrique, etc.) n'occupent qu'une petite partie de l'emprise totale de la CPV.

Les surfaces utilisées par les CPV au sol augmentent fortement mais leurs modalités de conception au sein de ces emprises et la production d'électricité qui en résulte peuvent

varier considérablement (Hernandez *et al.* 2014). Les infrastructures annexes (comme les pistes d'accès et les équipements électriques) et l'espacement requis pour les panneaux peuvent faire en sorte que l'espace réellement nécessaire aux installations solaires représente environ 2,5 fois la surface des panneaux eux-mêmes (Turney et Fthenakis 2011).

Les incidences des CPV sur les sols découlent des pressions exercées par :

- les éventuels défrichements, voire le dessouchage (internes aux CPV, mais aussi externes en considérant les OLD et les éventuelles surfaces de compensation) ;
- les éventuels terrassements, déblais et remblais et le compactage du sol qui en résulte ;
- l'ancrage au sol des structures supportant les panneaux photovoltaïques (qui représente une très faible part de la surface occupée par les panneaux, sauf si la nature du sol nécessite d'utiliser des longrines béton ou des gabions) ;
- la couverture des sols qu'engendrent les panneaux et la modification de la luminosité, de la température et des ruissellements qui en résultent (concentration des écoulements en bas de panneaux engendrant des risques d'érosion) ;
- la construction de l'ensemble des structures annexes (poste de livraison électrique, fossés de drainage ou de circulation des câbles, dispositifs de raccordement électrique, éventuelles voies d'accès extérieurs et pistes de circulation des engins au sein du parc, etc.).

Les impacts des CPV sur les sols les plus documentés et évalués par la communauté scientifique sont relatifs à leur emprise foncière ; ainsi qu'au changement de température des sols engendrée par l'ombre des panneaux.

Ainsi, plusieurs auteurs montrent notamment la modification du degré d'hydromorphie des sols sous les panneaux comparé aux inter-rangs. Ainsi, Choi *et al.* (2020) constatent que les modules PV ont introduit une hétérogénéité dans la distribution de l'humidité du sol, les précipitations s'accumulant le long des bords inférieurs des panneaux. Makaronidou (2020) observe une humidité du sol sous les panneaux plus élevée que dans les inter-rangs pendant la saison de croissance de la végétation. Des résultats similaires ont été obtenus par Hassanpour *et al.* (2018) en étudiant une CPV implantée dans une prairie de l'Oregon soumise au stress hydrique.

Impact \ Etape		Extraction / Fabrication	Construction / Installation	Exploitation	Démantèlement	Traitement en fin de vie
Utilisation des sols	Occupation des sols	?	++	++	?	
	Artificialisation du sol	?	?	+ / ++	?	
	Changement d'affectation du sol	?	+ / ++	?	?	
	Recouvrement sol	?	?	++	?	
	Co-usage du sol	?	?	+ / ++		
Physique	Changement de température du sol		?	+ / +++		
	Compaction / Tassement du sol	?	+	?	?	
	Imperméabilisation du sol	?	?	+	?	
	Erosion du sol	?	?	+	?	
Chimique	Contamination chimique du sol	?	+	+	?	
	Acidification du sol	+	+	+	+	+
Biologique	Qualité de l'écosystème	+	+	+	+	+

Figure 7 : Caractérisation des impacts par étape du cycle de vie de la structure de production d'énergie solaire au sol (ADEME et al. 2019)

+++	Impact pouvant être négligeable à important et à enjeu dans le cas français
++	Impact pouvant être négligeable à non négligeable et à enjeu dans le cas français
+	Impact généralement négligeable et a priori à faible enjeu dans le cas français
?	Impact non évalué (car non mentionné dans les publications) mais potentiellement à enjeu dans le cas français
	Impact jugé non pertinent ou à faible enjeu pour la filière française

	Impact très bien documenté (nombreuses études dont les résultats sont pertinents dans le cas français et font consensus)
	Impact bien documenté (plusieurs études dont les résultats semblent fiables, applicables dans le cas français et font consensus)
	Impact connu (peu d'études, ou non nécessairement transposable au cas français, ou sources peu fiables / divergentes)
	Impact mal connu (pas d'étude ou sources non fiables)

La variabilité spatiale et l'ampleur de ces incidences varient en fonction de nombreux facteurs, dont :

- de la composition des sols sur lesquels sont envisagés les projets, de la topographie et du climat ;
- du couvert végétal initialement présent ;
- de la nature des travaux effectués ;
- des modalités d'ancrage des panneaux utilisées (pieux battus, massifs bétons, etc.), de leur densité et de la hauteur à laquelle ils sont installés.

Lorsqu'ils ne nécessitent pas de fondations en béton, ils peuvent être facilement démontés, permettant ainsi à un autre usage de prendre éventuellement leur suite au terme de leur durée d'exploitation commerciale ou technique.

4.3 Incidences sur les composantes biogéochimiques des milieux naturels

Un cycle biogéochimique est le processus de transport et de transformation cyclique (recyclage) d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, dans lesquels se retrouve la biosphère. Un tel cycle induit souvent des passages de l'état organique à l'état minéral au sein de la biosphère. Les divers cycles en interaction confèrent à la biosphère une capacité de régulation, appelée homéostasie. Celle-ci est à la base de la pérennité des écosystèmes, grâce à la grande stabilité qu'elle assure, tout du moins en dehors des interventions humaines et phénomènes géo-climatiques exceptionnels.

4.3.1 Cycles du carbone et de l'azote et gaz à effets de serre (GES) associés

4.3.1.1 Emissions de GES des infrastructures photovoltaïques

Une analyse du cycle de vie réalisée par Ecoinvent (2011) estimait les émissions de CO₂ des CPV au sol autour de 48 gCO₂/kWh, ce qui est largement inférieur aux émissions des énergies fossiles comme le gaz, le pétrole ou le charbon, légèrement inférieur aux émissions du mix électrique français (de 2011), mais supérieur aux autres sources d'énergies renouvelables et au nucléaire (Figure 8). Cette moyenne cache des disparités entre technologies : avec 69 gCO₂/kWh les panneaux polycristallins sont ainsi plus émetteurs que les monocristallins (40 gCO₂/kWh) ou que les panneaux dits « à couche mince » à base de tellure de cadmium (CdTe) (21,5 gCO₂/kWh).

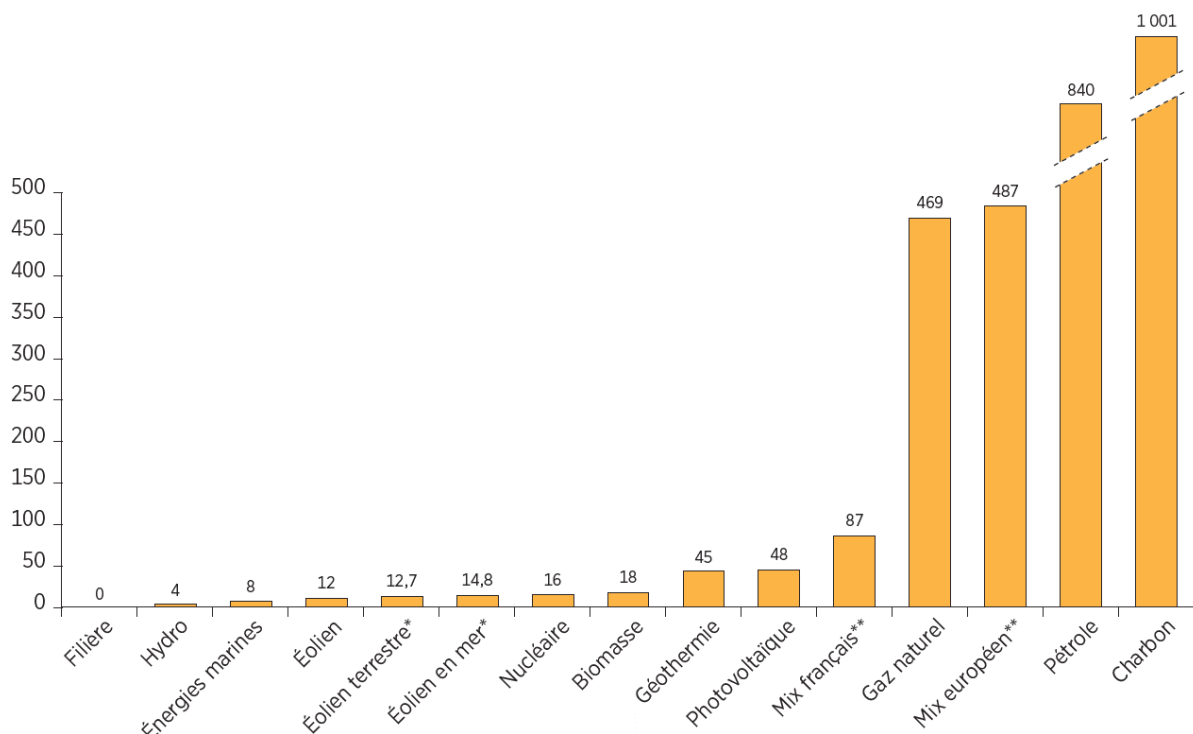


Figure 8 : Taux d'émission de gaz à effet de serre, en gCO₂/kWh (GIEC 2011; Ecoinvent** 2011; Cycleco* 2015)

Dans une étude plus récente, Fthenakis et Leccisi (2021) ont démontré que les émissions de CO₂ causées par les systèmes PV cristallins varient de 17 à 18 gCO₂eq/kWh lorsqu'ils sont installés à des irradiances élevées, de 23 à 25 gCO₂eq/kWh à des irradiances modérées (conditions observées dans le sud de la France), et de 40 à 43 gCO₂eq/kWh à des irradiances faibles (conditions observées dans le nord de la France). Ces études plus

récentes bénéficient en outre de données plus précises des facteurs d'émissions (en équivalent CO₂ / unité).

Lorsque les CPV au sol se substituent à des énergies fossiles, il est donc communément admis qu'elles participent à l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris qui visent à limiter le changement climatique et ses effets sur la biodiversité.

Ces émissions de CO₂ pourraient être encore réduites par l'innovation (augmentation des rendements des modules) et par une relocalisation au moins partielle des activités photovoltaïques amont (extraction et premières transformations) et aval (recyclage) assortie de l'imposition de normes d'écoconception renforcées (Commissariat général au développement durable 2020).

4.3.1.2 Emissions de GES par modification des milieux naturels

Toutefois, ces bilans carbone ne tiennent pas compte des risques d'émissions directes de GES causées par le travail des sols en phase chantier et la minéralisation de la matière organique qui peut en résulter, ni des émissions indirectes relatives à la modification du couvert végétal. En effet, les sols stockent, sous forme de matières organiques, deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère. Sur une profondeur de 30 cm, les sols des terres arables (grandes cultures et prairies temporaires) stockent en moyenne 51,6 tonnes de carbone par hectare (tC/ha), ceux des forêts 81 tC/ha et ceux des prairies permanentes 84,6 tC/ha (Pellerin, Bamière, et Réchauchère 2020).

Dans le cas des CPV flottantes, l'ombrage et la stabilisation de la colonne d'eau pourraient également modifier les cycles du carbone et de l'azote au sein des écosystèmes lacustres et contribuer à une augmentation des émissions de GES.

Les écosystèmes terrestres, quant à eux, atténuent l'impact de ces émissions en CO₂ en captant une partie de ce Carbone via la photosynthèse (Figure 9).

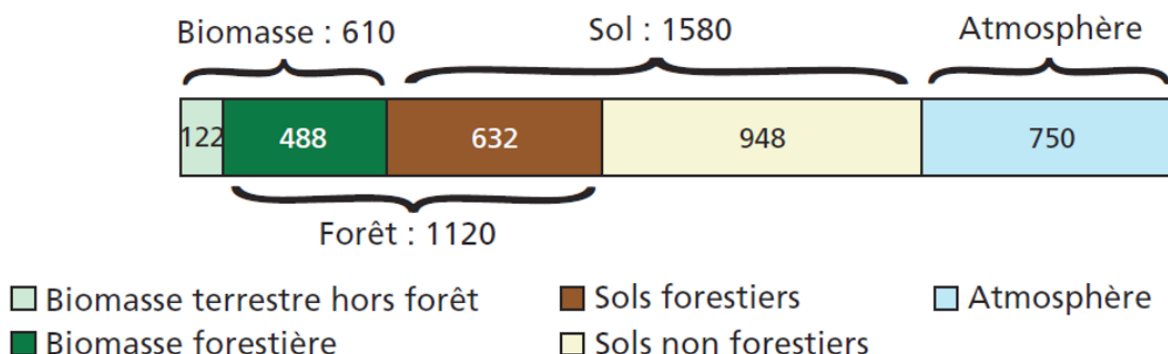


Figure 9 : Stock de carbone mondial (hors océan), en GtC (GIEC 2001).

Ainsi, des chercheurs espagnols ont évalué les besoins potentiels en foncier pour l'énergie solaire et les émissions de GES qui en résulteraient pour l'UE, l'Inde, le Japon et la Corée du Sud. Dans l'éventualité où cette filière représenterait 25 à 80 % du mix électrique de ces régions d'ici 2050, ces chercheurs estiment que l'énergie solaire pourrait occuper 0,5 à 5 % de la superficie totale des terres. Les modifications de la couverture terrestre qui pourraient en résulter, y compris les effets indirects, pourraient entraîner un rejet net de carbone compris entre 0 et 50 gCO₂/kWh, selon la région, l'ampleur de l'expansion, l'efficacité de la technologie solaire, la nature des milieux naturels concernés et les pratiques de gestion des terres dans les parcs solaires (van de Ven *et al.* 2021).

Les auteurs estiment qu'il convient donc de mettre en œuvre une planification et une réglementation coordonnées des nouvelles infrastructures d'énergie solaire afin d'éviter une augmentation significative de ces émissions de GES au cours de leur cycle de vie par le biais des pertes de carbone terrestre (van de Ven *et al.* 2021).

En phase de chantier, le défrichement suivi de terrassements réduisent la biomasse végétale ainsi que les apports de matière organique et augmentent les émissions de CO₂ vers l'atmosphère par déstockage du carbone contenu dans les sols et la biomasse végétale (Moore-O'Leary *et al.* 2017). Ainsi, le défrichement de forêts pour faire de la place à l'énergie solaire entraînerait des émissions de CO₂ pouvant atteindre 36 gCO₂/kWh (en plus des émissions liées au cycle de vie des panneaux eux-mêmes) (Turney et Fthenakis 2011).

En phase d'exploitation, les températures du sol sous les panneaux photovoltaïques sont abaissées en été ce qui réduit les émissions de CO₂ lors de cette période (Armstrong *et al.* 2016) et ralentit les cycles biogéochimiques (Armstrong *et al.* 2014). L'expérience de l'agriculture et des sites pollués ont tendance à indiquer que ces dégradations sont réversibles, même si cela peut prendre du temps (une à plusieurs décennies) pour reconstituer un stock de matières organiques.

Choi *et al.* (2020) ont étudié les paramètres physiques et chimiques critiques du sol d'une CPV revégétalisée et d'une prairie de référence adjacente dans le Colorado, aux États-Unis. Sept ans après la revégétalisation, ils ont constaté que le carbone et l'azote étaient présents en plus faible quantité dans le sol photovoltaïque que dans le sol de référence. Choi *et al.* émettent l'hypothèse que cela est dû à l'enlèvement de la couche arable pendant la construction de la CPV (enlèvement qui n'a pas lieu sur toutes les CPV). Ceci est cohérent avec des études antérieures montrant une réduction de la matière organique du sol et de la production végétale dans des expériences simulant l'érosion de la couche arable en la retirant artificiellement (Larney *et al.* 2016 ; Hölzel et Otte 2003). Les niveaux réduits de carbone et d'azote suggèrent que le cycle des nutriments ne s'était pas complètement rétabli 7 ans après la construction de la CPV et, en outre, que la capacité du sol à séquestrer le carbone était diminuée par rapport au sol de référence.

Cette dégradation de la structure du sol, combinée à l'élimination de la végétation, altère les habitats de la microfaune du sol, et leurs fonctions écologiques dont le recyclage des nutriments et le stockage du carbone. La question de la réversibilité de ces incidences à moyen et long termes reste posée.

Il est donc admis que le choix de la localisation des sites d'implantation des CPV ainsi que leurs modalités de réalisation sont importants dans l'évaluation des émissions de GES de ces projets (Tawalbeh *et al.* 2021).

4.3.2 Cycle de vie et recyclage

L'énergie photovoltaïque est une énergie renouvelable qui bénéficie d'une image positive, principalement du fait de la conversion non polluante de l'énergie solaire en électricité qui, contrairement aux énergies fossiles ou au nucléaire, ne nécessite pas d'extraire ou de transporter du combustible en phase d'exploitation. Toutefois, la contamination chimique des sols, de l'air et des milieux aquatiques générée lors de l'extraction de certains matériaux utilisés dans les panneaux et systèmes de raccordement associés, est un risque potentiellement significatif (Commissariat général au développement durable 2020).

De même, les panneaux photovoltaïques voient leur performance se dégrader au fil du temps. La fin de vie est généralement laissée à l'appréciation du producteur d'électricité : en fonction de ses contraintes d'espace, de production et de rendement, celui-ci peut éventuellement juger nécessaire de remplacer les panneaux avant leur fin de vie, par des équipements plus performants. Si la durée de vie d'un panneau solaire est aujourd'hui de l'ordre de 25 à 30 ans en moyenne, sa durée moyenne d'utilisation évolue entre 15 et 20 ans seulement.

Les panneaux photovoltaïques en fin de vie constituent une préoccupation mondiale émergente, avec une estimation de 78 millions de tonnes de déchets photovoltaïques dans le monde d'ici 2050 (Chowdhury *et al.* 2020). En plus de la crise mondiale actuelle des déchets électroniques, ils représentent une grave menace pour l'environnement dans certains pays où ils ne sont pas recyclés, notamment en raison des risques de ruissellement dans l'eau potable et de la dégradation des sols due à la libération

potentielle de matériaux toxiques (Nain et Kumar 2020). Le recyclage et l'utilisation efficace (upcycling) des déchets issus des parcs photovoltaïques sont essentiels pour assurer la durabilité (à long terme) de cette filière en tant que source propre d'énergie renouvelable (Kumar et Mani 2021).

En ce qui concerne la France, les besoins en recyclage sont estimés à 150 000 tonnes d'ici 2030 par Sorel, l'éco-organisme chargé du recyclage des panneaux solaires en France. Structurer la filière de recyclage des panneaux photovoltaïques constitue donc un enjeu industriel et environnemental crucial.

Si la majorité des panneaux est recyclable théoriquement à près de 99 %, le point d'équilibre économiquement acceptable se situe aujourd'hui aux environs de 95 % de matériaux recyclés en France.

4.3.3 Pollution des sols et de l'eau

En phase d'exploitation, il convient de souligner que la captation de l'énergie solaire ne génère aucun sous-produit ; cela contribue à l'image positive de la filière et explique pourquoi de nombreuses études visent à en favoriser le développement (Schwarzbözl et al. 2006 ; Polman et al. 2016). Les installations d'énergie solaire sont néanmoins parfois associées dans la littérature à des risques de pollutions physico-chimiques des sols ou de l'eau. En cas d'incendie au sein d'une CPV, une pollution de l'air est, elle aussi, possible.

En phase de construction

L'utilisation d'engins de chantier lors de la construction de la CPV peut être, en cas d'incident, une source de pollution due à des carburants et lubrifiants qui peuvent être accidentellement répandus sur le site.

Lorsque du béton est utilisé pour les fondations, de fines particules remontent à la surface du béton lorsqu'il se solidifie et forment une pellicule blanche appelée « voile de ciment ». Lors du lavage de l'outillage (pelles, truelles, seaux...), des bétonnières, des bennes ou des centrales à béton, les eaux de lavage nécessitent d'être récupérées et dépolluées.

Lorsqu'ils sont nécessaires, les terrassements et retournements des sols présentent, du fait de l'érosion des sols qui peut en résulter, des risques de chargement des ruissellements superficiels puis des milieux récepteurs aval par des sédiments fins.

En phase d'exploitation

Des publications à l'international évoquent l'usage de dépoussiérants et d'herbicides afin de maintenir le rendement des panneaux et de « gérer la végétation » sur le site de la CPV (Lovich et Ennen 2011). L'utilisation de dépoussiérants peut à la fois augmenter le ruissellement et modifier les caractéristiques chimiques des cours d'eau voisins lorsqu'ils sont emportés par les eaux (Grippio, Hayse, et O'Connor 2015).

En France, l'usage de ces produits est *a priori* très limité et, lorsqu'un nettoyage des panneaux est nécessaire, celui-ci est effectué uniquement avec de l'eau. Cela peut nécessiter de recourir au pompage dans des cours d'eau ou des réservoirs.

4.4 Incidences sur les composantes biologiques des milieux naturels

4.4.1 Généralités

En modifiant les paramètres physiques du sol et de la canopée (température, hygrométrie, luminosité), l'implantation d'une CPV au sol sur une parcelle est susceptible d'impacter l'abondance, la composition et la diversité en espèces végétales et animales et en habitats naturels. Les conséquences sont une modification ou la perte des fonctions biologiques initialement associées à ces milieux naturels : modification ou perte irréversible d'habitats,

dérangement des individus (par aversion ou attrait) et altération de leurs mouvements migratoires (par fractionnement des milieux naturels).

En 2011, il existait encore peu d'études scientifiques sur les effets des CPV sur les composantes biologiques des milieux naturels, mais Lovich et Ennen (2011) notaient déjà que lorsque l'installation des CPV nécessite la modification voire la destruction des habitats naturels, leurs impacts sur la biodiversité étaient probablement défavorables. Depuis, plusieurs scientifiques ont constaté la perte, la dégradation et la fragmentation d'habitats de repos, d'alimentation ou de reproduction d'espèces animales, avec pour conséquences une réduction de la diversité et de la densité de ces dernières (Turney et Fthenakis 2011; Hernandez *et al.* 2014; Visser *et al.* 2019; Vellot, Cluchier, et Illac 2020).

L'ampleur de ces incidences sur la biodiversité varie cependant en fonction de l'état de conservation des habitats naturels initialement présents et de leur situation géographique. Ainsi, dans le cas particulier de l'aménagement d'une CPV sur un site dégradé ou initialement soumis à des cultures intensives, présentant peu d'enjeux de biodiversité, la gestion du site qui s'ensuit peut concourir à une forme de renaturation favorable à sa recolonisation par certaines espèces végétales et animales adaptées à des conditions d'habitats très contrastées, soit totalement ouverts soit très ombragés, et dont la végétation y est artificiellement gérée. Comparativement aux paysages environnants, de telles CPV qui laisseraient une place suffisante à la végétation, peuvent alors présenter un milieu attractif pour certaines espèces, dont certains papillons diurnes, sauterelles ou oiseaux nicheurs (Guiller *et al.* 2017; Peschel *et al.* 2019); sans toutefois restaurer l'ensemble des fonctions écologiques propres à un écosystème naturel.

Le défrichement nécessaire à l'implantation de CPV sur des friches reconverties, ainsi que les mesures de gestion adaptées de la végétation en phase d'exploitation, peuvent contribuer à maintenir les milieux ouverts et mettre ainsi un terme à la discontinuité des habitats naturels, et à la perte d'habitats pour les insectes et la faune volante spécialistes des milieux ouverts et ensoleillés (Peschel *et al.* 2019).

4.4.2 Incidences sur les cortèges phytosociologiques

Les travaux en phase de construction et la gestion de la flore en phase d'exploitation peuvent entraîner une modification notable de la structure de la végétation ainsi que la création de zones abiotiques ou imperméabilisées sur des surfaces limitées (pistes, plateformes techniques, etc.).

Lorsqu'il est réalisé, le défrichement provoque une réduction des apports de matière organique dans les premiers horizons du sol (Mills et Fey 2004), ce qui peut fortement impacter la disponibilité en nutriments et limiter la productivité (Lal 1993).

Par une diminution du rayonnement photosynthétique actif, l'ombrage des panneaux entraîne une modification de la communauté végétale. Armstrong *et al.* (2016) ont observé une communauté sous panneaux significativement plus diversifiée en *Poaceae* qu'en dehors des panneaux mais cependant exempt de *Fabaceae*; les plantes pollinisées par le vent sont donc favorisées par rapport à celles pollinisées par les insectes, ce qui indique la réduction forte des insectes pollinisateurs et de la fonction écologique de pollinisation. Ils ont montré que la richesse spécifique était 2 fois moins importante sous les panneaux et que la biomasse végétale totale y était 5 fois plus faible.

Dans les milieux plus arides, Liu *et al.* (2019) ont montré que la biomasse aérienne de la végétation était près de 22 fois plus faible dans les zones soumises à l'influence des panneaux photovoltaïques. Dans les régions désertiques, les micro-habitats associés aux panneaux solaires permettent de limiter l'évapotranspiration et donc d'offrir des conditions plus propices à l'installation des communautés végétales sciaphiles⁷ (Kristie Tanner *et al.* 2020). Par ailleurs, les plantes mises à l'ombre produisent significativement moins de nectar mais avec des fortes variations entre espèces, ce qui réduit leur attractivité envers les pollinisateurs et donc leur reproduction (Jakobsen 1994; Petanidou

⁷ Qualifie les plantes ou les groupes de plantes qui ont besoin d'ombre pour se développer.

et Smets 1996; Nocentini *et al.* 2013). En climat méditerranéen, Vellot *et al.* (2020) observent peu de différences en termes de composition floristique mais une forte diminution de la biomasse végétale, 4 fois moins importante sous les panneaux.

Dans un contexte tempéré, Armstrong *et al.* (2016) ont mis en évidence que la biomasse végétale aérienne et la diversité des espèces étaient plus faibles sous les panneaux photovoltaïques en raison du microclimat et des mesures de gestions. La photosynthèse et le bilan net de l'écosystème au printemps et en hiver étaient également plus faibles sous les panneaux photovoltaïques.

Madej (2020) a étudié la dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur deux sites prairiaux pâturés en France. La diversité et la richesse végétale se sont trouvées relativement homogènes sur le parc plus récent mais aurait tendance à s'appauvrir comme le suggère le site plus ancien. Selon cet auteur, cet effet temporel est lié à la domination d'une espèce de la famille des poacées plus compétitrice à l'abri des panneaux, que les autres espèces végétales. Il est également intéressant de souligner que la CPV sur laquelle ont été observés les résultats les plus homogènes est celle dont les panneaux sont installés le plus haut avec une hauteur maximale moyenne de 3,0 m contre 2,10 m pour l'autre. Selon cet auteur, la dynamique de la croissance de la végétation s'est retrouvée moins perturbée, en été, sous les panneaux que dans les zones ensoleillées grâce à la réduction des stress hydriques, lumineux et thermiques induit par la protection du couvert des panneaux photovoltaïques. La végétation présente dans les sites témoins ou en inter-rangée, a été affectée par la sécheresse, ce qui a provoqué une diminution de sa croissance. Cependant, bien que la croissance et l'état de la végétation soient avantagés sous les panneaux, la productivité à l'ombre n'a pas présenté une plus grande biomasse comparée à la végétation qui s'est développée au soleil.

Les effets de l'ombrage ont été particulièrement étudiés dans le cadre de projets agrivoltaïques pour lesquels il est important d'anticiper l'incidence des infrastructures sur la production agricole.

Selon Weselek *et al.* (2019), l'implantation de panneaux solaires au-dessus des cultures peut entraîner une baisse des rendements agricoles car le rayonnement solaire y est potentiellement réduit d'environ un tiers. Cet ombrage varie cependant selon le type de panneaux installés : fixes ou sur tracker. Grâce à la production combinée d'électricité et de cultures, l'agrivoltaïsme peut toutefois augmenter la rentabilité des terres jusqu'à 70 %, notamment dans les territoires ayant un climat aride.

Pour certaines espèces de prairies tempérées, des expériences en pot avec des toiles d'ombrage ont montré que, selon la variété, des rendements constants, voire supérieurs, peuvent être obtenus dans des conditions d'ombrage modéré (Pang *et al.* 2019 ; Semchenko *et al.* 2012). Ces résultats ont été confirmés lors de la première année des expériences agrivoltaïques réalisées par Weselek *et al.*, où la réduction d'un tiers du rayonnement photosynthétiquement disponible pour la plante par l'ombrage a conduit à une augmentation de la biomasse végétale végétative du blé et du céleri-rave, mais a à peine affecté les rendements totaux du trèfle d'herbe (Weselek *et al.* 2019).

Agostini *et al.* (2021) ont modélisé les performances environnementales et économiques d'un système agrivoltaïque innovant construit sur des structures tendues (Agrovoltaico®) dans la vallée du Pô. L'analyse du cycle de vie réalisée montre que les systèmes Agrovoltaico ont des performances environnementales similaires à celles des autres systèmes photovoltaïques dans tous les domaines de préoccupation environnementale étudiés (changement climatique, eutrophisation, qualité de l'air et consommation des ressources).

Dans le cadre d'un projet agrivoltaïque dans un environnement chaud et sec, l'ombrage des panneaux photovoltaïques offre de multiples avantages additifs et synergiques, notamment une réduction des stress hydrométrique et thermiques pour les plantes et une plus grande production alimentaire et électrique (Barron-Gafford *et al.* 2019).

Des chercheurs ont réussi à faire pousser de l'aloë vera (Ravi et al. 2016), des tomates (Cossu et al. 2014), du maïs biogaz (Amaducci, Yin, et Colauzzi 2018), de l'herbe de pâturage (Hassanpour Adeg, Selker, et Higgins 2018) et de la laitue dans le cadre d'expériences agrivoltaïques. En France, il a été montré que certaines variétés de laitue produisent un rendement plus important à l'ombre qu'en plein soleil (Marrou, Wery, et al. 2013) ; d'autres variétés produisent essentiellement le même rendement à ciel ouvert et sous des panneaux photovoltaïques (Marrou, Guillioni, et al. 2013). A plus long terme, les panneaux photovoltaïques semi-transparents ouvrent des possibilités supplémentaires pour la production en colocation et en serre (Emmott et al. 2015).

Touil et al. (2021) aboutissent aux conclusions suivantes : « (1) la réduction du rayonnement solaire est le principal facteur de changement sous la canopée photovoltaïque, où une réduction de plus de 40 % du rayonnement solaire due à la présence des panneaux PV a été observée. (2) Les systèmes agrivoltaïques (serre PV ou sol) avec un taux de couverture égal ou inférieur à 25 % n'ont pas montré d'effets significatifs sur la croissance et la qualité des plantes. (3) Des effets inhibiteurs sur la croissance des cultures ont été observés avec un taux de couverture de 50 à 100 %, sauf pour les fraises et les épinards. (4) L'efficacité de l'utilisation de l'eau pour certaines espèces de cultures dans un climat de terre sèche était plus grande dans le système APV. Au vu des résultats, la recherche semble suffisamment prometteuse pour soutenir les pratiques APV qui limitent l'ombrage des panneaux PV à moins de 25 % pour éviter d'affecter la croissance des cultures, ce qui est supposé être la priorité d'une exploitation agricole ».

En résumé : les résultats issus de la recherche scientifique montrent globalement une diminution notable de la biomasse végétale, ainsi qu'une modification de la nature des communautés végétales présentes au sein des CPV comparées à des situations témoins.

Sous les panneaux, les nouvelles conditions microclimatiques et d'hydromorphie des sols peuvent s'avérer favorables au développement de certaines plantes, dont de graminées inféodées aux milieux ombragés ; à l'inverse, d'autres espèces trouvent des conditions défavorables à leur développement, dont les espèces nectarifères. La nature et l'ampleur de ces modifications varient en fonction du climat et des modalités de conception des parcs (nature, hauteur et densité des panneaux installés). Les incidences de la gestion de la végétation, par fauche ou pâturage, devraient également être évaluées afin d'identifier les modalités les plus optimales pour les CPV et le maintien de cortèges d'espèces végétales diversifiés.

4.4.3 Incidences sur les insectes

Les travaux en phase chantier puis la présence des infrastructures et les mesures de gestion de la végétation en phase d'exploitation peuvent avoir des incidences sur la richesse, la diversité et l'abondance des insectes au sein des CPV.

Incidences des défrichements, terrassements et de la gestion du site

Un des impacts des CPV au sol sur les insectes est l'altération d'habitats favorables au bon déroulement de leur cycle de vie engendrée par (1) les travaux d'implantation des panneaux et des structures afférentes (voies d'accès, clôtures, etc.) ; puis (2) la gestion de la végétation au sein des emprises.

Ces impacts sont d'autant plus importants que les milieux concernés présentaient un intérêt écologique fort avant l'installation de la CPV et que les emprises sont vastes. Vellot et al. (2020) indiquent ainsi : « Les assemblages d'espèces d'insectes peuvent être modifiés à la suite d'un aménagement du milieu, comme l'installation d'une CPV. Les effets d'un tel aménagement ne se limitent pas au périmètre de l'emprise de la centrale mais peuvent s'étendre aux milieux environnants. La fragmentation des habitats engendrée peut alors perturber les déplacements des individus à différentes échelles spatio-temporelles (colonisation, dispersion, etc.). L'ouverture du milieu à la suite de l'installation d'une CPV pourra ainsi favoriser les mouvements des espèces de milieux ouverts, mais aussi défavoriser ceux des espèces de forêts et de lisières. De plus, la

composition spécifique de la végétation ainsi que ses caractéristiques physiques (densité, hauteur, etc.) peuvent impacter significativement les assemblages d'espèces présentes ».

Les orthoptères sont sensibles à la structure du milieu, où ils trouvent les emplacements propices à leur thermorégulation, ainsi que les ressources végétales dont ils se nourrissent.

La modification des communautés végétales, qui tend à être dominée par des graminées (Poacées) est un facteur environnemental important pour expliquer les modifications des communautés d'insectes. Ainsi, Vellot *et al.* (2020) notent que « *les lépidoptères nécessitent eux aussi des milieux favorables à leur thermorégulation, mais ils sont davantage dépendants de la diversité des plantes qui conditionnent leur reproduction et leur alimentation* ».

Incidences de la création d'un microclimat sous les panneaux

Pour les insectes pollinisateurs, l'ombrage constitue un facteur de forte diminution de la fréquentation d'un habitat. En effet, ces derniers ont besoin de l'énergie solaire pour augmenter leur température corporelle et recherchent un environnement ensoleillé pour réduire les pertes d'énergie (Wit et Biesmeijer 2020). Si l'ouverture des milieux inhérente à l'installation des CPV au sol augmente l'ensoleillement au niveau des délaissés et des OLD, l'ombrage engendré par les panneaux, qui couvrent en moyenne 40 % de l'emprise d'une CPV, constitue à l'inverse un facteur d'aversion limitant pour ces insectes qui vont alors éviter ces zones (Arnold et Chittka 2012 ; Guiller *et al.* 2017 ; Montag, Parker, et Clarkson 2016).

Ainsi, l'activité de pollinisation par les abeilles domestiques et sauvages peut être fortement réduite par l'ombrage (Polatto, Chaud-Netto et Alves-Junior 2014) et par la difficulté induite à reconnaître les couleurs florales, ce qui les conduit à éviter ces secteurs (Arnold et Chittka 2012). Il en est de même pour les papillons qui ont tendance à éviter ces secteurs ombragés (Guiller *et al.* 2017).

De plus, les plantes soumises à l'ombrage des panneaux produisent significativement moins de nectar (malgré de fortes variations entre espèces), ce qui réduit leur attractivité pour les pollinisateurs et donc leur reproduction (Nocentini *et al.* 2013; Graham *et al.* 2021).

Entre des rangées de panneaux espacées de 6 m sous un climat aride, l'ombrage partiel ne semble pas affecter l'abondance et la diversité des pollinisateurs en comparaison d'une zone témoin en plein soleil (Graham *et al.* 2021).

Incidences de la création d'un microclimat au-dessus des panneaux

Plusieurs auteurs relatent des cas de mortalité directe d'insectes (abeilles, papillons, diptères,...) du fait de la chaleur réfléchie suite à des vols au-dessus des panneaux et mentionnent la présence de prédateurs (reptiles, oiseaux) qui collectent les insectes morts au pied des panneaux (Lovich et Ennen 2011; R.R Hernandez *et al.* 2014).

Incidences de la création d'une surface lisse et de la polarisation de la lumière

De nombreux insectes utilisent la lumière polarisée comme moyen d'orientation (Horváth *et al.* 2009). Aussi, la lumière polarisée et réfléchie par des surfaces lisses perturbe leur comportement et leur orientation, au point que certains confondent les panneaux avec des miroirs d'eau (Figure 10).

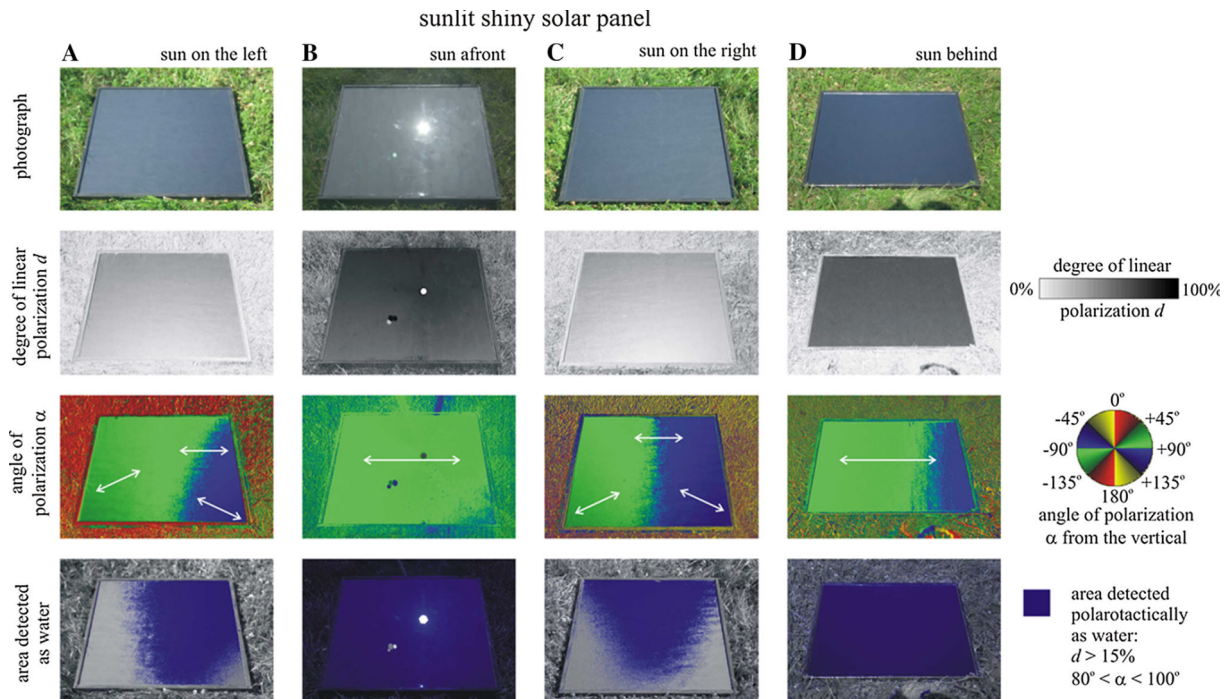


Figure 10 : représentation de la lumière polarisée par un panneau noir brillant (Száz et al. 2016).

Ainsi, certains d'entre eux sont détournés des plans d'eau naturels et pondent leurs œufs sur des panneaux solaires (Black et Robertson 2020). Horváth et al. (2010) observent ce comportement auprès d'insectes aquatiques dits « polarotactiques », dont plusieurs espèces d'odonates (libellules), d'éphémères (*Ephemeroptera*), de trichoptères (*Trichoptera*), de diptères (*Dolichopodidae*) et de mouches tabanidées (*Tabanidae*), familles d'espèces les plus attirées par les panneaux solaires. Ce comportement de ponte au-dessus des panneaux solaires est plus fréquent qu'au-dessus des surfaces à plus faible degré de polarisation (y compris l'eau). Il peut entraîner la mortalité et l'échec de la reproduction des espèces concernées du fait de la chaleur et de l'absence d'eau (Horváth et al. 2010 ; Blahó et al. 2012).

Cette situation pourrait être exploitée par des prédateurs insectivores tels que les bergeronnettes, les moineaux, les mésanges charbonnières ou certains chiroptères, dont on a observé qu'ils se nourrissaient de ces insectes polarotactiques piégés sur des feuilles de plastique noir hautement polarisant (Kriska, Horváth, et Andrikovics 1998; Bernáth et al. 2008) et sur des surfaces verticales en verre (Horváth et al. 2009). À plus long terme, ce piège écologique pourrait réduire la disponibilité en proie pour les insectivores qui utilisent le site.

Incidences variable selon l'état initial du site équipé

Certaines études ont montré que les zones dénuées de panneaux dans les CPV peuvent constituer un habitat plus approprié pour les pollinisateurs que des sites dégradés situés aux alentours.

Par exemple, Wit et Biesmeijer (2020), dans une étude non publiée dans une revue à comité de lecture, ont trouvé plus d'espèces d'abeilles qu'on ne peut en trouver normalement dans les zones agricoles ou industrielles et un bon nombre d'espèces de syrphes également. Ils considèrent que la CPV étudiée constitue même un bon habitat pour cinq espèces d'abeilles menacées, à savoir *Hoplitis tridentata*, *Lasioglossum brevicorne*, *Osmia aurulenta*, *Osmia caerulescens* et *Panurgus banksianus*. Toutefois, dans le cas étudié, la composition des cortèges végétaux est importante, ainsi que la présence de zones ensoleillées. Il doit y avoir des plantes à fleurs attrayantes du printemps à la fin de l'été pour permettre aux insectes pollinisateurs de butiner et de nidifier. Au sein de ce parc, la richesse florale et faunistique, exceptionnelle pour une zone industrielle a été établie à l'aide d'un entretien important comprenant un minimum de

fauche (aucune durant la première année puis 1 à 2 les années suivantes). Il s'agit également d'une étude portant sur une seule CPV situé aux Pays-Bas, ce qui réduit fortement sa généralisation à l'ensemble des CPV en contexte français voire méditerranéen.

En outre, des emplacements ensoleillés sont nécessaires pour assurer l'établissement et la floraison d'une grande variété d'espèces végétales et des conditions de vol adéquates pour les pollinisateurs. Le parc solaire de Shell Moerdijk remplit ces conditions grâce à un espace important autour et entre les panneaux solaires (un inter-rang de 3,12 m entre chaque rangée de panneaux d'une largeur de 3,78 m).

Guiller *et al.* (2017) estiment que, dans une certaine mesure, l'installation de CPV sur des zones d'ores et déjà perturbées par des activités anthropiques passées peut limiter la portée et l'intensité des impacts environnementaux. Ainsi, l'implantation de la CPV étudiée sur une ancienne carrière d'argile peut expliquer pourquoi les papillons mobiles perçoivent cette installation comme hautement attractive. Inversement, ils suggèrent que son installation sur des habitats localement riches aurait été très préjudiciable à ces mêmes communautés de papillons, et en particulier aux espèces sédentaires.

Nota : créer des « confettis » de territoires sans pesticides ne suffit pas à voir les populations d'insectes se développer. En effet, à proximité de champs exploités intensivement et régulièrement traités avec des produits phytosanitaires, la diversité et le nombre de papillons diurnes sont nettement inférieurs à ceux que l'on rencontre dans les prairies proches de champs peu ou pas cultivés (Habel *et al.* 2019). D'après une autre étude, le taux de disparition des insectes est à son maximum sur les pâturages majoritairement entourés de terres arables, c'est pourquoi il importe d'aborder la question des impacts sur les insectes à l'échelle des paysages et de ne pas se limiter à l'emprise des CPV (Seibold *et al.* 2019).

En résumé : selon les résultats issus de la littérature scientifique, l'impact des CPV sur les cortèges d'espèces d'insectes peut être élevé, tant en termes de richesse spécifique, de diversité ou d'abondance. L'ampleur de cette incidence est fortement corrélée à la modification des conditions d'habitats de ces espèces, liée notamment aux nouvelles conditions microclimatiques et à la gestion de la végétation sur de grandes surfaces. Ainsi, la raréfaction des plantes pollinisées par les insectes ou la diminution de leur capacité de production de nectar compte tenu de l'ombrage généré par les panneaux va diminuer l'abondance et la diversité en insectes pollinisateurs.

La surface des panneaux photovoltaïques a aussi une incidence du fait de la chaleur réfléchiée et de la polarisation de la lumière, cette dernière créant une confusion avec des miroirs d'eau et un piège sensoriel pour les insectes polarotactiques lorsqu'ils sont présents dans l'environnement des CPV. Ces deux types d'impacts (au-dessus et en dessous des panneaux) modifient les cortèges d'espèces présents et les fonctions écologiques associées. De par le rôle important que jouent les insectes à la base des chaînes trophiques, il est urgent de stimuler les recherches scientifiques sur ces impacts et les moyens de les atténuer.

4.4.4 Incidences sur les oiseaux

Incidences des défrichements, terrassements et de la gestion du site

L'altération voire la destruction des habitats naturels, notamment lors de la phase de chantier, sont susceptibles de fortement impacter les oiseaux. En effet, ces travaux peuvent modifier les cortèges d'espèces végétales et animales présents, engendrant potentiellement un déplacement de certains oiseaux et modifiant les réseaux trophiques et donc la disponibilité ou l'accessibilité en proies (une modification du couvert végétal peut entraîner une moindre disponibilité en insectes et, par effet en chaîne, avoir des répercussions sur les populations locales d'oiseaux ou de chauves-souris).

Ainsi, l'altération de zones humides aura des effets importants sur les communautés d'oiseaux d'eau. Toral et Figuerola (2010) suggèrent par exemple qu'une réduction des surfaces de riziculture au profit d'autres types de cultures ou de fermes solaires, pourraient avoir des effets importants sur les oiseaux d'eau (Gruiformes, Ciconiiformes, Anseriformes).

Lorsque la modification des milieux se traduit par une diminution du nombre d'insectes, cela peut avoir des répercussions sur les autres groupes d'espèces, notamment les oiseaux insectivores. Des ressources alimentaires suffisantes sont en effet essentielles à la reproduction des populations avifaunistiques, car la disponibilité de protéines animales pour l'élevage des jeunes oiseaux conditionne leur survie (Wahl 2014).

Jusqu'en 2014, l'impact des CPV sur la diversité, l'abondance et les activités des oiseaux, est encore peu étudié et les études sont à ce stade limitées à quelques sites spécifiques (Smith et Dwyer 2016; R.R Hernandez et al. 2014). DeVault et al. (2014) observaient sur une CPV située à proximité d'un aéroport : « *Bien que nous ayons observé plus d'oiseaux par surface étudiée dans les CPV que dans les autres surfaces enherbées de l'aérodrome, nous avons trouvé moins d'espèces d'oiseaux dans les CPV que dans le reste de l'aérodrome. Dans l'ensemble, le niveau d'utilisation des oiseaux observé sur les panneaux photovoltaïques semble faible, surtout si l'on considère que les prairies des aérodromes sont gérées de manière à être largement exemptes d'animaux sauvages. En outre, la diversité des espèces d'oiseaux est généralement plus grande dans les prairies naturelles que dans les prairies de monoculture et les prairies d'aérodrome. Ainsi, notre étude soutient le point de vue selon lequel le développement solaire est généralement préjudiciable à la faune sauvage à l'échelle locale* ». Cela les amène à suggérer que la conversion de certaines parties des terrains des aérodromes en installations photovoltaïques pourrait réduire le risque aviaire pour les avions.

De récentes études confirment cet effet significatif des CPV sur l'avifaune. Ainsi :

- Visser et al. (2019) constatent une diminution de la richesse et de la densité des espèces d'oiseaux au sein d'une CPV comparé au paysage environnant non transformé, cette différence de cortège d'espèces reflétant la perte d'espèces d'arbustes ou de milieux forestiers ;
- Hernandez et al. (R.R Hernandez et al. 2014) constatent en phase d'exploitation, un comportement d'aversion vis-à-vis des CPV par certaines espèces d'oiseaux, induisant une perte d'habitat pour les espèces utilisant précédemment le site comme terrain de chasse, d'alimentation ou de nidification.

Incidences des panneaux eux-mêmes

Suite à une étude menée sur une CPV implantée sur un aérodrome dans l'ouest de l'Ohio, DeVault et al. (2014) indiquent : « *Nous avons trouvé peu de preuves que les oiseaux utilisant des panneaux PV réagissaient à la lumière polarisée réfléchi par les panneaux PV ou par l'abondance ou la disponibilité accrue d'insectes attirés par les panneaux. Nous n'avons observé aucune perte d'oiseaux manifestement causée par un échouage ou une collision avec les panneaux, et nous avons rarement observé des oiseaux en train de fouiller sur ou à proximité des panneaux photovoltaïques (voir ci-dessous). De plus, plusieurs espèces d'oiseaux fortement insectivores (par exemple, les hirondelles et les*

moucherolles) étaient, en général, au moins aussi abondantes dans les prairies des aérodromes que sur les panneaux photovoltaïques ».

Une étude plus récente portant sur l'analyse de suivis de mortalité réalisés sur 10 CPV aux Etats-Unis, a mis en évidence une mortalité moyenne estimée à 2,49 oiseaux par mégawatt (MW) et par an (Kosciuch *et al.* 2020). Cette estimation, est légèrement inférieure à celle effectuée précédemment par Walston *et al.* (2016) qui inclut dans son analyse des centrales solaires à concentration bien plus mortifères mais qui n'ont que peu de points communs avec les CPV. Les cas de mortalité observés sur les CPV sont essentiellement dus à des collisions mais peuvent également résulter d'électrocutions.

Les espèces d'oiseaux impactées sont extrêmement variées. Parmi elles, les plus représentées sont la Tourterelle de Caroline (*Zenaida macroura*) et deux passereaux : la Sturnelle de l'Ouest (*Sturnella neglecta*) et l'Alouette hausse-col (*Eremophila alpestris*). Ces espèces partagent plusieurs caractéristiques, notamment le fait qu'elles vivent principalement au sol, qu'elles utilisent des habitats présentant une végétation à croissance relativement faible et qu'elles présentent des populations relativement importantes aux États-Unis.

Kosciuch *et al.* (2020) notent également une surreprésentation des oiseaux d'eau parmi les oiseaux retrouvés morts qui pourraient être liée à la proximité de grandes zones humides utilisées comme halte migratoire ou de zone d'hivernage. L'augmentation du nombre de cas de mortalité observés durant l'automne vient appuyer cette hypothèse. Toutefois, les centrales étudiées n'ont pas donné lieu au constat d'événements de mortalités de masse tels que ceux rencontrés sur d'autres infrastructures anthropiques lors de passages migratoires en grand nombre par mauvaises conditions de visibilité (tours, immeubles, plateformes en mer, éoliennes, etc.).

Ces résultats ne peuvent pas être extrapolés tels quels aux CPV françaises, les études précitées portant sur des sites implantés en zone désertique (Californie), de surface et de puissance parfois très importantes (jusque 1 206 ha pour 550 MW) ; et les mortalités observées étant très hétérogènes avec des variations inter-sites allant de 0,08 oiseau/MW à 9,26 oiseaux/MW. Ils suggèrent toutefois de vérifier ce risque d'incidence pour les espèces d'oiseaux de métropole et des DOM.

Les panneaux bifaciaux permettent de capter les rayons du soleil sur chaque face. Ils peuvent être installés horizontalement ou en diagonal comme les panneaux classiques – la face du dessous a alors un rendement plus faible que celle du dessus – ou verticalement pour capter majoritairement les rayons du matin et de l'après-midi mais moins ceux du zénith lorsque les prix du marché sont au plus bas (Fig. 11).

Installés verticalement, les panneaux bifaciaux présentent des similarités avec les parois vitrées réputées particulièrement mortifères pour les oiseaux (Loss *et al.* 2014). Les panneaux installés dans cette configuration présentent un risque collision accru pour les oiseaux et les chiroptères par rapport à des panneaux installés horizontalement ou en biais. Greif *et al.* (2017) ont montré que les chauves-souris semblent percevoir les surfaces verticales lisses comme des zones ouvertes et dégagées, une erreur qui entraîne souvent des collisions.

Suivant la hauteur à laquelle sont installés les panneaux, ceux-ci peuvent être utilisés par des oiseaux comme



Figure 11 : Panneaux bifaciaux (CNR)

reposoirs ou perchoirs lors de phase de chasse, ce qui peut avoir une influence sur l'abondance des oiseaux locaux et, par effet en chaîne, sur leur proies (McClanahan & Wolfe, 1993).

Dans les environnements arides, l'ombrage engendré par ces nouvelles structures peut également modifier l'abondance et la diversité des espèces d'oiseaux utilisant le site de la CPV (Dean, Milton, et Jeltsch 1999 ; Williams, Tieleman, et Shobrak 1999).

Incidences de la polarisation de la lumière

Certains auteurs suggèrent que des oiseaux pourraient confondre des surfaces réfléchissant la lumière polarisée, comme les panneaux photovoltaïques, avec la surface de l'eau et pourraient se blesser en tentant de se poser. Le problème serait d'autant plus important pour certains oiseaux d'eau comme les grèbes et les harles, car incapables de redécoller à partir de la terre ferme (Horváth et al. 2009).

Il a été démontré que les panneaux photovoltaïques réfléchissent une lumière polarisée qui attire les insectes aquatiques polarotactiques (Horváth et al., 2010 ; Blahó et al., 2012). Des prédateurs insectivores, dont des oiseaux tels que la Bergeronnette grise (*Motacilla alba*), la Bergeronnette printanière (*Motacilla flava*), la Pie bavarde (*Pica pica*), le Moineau domestique (*Passer domesticus*) et la Mésange charbonnière (*Parus major*), ont été observés en train de se nourrir d'insectes polarotactiques attirés par des sources de lumière polarisée telles que les vitres verticales, les feuilles de plastique noires horizontales et les routes asphaltées sèches (Kriska, Horváth, et Andrikovics 1998 ; Bernáth et al. 2008 ; Horváth et al. 2009). Bernáth et al. (2001) décrivent des oiseaux tels que le Milan noir (*Milvus migrans*), la Grande aigrette blanche (*Ardea alba*) et l'Hirondelle de cheminée (*Hirundo rustica*) essayant de s'abreuver à des feuilles de plastique, en émettant l'hypothèse que ce comportement pourrait être dû à une attraction sur des surfaces réfléchissant la lumière polarisée. L'étude décrit également la mortalité des oiseaux dans un lac d'huile usée en Hongrie, en attribuant à nouveau ce phénomène à l'attraction directe de la lumière polarisée ou aux insectes attirés par la lumière polarisée. Comme les panneaux solaires photovoltaïques sont solides, si cette hypothèse est correcte, il est peu probable qu'il y ait un danger significatif pour les oiseaux perchés qui tentent de s'abreuver, mais les hirondelles et les oiseaux apparentés pourraient présenter un risque de collision car les hirondelles sont connues pour boire "sur l'aile" (Bryant 1984).

Néanmoins, en l'état actuel des connaissances, aucune relation directe n'a été mise en évidence entre la polarisation de la lumière par les panneaux et les collisions d'oiseaux avec ces derniers. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour mieux comprendre la sensibilité des oiseaux à la lumière polarisée. Ceci participerait à la recherche de mesures de réduction à mettre en place pour réduire le risque de collision des oiseaux et des chiroptères (Lao et al. 2020).

Ghazi et Ip (2014) font référence aux oiseaux attirés par la chaleur des panneaux solaires pendant les mois d'été. Mais la problématique qu'ils étudient est celle du nettoyage des déjections en absence de pluie.

Incidences des clôtures et barrières

Des barrières ou clôtures inadaptées peuvent engendrer des blessures voire des mortalités pour certaines espèces. Les poteaux creux sont des pièges mortels pour les oiseaux (notamment cavernicoles) mais aussi pour les chauves-souris, les reptiles, les micromammifères voire pour certains insectes (Noblet 2010 ; McInturff et al. 2020). Les éléments pointus comme les barbelés ou les pointes en partie haute engendrent des blessures, parfois mortelles, aux oiseaux de bas vol ou de grande taille comme les faucons, les rapaces nocturnes en action de chasse ou les oiseaux d'eau lorsque la clôture longe ou enjambe un cours d'eau (Paige 2015). Les clôtures peu visibles constituent également des obstacles pour les Galliformes (perdrix, faisans, tétaras, etc.) qui peuvent entrer en collision et se blesser (Observatoire des Galliformes de Montagne 2018).

En résumé : le principal impact identifié jusqu'à présent par les scientifiques des CPV sur les oiseaux, demeure la perte d'habitat liée à l'altération voire à la destruction des milieux naturels favorables au bon déroulement de leur cycle de vie. En complément, quelques scientifiques commencent à étudier les incidences des panneaux photovoltaïques sur le comportement des oiseaux. Selon les espèces étudiées, deux patterns se distinguent, dont un comportement d'aversion des CPV ; ou à l'inverse, un attrait potentiel pour les milieux ouverts autour des panneaux ou par les panneaux eux-mêmes. Des mortalités par collision ont également été constatées auprès d'espèces spécialistes de milieux ouverts ou de zones humides, mais pas de manière systématique. Il est probable que les espèces soient affectées différemment par les CPV, en fonction des conditions d'habitats présentes au sein de l'emprise des parcs et à proximité de ceux-ci, des exigences écologiques propres à chacune des espèces concernées, de leur comportement alimentaire et des modalités de conception et de gestion des CPV et des panneaux eux-mêmes. Ces premiers résultats issus de la recherche scientifique à l'international, auraient avantage à être mieux caractérisés et quantifiés, notamment sur les cortèges d'espèces françaises de métropole et outre-mer.

4.4.5 Incidences sur les mammifères

Cas des chauves-souris

Il existe une documentation limitée sur la façon dont les CPV affectent directement ou indirectement les chauves-souris. Ce manque d'information est reconnu à l'échelle internationale et nationale.

Il a été démontré que les chauves-souris juvéniles cherchent à s'abreuver sur des panneaux lisses (Greif et Siemers 2010), mais cette étude ne fait pas spécifiquement référence aux panneaux solaires et ne quantifie pas le risque de collision ni l'impact écologique potentiel lié à ce comportement. Bien que ces auteurs n'aient signalé aucune mortalité au cours de leur étude, ils ont démontré que les chauves-souris perçoivent les surfaces lisses horizontales comme des plans d'eau et tentent à plusieurs reprises de s'y abreuver. Les panneaux lisses peuvent également affecter leur activité de recherche de nourriture, car elles risquent de se heurter ou de se blesser la mâchoire lorsqu'elles tentent de boire à leur surface. Les espèces étudiées par Greif et Siemers (2010) sont le Minioptère de Schreibers (*Miniopterus schreibersii*), le Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*), le Grand Murin (*Myotis myotis*) et le Grand rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*).

A l'instar des insectes et des oiseaux, il est possible que les CPV, en modifiant les conditions d'habitats, impactent l'activité chiroptérologique au sein des parcs et aux alentours. Une étude est actuellement menée en Angleterre à ce sujet⁸ ; une autre vient de débuter en France métropolitaine.

De même, des chercheurs hongrois travaillent également sur la modification du comportement des chauves-souris en contact avec des panneaux solaires⁹. Selon leurs premiers résultats (en cours de publication), ce comportement varie selon l'angle d'inclinaison des panneaux. Lorsque ces derniers présentent des angles inférieurs à 30°/35°, les chauves-souris confondent les panneaux avec des miroirs d'eau et cherchent à s'y abreuver. Ces observations corroborent ceux de Greif et Siemers (2010) et Montag et al (2016). En revanche, lorsque les panneaux présentent des angles supérieurs, les chauves-souris ne détectent plus les panneaux et entrent en collision.

Ainsi, les CPV pourraient constituer des pièges sensoriels pour ce groupe d'espèces, tel que suggéré par Greif et al. (2017).

Comme pour les oiseaux, les insectes piégés sur les panneaux solaires photovoltaïques réfléchissant la lumière polarisée pourraient attirer les chauves-souris insectivores et les

⁸ <https://www.garethjoneslab.com/solarfarms>

⁹ <http://mirrorproject.elte.hu/>

inciter à les chasser (Horváth et al. 2010). On ignore toutefois si cette situation pourrait être bénéfique pour les chauves-souris ou si elle présente un risque supplémentaire de création d'un piège écologique (comme pour les insectes).



Figure 12 : Chauve-souris en train de boire. Un grand Murin, s'approche d'une surface d'eau, ouvre la bouche et baisse la tête pour prendre une gorgée d'eau. Photo de Dietmar Nill issue de Grief et Siemers (2010)

Horváth et al. (2009) présentent une image d'une chauve-souris piégée dans un lac d'huile usée à Budapest et suggèrent que cela pourrait être dû au fait que la chauve-souris chassait des insectes polarotactiques attirés à la surface. Sachant que les insectes polarotactiques sont attirés par les panneaux solaires (Horváth et al. 2010; Blahó et al. 2012), les chauves-souris insectivores pourraient être indirectement attirées par les panneaux solaires photovoltaïques lorsque ceux-ci sont implantés à proximité de plans d'eau ou de zones humides.

En résumé : en attendant la publication de résultats issus d'études scientifiques en cours en Angleterre et en Hongrie, sur les incidences des CPV sur l'activité chiroptérologique en général et sur le comportement de certaines espèces en particulier, de nombreuses hypothèses restent émises. Parmi ces dernières – la perte d'habitats du fait d'un comportement d'aversion des chiroptères pour les CPV pourrait concerner l'ensemble des espèces, avec un report des individus vers les milieux adjacents (dont les haies environnantes) – hypothèse qui sera vérifiée en France dans les années à venir. Des recherches expérimentales ou d'observation sont également nécessaires et devraient être menées sur la base d'une espèce ou d'un groupe d'espèces en raison des différences de comportement et de la variation des exigences écologiques interspécifiques.

Cas des autres mammifères

Les incidences des CPV sur les autres mammifères sont également peu étudiées.

Concernant les petits mammifères : les CPV sont susceptibles d'être transparentes pour ces espèces dès lors que des passages à faune sont inclus dans les clôtures. En revanche, l'intérêt des emprises des CPV en termes de site d'alimentation pour ces espèces est à questionner ici, surtout s'il y a plus de zones imperméabilisées et de graminées, et moins d'insectes.

Concernant les grands mammifères : les clôtures, et donc la perte d'habitat et le fractionnement des milieux qu'elles engendrent, constituent une réelle préoccupation dans un contexte où ces parcs voient leur surface augmenter considérablement, atteignant couramment une centaine d'hectares et parfois 1 000 ha comme le projet Horizeo en Nouvelle-Aquitaine.

Bien que l'effet barrière des installations solaires ne soit pas encore étudié, il a été démontré que les effets « barrières » liés au développement de grandes infrastructures ont un impact sur les mouvements migratoires des grands mammifères et peuvent réduire la taille de leurs aires de répartition spatiale (Wingard *et al.* 2014 ; Wyckoff *et al.* 2018). Ainsi, les clôtures pleines, en créant un exclos, peuvent impacter les mammifères, mais aussi les oiseaux, voire les amphibiens et certains insectes. Elles peuvent également générer une fragmentation des milieux naturels, ou la perte directe d'habitat (par dégradation/destruction ou par interruption d'accès).

Des barrières ou clôtures inadaptées peuvent engendrer des blessures voire des mortalités pour certaines espèces. Les éléments pointus comme les barbelés ou les pointes en partie haute engendrent des blessures, parfois mortelles, aux animaux sauteurs (chevreuils, notamment juvéniles). Les clôtures non rigides constituent également des pièges pour les cervidés qui peuvent s'y trouver coincer.

Elles contraignent également le déplacement des individus dans l'espace et sur leurs territoires. Par extension, elles peuvent contribuer à augmenter la mortalité des individus en les contraignant à circuler au sein d'espaces dangereux (voies de circulation, terrains en impasse). Pour les groupes les plus mobiles (oiseaux, reptiles, insectes volants), cette séparation peut contribuer à fragmenter des territoires entraînant une perte d'attractivité de ces espaces (Katz, Tusseau, et Charaven 2014; Guiller *et al.* 2017).

4.4.6 Incidences sur l'herpétofaune

Moins mobiles que les espèces volantes, les reptiles et les amphibiens sont d'autant plus sensibles à l'altération ou à la destruction de leurs habitats naturels. En raison de l'importance des travaux en phase de construction, et selon les périodes auxquelles ces travaux sont réalisés, les CPV peuvent être une source d'impacts non négligeables sur les populations en place lorsque les projets sont envisagés dans des zones accueillant reptiles et/ou amphibiens. Là aussi, c'est l'intérêt d'une CPV comme site d'alimentation pour l'herpétofaune qui est à questionner, compte tenu de la présence de deux conditions d'habitats très contrastées : milieux ouverts à végétation rase vs milieux ombragés, recouverts par une structure hors sol créant des conditions peu favorables aux plantes nectarifères et aux insectes.

Dans son rapport étudiant les suivis environnementaux réalisés par des exploitants de CPV français, Enerplan (2020) met en évidence des tendances d'évolution de la patrimonialité des cortèges d'espèces de reptiles recensés principalement négatives entre la situation de l'état initial et les données collectées dans le cadre des suivis après construction : plus de 70 % de l'échantillon considéré comme exploitable présente une diminution de la valeur patrimoniale recensée et près de 30 % pas de tendance nette – neutre. Ces résultats n'ont toutefois pas été publiés dans une revue à comité de lecture.

L'installation de nouvelles structures pouvant faire office de perchoir pour des prédateurs peut également mettre en danger des espèces de lézards dans un mauvais état de

conservation, en augmentant potentiellement la pression de prédation (Hawlana *et al.* 2010).

4.4.7 Cas des espèces exotiques envahissantes

Les études scientifiques portant sur le photovoltaïque abordent rarement la question des espèces exotiques envahissantes (EEE). Une étude publiée par Enerplan et ses partenaires cite le cas d'une espèce exotique envahissante (le Robinier faux acacia), observée suite aux travaux dans une CPV implantée en contexte méditerranéen, qui a pu être éradiquée localement par la mise en œuvre de mesures adaptées (Enerplan *et al.* 2020).



Figure 13 : Renouée du Japon sur une CPV de Charente-Maritime (2022)

A contrario, certains suivis environnementaux montrent la colonisation des emprises des CPV par des EEE, et ce compte tenu du défrichement et de la création de milieux ouverts favorables aux espèces pionnières. C'est le cas dans une CPV du département des Landes où un développement important d'une EEE sous les panneaux n'a pu être éradiqué durant les années couvertes par le suivi environnemental.

5. Cas des CPV flottantes

De nombreux projets de centrales solaires flottantes émergent depuis quelques années en France comme dans le reste du monde. Dans ces CPV, les panneaux sont fixés sur des flotteurs installés sur des plans d'eau généralement artificiels, pas ou peu exploités. Quelques projets pilotes, de petite taille, commencent également à voir le jour en mer.

Les CPV flottantes présentent plusieurs avantages pour les développeurs et exploitants : un meilleur rendement (dû à une topographie plane, à la plus faible température à la surface de l'eau, à des dépôts de poussières ou de pollen moins importants et à l'absence d'ombre sur les panneaux), une installation simple par assemblage de modules, un contrôle du foncier lui aussi facilité (Leggieri et Semeraro 2020), une synergie possible avec des centrales hydroélectriques, une limitation du risque de vandalisme, etc. Ces installations présentent également des inconvénients : des flotteurs encombrants lors du transport, des coûts de construction et d'exploitation plus importants, des problématiques d'amarrage et de résistance au vent, et une réglementation encore mouvante dans de nombreux pays (Blengini 2020).

5.1 Modalités de conception, d'installation et d'exploitation des CPV flottantes

Ces projets nécessitent, en grande partie, des infrastructures similaires à celles des projets au sol (clôtures, voies d'accès au plan d'eau, raccordement des rangées de panneaux au poste de livraison électrique puis au réseau de transport, etc.). Les différences portent essentiellement sur l'usage plus rare de clôtures, sur l'absence de pistes carrossables au sein de la centrale, sur le système de fixation des rangées de panneaux (sur des flotteurs amarrés au fond du plan d'eau ou à la berge) et sur la nature du raccordement qui n'est enfoui que sur la partie terrestre.

Le système d'amarrage peut varier en fonction du substrat au fond du plan d'eau (ancres, poids, plots en béton fixés au fond, etc.).

En phase de construction et d'exploitation, l'usage de bateaux et de plongeurs peut être nécessaire. Cela peut conduire à la création d'un embarcadère.

5.2 Incidences sur les composantes physiques

Armstrong (2020) a développé un cadre théorique permettant de hiérarchiser les effets pour l'évaluation des impacts du CPV flottant sur les masses d'eau douce, en mettant l'accent sur les interactions écologiques. Il décrit comment la présence de panneaux photovoltaïques flottants peut modifier considérablement l'interface air-eau, avec des implications ultérieures sur la météorologie de surface, les flux air-eau et les fonctions physiques, biogéochimiques et biologiques du plan d'eau récepteur.

Il a été démontré que les CPV flottantes, c'est-à-dire les cellules solaires photovoltaïques posées sur la surface des plans d'eau, réduisent l'évaporation des plans d'eau et sont considérés comme des options prometteuses, notamment lorsqu'ils sont appliqués aux réservoirs hydroélectriques en régions arides. On connaît toutefois mal l'impact du CPV flottant sur les fonctions physiques, biogéochimiques et biologiques du plan d'eau hôte, à tel point que ces lacunes pourraient entraîner de mauvais choix sociétaux et une incohérence de politique publique, compte tenu notamment des engagements des Etats membres de l'Europe de maintien de ces masses d'eau en bon état chimique et écologique (Armstrong *et al.* 2020).

5.2.1 Incidences sur les sols et les habitats naturels

Selon Costa (2017), les travaux relatifs au raccordement électrique – entre la plate-forme et le bord du réservoir ou plan d'eau – constitue l'un des risques d'incidences le plus

important sur l'environnement de la CPV flottante pilote qu'il étudie. Cette centrale portugaise, installée sur un réservoir hydroélectrique, est composée de 840 panneaux de type REC PE 260 répartis en quatre groupes de 210 chacun et qui, ensemble, forment une plate-forme flottante qui soutient toute la structure et facilite l'accès pour la maintenance (environ 1 400 m²). Le projet n'occupe que 0,012 % de la superficie du lac, il est donc considéré comme un très petit projet.

Outre le transport de l'électricité entre la plate-forme et le bord du réservoir, l'installation du système d'amarrage pendant la phase de construction a différents impacts significatifs selon le type de sol au fond du réservoir (Costa, 2017).

L'installation d'une CPV flottante peut également nécessiter la construction d'un embarcadère, ce qui peut occasionner d'autres impacts environnementaux.

5.2.2 Incidences sur les champs électromagnétiques

Les câbles électriques peuvent être posés ou enterrés au fond du réservoir, installés dans la colonne d'eau ou à la surface. Costa (2017) décrit les incidences des différentes options qui peuvent être retenues :

- si le câble est enterré au fond du réservoir, en plus des effets électromagnétiques (éventuellement de moindre intensité), il peut y avoir des impacts négatifs sur la géologie et la géomorphologie pendant la phase de construction ;
- si le câble est installé dans la colonne d'eau, la création de champs électromagnétiques peut affecter le comportement des poissons et l'orientation spatiale de plusieurs autres groupes d'espèces aquatiques ;
- enfin, si le câble électrique est placé à la surface, il aura des incidences mineures sur le paysage et les champs électromagnétiques.

5.2.3 Cas du microclimat au niveau des panneaux photovoltaïques

L'ombrage créé par les panneaux se traduit par une modification des conditions microclimatiques, dont une diminution de l'évaporation et de la luminosité, avec des conséquences potentielles sur la productivité primaire et secondaire au sein de l'écosystème lacustre.

Costa (2017) n'a pas observé de modification de la température dans la colonne d'eau malgré la présence d'une CPV flottante ; mais celle-ci ne représentait que 0,012 % de la surface miroir totale du plan d'eau concerné.

Exley *et al.* (2021) ont simulé les effets des panneaux solaires photovoltaïques flottants sur le régime thermique des lacs. Les modifications constatées au sein de la masse d'eau varient fortement en fonction du taux de couverture du miroir d'eau ; celles-ci pourraient altérer radicalement les processus biogéochimiques, avec des implications majeures sur certains services écosystémiques et les coûts de traitement de l'eau. Ces auteurs alertent sur la nature extrême des résultats obtenus en fonction des différents cas simulés par leur modèle, selon différentes combinaisons de vitesse du vent et de rayonnement solaire. Ces impacts pourraient être comparables, voire plus importants, que le changement climatique. Ainsi, et selon la façon dont ils sont utilisés, les panneaux photovoltaïques flottants pourraient atténuer certains effets du changement climatique sur les plans d'eau et être un outil utile pour les gestionnaires de ces milieux face aux changements de la qualité de l'eau ; ou à l'inverse, ils pourraient induire des impacts délétères sur ces écosystèmes.

D'autres études sont en cours, dont certaines sont menées en France comme le projet SoLAKE qui vise à évaluer les effets des CPV flottantes sur la biodiversité aquatique et le fonctionnement des écosystèmes lacustres par l'Université Paul Sabatier de Toulouse et l'Université Claude Bernard – Lyon.

5.3 Incidences sur les composantes biogéochimiques

5.3.1 Concentration en oxygène dissous au sein de la colonne d'eau

La concentration d'oxygène dissous au sein de la colonne d'eau dépend de la température de l'eau, car la solubilité des gaz dans l'eau diminue avec l'augmentation de la température et vice versa. En étudiant une CPV pilote installée sur le réservoir d'Alto Rabagão (Portugal), Costa (2017) a observé un changement dans les mesures locales d'oxygène dissous dans l'eau après l'installation de la structure flottante. Ces mesures mériteraient d'être répliquées sur une installation de taille industrielle.

5.3.2 Autres composants chimiques

La dégradation des matériaux utilisés au sein des CPV peut modifier les propriétés physiques et chimiques de l'eau ; ce processus peut être atténué par l'utilisation de matériaux difficiles à dégrader et n'ayant pas d'impact sur la qualité de l'eau.

Une évaluation quantitative du risque microbien a été réalisée sur un réservoir de stockage d'eau, utilisé pour la production d'eau potable, en lien avec des projets d'implantation de panneaux photovoltaïques flottants. Il a été conclu que la couverture de 10 à 30 % des réservoirs provoquerait une libération de métaux lourds, mais que ceux-ci seraient en grande partie éliminés par le traitement ultérieur de l'eau potable et ne remettrait pas en cause la potabilité de l'eau pour les consommateurs finaux (Mathijssen *et al.* 2020).

5.4 Incidences sur les composantes biologiques

5.4.1 Cas du benthos

L'ombrage causé par la présence de la structure affecte les communautés benthiques, qui vivent sur ou dans le substrat du lac (Costa 2017).

5.4.2 Cas du phytoplancton

Haas *et al.* (2020) ont étudié des scénarios dans lesquels les modules solaires couvrent de plus en plus le lac, réduisant ainsi l'apport de lumière de 0 % à 100 %. L'accent est mis sur la croissance des microalgues en surveillant la concentration en chlorophylle-a totale comme indicateur de la biomasse. La réponse de l'écosystème lacustre dépend fortement du taux de couverture du lac par les modules : pour des couvertures inférieures à 40 %, les modules ont peu ou pas d'effet sur la production des microalgues. Pour des couvertures modérées (40-60 %), la production des algues est stoppée en raison de la réduction de la lumière dans le réservoir, ce qui peut contribuer à lutter contre la prolifération de cyanobactéries lorsque celles-ci sont un problème rencontré dans le plan d'eau. Enfin, une couverture importante de modules solaires peut éradiquer complètement les efflorescences algales (qui peuvent avoir d'autres impacts sur la santé de l'écosystème, mais qui sont à la base du réseau trophique au sein de ces écosystèmes).

5.4.3 Cas des poissons, oiseaux et mammifères (chiroptères)

Costa (2017) indique que la présence d'une CPV flottante peut provoquer un effet de barrière pour certains oiseaux, chauves-souris et poissons, de refuge pour certaines communautés sous-marines ou d'attrait pour certaines espèces d'oiseaux et de chauves-souris qui chercheraient à s'alimenter. Il est possible que certaines espèces évitent la zone en vol, entrent en collision ou recherchent la structure pour s'y installer.

Les oiseaux d'eau voient la surface de leur habitat réduite par celle des CPV flottantes. Les chiroptères et oiseaux s'abreuvant en vol à la surface de l'eau sont aussi exposés au risque de collision avec ces structures.

5.4.4 Cas des récifs coraliens et du biofouling

En mer, les impacts négatifs potentiels sur les coraux et les herbiers marins sont évoqués (Hooper, Armstrong, et Vlaswinkel 2021).

Costa (2017) indique que bien que l'effet récif et la création d'habitat puissent être considérés comme créant des conditions favorables au développement de certaines espèces marines, celles-ci peuvent également favoriser l'installation d'espèces exotiques envahissantes. Cet encrassement biologique (anglais biofouling), c'est-à-dire la formation d'une couche d'êtres vivants sur une surface artificielle en contact permanent ou fréquent avec de l'eau, peut être considéré comme gênante et nécessiter des traitements mécaniques (brossage, grattage) ou chimiques (antifouling, biocides) pour limiter ce phénomène. Ces actions peuvent avoir des incidences sur l'état écologique du plan d'eau.

6 Mesures d'atténuation et de suivi

Au regard des incidences possibles des CPV sur la biodiversité relevées dans la littérature scientifique, il importe de développer, construire et exploiter les projets de CPV en appliquant de façon vertueuse la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) à tous les stades du cycle de vie de ces projets de manière à atteindre, comme la réglementation l'impose, une absence de perte nette de biodiversité.

6.1 Mesures d'évitement

6.1.1 Définition

L'évitement, première famille de mesure de la séquence ERC, doit garantir l'absence totale d'incidences d'un projet sur une entité environnementale donnée (ex. un milieu naturel à très forts enjeux écologiques ; l'ensemble des habitats et des spécimens d'une espèce protégée ; etc.). Il comprend les trois grandes catégories suivantes :

- L'évitement d'opportunité (faire ou ne pas faire le projet), qui vise à vérifier l'opportunité d'installation de CPV sur un territoire, comparée à d'autres filières énergétiques potentiellement moins impactantes par exemple ;
- L'évitement géographique (faire ailleurs ou faire moins), qui vise à privilégier l'implantation des CPV sur des sites à moindre enjeux environnementaux ; de même qu'à définir l'emprise des CPV de manière à empêcher toute atteinte à certaines entités environnementales présentes au droit ou à proximité du site ;
- L'évitement technique (faire autrement) qui vise à garantir l'absence totale d'incidences sur une entité environnementale donnée au sein même de l'emprise du projet.

6.1.2 Recommandations par familles de mesures d'évitement

Concernant l'évitement d'opportunité

Au regard de la littérature scientifique, la question du développement de la filière solaire photovoltaïque est rarement discutée comparée à d'autres alternatives économiques ou à d'autres filières énergétiques. Ces considérations sont plutôt abordées au sein des études de prospectives de RTE, négaWatt ou de l'ADEME par exemple.

Certains chercheurs s'interrogent toutefois sur l'opportunité des CPV présentant d'immenses emprises surfaciques, de plusieurs centaines à milliers d'hectares, et pour lesquelles les risques d'incidences sur le climat à l'échelle locale (du fait notamment de la modification de l'albédo, du taux d'évapotranspiration et de la création d'îlots de chaleur) comme internationale (par l'émission de GES contenus dans les sols) posent question. Ceci suggère **d'éviter la conception de CPV sur d'immenses surfaces**, qui plus est en milieux forestiers, en zones humides ou sur certains plans d'eau pour lesquels la modification de leurs cycles biogéochimiques pourrait engendrer la libération de méthanes et d'oxydes nitreux.

Concernant l'évitement géographique

A l'échelle internationale

L'évitement des milieux naturels pour l'implantation des CPV est fortement recommandé par la communauté scientifique. Il est ainsi souvent rappelé que le solaire photovoltaïque peut être installé sur des infrastructures existantes (toits, façades) ou des surfaces déjà artificialisées (ombrières de parking par exemple). En optimisant l'utilisation de ces espaces déjà anthropisés, cela réduit d'autant la pression sur les milieux naturels, et les atteintes à leurs fonctions écologiques et aux services écosystémiques associés (Schwarzbözl *et al.* 2006 ; Polman *et al.* 2016).

D. McDonald (2020) indique qu'au regard de l'importance des emprises des CPV, l'implantation géographique des parcs à l'écart des espaces naturels devrait être une priorité et leur conception devrait être la plus judicieuse possible, même si les écosystèmes concernés ne sont pas menacés. En Californie, plusieurs chercheurs conseillent d'orienter le déploiement de l'énergie solaire vers les milieux désertiques qui combinent des niveaux élevés d'insolation solaire avec des enjeux relativement faibles de biodiversité (Tsoutsos, Frantzeskaki, et Gekas 2005 ; Turney et Fthenakis 2011).

Il est également recommandé d'utiliser des zones dégradées ou même l'environnement urbain (Rebecca R Hernandez, Hoffacker, et Field 2015). Par exemple, il a été estimé que 200 000 ha de terres dégradées seraient suffisants pour atteindre tous les objectifs de la Californie en matière d'électricité renouvelable (Cameron, Cohen, et Morrison 2012).

Certains chercheurs pensent que les développeurs devraient privilégier autant que possible l'installation des CPV sur des terres agricoles, pour éviter d'altérer les terres dans leur état végétatif naturel comme les forêts ou les prairies. Brick (2019) estime ainsi que la conversion de terres agricoles non plantées en CPV avec de la végétation sous les panneaux, constitue une amélioration globale de l'environnement local qui peut apaiser les inquiétudes des riverains et éviter le risque de dégradation supplémentaire de l'environnement. Sous réserve toutefois de maintien d'un co-usage agricole et énergétique.

A l'échelle nationale

L'ensemble des acteurs des EnR s'accordent à dire également que la meilleure façon d'éviter les impacts précités sur la biodiversité est d'implanter les CPV en dehors des milieux naturels, sur des sites imperméabilisés ou fortement anthropisés (bâtiments, parking, friches industrielles, cultures intensives, etc.). Ce qui réduit d'autant la pression sur le foncier. Combinée avec des toits végétalisés, ces installations peuvent fournir un habitat à certaines espèces de plantes ou d'insectes et assurer un certain nombre de services écosystémiques en zones urbaines (Vijayaraghavan 2016 ; Nash *et al.* 2016).

En 2011, la DGEC du MTE émettait déjà des recommandations relatives à l'évitement des sites à forts enjeux écologiques :

- **Préservation de la biodiversité** : éviter les sites protégés, protection des espaces agricoles, forestiers et naturels ;
- **Economie d'espace** : recherche de sites dégradés, à faible valeur agronomique et/ou en complément d'autres activités (pâturage...) ;
- **Utilisation durable des sols** : pas de substitution à des parcelles agricoles en cours d'exploitation ;
- Maîtrise du risque naturel ;
- Protection du paysage et du cadre de vie qui se traduit souvent par la recherche d'une faible co-visibilité avec les habitations et les sites patrimoniaux.

Ces recommandations sont reprises dans les différentes études de l'ADEME, ainsi que par les collectivités ou services de l'Etat (DREAL PACA 2019; DDT de l'Isère 2021).

Depuis, de récentes dispositions encouragent le développement de CPV en cohabitation avec des activités agricoles.

A noter que :

- s'il convient de privilégier les sites imperméabilisés et délaissés, certains d'entre eux peuvent malgré tout présenter un intérêt du point de vue de la biodiversité. En effet, la nature y reprend ses droits parfois ce qui amène au développement d'espèces spécifiques souvent protégée (cas des terrils, carrières abandonnées, anciens terrains militaires, friches diverses, installations de stockage de déchets, etc.) ;
- les résultats encourageant sur la possibilité d'un co-usage en milieux agricoles laissent penser que le développement de CPV en zones cultivées peut être

également encouragé, sous réserve que les projets n'affectent pas le potentiel agronomique des parcelles ;

Par ailleurs, certains choix de sites ou d'emprises peuvent chercher à contourner des milieux naturels ou habitats d'espèces à forts enjeux (ex. : arbre support à insectes saproxyliques¹⁰, gîtes à chiroptères, mare à amphibiens, zone humide, population d'espèce végétale protégée, etc.). Pour autant, ces mesures ne relèvent pas systématiquement de « l'évitement », ces dernières ne garantissant pas l'absence totale d'incidences sur les milieux ou espèces ciblées compte tenu de la modification des conditions d'habitats environnants et des fonctions écologiques associées. Pour plus d'efficacité, un évitement total doit être recherché, ce qui suppose un éloignement suffisant des CPV avec les milieux naturels ou aires de répartition spatiale des espèces ciblées.

Concernant l'évitement technique

En l'état actuel des connaissances, la mise en place de dispositifs techniques au sein même des emprises des CPV, garantissant l'absence totale d'incidences sur une entité environnementale donnée reste méconnue.

6.1.3 Approches et outils disponibles

Concernant les critères à prendre en compte lors de la phase d'évitement, la loi de reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (2016) a introduit la notion de « services écosystémiques ». Ainsi, l'article L. 110-1 du code de l'environnement indique que « I. - Les espaces, ressources et milieux naturels terrestres et marins, les sites, les paysages diurnes et nocturnes, la qualité de l'air, les êtres vivants et la biodiversité font partie du patrimoine commun de la nation. Ce patrimoine génère des services écosystémiques et des valeurs d'usage. [...] II. - Leur connaissance, leur protection, leur mise en valeur, leur restauration, leur remise en état, leur gestion, la préservation de leur capacité à évoluer et la sauvegarde des services qu'ils fournissent sont d'intérêt général et concourent à l'objectif de développement durable qui vise à satisfaire les besoins de développement et la santé des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Elles s'inspirent, dans le cadre des lois qui en définissent la portée, des principes suivants : [...] 2° Le principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable. Ce principe implique d'éviter les atteintes à la biodiversité et aux services qu'elle fournit ; [...] ».

Opportunité des projets en milieux naturels

En compléments des objectifs quantitatifs de développement des différentes filières énergétiques inscrits au sein des programmations nationale et régionale (cf. § III), l'opportunité de développement de projets énergétiques peut être étudiée au cas par cas à l'échelle d'un territoire donné.

En complément des approches sectorielles basées sur la disponibilité foncière ou la capacité de production et la rentabilité économique des projets, des chercheurs en Sciences Humaines et Sociales et des économistes ont développé des méthodes permettant de raisonner de manière plus globale et transversale, en intégrant l'ensemble des besoins et usages à l'échelle d'un territoire donné. Plusieurs approches et méthodes sont possibles, certaines étant basées uniquement sur l'identification des ressources disponibles (vent, niveau d'ensoleillement, débits des cours d'eau, etc.) ; d'autres sur la comparaison de scénarios intégrant un ensemble d'enjeux et contraintes cumulés au sein d'un même territoire (enjeux énergétiques, paysagers, agricoles, etc. : cf. grilles multicritères élaborées dans le cadre des [plans paysages et transition énergétique](#)) ; d'autres sur des approches de type « Nexus », qui visent à vérifier l'équilibre entre les demandes d'origine anthropiques et la disponibilité des ressources nécessaires au sein d'un territoire donné, en se basant sur les flux d'énergie, d'eau et de nourriture (Biggs et

¹⁰ Une espèce saproxylique réalise tout ou partie de son cycle de vie dans le bois en décomposition, ou des produits de cette décomposition. Elle est associée à des arbres tant vivants que morts.

al. 2015). Encore peu ou pas utilisés, ces deux derniers types d'approche permettent pourtant de s'affranchir des logiques sectorielles, et de veiller à une meilleure acceptation sociale des projets en objectivant les choix effectués sur la base des besoins et usages de chaque territoire.

A noter enfin les nombreuses alternatives possibles au sein de la filière solaire elle-même, notamment celles qu'offre désormais l'agrivoltaïsme, de nombreuses innovations technologiques permettant désormais un co-usage entre la production agricole et la production d'énergie solaire à grande échelle (ADEME 2021).

Implantation géographique des projets

Implanter les projets sur des sites à « moindre impact environnemental » suppose d'avoir comparé et hiérarchisé différents scénarios d'implantation de ces derniers ; et ce, en tenant compte des contraintes géotechniques et des enjeux environnementaux et socio-économiques, et à une échelle spatiale adaptée. Au regard des attendus du code l'environnement précités (cf. article L. 110-1), cette analyse suppose une comparaison des incidences de ces différents scénarios, sur la biodiversité et les services écosystémiques associés.

Concernant l'évaluation de services écosystémiques : des bureaux d'étude et chercheurs ont développé plusieurs approches et méthodes (CGDD 2017). Mais force est de constater que ces dernières ont été peu ou pas été utilisées. Dernièrement, l'INRAe et la DREAL Haut de France ont publié un guide d'évaluation des services écosystémiques basé sur une méthode participative (Campagne et Roche 2021) ; et une évaluation de ces services à l'échelle de la région Hauts-de-France est en cours.

Concernant la comparaison de scénarios d'implantation des projets : l'approche la plus utilisée est la comparaison de choix de sites ou d'emprise des projets à l'aide de grilles multicritères, dont une synthèse est présentée au sein du Centre de ressources « ERC » de l'OFB¹¹. A noter également qu'au sein du guide technique d'éco-conception des centrales photovoltaïques, publié dans le cadre du programme PIESO, une matrice décisionnelle est présentée (Vellot et al. 2020). Les auteurs indiquent travailler à son actualisation afin d'intégrer les liens fonctionnels entre les sites potentiels d'implantation des CPV et les sites classés ou à statuts (Natura 2000, ZNIEFF de type I, etc.).

6.2 Mesures de réduction

6.2.1 Généralités

Aux Etats-Unis, de nombreuses agences gouvernementales et autres organisations fournissent des lignes directrices en matière de conception des CPV (BRE 2014). De telles directives ont proliféré mais les orientations spécifiques actuelles en matière de prise en compte de la biodiversité varient d'un État à l'autre selon les enjeux. Par exemple, en Caroline du Nord, les directives indiquent que certaines espèces d'arbres protégées peuvent être en danger si elles sont enlevées pour minimiser l'ombrage des panneaux (Lovelady 2014). Les directives d'autres États vont plus loin et détaillent activement la manière avec laquelle la biodiversité peut être gérée au sein des CPV en donnant des conseils sur la manière d'élaborer des plans de gestion conservatoire des sites concernés. Par exemple, en Arizona, on note l'importance des eaux de surface pour la faune et la flore, et on souligne que les CPV devraient être installées en dehors des périodes de reproduction clés (Arizona Game and Fish Department 2010).

Au Royaume-Uni, où les CPV sont généralement situées dans des prairies ou des pâturages, les recommandations comprennent la préservation des zones de nidification, l'ensemencement de bandes de pollen et de nectar, l'utilisation de moutons pour le pâturage autour des panneaux et la restitution des terres à leur utilisation d'origine lors du démantèlement du projet (BRE 2014).

¹¹ <https://erc-biodiversite.ofb.fr/erc/eviter/methodes-et-outils/comparer-differentes-alternatives-ou-scenarii-dun-projet>

Les mesures d'atténuation pour l'environnement aquatique comprennent l'éloignement de l'installation des zones à haute valeur de conservation et des zones sensibles, la création de zones tampons pour limiter l'érosion et le ruissellement autour des eaux de surface, et la réduction de l'utilisation d'herbicides (Grippio, Hayse, et O'Connor 2015).

Afin de minimiser la perte de ces fonctions clés du sol, Choi *et al.* (2020) recommandent que des pratiques appropriées de préservation du site soient adoptées pour minimiser la perturbation de la couche arable pendant la construction.

6.2.2 Hauteur des panneaux

La hauteur au sol apparaît comme un critère déterminant pour limiter l'ombrage et éviter la création de microclimats. Une hauteur minimale de 0,80 m était recommandée dans le Guide de l'étude d'impact des installations photovoltaïques au sol (DGEC 2011). Un projet d'arrêté relatif à l'artificialisation mis en consultation en mai 2022 propose que les CPV dont le point bas des modules est inférieur à 1,10 m soient systématiquement comptabilisées dans la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers.

Ces recommandations mériteraient d'être précisées en prenant en compte les retours d'expériences les plus récents, notamment ceux inspirés de l'agrivoltaïsme.

6.2.3 Densité et distance inter-rangs

Les retours d'expériences issus des expérimentations photovoltaïques montrent que la densité de panneaux influe directement sur la production agronomique. Touil *et al.* (2021) recommandent ainsi de ne pas couvrir plus de 25 % de la surface cultivée de panneaux photovoltaïques afin de ne pas affecter la croissance des plantes.

En ce qui concerne les CPV flottantes, Haas *et al.* (2020) préconisent de ne pas couvrir plus de 40 % des plans d'eau afin de ne pas affecter la croissance du phytoplancton.

Dans une étude allemande, non publiée dans une revue à comité de lecture, Peschel *et al.* (2019) estiment qu'il existe une différence importante entre les CPV à large espacement de rangs et celles où cet espacement est plus resserré. Sur la base de l'observation des peuplements d'insectes, d'oiseaux nicheurs et de reptiles, notamment des lézards de souches, l'étude conclut que plus la largeur des bandes ensoleillées entre les rangs de modules est significative, plus le nombre d'espèces et d'individus s'accroît sur ces espaces dénués de panneaux.

Ainsi, il est possible d'aménager des habitats fortement adaptés à la faune reptilienne, en particulier aux lézards des souches, au sein même des CPV en planifiant et en mettant en œuvre convenablement les zones construites. Par exemples :

- espacements variables entre les rangées de modules suivant les espèces présentes sur les sites équipés ;
- création d'espaces libres et entretien adapté des zones périphériques, dont par exemples, gestion conservatoire de la végétation et enrichissement structurel (Peschel *et al.* 2019).

Reste à comparer le bénéfice apporté par ces aménagements avec l'altération des habitats résultant de l'installation de la CPV elle-même.

6.2.4 Gestion conservatoire de la végétation

A l'issu du chantier de construction, une condition essentielle au repeuplement ou au maintien des cortèges d'espèces végétales et animales initialement présents au sein des CPV, est la gestion conservatoire de la végétation au sein des espaces situés entre les rangs de modules, autour des emprises des panneaux voire au sein des OLD (sous réserve de compatibilité avec les normes anti-incendie).

Plusieurs modes de gestion sont envisageables, tous n'apportant pas les mêmes garanties de maintien de la flore et de la faune :

- fauche tardive de la végétation (à certaines saisons et après atteinte d'une hauteur de tige des plantes à définir en fonction des espèces présentes, notamment les insectes, et de leurs besoins pour effectuer leur cycle de vie) ;
- gestion extensive pérenne ;
- ou pâturage extensif.

Ces pratiques se distinguent nettement de celles utilisées pour l'agriculture intensive ou pour la production d'énergie issue de la biomasse (Peschel *et al.* 2019) et ont montré leur efficacité. Ainsi, Blaydes *et al.* (2021) constatent qu'il est possible d'accroître la capacité des CPV à accueillir des insectes pollinisateurs en appliquant des mesures de gestions adaptées. Ils formulent dix recommandations à ce sujet, l'objectif étant de restaurer ou de créer des zones d'alimentation et de reproduction, en adoptant des pratiques de gestion adaptées aux espèces ciblées au sein de la CPV, et en augmentant l'hétérogénéité et la connectivité du paysage à une large échelle (250 m à 5 km). Le gain apporté par ces mesures doit bien sûr être comparé à la perte éventuelle de biodiversité engendrée par l'implantation de la CPV elle-même (dégradation voire destruction d'habitats naturels, polarisation de la lumière, ombrage causé par les panneaux, etc.).

De la même manière, Guiller *et al.* (2017) émettent des recommandations visant à améliorer la qualité environnementale des CPV pour les papillons de prairies :

1. revégétaliser les zones entre et sous les rangées de panneaux solaires une fois installés ;
2. adapter la fréquence des fauchages à la phénologie des plantes ;
3. augmenter à la fois la diversité des espèces de plantes hôtes des larves de papillons et la couverture des ressources florales.

En complément, toutes les mesures doivent être prises pour lutter contre l'importation et la dissémination d'espèces exotiques envahissantes (EEE) en phase de chantier puis d'exploitation ; et pour les éradiquer en cas de développement malgré les précautions prises. Des recommandations très concrètes sont désormais disponibles au sein de nombreux guides diffusés via le centre national de ressources « [espèces exotiques envahissantes](#) » de l'OFB.

6.2.5 Modalités de contention périmétrale des CPV

Afin de protéger les installations contre d'éventuelles dégradations ou vols, les CPV sont entourées d'une clôture destinée à éviter les intrusions.

L'implantation d'une clôture constitue un élément important de rupture de corridors écologiques, notamment pour les grands mammifères terrestres mais également pour la petite faune terrestre si l'infrastructure est mal conçue. En effet, pour qu'une espèce puisse se maintenir sur un territoire défini, elle a besoin d'espaces vitaux dans lesquels elle va pouvoir se nourrir, se reproduire et se réfugier ; elle doit également pouvoir se déplacer entre ces espaces pour répondre à ses besoins (Cerema 2019).

La barrière créée par l'infrastructure peut séparer les différents habitats des espèces nécessaires à l'accomplissement de leurs cycles biologiques (suppression des accès à leurs sites d'alimentation, à leurs milieux de reproduction...). Le niveau des impacts sera alors très variable en fonction de la présence, de la taille et de l'accessibilité ou non d'habitats de substitution.

Selon les espèces, l'augmentation des distances de déplacement pourra s'accompagner d'effets négatifs sur le bilan énergétique et sur la dynamique des populations. Si des habitats de substitution ne sont pas disponibles, si la qualité n'est pas suffisante ou si la taille est trop petite, l'espèce devra quitter le territoire ou déclinera (Cerema 2019).

Notons également que les perturbations d'une espèce peuvent aussi affecter favorablement ou défavorablement toutes les autres espèces qui interagissent avec elle. Il est pour cela nécessaire d'avoir une approche par « chaîne » et non seulement par espèce.

En affectant voire en supprimant les possibilités de déplacement des espèces, l'infrastructure limite les processus de dispersion, c'est-à-dire d'émigration d'individus d'une population (le plus souvent des juvéniles) vers une autre et concomitamment l'apport d'individus d'une population depuis une autre. L'infrastructure peut ainsi interrompre les flux entre les sites favorables d'espèces et empêcher la colonisation de nouveaux habitats. La rupture des continuités écologiques peut alors entraîner une baisse de la diversité génétique des populations par une diminution du taux d'échange de gènes au sein des populations. Elle conduit ainsi à une réduction de la diversité génétique de chacune des populations locales et une plus grande différenciation entre elles (dérive génétique). À terme, la probabilité d'adaptation des populations à de nouvelles conditions environnementales diminue. La réduction de la diversité génétique d'une population augmente également sa consanguinité et donc le risque sanitaire face à une épidémie, pouvant conduire également à son extinction. La suppression des possibilités de dispersion peut aussi conduire à la disparition de petites populations satellites qui ne doivent leur maintien qu'à l'apport d'individus venant de l'extérieur (Vignon & Suez, 2017).

En restreignant le déplacement des individus sur leurs territoires, les clôtures peuvent contribuer à augmenter la mortalité des individus en les contraignant sur des espaces dangereux (voies de circulation, terrains en impasse).

Des clôtures mal conçues peuvent également constituer un risque de collision pour les oiseaux ou occasionner des blessures aux animaux qui tenteraient de les franchir (pointes, barbelés, grillages souples, etc.).

A contrario, délimiter un espace qui devient peu fréquenté en phase d'exploitation, peut participer à un « effet réserve » qui peut être favorable à certaines espèces subissant de fortes pressions à l'extérieur.

6.2.6 Atténuation de la polarisation de la lumière

L'attrait qu'exercent les panneaux solaires sur certaines espèces peut être atténué par l'installation, sur les panneaux, d'une grille blanche constituée de bandes de 2 à 20 mm d'épaisseur afin de réduire ou d'éliminer la polarisation de la lumière (Horvath et al, 2009 ; 2010). Ces grilles ont prouvé leur efficacité sur trois familles d'insectes aquatiques. Les surfaces à haut degré de polarisation et à polarisation horizontale qui avaient des bordures blanches non polarisantes étaient 10 à 26 fois moins attrayantes pour ces insectes que les mêmes panneaux non équipés de grille. Bien que les panneaux solaires puissent agir comme des pièges écologiques, la fragmentation de leur zone d'activité solaire diminue leur attrait pour les insectes polarotactiques.

Autre amélioration technologique possible : l'installation de revêtements matifiant anti-reflets. Száz et al. (2016) ont évalué l'hypothèse selon laquelle ces derniers, utilisés pour augmenter l'efficacité énergétique des panneaux solaires, réduisent également la quantité de lumière polarisée qu'ils reflètent et leur attrait pour les insectes aquatiques. L'expérience a montré que les différentes espèces d'insectes ont réagi diversement :

- Comme prévu par les modèles, le nombre de taons et leurs comportements de recherche d'eau ont été considérablement réduits par les revêtements antireflets ;
- Sous un ciel couvert, les panneaux mats et brillants (c'est-à-dire sans revêtement) restaient des sources de lumière polarisée détectables par les insectes. La matité réduisait modestement le degré de polarisation de la lumière réfléchie, mais pas suffisamment pour que moins de chironomes soient attirés par ces panneaux ;
- Les éphémères préféraient les panneaux mats sous un ciel couvert ;
- Les traitements antireflets sont les plus susceptibles de réduire la lumière polarisée et de profiter aux insectes aquatiques sous un ciel ensoleillé et lorsqu'ils sont utilisés en conjonction avec une grille blanche non polarisante ; mais ils peuvent à l'inverse exacerber la gravité de leurs effets négatifs sur ces mêmes espèces par temps couvert.

Si la réduction de l'attractivité associée à l'application de grilles blanches ou à l'installation d'un revêtement antireflet matifiant s'additionnent, ces dispositifs pourraient être

déployés concomitamment. En réduisant l'attraction des insectes autour des installations, les oiseaux et les chauves-souris insectivores pourraient éviter la zone où les proies sont devenues moins abondantes.

Fritz *et al.* (2020) ont montré que l'application d'une couche microtexturées sur la surface des panneaux pouvait simultanément améliorer la récolte de la lumière solaire et limiter l'effet néfaste de la pollution lumineuse polarisée pour les insectes (aquatiques) polarotactiques.

Cependant, avant d'en généraliser l'usage, l'efficacité des grilles blanches doit être éprouvée sur d'autres zones biogéographiques et espèces, et le coût économique associé avec la réduction de la surface noire active des panneaux solaires quantifié (Black et Robertson 2020).

A l'heure actuelle, la mesure de conservation la plus efficace consiste à éloigner les panneaux solaires et autres polariseurs artificiels des corridors ripariens qui constituent des centres d'activité et de dispersion des insectes aquatiques (Száz *et al.* 2016).

6.2.7 Mesures spécifiques aux CPV flottantes

Les câbles raccordant la plateforme flottante à la berge peuvent être installés au fond du plan d'eau, maintenus dans la colonne d'eau ou placés en surface. Costa (2017) souligne l'importance d'identifier laquelle des trois positions possibles engendre l'impact le plus facile à atténuer. Si le câble est installé au fond du lac, la mesure d'atténuation à appliquer serait de l'enterrer, en utilisant des poids. Si le câble est maintenu dans la colonne d'eau, la mesure d'atténuation à appliquer serait de le blinder. Si le câble est placé en surface, il sera nécessaire de placer la CPV flottante aussi près que possible du barrage, afin de réduire la longueur du câble. Même ainsi, si la CPV flottante est importante, cette mesure devient difficile à appliquer. En outre, en raison de l'incertitude liée à l'intensité des champs électromagnétiques et à la manière dont ils pourraient affecter les poissons, cet impact doit être surveillé.

Le marnage potentiel au sein du plan d'eau doit également être pris en compte pendant la phase de construction, afin de positionner le câble et d'en réduire la longueur et de minimiser, ainsi, les impacts des champs électromagnétiques sur la faune aquatique.

En complément, l'emplacement de l'onduleur doit être étudié, soit sur la structure flottante soit à terre. Si l'onduleur est placé sur la structure flottante, le courant sera transporté vers la rive en courant alternatif. De cette façon, le transport entraîne des pertes supplémentaires. En revanche, si l'onduleur est placé à terre, le courant est transporté entre la structure et l'onduleur en courant continu. Dans ce cas, la maintenance est facilitée par un accès simple et les pertes de transport sont moindres. Du point de vue environnemental, le placement de l'onduleur sur la structure flottante a un impact indirect lié à la maintenance, et donc à l'augmentation de la fréquentation du site par l'homme, ce qui peut provoquer des nuisances pour la faune et des risques de déversements accidentels d'huile et de carburant par les bateaux.

Puisque l'entretien des panneaux ne peut être exclu, et compte tenu du fait que les espèces ont tendance à détecter et à réagir de manière plus importante aux champs électromagnétiques créés par le courant continu, Costa (2017) en conclut que le placement de l'onduleur dans la structure flottante est préférable.

6.3 Mesures de compensation

Troisième étape de la séquence ERC, la compensation écologique intervient lorsque les impacts sur la biodiversité engendrés par des projets, des plans ou des programmes n'ont pu être évités ou réduits. Des mesures de compensation doivent alors être mises en œuvre pour permettre de générer des gains au moins égaux aux pertes engendrées.

6.3.1 Dimensionnement de la compensation des atteintes à la biodiversité

Cinq étapes sont nécessaires au dimensionnement de la compensation des atteintes à la biodiversité :

1. caractériser les composantes environnementales du site affecté par le projet et les incidences négatives résiduelles significatives engendrées ;
2. évaluer les pertes de biodiversité (dites aussi « besoin de compensation » ou « dette environnementale ») ;
3. caractériser les composantes environnementales du site de compensation ; puis vérifier son équivalence qualitative avec le site affecté par le projet, au regard des espèces, des habitats et des fonctions présentes et de leurs trajectoires potentielles ;
4. évaluer les gains de biodiversité engendrés par les actions envisagées sur le site de compensation (dits aussi « réponse » ou « offre de compensation ») ;
5. ajuster la proposition de compensation, selon un processus itératif, afin de vérifier l'équivalence quantitative entre les pertes et les gains de biodiversité.

Cet ajustement peut prendre en compte les « pertes intermédiaires » éventuellement engendrées par les modalités de mise en œuvre de la mesure de compensation et le temps nécessaire à un retour à un état fonctionnel du site de compensation, une fois les actions écologiques réalisées (Figure 14).

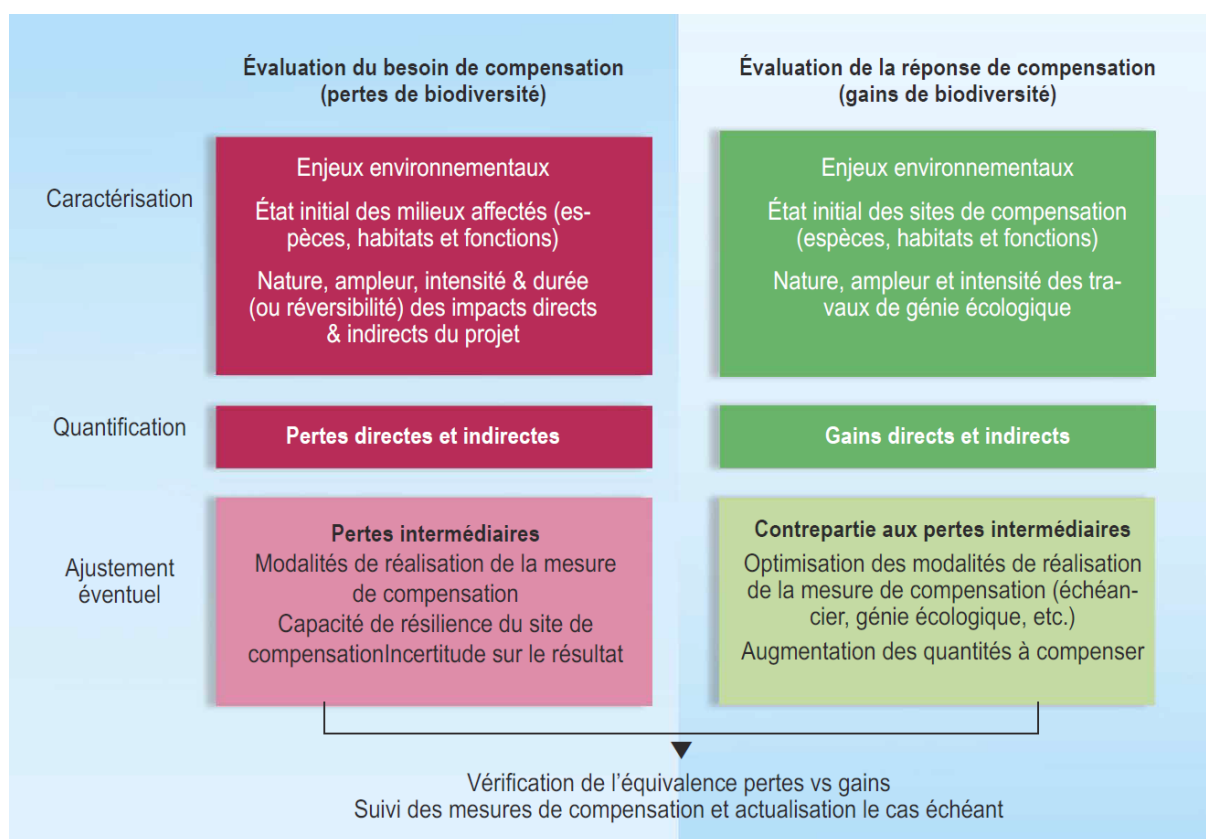


Figure 14 : Étapes du dimensionnement des pertes et gains de biodiversité (adapté de de Billy et al. 2015)

L'OFB a publié un ouvrage qui présente un état de l'art des différentes approches disponibles de dimensionnement de la compensation, analyse les méthodes qui en découlent, dresse un bilan des pratiques en vigueur et propose des pistes de réflexion en matière de dimensionnement à venir des mesures de compensation (Truchon, de Billy et Padilla 2020).

Celui-ci peut être complété par un guide rédigé par Andreadakis *et al.* (2021) qui propose un cadre national pour concevoir et dimensionner les mesures de compensation écologique. Il vise à contribuer à l'harmonisation et l'amélioration des pratiques, et à renforcer l'efficacité de la mise en œuvre de la séquence ERC.

A ce jour il n'existe ni guide ni méthode portant spécifiquement sur le dimensionnement de la compensation pour les CPV ; alors même que cette activité présente certaines spécificités qui le justifierait :

- Artificialisation des sols par couverture et gestion mais avec très peu d'imperméabilisation ;
- Modification des cortèges d'espèces, dérangement de la faune, perte d'habitats, fractionnement des milieux naturels, etc. – mais pas destruction totale et irréversible de ces milieux.

6.3.2 Nature des mesures de compensation

A l'instar du dimensionnement de la compensation, peu ou pas de recommandations sont disponibles au sein de la littérature scientifique en matière de choix et d'éligibilité des mesures de compensation. On notera toutefois des propositions de mesures au sein du guide PIESO (Vellot, Cluchier, et Illac 2020).

Au sein des projets proposés au cas par cas, les mesures de compensation des CPV correspondent souvent à de « l'ouverture de milieux naturels » par débroussaillage massif ou alvéolaire, parfois sur plusieurs dizaines d'hectare. Ce type de mesures vise à ré-ouvrir

certaines milieux naturels en voie de fermeture compte tenu de la déprise agricole. Si elles permettent la réapparition d'espèces végétales et animales inféodées aux milieux ouverts, elles engendrent en contrepartie la destruction d'espèces végétales et animales, ou d'habitats naturels et de fonctions écologiques (réduction de la séquestration du carbone, forte perturbation des chaînes trophiques, forte réduction de la fonction écologique de pollinisation). Ainsi, cette mesure de compensation correspond elle-même à un impact environnemental qu'il faudrait compenser. De plus, cette action d'ouverture du milieu n'est pas pérenne et il faudra la répéter plusieurs fois en phase de fonctionnement de la CPV. La pérennité de la compensation étant un des piliers de la compensation, l'absence de pérennité de ce type de mesure devrait remettre en cause sa pertinence.

Concernant les pertes de fonctions écologiques dues à de telles ouvertures de milieu, il n'existe que peu de retours d'expérience démontrant leur compensation efficace et peu ou pas d'outils permettant de les quantifier. Par exemple, la forte réduction de la fonction écologique de pollinisation liée à des ouvertures de milieux lors des travaux d'installation d'une CPV n'est quasiment jamais compensée. En effet, restaurer cette fonction écologique reposant sur un réseau d'interactions entre plantes et pollinisateurs est très difficile à réaliser (voire impossible) et très longue à atteindre ; et elle sera donc associée à une rupture temporelle et spatiale dans la continuité de cette fonction. D'autres ruptures temporelle et spatiale dans la continuité de fonctions écologiques se retrouvent fréquemment concernant la séquestration du carbone (souvent compensée par la création d'îlot de senescence) ou la perturbation des chaînes trophiques (peu compensée en général).

6.4 Mesures de suivis

Les modalités de suivi doivent être précisées dans l'étude d'impact (L. 122-1-1, L. 122-5 II du code de l'environnement). Dans la doctrine nationale relative à la séquence éviter, réduire compenser les impacts sur le milieu naturel (2012), la référence aux modalités de suivi est ainsi énoncée : « À partir des propositions du maître d'ouvrage, l'arrêté d'autorisation fixe les modalités essentielles et pertinentes de suivi de la mise en œuvre et de l'efficacité des mesures. Des indicateurs doivent être élaborés par le maître d'ouvrage et validés par l'autorité décisionnaire pour mesurer l'état de réalisation des mesures et leur efficacité. Le maître d'ouvrage doit mettre en place un programme de suivi conforme à ses obligations et proportionné aux impacts du projet ». La Loi pour la reconquête de la biodiversité du 8 août 2016 a rendu obligatoire le dépôt des données brutes de biodiversité pour les porteurs de projet sur la plateforme de dépôt légal de données de biodiversité (DEPOBIO).

Afin de mieux appréhender les impacts des CPV sur leur environnement, Guiller *et al.* (2017) préconisent d'analyser les impacts environnementaux d'un gradient de centrales installées dans divers habitats, et les suivre dans la durée. Ils considèrent que les industriels seront probablement amenés, dans les années à venir, à travailler main dans la main avec les scientifiques pour mener des expériences BACI (Before-After, Control-Impact) qui donneront des informations qualitatives et quantitatives pour comprendre comment la biodiversité est affectée par une nouvelle installation.

6.4.1 Evaluation de l'évolution de la qualité écologique des milieux concernés par une CPV

L'indice de qualité écologique (IQE) caractérise la biodiversité à l'échelle globale d'un site. Il a été conçu pour évaluer des sites aménagés, accueillant du public, à vocation commerciale, industrielle ou de loisirs. Applicable partout en France métropolitaine, l'IQE évalue les enjeux patrimoniaux, la fonctionnalité écologique et la diversité des espèces et des habitats.

L'OFB a publié un guide méthodologique relatif à la mise en œuvre de l'IQE (Delzons *et al.* 2021) qui poursuit un triple objectif :

1. Fournir une vision globale des problématiques sur le site, en les mettant en perspective avec le contexte local ;
2. Mettre en avant des pistes d'actions pour conserver ou améliorer la biodiversité ;
3. Réaliser un suivi dans le temps afin de juger de l'efficacité des mesures mises en place en faveur de la biodiversité.

6.4.2 Evaluation de l'évolution spatio-temporelle d'espèces concernées par une CPV avant / après son installation

Une boîte à outils a été développée dans le cadre du projet PIESO (Vellot *et al.* 2020) visant à fournir un cadre conceptuel et pratique pour optimiser les suivis écologiques des centrales photovoltaïques. L'objectif est à la fois de permettre (i) aux bureaux d'études de réaliser des suivis plus pertinents et plus fiables, (ii) aux scientifiques de pouvoir exploiter les données issues de ces suivis dans des analyses plus fines et à plus grandes échelles et (iii) aux aménageurs d'améliorer l'intégration écologique de leurs installations. Elle s'adresse donc aux équipes techniques afin qu'elles prennent en compte les particularités des centrales photovoltaïques dans leurs protocoles de suivis, la saisie et l'analyse de données.

Les résultats obtenus par Brunod et Lelièvre (2020) confirment le besoin d'une meilleure standardisation des protocoles de suivis de la biodiversité au sein des CPV. Ils proposent de suivre 3 taxons indicateurs du potentiel écologique : la flore, les Rhopalocères et les Orthoptères.

6.4.3 Evaluation de la mortalité

Huso *et al.* (2016) proposent une méthode de suivi de la mortalité dans les installations solaires basées sur les méthodes actuellement utilisées dans les installations éoliennes mais adaptées aux conditions spécifiques rencontrées dans les CPV. Celle-ci prend en compte les biais de détection liés au couvert végétal, à l'efficacité des chercheurs et à la persistance des cadavres pour aboutir à une estimation de la mortalité exprimée à l'intérieur d'un intervalle de confiance.

6.4.4 Evaluation de l'efficacité des mesures ERC

Le suivi qui a pour objet de s'assurer de l'efficacité de l'atteinte des objectifs d'une mesure d'évitement, de réduction ou de compensation ne constitue pas à lui seul une mesure ; il est une partie intrinsèque et obligatoire de cette dernière.

Il est nécessaire de poursuivre les efforts de recherche. Le suivi du peuplement des centrales solaires à l'issue de leur construction fait notamment souvent défaut (Peschel *et al.* 2019).

7. Points de vigilance

7.1 Planification

Pour réduire la perte d'habitats causée par la construction de centrales photovoltaïques au sol, la sélection de sites de moindre impact environnemental est cruciale. Par exemple, les terrains inutilisés des aérodromes, peu propices à la flore et à la faune, pourraient être utilisés pour localiser certains projets (DeVault et al. 2014). Une autre solution proposée par Smith et Dwyer (2016), est que le développement des centrales photovoltaïques devrait éviter les zones qui sont habitées par des espèces sensibles ou en mauvais état de conservation (ADEME et al. 2019).

7.2 Comparaison avec d'autres activités anthropiques

Lorsque l'on souhaite promouvoir la filière photovoltaïque, il est tentant de vouloir comparer ses impacts avec ceux d'autres activités réputées plus problématiques. Plusieurs études font ainsi le constat des impacts de l'agriculture intensive sur la biodiversité (remembrements, pesticides, etc.) pour défendre des projets photovoltaïques qui s'y substitueraient ou qui seraient, parfois, simplement envisagés à proximité. Par exemple, Peschel et al. (2019) mettent en avant le fait que l'agriculture est une des principales causes des atteintes aux espèces animales en Allemagne et que le modèle agricole intensif, aujourd'hui dominant, est une des principales causes de déclin de la biodiversité.

Si la modification ou la suppression de certaines activités anthropiques dommageables à la biodiversité peuvent parfois être envisagées comme mesure de compensation, la simple dénonciation ou même la réduction de leurs impacts ne peut suffire à justifier un projet si celui-ci ne démontre pas lui-même son absence d'impact sur l'environnement.

Les mesures de compensation des atteintes à la biodiversité visent un objectif d'absence de perte nette, voire de gain de biodiversité. Elles doivent se traduire par une obligation de résultats et être effectives pendant toute la durée des atteintes. Elles ne peuvent pas se substituer aux mesures d'évitement et de réduction. Si les atteintes liées au projet ne peuvent être ni évitées, ni réduites, ni compensées de façon satisfaisante, celui-ci n'est pas autorisé en l'état (Article L163-1. du Code de l'environnement).

7.3 Effets des panneaux, de l'absence de panneaux ou des mesures de gestions

Plusieurs études mettent en avant la capacité des CPV à « améliorer la biodiversité » (Peschel et al. 2019 ; Blaydes et al. 2021). Il ne s'agit pas là d'une qualité intrinsèque des CPV mais du résultat de la mise en œuvre de mesures volontaires de gestion de la végétation ou de la création d'habitats ou de micro-habitats favorables à certaines espèces ciblées (insectes, reptiles, etc.) dans les secteurs des CPV préservés de l'implantation de panneaux, souvent en périphérie ou entre les rangs de panneaux.

Il peut s'agir, par exemple, de restaurer des prairies pour conserver les insectes pollinisateurs et restaurer des services écosystémiques (Hernandez-Santana et al. 2013 ; Blaauw et Isaacs 2014 ; Schulte et al. 2017 ; Walston et al. 2021). Ces études restent encore trop rares à l'échelle nationale et notamment sur le pourtour méditerranéen.

Il importe que les bénéfices apportés par ces mesures de gestion soient regardés au regard des impacts globaux de chaque projet de CPV, notamment lorsque ceux-ci sont envisagés dans des espaces naturels. Surtout, si ces mesures entrent dans le cadre de la séquence ERC pour permettre au projet d'atteindre une absence de perte nette de biodiversité, elles doivent faire l'objet d'un engagement pérenne et d'un suivi permettant d'attester de leur bonne mise en œuvre et de leur efficacité.

7.4 Des impacts pas toujours correctement pris en compte

Martinez (2020) s'est intéressée à la façon dont avait été appliquée la séquence ERC lors du développement de quatre projets de CPV en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Trois mesures importantes ressortent de l'analyse des projets de parcs photovoltaïques : la prise en compte de la biodiversité dans les Obligations Légales de Débroussaillage, dans le raccordement au réseau électrique, et dans les sondages archéologiques. Ces trois éléments ne sont effectivement pas toujours pris en compte dans les études mais ont pourtant des impacts notables sur l'environnement. Certains bureaux d'études rencontrent des difficultés à mettre en œuvre des mesures de réduction concernant ces éléments, notamment car ces derniers dépendent d'acteurs extérieurs.

8. Conclusion

Les centrales photovoltaïques au sol (CPV) peuvent affecter les écosystèmes naturels de multiples façons, et ce, tout au long de leur cycle de vie. Les incidences de la construction et de l'exploitation de ces installations sur la biodiversité sont liées notamment :

- en phase amont, à l'extraction des matériaux nécessaires notamment à la construction des panneaux et à leur ancrage ;
- en phase de chantier, à l'adaptation de l'emprise du parc aux besoins de l'installation des panneaux et de circulation des engins (défrichements et terrassements si nécessaires, déblais/remblais) et à la modification des cortèges d'espèces végétales voire à l'érosion des sols qui peut en découler ; à l'installation des différents dispositifs nécessaires à l'exploitation (fossés, pistes, plateformes techniques et bases-vie) tassant les sols ou modifiant les modalités de circulation de l'eau ; à l'augmentation de la fréquentation humaine de milieux naturels initialement isolés ;
- en phase d'exploitation,
 - au maintien d'un milieu artificiellement herbacé au niveau des délaissés et entre les rangées de panneaux (fauche ou pâturage réguliers et installation d'un cortège d'espèces végétales essentiellement rudérales), et clos (excluant toute intrusion sur site par des espèces animales de grandes tailles) ;
 - à la couverture partielle ou totale des sols, et à l'altération des conditions physiques au-dessus des panneaux (création de grandes surfaces lisses polarisant la lumière, augmentation de la température), comme en dessous (modification des conditions édaphiques par couverture et ombrage des sols, création d'un microclimat, d'un champ électromagnétiques, etc.) ; etc.

Ces différentes pressions peuvent engendrer une modification durable des cortèges d'espèces de flore et de faune initialement présents, du fait :

- de la modification des cortèges floristiques et phytosociologiques pouvant altérer la mosaïque d'habitats initialement présente ;
- ou de l'atteinte à la dynamique de certaines populations d'espèces, compte tenu du dérangement voire de la mortalité des individus, lié :
 - à un comportement d'aversion vis-à-vis des CPV et à la perte d'habitats qui en résulte,
 - ou à l'inverse, à un comportement d'attrait, qui, pour certaines espèces, peut représenter un piège écologique (collision, affamement, etc.),
 - à l'altération ou à l'interruption des déplacements par interruption des connexions biologiques entre les habitats au sein du parc et avec les milieux naturels adjacents, fragmentation des milieux naturels, interruption ou concentration des flux d'individus, etc.

Certains risques d'incidences existent également hors site d'implantation des panneaux, causés par l'extraction et le transport de matériaux de construction, perturbant la flore et la faune loin de l'installation elle-même (Lovich et Ennen 2011).

Malgré l'ensemble de ces hypothèses, les centrales solaires au sol ont fait l'objet de peu d'études scientifiques, notamment à l'échelle nationale où le besoin de retours d'expérience est urgent pour argumenter les conditions d'application de la séquence ERC. Les impacts les plus documentés sont liés à la destruction/altération des milieux naturels en phase d'installation et d'exploitation (ex : dégradation, destruction irréversible ou fragmentation d'habitats ; modification du fonctionnement d'un écosystème (Devauze et al. 2019) et au dérangement de certaines espèces en particulier.

- En France : d'une manière générale, les retours d'expérience demeurent assez peu consolidés et la littérature scientifique analysée n'a pas permis de dresser une liste

des principaux habitats ou espèces les plus sensibles ou, au contraire, les moins sensibles, à l'installation et à la présence de parcs solaires au sol français (ADEME *et al.* 2019). Concernant les incidences éventuelles sur la faune et la flore, c'est principalement la dégradation voire la perte d'habitats qui est citée, tandis que les impacts sur les individus de type perturbation du comportement voire création de pièges écologiques, blessures ou mortalités restent à étudier.

- A l'international : la connaissance des incidences des parcs photovoltaïques au sol sur la biodiversité souffre également d'un manque crucial d'études scientifiques robustes (protocole de type BACI, suivis à long terme portant également sur des sites « contrôles »). Ainsi, plusieurs hypothèses émises par différents chercheurs (Lovich et Ennen 2011 ; Horváth *et al.* 2009 ; Northrup et Wittemyer 2013) – dont la mortalité, les effets des champs électromagnétiques, les changements climatiques locaux et régionaux, la pollution de l'air (poussière), la consommation d'eau et la pollution lumineuse, l'altération et la fragmentation des habitats et la rupture des continuités écologiques, etc. – nécessiteraient d'être vérifiées.

Récemment, les études scientifiques tendent à s'intensifier et à mettre en évidence des incidences, parfois insoupçonnées, des parcs photovoltaïques sur la biodiversité. Il y a lieu dans tous les cas d'éviter les affirmations spéculatives selon lesquelles les impacts écologiques des parcs photovoltaïques au sol seraient « négligeables » (Katzner *et al.* 2013) voire même positifs (Enerplan *et al.* 2020) alors même que cela reste à étudier.

Les énergies renouvelables contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais doivent être développées de manière à réduire tant que possible leurs impacts sur la faune et la flore, en équilibrant les besoins d'atténuation du changement climatique et de conservation de la nature (IPBES, GIEC 2021). Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux apprécier les effets associés aux centrales photovoltaïques, ce qui permettra ensuite de mieux mesurer, anticiper et atténuer les impacts de ces projets sur les habitats naturels et la faune.

Il convient enfin de noter que les effets bénéfiques mesurés sur les CPV sont rarement inhérents à la technologie photovoltaïque elle-même mais découlent d'une application rigoureuse de la séquence ERC avec pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits, voire de mesures d'accompagnement volontaires. Un projet envisagé dans un milieu présentant déjà un intérêt floristique ou faunistique et ne prévoyant pas de mesures de gestion adaptées présentera nécessairement un bilan négatif pour les habitats naturels et les espèces qui les utilisent.

Des mesures existent et doivent être mises en œuvre pour concevoir et exploiter des CPV respectant la biodiversité : il s'agit en premier lieu d'orienter les projets en toitures ou sur des sites dégradés (hors des espaces naturels terrestres et lacustres). Il convient ensuite de s'inspirer des retours d'expériences, notamment ceux issus de l'agrivoltaïsme, pour limiter les emprises aux sols (pieux plutôt que fondations) et réduire autant que possible la couverture et l'ombrage en rehaussant et en espaçant les structures supportant les panneaux. Enfin, les CPV ne devrait pas s'étendre sur des surfaces trop importantes afin de ne pas constituer des obstacles incontournables pour les grands mammifères et d'éviter l'effet « îlot de chaleur ».

Les travaux de R&D doivent être menés pour éprouver des dispositifs visant à réduire l'attractivité des panneaux pour les insectes polarotactiques et les chauves-souris.

Enfin, des mesures pérennes, favorables aux espèces présentes initialement, doivent être mises en œuvre, dès la mise en service de la CPV, pour assurer, autant que possible, une renaturation du site. Ces mesures doivent faire l'objet d'un suivi de leur efficacité durant toute la période d'exploitation de la CPV jusqu'à son démantèlement.

9. Bibliographie

- ADEME. 2019. « Évaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de centrales photovoltaïques ». <https://www.ademe.fr/evaluation-gisement-relatif-zones-delaissées-artificialisées-propices-a-l'implantation-centrales-photovoltaïques>.
- . 2021. « Recueil de retours d'expériences sur les systèmes PV en terrains agricoles et fiches techniques récapitulatives ».
- . 2022a. « Prospective - Transitions 2050 - Feuilleton Sols ».
- . 2022b. « Transitions 2050 - Feuilleton Mix électrique ».
- ADEME, Deloitte, C Devauze, M Planchon, F Lecorps, M Calais, et M Bori. 2019. « Etat de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts ». Deloitte Développement durable, Biotope, ADEME.
- Agostini, A, M Colauzzi, et S Amaducci. 2021. « Innovative Agrivoltaic Systems to Produce Sustainable Energy: An Economic and Environmental Assessment ». *Applied Energy* 281 (janvier): 116102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102>.
- Amaducci, Stefano, Xinyou Yin, et Michele Colauzzi. 2018. « Agrivoltaic Systems to Optimise Land Use for Electric Energy Production ». *Applied Energy* 220 (juin): 545-61. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>.
- Andreadakis, A, C Bigard, N Delille, F Sarrazin, T Schwab, OFB, Cerema, CGDD, et AgroParisTech. 2021. « Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique - Guide de mise en oeuvre ». Commissariat général au développement durable.
- Arizona Game and Fish Department. 2010. « Guidelines for Solar Development in Arizona ».
- Armstrong, Alona, Ralph R Burton, Susan E Lee, Stephen Mobbs, Nicholas Ostle, Victoria Smith, Susan Waldron, et Jeanette Whitaker. 2016. « Ground-level climate at a peatland wind farm in Scotland is affected by wind turbine operation ». *Environmental Research Letters* 11 (4): 044024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044024>.
- Armstrong, Alona, Nicholas J Ostle, et Jeanette Whitaker. 2016. « Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling ». *Environmental Research Letters* 11 (7): 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.
- Armstrong, Alona, Trevor Page, Stephen J Thackeray, Rebecca R Hernandez, et Ian D Jones. 2020. « Integrating environmental understanding into freshwater floatovoltaic deployment using an effects hierarchy and decision trees ». *Environmental Research Letters* 15 (11): 114055. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbf7b>.
- Armstrong, Alona, Susan Waldron, Jeanette Whitaker, et Nicholas J Ostle. 2014. « Wind Farm and Solar Park Effects on Plant-Soil Carbon Cycling: Uncertain Impacts of Changes in Ground-Level Microclimate ». *Global Change Biology* 20 (6): 1699-1706. <https://doi.org/10.1111/gcb.12437>.
- Arnold, Sarah E J, et Lars Chittka. 2012. « Illumination Preference, Illumination Constancy and Colour Discrimination by Bumblebees in an Environment with Patchy Light ». *Journal of Experimental Biology* 215 (13): 2173-80. <https://doi.org/10.1242/jeb.065565>.
- Association négaWatt. 2018. « Scénario négaWatt 2017-2050 ».

- Barron-Gafford, Greg A, Rebecca L Minor, Nathan A Allen, Alex D Cronin, Adria E Brooks, et Mitchell A Pavao-Zuckerman. 2016. « The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger Solar Power Plants Increase Local Temperatures ». *Scientific Reports* 6 (1). <https://doi.org/10.1038/srep35070>.
- Barron-Gafford, Greg A, Mitchell A Pavao-Zuckerman, Rebecca L Minor, Leland F Sutter, Isaiah Barnett-Moreno, Daniel T Blackett, Moses Thompson, et al. 2019. « Agrivoltaics Provide Mutual Benefits across the Food-energy-water Nexus in Drylands ». *Nature Sustainability* 2 (9): 848-55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- Bernáth, B, G Kriska, B Suhai, et G Horváth. 2008. « Wagtails (Aves: Motacillidae) as insect indicators on plastic sheets attracting polarotactic aquatic insects ». *Acta zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, n° 54: 145-55.
- Bernáth, B, G Szedenics, G Molnár, G Kriska, et G Horváth. 2001. « Visual ecological impact of “Shiny black anthropogenic products” on aquatic insects: Oil reservoirs and plastic sheets as polarized traps for insects associated with water ». https://www.researchgate.net/publication/279596351_Visual_ecological_impact_of_Shiny_black_anthropogenic_products_on_aquatic_insects_Oil_reservoirs_and_plastic_sheets_as_polarized_traps_for_insects_associated_with_water.
- Biggs, Eloise M, Eleanor Bruce, Bryan Boruff, John M.A Duncan, Julia Horsley, Natasha Pauli, Kellie McNeill, et al. 2015. « Sustainable Development and the Water-energy-food Nexus: A Perspective on Livelihoods ». *Environmental Science & Policy* 54 (décembre): 389-97. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>.
- Billy, Véronique de, Julien Tournebize, Geneviève Barnaud, Marc Benoît, François Birgand, Josette Garnier, Benoît Lesaffre, et al. 2015. « Compenser la destruction de zones humides. Retours d'expérience sur les méthodes et réflexions inspirées par le projet d'aéroport de Notre-Dame-des-Landes (France) ». *Natures Sciences Sociétés* 23 (1): 27-41. <https://doi.org/10.1051/nss/2015008>.
- Blaauw, Brett R, et Rufus Isaacs. 2014. « Flower Plantings Increase Wild Bee Abundance and the Pollination Services Provided to a Pollination-Dependent Crop ». Édité par Yann Clough. *Journal of Applied Ecology* 51 (4): 890-98. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12257>.
- Black, Theodore V, et Bruce A Robertson. 2020. « How to Disguise Evolutionary Traps Created by Solar Panels ». *Journal of Insect Conservation* 24 (2): 241-47. <https://doi.org/10.1007/s10841-019-00191-5>.
- Blahó, Miklós, Ádám Egri, András Barta, Györgyi Antoni, György Kriska, et Gábor Horváth. 2012. « How Can Horseflies Be Captured by Solar Panels? A New Concept of Tabanid Traps Using Light Polarization and Electricity Produced by Photovoltaics ». *Veterinary Parasitology* 189 (2-4): 353-65. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.04.016>.
- Blaydes, H, S.G Potts, J.D Whyatt, et A Armstrong. 2021. « Opportunities to Enhance Pollinator Biodiversity in Solar Parks ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145 (juillet): 111065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>.
- Blengini, G. 2020. « Floating photovoltaic systems: state of art, feasibility study in Florida and computational fluid dynamic analysis on hurricane resistance ». Turin.
- BRE. 2014. « Biodiversity Guidance for Solar Developments ». ds G E Parker and L Greene.
- Brunod, P, et H Lelièvre. 2020. « Synthèse des résultats de l'étude préalable à l'évaluation du potentiel d'accueil de la biodiversité au sein des centrales photovoltaïques (Phase 1 du programme PHOTODIV) ».
- Bryant, D.M. 1984. « Reproductive Energetics of Two Tropical Bird Species ». *The Auk*, vol. 101, no. 1. www.jstor.org/stable/4086219.

- Cameron, D. Richard, Brian S Cohen, et Scott A Morrison. 2012. « An Approach to Enhance the Conservation-Compatibility of Solar Energy Development ». Édité par Juan A Añel. *PLoS ONE* 7 (6): e38437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038437>.
- Campagne, C.S, et P.K Roche. 2021. « Guide pour la prise en compte des services écosystémiques dans les évaluations des incidences sur l'environnement ». DREAL Hauts-de-France.
- Cerema. 2019. « Clôtures routières et ferroviaires & faune sauvage ». Cerema.
- CGDD. 2017. « Évaluation environnementale. La phase d'évitement de la séquence éviter, réduire, compenser, (ERC). Actes du séminaire du 19 avril 2017 ». <https://side.developpement-durable.gouv.fr/ACCRDD/doc/SYRACUSE/389347/evaluation-environmentale-la-phase-d-evitement-de-la-sequence-eviter-reduire-compenser-erc-actes-d>.
- Choi, Chong Seok, Alexander E Cagle, Jordan Macknick, Dellena E Bloom, Joshua S Caplan, et Sujith Ravi. 2020. « Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure ». *Frontiers in Environmental Science* 8 (août). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00140>.
- Chowdhury, Md. Shahariar, Kazi Sajedur Rahman, Tanjia Chowdhury, Narissara Nuthammachot, Kuaanan Techato, Md Akhtaruzzaman, Sieh Kiong Tiong, Kamaruzzaman Sopian, et Nowshad Amin. 2020. « An Overview of Solar Photovoltaic Panels' End-of-Life Material Recycling ». *Energy Strategy Reviews* 27 (janvier): 100431. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.
- Commissariat au développement durable. 2020. « Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles ».
- Corcket, Emmanuel, Pierre Liancourt, Ragan Callaway, et Richard Michalet. 2003. « The Relative Importance of Competition for Two Dominant Grass Species as Affected by Environmental Manipulations in the Field ». *Écoscience* 10 (2): 186-94. <https://doi.org/10.1080/11956860.2003.11682766>.
- Cossu, Marco, Lelia Murgia, Luigi Ledda, Paola A. Deligios, Antonella Sirigu, Francesco Chessa, et Antonio Pazzona. 2014. « Solar Radiation Distribution inside a Greenhouse with South-Oriented Photovoltaic Roofs and Effects on Crop Productivity ». *Applied Energy* 133 (novembre): 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.070>.
- Costa, SG. 2017. « Impactes ambientais de sistemas fotovoltaicos flutuantes ». Universidade de Lisboa.
- Cycleco. 2015. « Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France. Rapport final. ADEME ».
- DDT de l'Isère. 2021. « Implantation des projets d'agrivoltaïsme et des centrales photovoltaïques au sol et flottantes. Méthodologie d'instruction des services de l'État en Isère ». https://www.isere.gouv.fr/content/download/61212/406113/file/Methodologie_agrivo_PV_sol_flottant.pdf.
- Dean, W.R.J, S.J Milton, et F Jeltsch. 1999. « Large Trees, Fertile Islands, and Birds in Arid Savanna ». *Journal of Arid Environments* 41 (1): 61-78. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0455>.
- Delzons, O, V Cima, C Fournier, P Gourdain, K Hérard, A Lacoeyllhe, J Laignel, O Roquinarç'h, et C Thierry. 2021. « Indice de qualité écologique (IQE) - Indice de potentialité écologique (IPE) - Guide méthodologique ». OFB.
- DeVault, Travis L, Thomas W Seamans, Jason A Schmidt, Jerrold L Belant, Bradley F Blackwell, Nicole Mooers, Laura A Tyson, et Lolita Van Pelt. 2014. « Bird Use of Solar Photovoltaic Installations at US Airports: Implications for Aviation Safety ».

- Landscape and Urban Planning* 122 (février): 122-28.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.017>.
- DGEC. 2011. « Installations photovoltaïques au sol - Guide de l'étude d'impact ».
- DREAL PACA. 2019. « Cadre régional pour le développement des projets photovoltaïques en Provence-Alpes-Côte d'Azur ». https://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cadre_regional_photovoltaique_dreal_paca_2019_02.pdf.
- . 2020. « Cadre régional pour le développement des projets photovoltaïques en Provence-Alpes-Côte d'Azur: Complément concernant les installations photovoltaïques flottantes ». https://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/complement_cadre_pv_-_pv_flottants_mai_2020.pdf.
- Ecoinvent. 2011. « Ecoinvent 2.2: Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Ecoinvent data v2.2 of 2011 ».
- Emmott, Christopher J. M, Jason A Röhr, Mariano Campoy-Quiles, Thomas Kirchartz, Antonio Urbina, Nicholas J Ekins-Daukes, et Jenny Nelson. 2015. « Organic Photovoltaic Greenhouses: A Unique Application for Semi-Transparent PV? » *Energy & Environmental Science* 8 (4): 1317-28.
<https://doi.org/10.1039/C4EE03132F>.
- Enerplan, SER, Région Nouvelle-Aquitaine, Région Occitanie, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. 2020. « Photovoltaïque et biodiversité: exploitation et valorisation de données issues de parcs photovoltaïques en France ». https://www.enerplan.asso.fr/medias/publication/2020_REXPVBiodiversite_Rapportfinal_vf.pdf.
- Exley, Giles, Alona Armstrong, Trevor Page, et Ian D Jones. 2021. « Floating Photovoltaics Could Mitigate Climate Change Impacts on Water Body Temperature and Stratification ». *Solar Energy* 219 (mai): 24-33.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076>.
- Fritz, Benjamin, Gábor Horváth, Ruben Hünig, Ádám Pereszlényi, Ádám Egri, Markus Guttman, Marc Schneider, Uli Lemmer, György Kriska, et Guillaume Gomard. 2020. « Bioreplicated Coatings for Photovoltaic Solar Panels Nearly Eliminate Light Pollution That Harms Polarotactic Insects ». Édité par Oksana Ostroverkhova. *PLOS ONE* 15 (12): e0243296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243296>.
- Fthenakis, Vasilis, et Hyung Chul Kim. 2009. « Land Use and Electricity Generation: A Life-Cycle Analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (6-7): 1465-74.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.017>.
- Fthenakis, Vasilis, et Enrica Leccisi. 2021. « Updated Sustainability Status of Crystalline Silicon-based Photovoltaic Systems: Life-cycle Energy and Environmental Impact Reduction Trends ». *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 29 (10): 1068-77. <https://doi.org/10.1002/pip.3441>.
- Ghazi, Sanaz, et Kenneth Ip. 2014. « The Effect of Weather Conditions on the Efficiency of PV Panels in the Southeast of UK ». *Renewable Energy* 69 (septembre): 50-59.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.018>.
- Gibson, Luke, Elspeth N Wilman, et William F Laurance. 2017. « How Green Is 'Green' Energy? » *Trends in Ecology & Evolution* 32 (12): 922-35.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.09.007>.
- GIEC. 2011. « Sources d'énergie renouvelable et atténuation du changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique. Rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ». https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_fr-1.pdf.
- Graham, Maggie, Serkan Ates, Andony P Melathopoulos, Andrew R Moldenke, Sandra J DeBano, Lincoln R Best, et Chad W Higgins. 2021. « Partial Shading by Solar

- Panels Delays Bloom, Increases Floral Abundance during the Late-Season for Pollinators in a Dryland, Agrivoltaic Ecosystem ». *Scientific Reports* 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>.
- Greif, Stefan, et Björn M Siemers. 2010. « Innate Recognition of Water Bodies in Echolocating Bats ». *Nature Communications* 1 (1). <https://doi.org/10.1038/ncomms1110>.
- Greif, Stefan, Sándor Zsebők, Daniela Schmieder, et Björn M Siemers. 2017. « Acoustic Mirrors as Sensory Traps for Bats ». *Science* 357 (6355): 1045-47. <https://doi.org/10.1126/science.aam7817>.
- Grippio, Mark, John W. Hayse, et Ben L. O'Connor. 2015. « Solar Energy Development and Aquatic Ecosystems in the Southwestern United States: Potential Impacts, Mitigation, and Research Needs ». *Environmental Management* 55 (1): 244-56. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0384-x>.
- Guiller, Clémence, Laurence Affre, Magali Deschamps-Cottin, Benoît Geslin, Nicolas Kaldonski, et Thierry Tatoni. 2017. « Impacts of Solar Energy on Butterfly Communities in Mediterranean Agro-Ecosystems ». *Environmental Progress & Sustainable Energy* 36 (6): 1817-23. <https://doi.org/10.1002/ep.12626>.
- Haas, J, J Khalighi, A de la Fuente, S.U Gerbersdorf, W Nowak, et Po-Jung Chen. 2020. « Floating Photovoltaic Plants: Ecological Impacts versus Hydropower Operation Flexibility ». *Energy Conversion and Management* 206 (février): 112414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414>.
- Habel, Jan Christian, Werner Ulrich, Nina Biburger, Sebastian Seibold, et Thomas Schmitt. 2019. « Agricultural Intensification Drives Butterfly Decline ». Édité par Raphael Didham et Peter Batary. *Insect Conservation and Diversity*, février. <https://doi.org/10.1111/icad.12343>.
- Hassanpour Adeh, Elnaz, John S Selker, et Chad W Higgins. 2018. « Remarkable Agrivoltaic Influence on Soil Moisture, Micrometeorology and Water-Use Efficiency ». Édité par Mauro Villarini. *PLOS ONE* 13 (11): e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>.
- Hawlena, Dror, David Saltz, Zvika Abramsky, et Amos Bouskila. 2010. « Ecological Trap for Desert Lizards Caused by Anthropogenic Changes in Habitat Structure That Favor Predator Activity: Predator-Induced Ecological Traps ». *Conservation Biology* 24 (3): 803-9. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01477.x>.
- Hernandez, Rebecca R, Madison K Hoffacker, et Christopher B Field. 2015. « Efficient Use of Land to Meet Sustainable Energy Needs ». *Nature Climate Change* 5 (4): 353-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate2556>.
- Hernandez, R.R, S.B Easter, M.L Murphy-Mariscal, F.T Maestre, M Tavassoli, E.B Allen, C.W Barrows, et al. 2014. « Environmental Impacts of Utility-Scale Solar Energy ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (janvier): 766-79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>.
- Hernandez-Santana, V, X Zhou, M.J Helmers, H Asbjornsen, R Kolka, et M Tomer. 2013. « Native Prairie Filter Strips Reduce Runoff from Hillslopes under Annual Row-Crop Systems in Iowa, USA ». *Journal of Hydrology* 477 (janvier): 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.013>.
- Hölzel, Norbert, et Annette Otte. 2003. « Restoration of a Species-Rich Flood Meadow by Topsoil Removal and Diaspore Transfer with Plant Material ». *Applied Vegetation Science* 6 (2): 131-40. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2003.tb00573.x>.
- Hooper, Tara, Alona Armstrong, et Brigitte Vlaswinkel. 2021. « Environmental Impacts and Benefits of Marine Floating Solar ». *Solar Energy* 219 (mai): 11-14. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.010>.

- Horváth, Gábor, Miklós Blahó, Ádám Egri, György Kriska, István Seres, et Bruce Robertson. 2010. « Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects: Polarized Light Pollution from Solar Panels ». *Conservation Biology* 24 (6): 1644-53. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x>.
- Horváth, Gábor, György Kriska, Péter Malik, et Bruce Robertson. 2009. « Polarized Light Pollution: A New Kind of Ecological Photopollution ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 7 (6): 317-25. <https://doi.org/10.1890/080129>.
- Huso, MM, T Dietsch, et C Nicolai. 2016. « Mortality Monitoring Design for Utility-Scale Solar Power Facilities: U.S. Geological Survey ». Open-File Report 2016-1087. USGS.
- IPBES. 2016. « Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production ». <https://zenodo.org/record/2616458>.
- IPBES, GIEC. 2021. « Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change ». <https://zenodo.org/record/5101125>.
- Jakobsen, H. 1994. « Influence of Temperature and Floret Age on Nectar Secretion in *Trifolium repens* L. » *Annals of Botany* 74 (4): 327-34. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1125>.
- Katz, C, JM Tusseau, et P Charaven. 2014. « Limiter l'impact des clôtures sur la biodiversité - Fiche technique du Club U2B ».
- Katzner, TA, JA Johnson, DM Evans, TWJ Garner, ME Gompper, R Altwegg, TA Branch, IJ Gordon, et N Pettoirelli. 2013. « Challenges and opportunities for animal conservation from renewable energy development ». *Animal Conservation* 16: 367-69.
- Kosciuch, Karl, Daniel Riser-Espinoza, Michael Gerringer, et Wallace Erickson. 2020. « A Summary of Bird Mortality at Photovoltaic Utility Scale Solar Facilities in the Southwestern U.S. » Édité par Jinbao Zhang. *PLOS ONE* 15 (4): e0232034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232034>.
- Kriska, G, G Horváth, et S Andrikovics. 1998. « Why Do Mayflies Lay Their Eggs En Masse on Dry Asphalt Roads? Water-Imitating Polarized Light Reflected from Asphalt Attracts Ephemeroptera ». *The Journal of Experimental Biology* 201 (Pt 15): 2273-86.
- Kumar, Manish, et Monto Mani. 2021. « Towards an Interdisciplinary Framework for Effective Sustainability Assessment in Manufacturing ». *Procedia CIRP* 98: 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.009>.
- Lal, Rattan. 1993. « Tillage Effects on Soil Degradation, Soil Resilience, Soil Quality, and Sustainability ». *Soil and Tillage Research* 27 (1-4): 1-8. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90059-X).
- Lao, Sirena, Bruce A Robertson, Abigail W Anderson, Robert B Blair, Joanna W Eckles, Reed J Turner, et Scott R Loss. 2020. « The Influence of Artificial Light at Night and Polarized Light on Bird-Building Collisions ». *Biological Conservation* 241 (janvier): 108358. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108358>.
- Larney, Francis J, Lingling Li, H. Henry Janzen, Denis A Angers, et Barry M Olson. 2016. « Soil Quality Attributes, Soil Resilience, and Legacy Effects Following Topsoil Removal and One-Time Amendments ». Édité par Francis Zvomuya. *Canadian Journal of Soil Science* 96 (2): 177-90. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0089>.
- Leggieri, Angelo, et Teodoro Semeraro. 2020. « A New Perspective of Solar Renewable Energy for South Italy Using the Floating Photovoltaic System ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 960 (décembre): 022019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/2/022019>.

- Liu, Yu, Rui-Qi Zhang, Ze Huang, Zhen Cheng, Manuel López-Vicente, Xiao-Rong Ma, et Gao-Lin Wu. 2019. « Solar Photovoltaic Panels Significantly Promote Vegetation Recovery by Modifying the Soil Surface Microhabitats in an Arid Sandy Ecosystem ». *Land Degradation & Development* 30 (18): 2177-86. <https://doi.org/10.1002/ldr.3408>.
- Loss, Scott R, Tom Will, Sara S Loss, et Peter P Marra. 2014. « Bird–building Collisions in the United States: Estimates of Annual Mortality and Species Vulnerability ». *The Condor* 116 (1): 8-23. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-13-090.1>.
- Lovelady, Adam. 2014. « Planning and Zoning for Solar in North Carolina ».
- Lovich, Jeffrey E, et Joshua R Ennen. 2011. « Wildlife Conservation and Solar Energy Development in the Desert Southwest, United States ». *BioScience* 61 (12): 982-92. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.12.8>.
- Madej, Loan. 2020. « Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur 2 sites prairiaux pâturés ». <https://hal.inrae.fr/hal-03121955/document>.
- Makaronidou, M. 2020. « Assessment on the local climate effects of solar parks ». Lancaster University.
- Marrou, H, L Guilioni, L Dufour, C Dupraz, et J Wery. 2013. « Microclimate under Agrivoltaic Systems: Is Crop Growth Rate Affected in the Partial Shade of Solar Panels? » *Agricultural and Forest Meteorology* 177 (août): 117-32. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>.
- Marrou, H, J Wery, L Dufour, et C Dupraz. 2013. « Productivity and Radiation Use Efficiency of Lettuces Grown in the Partial Shade of Photovoltaic Panels ». *European Journal of Agronomy* 44 (janvier): 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>.
- Martinez, O. 2020. « Bilan sur la mise en oeuvre des mesures d'évitement et de réduction dans la construction de centrales photovoltaïques au sol en Provence-Alpes-Côte-d'Azur ». DREAL Provence Alpes-Côte d'Azur / VA Risques, pollutions et nuisances.
- Mathijssen, D, B Hofs, E Spierenburg-Sack, R van Asperen, B van der Wal, J Vreeburg, et H Ketelaars. 2020. « Potential Impact of Floating Solar Panels on Water Quality in Reservoirs; Pathogens and Leaching ». *Water Practice and Technology* 15 (3): 807-11. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.062>.
- McDonald, DJ. 2020. « Botanical Impact Assessment for the proposed Project 3 Solar PV Farm at Visserspan 40 near Dealesville, Free State Province ».
- McDonald, Robert I, Joseph Fargione, Joe Kiesecker, William M Miller, et Jimmie Powell. 2009. « Energy Sprawl or Energy Efficiency: Climate Policy Impacts on Natural Habitat for the United States of America ». Édité par Juan A Añel. *PLoS ONE* 4 (8): e6802. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006802>.
- McInturff, Alex, Wenjing Xu, Christine E Wilkinson, Nandintsetseg Dejid, et Justin S Brashares. 2020. « Fence Ecology: Frameworks for Understanding the Ecological Effects of Fences ». *BioScience*, septembre. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa103>.
- Mills, A. J, et M. V Fey. 2004. « Declining Soil Quality in South Africa: Effects of Land Use on Soil Organic Matter and Surface Crusting ». *South African Journal of Plant and Soil* 21 (5): 388-98. <https://doi.org/10.1080/02571862.2004.10635071>.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2019. « Instruction technique DGPE/SDFCB/2019-122 ».
- Montag, Hannah, Guy Parker, et Tom Clarkson. 2016. « The effect of solar farms on local biodiversity: a comparative study ». Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity. <https://2lwej44565rn2mmjlk31pmwq-wpengine.netdna-ssl.com/wp->

content/uploads/2016/05/The-Effects-of-Solar-Farms-on-Local-Biodiversity-A-Comparative-Study.pdf.

- Moore-O'Leary, Kara A, Rebecca R Hernandez, Dave S Johnston, Scott R Abella, Karen E Tanner, Amanda C Swanson, Jason Kreidler, et Jeffrey E Lovich. 2017. « Sustainability of Utility-scale Solar Energy – Critical Ecological Concepts ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 15 (7): 385-94. <https://doi.org/10.1002/fee.1517>.
- MTES, et MCTRCT. 2020. « L'instruction des demandes d'autorisations d'urbanisme pour les centrales solaires au sol - Guide 2020 ».
- Nain, Preeti, et Arun Kumar. 2020. « Ecological and Human Health Risk Assessment of Metals Leached from End-of-Life Solar Photovoltaics ». *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 267 (décembre): 115393. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115393>.
- Nash, C, J Clough, D Gedge, R Lindsay, D Newport, M.A Ciupala, et S Connop. 2016. « Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs: a London Olympic Park green roof case study ». *Israel Journal of Ecology and Evolution* 62 (1-2): 74-87. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1045791>.
- Noblet, JF. 2010. « Neutraliser les pièges mortels pour la faune sauvage ». Conseil Général de l'Isère.
- Nocentini, Daniele, Ettore Pacini, Massimo Guarnieri, Diego Martelli, et Massimo Nepi. 2013. « Intrapopulation Heterogeneity in Floral Nectar Attributes and Foraging Insects of an Ecotonal Mediterranean Species ». *Plant Ecology* 214 (6): 799-809. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0204-z>.
- Observatoire des Galliformes de Montagne. 2018. « Inventaire des clôtures dangereuses pour les galliformes de montagne et bilan de leur visualisation dans les Pyrénées françaises ».
- Ong, S, C Campbell, P Denholm, R Margolis, et G Heath. 2013. « Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States ». NREL/TP-6A20-56290, 1086349. <https://doi.org/10.2172/1086349>.
- Paige, C. 2015. « A Wyoming Landowner's Handbook to Fences and Wildlife: Practical Tips for Fencing with Wildlife in Mind ». Wyoming Community Foundation, Laramie, WY.
- Pang, Kejia, J. W Van Sambeek, Nadia E Navarrete-Tindall, Chung-Ho Lin, Shibu Jose, et H. E Garrett. 2019. « Responses of Legumes and Grasses to Non-, Moderate, and Dense Shade in Missouri, USA. I. Forage Yield and Its Species-Level Plasticity ». *Agroforestry Systems* 93 (1): 11-24. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0067-8>.
- Pellerin, S, L Bamière, et O Réchauchère. 2020. « Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Rapport scientifique de l'étude ». INRA (France).
- Peschel, R, T Peschel, M Marchand, et J Hauke. 2019. « Solarparks - Gewinne für die Biodiversität ». BNE.
- Petanidou, Theodora, et Erik Smets. 1996. « Does Temperature Stress Induce Nectar Secretion in Mediterranean Plants? » *New Phytologist* 133 (3): 513-18. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01919.x>.
- Polatto, Leandro P, José Chaud-Netto, et Valter V Alves-Junior. 2014. « Influence of Abiotic Factors and Floral Resource Availability on Daily Foraging Activity of Bees: Influence of Abiotic and Biotic Factors on Bees ». *Journal of Insect Behavior* 27 (5): 593-612. <https://doi.org/10.1007/s10905-014-9452-6>.

- Polman, A, M Knight, E. C Garnett, B Ehrler, et W. C Sinke. 2016. « Photovoltaic Materials: Present Efficiencies and Future Challenges ». *Science* 352 (6283): aad4424-aad4424. <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>.
- Ravi, Sujith, Jordan Macknick, David Lobell, Christopher Field, Karthik Ganesan, Rishabh Jain, Michael Elchinger, et Blaise Stoltenberg. 2016. « Colocation Opportunities for Large Solar Infrastructures and Agriculture in Drylands ». *Applied Energy* 165 (mars): 383-92. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.078>.
- Rehbein, Jose A, James E. M Watson, Joe L Lane, Laura J Sonter, Oscar Venter, Scott C Atkinson, et James R Allan. 2020. « Renewable Energy Development Threatens Many Globally Important Biodiversity Areas ». *Global Change Biology* 26 (5): 3040-51. <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>.
- RTE. 2021. « Futurs énergétiques 2050 - Bilan de la Phase I : Synthèse et enseignements issus de la consultation publique ». https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-06/BP50_Resume%20excutif.pdf.
- Schulte, Lisa A., Jarad Niemi, Matthew J Helmers, Matt Liebman, J. Gordon Arbuckle, David E James, Randall K Kolka, et al. 2017. « Prairie Strips Improve Biodiversity and the Delivery of Multiple Ecosystem Services from Corn-soybean Croplands ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (42): 11247-52. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620229114>.
- Schwarzbözl, Peter, Reiner Buck, Chemi Sugarmen, Arik Ring, Ma Jesús Marcos Crespo, Peter Altwegg, et Juan Enrile. 2006. « Solar Gas Turbine Systems: Design, Cost and Perspectives ». *Solar Energy* 80 (10): 1231-40. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.007>.
- Seibold, Sebastian, Martin M Gossner, Nadja K Simons, Nico Blüthgen, Jörg Müller, Didem Ambarlı, Christian Ammer, et al. 2019. « Arthropod Decline in Grasslands and Forests Is Associated with Landscape-Level Drivers ». *Nature* 574 (7780): 671-74. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3>.
- Semchenko, Marina, Mari Lepik, Lars Götzenberger, et Kristjan Zobel. 2012. « Positive Effect of Shade on Plant Growth: Amelioration of Stress or Active Regulation of Growth Rate?: Effects of Shade on Plant Growth ». *Journal of Ecology* 100 (2): 459-66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01936.x>.
- Service des données et études statistiques du MTE. 2021. « Tableau de bord : solaire photovoltaïque. Premier trimestre 2021. Stat Info Energie N° 366 ». <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/366>.
- Smith, Jennifer A, et James F Dwyer. 2016. « Avian Interactions with Renewable Energy Infrastructure: An Update ». *The Condor* 118 (2): 411-23. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-15-61.1>.
- Stoms, David M, Stephanie L Dashiell, et Frank W Davis. 2013. « Siting Solar Energy Development to Minimize Biological Impacts ». *Renewable Energy* 57 (septembre): 289-98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.055>.
- Száz, Dénes, Dávid Mihályi, Alexandra Farkas, Ádám Egri, András Barta, György Kriska, Bruce Robertson, et Gábor Horváth. 2016. « Polarized Light Pollution of Matte Solar Panels: Anti-Reflective Photovoltaics Reduce Polarized Light Pollution but Benefit Only Some Aquatic Insects ». *Journal of Insect Conservation* 20 (4): 663-75. <https://doi.org/10.1007/s10841-016-9897-3>.
- Tanner, K, KA Moore, et BM Pavlik. 2014. « Measuring impacts of solar development on desert plants ». *Fremontia* 42 (2): 15-16.
- Tanner, Kristie, Esther Molina-Menor, Adriel Latorre-Pérez, Àngela Vidal-Verdú, Cristina Vilanova, Juli Peretó, et Manuel Porcar. 2020. « Extremophilic Microbial

- Communities on Photovoltaic Panel Surfaces: A Two-year Study ». *Microbial Biotechnology* 13 (6): 1819-30. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13620>.
- Tawalbeh, Muhammad, Amani Al-Othman, Feras Kafiah, Emad Abdelsalam, Fares Almomani, et Malek Alkasrawi. 2021. « Environmental Impacts of Solar Photovoltaic Systems: A Critical Review of Recent Progress and Future Outlook ». *Science of The Total Environment* 759 (mars): 143528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.
- Toral, Gregorio M., et Jordi Figuerola. 2010. « Unraveling the Importance of Rice Fields for Waterbird Populations in Europe ». *Biodiversity and Conservation* 19 (12): 3459-69. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9907-9>.
- Touil, Sami, Amina Richa, Meriem Fizir, et Brendon Bingwa. 2021. « Shading Effect of Photovoltaic Panels on Horticulture Crops Production: A Mini Review ». *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 20 (2): 281-96. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2>.
- Truchon, H, V de Billy, et B Padilla. 2020. « Dimensionnement de la compensation ex ante des atteintes à la biodiversité - État de l'art des approches, méthodes disponibles et pratiques en vigueur ». Office français de la biodiversité.
- Tsoutsos, Theocharis, Niki Frantzeskaki, et Vassilis Gekas. 2005. « Environmental Impacts from the Solar Energy Technologies ». *Energy Policy* 33 (3): 289-96. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6).
- Turney, Damon, et Vasilis Fthenakis. 2011. « Environmental Impacts from the Installation and Operation of Large-Scale Solar Power Plants ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (6): 3261-70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>.
- Usman, Abdulwasiiu. 2020. « An Overview of the Adverse Effects of Renewable Energy Sources ». *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 8 (7): 477-86. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.7079>.
- Vellot, O, A Cluchier, et P Illac. 2020. « Guide PIESO, Guide technique d'éco-conception des centrales photovoltaïques — un outil d'aide à l'intégration écologique ».
- Vellot, O, N Kaldonski, M Thorel, A Cluchier, P Illac, et M Pillods. 2020. « PIESO BOOST, Boîte à Outils pour l'Optimisation des Suivis écologiques et des Techniques d'intégration de l'énergie solaire ».
- Ven, Dirk-Jan van de, Iñigo Capellan-Peréz, Iñaki Arto, Ignacio Cazarro, Carlos de Castro, Pralit Patel, et Mikel Gonzalez-Eguino. 2021. « The Potential Land Requirements and Related Land Use Change Emissions of Solar Energy ». *Scientific Reports* 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>.
- Vidal, Rosario, Jaume-Adrià Alberola-Borràs, Severin N Habisreutinger, Joaquín-Luis Gimeno-Molina, David T Moore, Tracy H Schloemer, Iván Mora-Seró, Joseph J Berry, et Joseph M Luther. 2020. « Assessing Health and Environmental Impacts of Solvents for Producing Perovskite Solar Cells ». *Nature Sustainability*, décembre. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00645-8>.
- Vijayaraghavan, K. 2016. « Green Roofs: A Critical Review on the Role of Components, Benefits, Limitations and Trends ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (mai): 740-52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>.
- Visser, Elke, Vonica Perold, Samantha Ralston-Paton, Alvaro C Cardenal, et Peter G Ryan. 2019. « Assessing the Impacts of a Utility-Scale Photovoltaic Solar Energy Facility on Birds in the Northern Cape, South Africa ». *Renewable Energy* 133 (avril): 1285-94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.106>.
- Wahl, Johannes. 2014. *Vögel in Deutschland - 2014*.
- Walston, Leroy J, Yudi Li, Heidi M Hartmann, Jordan Macknick, Aaron Hanson, Chris Nootenboom, Eric Lonsdorf, et Jessica Hellmann. 2021. « Modeling the Ecosystem

- Services of Native Vegetation Management Practices at Solar Energy Facilities in the Midwestern United States ». *Ecosystem Services* 47 (février): 101227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101227>.
- Walston, Leroy J, Katherine E Rollins, Kirk E LaGory, Karen P Smith, et Stephanie A Meyers. 2016. « A Preliminary Assessment of Avian Mortality at Utility-Scale Solar Energy Facilities in the United States ». *Renewable Energy* 92 (juillet): 405-14. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.041>.
- Weselek, Axel, Andrea Ehmann, Sabine Zikeli, Iris Lewandowski, Stephan Schindele, et Petra Högy. 2019. « Agrophotovoltaic Systems: Applications, Challenges, and Opportunities. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 39 (4). <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
- Williams, Joseph B, B. Irene Tieleman, et Mohammed Shobrak. 1999. « Lizard Burrows Provide Thermal Refugia for Larks in the Arabian Desert ». *The Condor* 101 (3): 714-17. <https://doi.org/10.2307/1370208>.
- Wingard, J, P Zahler, O Bayasgalan, et B Bayarbaatar. 2014. « Guidelines for Addressing the Impact of Linear Infrastructure on Large Migratory Mammals in Central Asia ». UNEP Convention on Migratory Species (CMS). UNEP Convention on Migratory Species (CMS). <https://www.cms.int/en/publication/guidelines-addressing-impact-linear-infrastructure-large-migratory-mammals-central-asia>.
- Wit, F, et K Biesmeijer. 2020. « The effects of solar parks on plants and pollinators: the case of Shell Moerdijk ». Pollinator Ecology Group, Naturalis Biodiversity Center, Leiden.
- Wyckoff, Teal B, Hall Sawyer, Shannon E Albeke, Steven L Garman, et Matthew J Kauffman. 2018. « Evaluating the Influence of Energy and Residential Development on the Migratory Behavior of Mule Deer ». *Ecosphere* 9 (2): e02113. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2113>.



**Agir pour
la biodiversité**

LPO France
Fonderies Royales - CS 90263 - 17305 Rochefort cedex
lpo.fr