

Impacts de la couverture des végétations prairiales par les panneaux photovoltaïques

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SOUS UNE PERSPECTIVE DE
CONSERVATION DES ÉCOSYSTÈMES

Dossier réalisé par :

Rémi TURBAN

Les milieux prairiaux sont des écosystèmes riches en espèces et fournissant de nombreux services écosystémiques. Ils sont néanmoins menacés, en Europe comme en France, notamment par l'artificialisation des sols et les pratiques agricoles intensives.

L'agrivoltaïsme consiste en l'implantation d'une installation de production photovoltaïque au sein d'une parcelle agricole, visant à ne pas engendrer d'impact sur la productivité de cette dernière, voire à en améliorer le rendement (protection contre les aléas météorologiques, conservation de l'humidité, ombrage en faveur des animaux ou des plantes, etc.).

Dans ce cadre, une installation agrivoltaïque peut être envisagée au sein de prairies, qu'elles soient dédiées aux fauches fourragères ou au pâturage. Divers impacts sur les écosystèmes prairiaux sont alors à prévoir. C'est notamment le cas des effets de la couverture par les tables photovoltaïques des végétations considérées.

Par ailleurs, compte tenu de la récente arrivée de ce type d'installation, il n'existe actuellement que peu d'études ou de méta-analyses traitant de cette problématique, en dehors de constats fortuits ou de suivis environnementaux offrant des résultats plus ou moins robustes.

Ce dossier s'attelle ainsi à synthétiser les connaissances actuelles sur le sujet, sous une perspective de conservation des écosystèmes, reprenant les études publiées disponibles au public, ainsi que les données issues des suivis réalisés par ENCIS Environnement.


Structure	
Adresse	21 rue Columbia 87068 LIMOGES Cedex
Téléphone	05 55 36 28 39
Rédaction	Rémi TURBAN, Responsable d'études - Écologue
Correction et validation	Eric BEUDIN, Responsable d'études et développement technique, Écologue Pierre PAPON Directeur du pôle Écologie

Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	Cadre de l'étude.....	6
2.1	Végétations concernées	6
2.2	Critères considérés.....	6
2.3	Circonscription des effets liés à la couverture par les tables photovoltaïques et exclusion des facteurs confondants.....	7
3.	Analyse bibliographique.....	8
3.1	Étude des effets sur la flore	8
3.2	Identification des causes sous-jacentes.....	11
4.	Synthèse et discussion	14
5.	Bibliographie.....	16

1. Introduction

Les milieux prairiaux couvrent entre 18 et 25 % de la surface de la France métropolitaine (Huyghe, Peeters, De Vlieghe, 2015 ; CORINE Land Cover, 2018). Ils représentent ainsi l'un des trois principaux écosystèmes du territoire avec les terres arables, majoritairement cultivées en céréales, et les forêts. Les prairies, notamment lorsqu'elles sont dans un état de conservation optimal, sont parmi les milieux les plus riches en termes d'espèces (Wilson *et al.*, 2012), formant ainsi un habitat pour une grande partie de la flore et de la faune du territoire. Elles fournissent, de ce fait, de très nombreux services écosystémiques (Bengtsson *et al.*, 2019). Ces milieux sont toutefois menacés, notamment par l'artificialisation des sols et les pratiques agricoles intensives (Pellaton *et al.*, 2022 ; Schils *et al.*, 2020).

En France, depuis le début des années 2010, des projets photovoltaïques sont élaborés au sein de parcelles agricoles, désignés alors comme « parc solaires », « champs photovoltaïques » ou, plus récemment, « installations agrivoltaïques ». Le principe recherché consiste à gagner en espace utilisable pour la production d'électricité, tout en visant à ne pas engendrer d'impact sur la productivité agricole, voire à en améliorer le rendement (protection contre les aléas météorologiques, conservation de l'humidité, ombrage en faveur des animaux ou des plantes, etc.). Ainsi, en 2021, environ 500 hectares de terrains agricoles seraient déjà occupés (Idele, 2021) et en 2023, entre 500 000 et 1 million d'hectares auraient été contractualisés (Pié, 2023).

Dans ce contexte, les panneaux, fixes ou mobiles, sont implantés en hauteur (point bas situé au minimum à 80 cm, plus régulièrement au-delà de 100 à 120 cm, point haut allant jusqu'à 5 m). Ceux-ci mesurent environ 1 à 4 m de largeur et sont inclinées de 10° à 30°, écartés les uns des autres de quelques centimètres pour laisser s'écouler de l'eau de pluie. Par ailleurs, les rangées sont généralement espacées de 2 à 15 m, selon le type de projet.

Ces installations peuvent à la fois concerner des cultures céréalières, maraîchères ou encore des vignobles. Mais celles-ci peuvent aussi être implantées sur des prairies, qu'elles soient dédiées aux fauches fourragères ou au pâturage.

Divers impacts sur les écosystèmes prairiaux sont alors à prévoir. S'ils sont pour certains facilement diagnostiquables (imperméabilisation du sol ou destruction directe de milieux par l'implantation de bâtiments, par exemple), d'autres sont plus complexes à évaluer. C'est notamment le cas des effets de la couverture des végétations considérées par les tables photovoltaïques. Par ailleurs, compte tenu de la récente arrivée de ce type d'installation, il n'existe actuellement que peu d'études ou de méta-analyses traitant de cette problématique, en dehors de constats fortuits ou de suivis environnementaux offrant des résultats plus ou moins robustes.

Ce dossier s'attelle ainsi à synthétiser les connaissances actuelles sur le sujet, sous une perspective de conservation des écosystèmes, reprenant les études publiées disponibles au public, ainsi que les données issues des suivis réalisés par ENCIS Environnement. Le périmètre d'étude concerne les impacts sur les milieux prairiaux issus de la seule cause de la couverture par les panneaux photovoltaïques, et non des effets provoqués par l'implantation d'une centrale au cours de ces différentes phases de vie.

2. Cadre de l'étude

2.1 Végétations concernées

Il existe de multiples définitions du terme « prairie », dépendant notamment du cadre de son emploi : agriculture, écologie ou géographie. Il sera considéré ici les milieux prairiaux au sens large, définis comme étant des formations végétales herbacées semi-naturelles, dominées par les graminées (*Poaceae*), incluant principalement les prairies de fauche, les prairies pâturées et les pelouses.

Ce périmètre d'analyse permet ainsi de couvrir la très grosse majorité des végétations herbacées présentant des enjeux de conservation et susceptibles d'être concernées par des projets de parcs photovoltaïques ou agrivoltaïques.

2.2 Critères considérés

Les effets de la couverture sur les végétations prairiales peuvent être mesurées via différents critères. Ils sont en général étudiés en suivant leur évolution par des protocoles CE (*Control - Exposition*), BAI (*Before - After - Intervention*) ou BACI (*Before - After - Control - Intervention*).

Ceux retenus ici ont été choisis en fonction, notamment, de leur représentativité au sein des différents retours d'expériences pris en compte, ainsi que de leur rattachement au cadre écosystémique et à une problématique de conservation des milieux.

Ainsi, les plus pertinents sont :

- La richesse spécifique (nombre d'espèces) ;
- La diversité spécifique (richesse spécifique mise en relation avec l'abondance d'individus par espèce, notamment définie par les indices de Simpson ou de Shannon et le rapport d'équitabilité) ;
- Les cortèges spécifiques (groupe d'espèces pourvues d'affinités écologiques similaires).

D'autres critères peuvent être considérés, tels que les caractéristiques relatives à la structure de la végétation (recouvrement, biomasse et hauteur). Ceux-ci sont toutefois complexes à mettre en relation avec l'état de conservation d'un écosystème prairial. Ils sont, par exemple, plus pertinents pour des évaluations de rendements agricoles. Ces critères permettent néanmoins de caractériser plus précisément les effets de la couverture par les panneaux photovoltaïques et peuvent ainsi mettre en avant d'éventuels liens de causalité.

La patrimonialité des espèces (liée à leur état de conservation et de protection) et la valence écologique (amplitude de tolérance d'une espèce vis-à-vis des facteurs biotiques et abiotiques, définissant sa niche écologique) sont de bons indicateurs de l'état de conservation des écosystèmes concernés. Néanmoins ceux-ci n'ont que très rarement été retrouvés dans les publications et n'ont pas pu être pris en compte étant donnée l'incompatibilité des modalités de ces mêmes études vis-à-vis de la présente analyse bibliographique.

2.3 Circonscription des effets liés à la couverture par les tables photovoltaïques et exclusion des facteurs confondants

L'implantation d'un parc photovoltaïque au sein d'une prairie peut engendrer divers impacts sur le milieu en question et la flore qui s'y développe. Néanmoins, ces impacts ne sont pas nécessairement issus de la couverture par les panneaux et de ses conséquences microclimatiques mais peuvent être liés à différents facteurs, au cours de différentes étapes de vie de la centrale. Ainsi, il est nécessaire de délimiter le champ de recherche des effets produits sur la végétation aux seules causes ciblées.

Les perturbations sur les milieux engendrés par les travaux de construction sont les premiers impacts induits par la mise en place d'un parc photovoltaïque (ADEME, 2019). En ce qui concerne les habitats prairiaux, ces perturbations peuvent être liées, notamment, à d'éventuels terrassements et décapages, aux implantations des bâtiments (postes de transformation et de livraison, citerne incendie, etc.), des pistes d'accès, des raccordements électriques et des structures porteuses, ainsi qu'aux passages des engins de chantier et aux piétinements humains. Il est aussi à prendre en compte l'augmentation du risque de colonisation d'espèce floristique envahissante, particulièrement lorsque des sols sont mis à nu (Gelbard et Belnap, 2003).

Les conversions des assolements et/ou les changements de pratiques agricoles et de gestion lors de l'implantation peuvent significativement modifier les végétations présentes (Parker et McQueen, 2013 ; Montag *et al.*, 2016 ; Vervloesem *et al.*, 2022). Ceux-ci sont susceptibles d'engendrer une plus-value écologique notable (conversion de cultures céréalières en prairies pâturées, mise en place d'une gestion extensive, etc.), voire, plus rarement, des effets négatifs pour la flore (augmentation de la pression de pâturage ou de la récurrence des fauches, réensemencement peu diversifié, etc.). Ainsi, le rapport de I Care & Consult et Biotope (2020) met en avant, notamment, de fréquentes augmentations de la richesse floristique observée parmi les parcs étudiés, sans dissociation claire des évolutions d'occupation des sols entre l'avant et l'après implantation.

Les effets de la couverture étudiés dans le cadre de cette recherche bibliographique seront considérés en tenant compte et en excluant les impacts induits par les perturbations occasionnées par la construction ou encore par la modification de l'occupation de sols et de la gestion. Ainsi, les résultats retenus comme étant les plus pertinents seront ceux issus d'analyses tenant compte d'un témoin de variations temporelles (protocole BAI) et/ou spatiales (protocole CE) aux caractéristiques analogues à celles de la zone exposée (zone couverte par les panneaux).

Il sera toutefois intéressant de prendre en compte différentes modalités liées à cette couverture, telles que l'écart inter-rangs ou la hauteur des tables installées.

3. Analyse bibliographique

3.1 Étude des effets sur la flore

Pris séparément, les critères retenus ici ne sont pas systématiquement des indicateurs fiables pour qualifier l'état de conservation d'un écosystème prairial. Ensemble, ils permettent néanmoins de caractériser en grande partie les végétations présentes.

Richesse spécifique

De nombreuses publications mettent en avant une augmentation de la richesse floristique après l'implantation d'un parc photovoltaïque (Parker et McQueen, 2013 ; Montag *et al.*, 2016 ; I Care & Consult et Biotope, 2020). Celles-ci font néanmoins une comparaison temporelle incluant un changement d'occupation des sols, souvent des cultures ou des friches converties en prairies.

Il existe tout de même quelques études comparatives au sein de milieux semblables, avec témoins temporels et/ou spatiaux (analyses sous les panneaux, entre les rangées, et à l'extérieur de l'emprise de la centrale).

Une méta-analyse, de Zhang *et al.* (2023), reprend notamment 16 publications et révèlent une générale absence de différence parmi la richesse spécifique observée. Cette analyse tient toutefois compte d'une grande proportion d'études réalisées au sein de milieux atypiques, dont des milieux désertiques ou semi-désertiques.

Dans le cadre de milieux prairiaux présents en France métropolitaine ou analogues, la grande majorité des publications conclues sur une perte significative de la richesse spécifique.

Madej (2020) compare notamment deux parcs photovoltaïques dans le Massif central. Le premier, de 2 ans, est implanté au sein d'une prairie semée récente, pâturée de manière extensive par des ovins et avec un inter-rang de 4 mètres. La richesse spécifique relevée n'est pas significativement différente entre les modalités, que ce soit sous les panneaux, au niveau des inter-rangs, et à l'extérieur du parc. Le second, plus ancien (6 ans), est implanté au sein d'une prairie naturelle pâturée de manière intensive par des ovins et avec un inter-rang de 1,85 mètre. Ici, la richesse spécifique est deux fois moindre sous les panneaux qu'à l'extérieur du parc, et les inter-rangs présentent des valeurs moyennes entre les deux autres modalités.

De même, au Royaume-Uni, Armstrong *et al.* (2016), constatent une richesse environ deux fois moins importante sous les panneaux qu'en-dehors, sur une prairie soumise à un pâturage ovin et un inter-rang de 11 mètres.

Dans des milieux prairiaux mésophiles similaires, deux suivis réalisés par ENCIS Environnement (non publiés) révèlent d'une part, une diminution significative de la richesse spécifique sous les panneaux vis-à-vis des inter-rangs au sein d'une prairie pâturée, et d'autre part une absence de différence significative entre ces deux modalités au sein d'une prairie fauchée.

Dans le cadre de milieux plus thermophiles (prairies sèches méditerranéennes, notamment), des résultats semblables sont observés. Ainsi, des diminutions de richesse spécifique sont relevées au sein de parc pâturés par des ovins (Lambert *et al.*, 2023), fauchés et pâturés de manière intensive (Vervloesem *et al.*, 2022) et dans le cadre de milieux herbacés restaurés notamment par des ensemencements (Lambert *et al.*, 2022 ; Vellot *et al.* 2020). Graham *et al.* (2021) ne trouvent

pas de différence significative dans le cas d'une prairie sèche fauchée régulièrement et d'un inter-rang de 2 mètres, mais mettent en avant des floraisons retardées, étalées et plus longues.

Dans le cadre de végétations herbacées de milieux semi-arides, [Li et al. \(2016\)](#) et [Zhai et al. \(2018\)](#) mettent en évidence une augmentation par deux de la richesse spécifique, de même que dans les milieux désertiques ([Liu et al., 2019](#) ; [Zhang et al., 2020](#)).

Enfin, dans un contexte moins ordinaire mais présentant plusieurs similitudes vis-à-vis des processus écosystémiques, [Schindler et al. \(2018\)](#) ne révèlent pas de différence significative de la richesse floristique dans le cadre de toitures végétalisées par des herbacées, couvertes ou non par des panneaux photovoltaïques.

Diversité spécifique

En plus de la richesse spécifique, la diversité est parfois considérée parmi les différentes publications retenues. Celle-ci est mesurée via les indices de Simpson ou de Shannon et le rapport d'équitabilité. Globalement, les tendances de ces indicateurs suivent celles de la richesse spécifique.

Ainsi, parmi les deux parcs auvergnats étudiés par [Madej \(2020\)](#), le premier (implanté depuis 2 ans sur une prairie semée avec un pâturage ovin extensif et un inter-rang de 4 mètres) ne révèle pas de différence significative de diversité entre la végétation située sous les panneaux, dans les inter-rangs, et à l'extérieur du parc. Le second (implanté depuis 6 ans sur une prairie naturelle avec un pâturage ovin intensif et un inter-rang de 1,85 mètres) présente à l'inverse une diversité jusqu'à deux fois plus faible sous les panneaux qu'à l'extérieur du parc et entre les rangs.

Les suivis réalisés par [ENCIS Environnement \(non publiés\)](#) révèlent d'une part, une diminution significative de la diversité sous les panneaux vis-à-vis des inter-rangs au sein d'une prairie pâturée, et d'autre part une absence de différence significative entre ces deux modalités au sein d'une prairie fauchée.

Dans le cadre de milieux prairiaux méditerranéens, [Vervloesem et al. \(2022\)](#) observent aussi de plus faibles diversités sous les panneaux au sein de parcs fauchés et pâturés de manière intensive. Il en va de même pour [Vellot et al. \(2020\)](#).

Enfin, dans le cadre de végétations herbacées de milieux semi-arides, [Wang et al. \(2016\)](#) et [Zhai et al. \(2018\)](#) mettent en évidence une augmentation de la diversité, de même que dans les milieux désertiques ([Zhang et al., 2020](#)).

Cortèges

L'hypothèse la plus vraisemblable, concernant l'impact de la couverture sur les cortèges, est sans doute l'augmentation de la proportion d'espèces plutôt sciaphiles (préférant les milieux ombragés) par rapport à la proportion d'espèces plus héliophiles (préférant les milieux ensoleillés). Celle-ci est notamment avérée dans l'étude de [Lambert et al. \(2023\)](#).

La publication de [Uldrijan et al. \(2022\)](#) présente toutefois des résultats divergents avec une proportion plus importante des espèces héliophiles sous les panneaux par rapport aux inter-rangs. Ces observations, à première vue paradoxales, sont expliquées par une couverture végétale réduite au sol, générant une plus faible compétition et moins d'ombrage pour de telles espèces.

Les suivis réalisés par [ENCIS Environnement \(non publiés\)](#) révèlent des végétations à la fois plus sciaphiles sous les panneaux, mais aussi plus eutrophiles (préférant les milieux riches en éléments nutritifs) et avec des proportions plus importantes en graminées (*Poaceae*) par rapport aux dicotylédones, notamment vis-à-vis des légumineuses (*Fabaceae*).

De même, [Madej \(2020\)](#) observe, au sein du parc le plus récent parmi les deux parcs auvergnats étudiés, une division par deux de la proportion de légumineuses sous les panneaux vis-à-vis du groupe témoin extérieur, ainsi qu'une augmentation de 10 à 20 % de la proportion de graminées. Il y est précisé que *Dactylis glomerata* est dominant sous les panneaux, *Festuca ovina* et *Bromus hordeaceus* sont dominants en dehors. L'autre parc étudié, plus ancien, n'a pas révélé de différence de ratio graminées/légumineuses, mais il existe néanmoins une dissimilitude (indice de Jaccard) marquée entre les cortèges présents sous les panneaux et en dehors.

[Armstrong et al. \(2016\)](#) observent aussi ce même effet, avec une proportion de graminées cinq fois plus élevée par rapport aux autres herbacées non-graminéennes.

Au sein de milieux prairiaux continentaux européens (République tchèque), [Uldrijan et al. \(2022\)](#) constatent une plus faible proportion en espèces pérennes sous les panneaux, au profit des espèces annuelles, possiblement liée à la plus faible couverture végétale, favorisant les espèces pionnières. Ils révèlent aussi une plus forte proportion en espèces continentales sous les panneaux, aux dépens des espèces océaniques, qu'ils attribuent à l'interception des pluies par les tables photovoltaïques.

Enfin, de nombreuses études mettent en avant la plus forte concentration en espèces exotiques envahissantes au sein des parcs qu'en-dehors ([Lambert et al., 2023](#) ; [I Care & Consult et Biotope, 2020](#) ; [Vervloesem et al., 2022](#)). Cet effet pourrait toutefois être lié davantage à la phase préalable de travaux, perturbant les sols et favorisant la colonisation de ces espèces.

Structure de la végétation (recouvrement, biomasse et hauteur)

Concernant le recouvrement végétal, la méta-analyse de [Zhang et al. \(2023\)](#) indique une augmentation globale parmi les publications retenues. Celle-ci tient toutefois compte d'une grande proportion d'études réalisées dans des milieux désertiques ou semi-désertiques.

Dans le cadre de milieux prairiaux plus typiques, la grande majorité des publications conclues sur un recouvrement végétal significativement plus faible sous les panneaux qu'entre les rangs ou à l'extérieur des centrales. Les parcs auvergnats étudiés par [Madej \(2020\)](#) présentent notamment un recouvrement végétal 5 à 10 % plus faible sous les panneaux qu'en-dehors. Des résultats similaires sont observés chez [Armstrong et al. \(2016\)](#) et [Uldrijan et al. \(2022\)](#). Il en va de même dans le cas d'un suivi réalisé par [ENCIS Environnement \(non publié\)](#) sur une prairie sèche au sein d'un ancien terrain militaire, ainsi que pour l'étude de [Lambert et al. \(2023\)](#) sur des milieux prairiaux méditerranéens.

Il est à noter qu'en contexte désertique, [Liu et al. \(2019\)](#) mettent en évidence un recouvrement végétal 6 à 7 fois plus important au sein d'un parc qu'à l'extérieur de celui-ci.

Concernant la biomasse végétale, la méta-analyse de [Zhang et al. \(2023\)](#) donne de nouveau des valeurs globalement supérieures parmi les publications retenues, en grande partie réalisées dans des milieux désertiques ou semi-désertiques.

Au Royaume-Uni, [Armstrong et al. \(2016\)](#) constatent des biomasses 4 à 5 fois plus faibles sous les panneaux photovoltaïques qu'en-dehors. En contexte méditerranéen, [Lambert et al. \(2023\)](#) observent aussi de plus faibles valeurs sous les tables.

Enfin, dans le cadre de végétations herbacées de milieux semi-arides, [Wang et al. \(2016\)](#) et [Hassanpour Adeh et al. \(2018\)](#) mettent en évidence une augmentation de la biomasse montant jusqu'à 90 %, de même que dans les milieux désertiques où [Liu et al. \(2019\)](#) font le constat d'une biomasse 30 fois plus importante sous les panneaux et 15 fois plus importantes entre les rangées, par rapport à l'extérieur du parc.

Concernant la hauteur de végétation, peu de retours existent. Le suivi réalisé par [ENCIS Environnement \(non publié\)](#) sur une prairie sèche au sein d'un ancien terrain militaire, révèle des hauteurs plus faibles sous les tables qu'entre les rangs. À l'inverse, [Schindler et al. \(2018\)](#) observent de plus grandes hauteurs sous les panneaux d'une toiture végétalisée.

3.2 Identification des causes sous-jacentes

Les variations observées parmi ces différents critères sont imputables à des différences microclimatiques et/ou édaphiques sous ou entre les rangées de panneaux. Ainsi, plusieurs variables sont mises en avant dans la bibliographie, notamment : la luminosité, la température de l'air et du sol, ainsi que l'humidité de l'air et du sol. Leur variation peut avoir des effets directs sur la végétation (modification des paramètres vitaux vis-à-vis de la niche écologique de chaque espèce) ou indirects (modification des paramètres biotiques ou abiotiques du sol, évolution des interactions trophiques, etc.). Dans ce cadre, les propriétés chimiques du sol (pH, teneur en éléments minéraux nutritifs) ont aussi été prises en compte.

Luminosité

La diminution de l'irradiation solaire (quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface) en lien avec la couverture photovoltaïque a été étudiée à de nombreuses reprises ([Zhang et al., 2023](#) ; [Hassanpour Adeh et al., 2018](#) ; [Vervloesem et al., 2022](#) ; [Armstrong et al., 2016](#) ; [Liu et al., 2019](#) ; [Graham et al., 2021](#) ; [Madej, 2020](#) ; [Vellot et al., 2020](#)). Les mesures réalisées révèlent une perte de 20 à 95 % de l'irradiation sous les panneaux et de 5 à 40 % entre les rangs. Ces variations sont dépendantes de la position des mesures sous les tables, ainsi que de la configuration des installations photovoltaïques (type, hauteur, surface, inclinaison et orientation des panneaux, espace inter-rangs, notamment).

Température de l'air

Les études retenues constatent globalement une diminution de la température de l'air sous les panneaux. C'est notamment le cas de la méta-analyse de [Zhang et al. \(2023\)](#). En milieu méditerranéen, [Lambert et al. \(2023\)](#) révèlent notamment un écart allant jusqu'à - 4°C sous les tables, vis-à-vis des zones extérieures, au cours de la journée.

Plusieurs études précisent toutefois certaines modalités. Ainsi, [Armstrong et al. \(2016\)](#) relatent une température journalière moyenne similaire sous les tables et en dehors, mais avec un air respectivement plus frais la journée et plus chaud la nuit, sous les panneaux. Il en résulte un écrasement des variations de températures jour/nuit, ainsi qu'un auto-équilibre de celles-ci.

Cet effet de lissage des températures est aussi relevé à l'échelle saisonnière par [Vellot et al. \(2020\)](#), qui observent des températures respectivement plus fraîches sous les tables en été, et plus chaudes en hiver.

[Vervloesem et al. \(2022\)](#) précisent aussi que ces constats sont valables pour des panneaux installés avec une hauteur suffisante. Ils mesurent en effet de plus fortes températures là où la table photovoltaïque est la plus proche du sol, en lien avec la chaleur rayonnée depuis celle-ci, ainsi que de plus faibles flux d'air.

À l'inverse, des installations très hautes semblent ne pas engendrer de différence de températures ([Semeraro et al., 2018](#)).

Une diminution de la température sous les tables est aussi observée dans les milieux désertiques ([Suuronen et al., 2017](#) ; [Liu et al., 2019](#)). Néanmoins, un effet d'îlot de chaleur (*Heat Island Effect*) a été constaté dans certains parcs présents dans des déserts ([Barron-Gafford et al., 2016](#) ; [Fthenakis et Yu, 2013](#)). Les auteurs mettent en avant la grande surface de ces installations, diminuant les flux d'air et engendrant alors des phénomènes de surchauffe.

Température du sol

L'effet de la couverture des panneaux sur la température du sol semble être relativement analogue à celle de la température de l'air. Si la méta-analyse de [Zhang et al. \(2023\)](#) relève une globale absence de différence entre les températures prises sous les panneaux et en dehors, [Madej \(2020\)](#) constate, en été, un écart moyen de 4 à 5,5°C de moins sous les panneaux, et de 2°C de moins entre les panneaux, par rapport à l'extérieur du parc. Des résultats similaires sont relatés par [Graham et al. \(2021\)](#), [Armstrong et al. \(2016\)](#) et [Wu et al. \(2014\)](#). Ces derniers font par ailleurs état de températures respectivement plus élevées en hiver sous les tables.

Humidité de l'air

L'ensemble des études examinées constatent une hygrométrie globalement plus forte sous les panneaux qu'en-dehors ([Zhang et al., 2023](#) ; [Vervloesem et al., 2022](#) ; [Armstrong et al., 2016](#) ; [Suuronen et al., 2017](#)). [Armstrong et al. \(2016\)](#) observent par ailleurs de plus faibles variations journalières (effet tampon).

Humidité du sol

La méta-analyse de [Zhang et al. \(2023\)](#) relève une globale absence de différence entre l'humidité du sol au droit des panneaux et en-dehors.

Néanmoins, de nombreuses autres publications relatent une plus forte humidité sous les panneaux. [Madej \(2020\)](#) mesure ainsi un sol 11 à 35 % plus humide sous les tables photovoltaïques en été. Des résultats similaires sont constatés par [Graham et al. \(2021\)](#) et [Vellot et al. \(2020\)](#), ainsi que par [Hassanpour Adeh et al. \(2018\)](#), [Wang et al. \(2016\)](#) et [Liu et al. \(2019\)](#) en milieu semi-aride et désertique.

[Lambert et al., 2023](#) relèvent quant à eux des taux d'humidité semblables entre les différentes modalités, interprétant un équilibre entre l'interception par les tables de l'eau pluviale et la rétention de l'évapotranspiration. Des résultats analogues sont constatés par [Armstrong et al., 2016](#).

Propriétés chimiques du sol

La méta-analyse de [Zhang *et al.* \(2023\)](#) relève des teneurs en carbone et en azote globalement similaires entre le sol au droit des panneaux et en-dehors. Le pH serait toutefois significativement plus faible sous les tables. Cette diminution du pH est aussi constatée chez [Vervoesem *et al.* \(2022\)](#), ainsi que [Wang *et al.* \(2016\)](#), en milieu semi-aride.

Ces deux dernières publications relatent par ailleurs, respectivement, de plus fortes teneurs en azote, et de plus fortes charges en matière organique, phosphore et potassium disponibles dans les sols sous les panneaux qu'en-dehors.

[Lambert *et al.*, 2023](#), en milieu méditerranéen, constatent enfin de plus faibles teneurs en carbone et en azote sous les tables, ainsi qu'une plus faible respiration du sol et une diminution de la biomasse microbienne.

4. Synthèse et discussion

Le tableau suivant synthétise les principaux résultats constatés au sein de la bibliographie retenue, premièrement pour les impacts physico-chimiques et microclimatiques, puis pour les impacts sur la végétation. Pour finir, sont résumées les hypothèses avancées par les auteurs afin d'expliquer les processus à l'œuvre.

Impacts physico-chimiques et microclimatiques					
Luminosité	Température		Humidité		Propriétés chimiques du sol
	Air	Sol	Air	Sol	
<p>↓</p> <p>- 20 à - 95 % sous les panneaux</p> <p>- 5 à - 40 % entre les rangs</p> <p>Fonction de la position et de la config. des panneaux (hauteur, surface, inclinaison, orientation, espace inter-rangs)</p>	<p>↓ ou =</p> <p>↓ jour ↓ été ↑ nuit ↑ hiver</p> <p>(auto-équilibrage des températures moyennes)</p> <p>Effet tampon (- de variations temporelles)</p> <p>= si panneaux surélevés</p> <p>↑ si parc de grande surface (îlots de chaleur)</p>	<p>↓</p> <p>↓ été ↑ hiver</p>	<p>↑</p> <p>Effet tampon (- de variations temporelles)</p>	<p>↑ ou =</p> <p>(équilibre entre interception des pluies et rétention de l'évaporation)</p> <p>Effet tampon (- de variations temporelles)</p>	<p>pH ↓ (+ acide)</p> <p>Éléments minéraux (C, N, P, K)</p> <p>↓ ou = ou ↑</p>
Impacts sur la végétation					
Richesse - diversité spécifique	Cortèges			Structure	
<p>↓</p> <p>Richesse spécifique et diversité : jusqu'à 2x plus faible sous les panneaux</p> <p>(les inter-rangs présentent des valeurs de richesse spécifique intermédiaires)</p> <p>↑ si milieux semi-arides ou désertiques</p>	<p>Spp. héliophiles ↓ Spp. sciaphiles ↑ (parfois paradoxalement l'inverse)</p> <p>Graminées ↑ Dicotylédones ↓ (notamment <i>Fabaceae</i>)</p> <p>Spp. exotiques envahissantes ↑</p> <p>Spp. eutrophiles ↑</p> <p>Spp. continentales ↑ Spp. océaniques ↓</p> <p>Spp. annuelles ↑ Spp. pérennes ↓</p>			<p>Biomasse & Recouvrement végétal</p> <p>↓</p> <p>Biomasse : jusqu'à 4 à 5x plus faible sous les panneaux</p> <p>Recouvrement : jusqu'à 5 à 10 % plus faible sous les panneaux</p> <p>↑ si milieux semi-arides ou désertiques</p>	
Hypothèses sur les processus à l'origine de ces effets					
<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la luminosité, défavorisant les espèces prairiales, essentiellement héliophiles Effet tampon sur le microclimat (variations de température et d'humidité moins fortes, moins de valeurs extrêmes), réduisant l'amplitude des niches écologiques et favorisant la compétition, au profit des espèces généralistes et aux dépens des espèces spécialistes En milieux semi-arides et désertiques : atténuation des conditions extrêmes, favorisant une forte apparition d'espèces plus généralistes, aux dépens de rares espèces spécialistes 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la luminosité favorisant les espèces plus sciaphiles et défavorisant les espèces plus héliophiles (parfois, un faible recouvrement végétal sous les panneaux favorise les espèces plus héliophiles) Diminution de la pollinisation par les insectes à l'ombre, défavorisant la flore entomogame, au profit des graminées (anémogames) Dans le cadre d'une gestion par pâturage, davantage d'excréments pourraient enrichir le sol et favoriser les espèces eutrophiles (le bétail se réfugiant régulièrement sous les panneaux afin de se protéger de la météo) Effet tampon sur la pluviométrie, favorisant les espèces continentales aux dépens des espèces océaniques Diminution du recouvrement végétal, facilitant la colonisation par des espèces exotiques envahissantes et favorisant les espèces annuelles aux dépens des espèces pérennes 			<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la luminosité, engendrant une allocation des ressources en faveur de la photosynthèse (plus forte production de chlorophylle), aux dépens du reste des processus physiologiques : croissance rachitique, biomasse amoindrie Diminution du recouvrement végétal, issue du piétinement du bétail lorsque la gestion est réalisée par pâturage (plus forte présence des animaux sous les panneaux), éventuellement aussi causée par des perturbations durant la construction En milieux semi-arides et désertiques : moins de conditions extrêmes, favorisant une biomasse et un recouvrement végétal plus importants 	

Un certain nombre de publications scientifiques et de retours de suivis environnementaux traitent des impacts de l'implantation de parc photovoltaïque sur les écosystèmes et la végétation qui les compose. Par ailleurs, plusieurs relatent de bénéfices engendrés sur la flore ou la faune. Cette bibliographie est néanmoins composée en grande partie de conclusions reposant sur des changements d'occupation des sols (typiquement, conversion de friches industrielles ou de cultures monospécifiques en prairies).

Peu d'études ont cependant été menées afin de cibler les effets de la couverture des milieux prairiaux par les panneaux photovoltaïques et leur impact sur les végétations. À titre d'exemple, dans le cadre de cette recherche bibliographique, seulement sept études analysant de manière robuste l'impact sur la richesse spécifique et selon les modalités fixées, ont pu être retenues.

Il ressort de ces études des résultats globalement délétères pour la flore prairiale. L'ombrage produit par les tables est notamment en cause, défavorable pour les espèces héliophiles qui caractérisent essentiellement les végétations prairiales. Une diminution de la pollinisation par les insectes pourrait aussi expliquer une nette perte des plantes entomogames, notamment des légumineuses, au profit d'une plus forte dominance des graminées, espèces anémogames.

Par ailleurs, la couverture photovoltaïque agit sur le microclimat présent sous les tables en lissant les variations de température et d'humidité, et en tempérant les conditions extrêmes. Cet effet tampon réduirait l'amplitude des niches écologiques et favoriserait ainsi la compétition, aux dépens des espèces les plus spécialistes, alors concurrencées par les espèces plus généralistes.

Cette banalisation des cortèges floristiques est aussi reflétée par une contraction de la richesse spécifique. Elle peut éventuellement s'accompagner d'autres effets plus ou moins néfastes pour le milieu, comme une tendance vers l'eutrophilie, potentiellement liée à la gestion pratiquée par pâturage.

Compte tenu de la place structurante des végétaux au sein des prairies, de tels impacts sont susceptibles d'entraîner d'importants déséquilibres dans les fonctionnalités de ces écosystèmes, que ce soit au niveau des réseaux trophiques, en qualité d'habitat pour la faune, ainsi que pour d'autres services écosystémiques comme la pollinisation ou la séquestration du carbone.

Si la bibliographie considérée met en avant, en majeure partie, des répercussions négatives de la couverture par les panneaux photovoltaïques sur les écosystèmes prairiaux, les conclusions sur les impacts observés restent toutefois assez hétérogènes d'un retour d'expériences à l'autre. Il existe en effet une multitude de paramètres pouvant influencer ces résultats, aussi bien liés à la configuration des installations, à la gestion pratiquée (pâturage, fauche, etc.) ou encore aux caractéristiques des végétations concernées. Ainsi, seule une multiplicité de répliques d'études et de suivis, couvrant les différentes modalités, pourront permettre de définir plus clairement les effets attendus dans un cas ou dans un autre.

5. Bibliographie

ADEME, Devauze C., Planchon M., Lecorps F., Calais M., Borie M. (2019). État de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts.

Armstrong A., Ostle N., Whitaker J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*. 11.

Barron-Gafford G., Minor R., Allen N., Cronin A., Brooks A., Pavao-Zuckerman M. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect : Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*. 6.

Bengtsson J., Bullock J.M., Egoh B., Everson C., Everson T., O'Connor T., O'Farrell P.J., Smith H.G., Lindborg R. (2019). Grasslands – more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*. 10.

Fthenakis V., Yu Y. (2013). Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms. IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, FL, USA.

Gelbard J.L., Belnap J. (2003). Roads as Conduits for Exotic Plant Invasions in a Semiarid Landscape. *Conservation Biology*, 17

Graham M., Ates S., Melathopoulos A.P., Moldenke A.R., DeBano S.J., Best L.R., Higgins C.W. (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.

Hassanpour Adeb E., Selker J.S., Higgins C.W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS One*. 13.

Huyghe C., Peeters A., Vlieghe A. (2015). La prairie en France et en Europe. Colloque présentant les méthodes et résultats du projet Climagie (métaprogramme ACCAF), Poitiers, France.

I Care & Consult et Biotope. (2020). Photovoltaïque et biodiversité : exploitation et valorisation de données issues de parcs photovoltaïques en France. Rapport final.

IDELE, Crestey M., Dervishi V., Fradin J., Pavie J. (2021). L'agrivoltaïsme appliqué à l'élevage des ruminants - Guide à destination des éleveurs et des gestionnaires de centrales photovoltaïques au sol.

Lambert Q., Bischoff A., Enea M., Gros R. (2023). Photovoltaic power stations : an opportunity to promote European semi-natural grasslands ? *Frontiers in Environmental Science*. 11.

Lambert Q., Gros R., Bischoff A. (2022). Ecological restoration of solar park plant communities and the effect of solar panels. *Ecological Engineering*. 182.

Li S., Gao Q., Wang X., Lan L., Yang Z. (2016). Characteristics of vegetation and soil property changes by photovoltaic plant interference in alpine desert steppe. *Journal of Soil and Water Conservation*. 30.

Liu Y., Zhang R.-Q., Huang Z., Cheng Z., López-Vicente M., Ma X.-R., Wu G.-L. (2019). Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in arid sandy ecosystem. *Land and Degradation & Development*. 30.

Madej L. (2020). Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur 2 sites prairiaux pâturés. *Milieux et Changements globaux*.

Montag H., Parker G., Clarkson T. (2016). The effects of solar farms on local biodiversity : a comparative study. *Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity*.

Parker G.E., McQueen C. 2013. Can solar farms deliver significant benefits to biodiversity ? Preliminary Study July-August 2013. *Wychwood Biodiversity & Rowsell and McQueen*.

Pellaton R., Lellei-Kovács E., Báldi A. (2022). Cultural ecosystem services in European grasslands : A systematic review of threats. *Ambio*. 51.

Pié J.-P. (2023). Agrivoltaïsme : 500 000 à 1 million d'hectares évoqués. *GreenUnivers*.

Schils R.L.M., Newell Price J.P., Klaus V.H., Tonn B., Hejduk S., Stypinski P., Hiron M., Fernández P., Ravetto Enri S., Lellei-Kovacs E., Annett N., Markovic B., Lively F., Ten Berge H., Smith K., Forster-Brown C., Jones M., Buchmann N., Janicka M., Fernandez J., Rankin J., McConnell D., Aubry A., Korevaar H. (2020). European permanent grasslands mainly threatened by abandonment, heat and drought, and conversion to temporary grassland. Meeting the future demands for grassland production. 25.

Schindler B.Y., Blaustein L., Lotan R., Shalom H., Kadas G.J., Seifan M. (2018). Green roof and photovoltaic panel integration : Effects on plant and arthropod diversity and electricity production. *Journal of Environmental Management*. 225.

Semeraro T., Pomes A., Del Giudice C., Negro D., Arenato R. (2018). Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. *Energy Policy*. 117.

Suuronen A., Muñoz-Escobar C., Lensu A., Kuitunen M., Celis N.G., Astudillo P.E., Ferrú M., Taucare-Ríos A., Miranda M.D., Kukkonen J.V.K. (2017). The influence of solar power plants on microclimatic conditions and the biotic community in chilean desert environments. *Environmental management*. 60.

Uldrijan D., Černý M., Winkler J. (2022). Solar Park – Opportunity or threat for vegetation and ecosystem. *Journal of Ecological Engineering*. 23.

Vellot O., Kaldonski N., Thorel M., Cluchier A., Illac P., Pillods M. (2020). PIESO BOOST, Boîte à Outils pour l'Optimisation des Suivis écologiques et des Techniques d'intégration de l'énergie solaire.

Vervloesem J., Marcheggiani E., Choudhury M., Muys B. (2022). Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. *Sustainability*. 14.

Wang T., Wang D., Guo T., Zhang G., Zhao S., Niu H., Lu S., Lin H. (2016). The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation. *Research of Soil and Water Conservation*. 23.

Wilson J.B., Peet R.K., Dengler J., Pärtel M. (2012). Plant species richness : the world records. *Journal of Vegetation Science*. 23.

Wu Z., Hou A., Chang C., Huang X., Shi D., Wang Z. (2014). Environmental impacts of large-scale CSP plants in North-western China. *Environmental Science : Processes and Impacts*. 16.

Zhai B., Gao Y., Dang X.-H., Chen X., Cheng B., Liu X.-J., Zhang C. (2018). Effects of photovoltaic panels on the characteristics and diversity of *Leymus chinensis* community. *Chinese Journal of Ecology*. 37.

Zhang Y., Tian Z., Liu B., Chen S., Wu J. (2023). Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial ecosystems : A meta-analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 11.

Zhang Z., Shang W., Wang Q., Fu G., Zhang W., Wang X. (2020). Biodiversity of herbaceous species under large photovoltaic power stations in desert region of Hexi corridor. *Journal of Northwest Forestry University*. 35.