



HAL
open science

Méta-analyse de l'impact des centrales photovoltaïques sur les communautés végétales

Alix Lafitte, Dakis-Yaoba Ouédraogo, Romain Sordello, Yorick Reyjol

► **To cite this version:**

Alix Lafitte, Dakis-Yaoba Ouédraogo, Romain Sordello, Yorick Reyjol. Méta-analyse de l'impact des centrales photovoltaïques sur les communautés végétales. PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD). 2024. hal-04585570

HAL Id: hal-04585570

<https://hal.science/hal-04585570>

Submitted on 23 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méta-analyse de l'impact des centrales photovoltaïques sur les communautés végétales

Alix Lafitte, Dakis-Yaoba Ouédraogo,
Romain Sordello & Yorick Reyjol



PATrINAT

Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel

Un service commun
de l'Office français de la biodiversité,
du Muséum national d'Histoire naturelle,
du Centre national de la recherche scientifique
et de l'Institut pour la recherche et le développement



Nom du Projet : SOLAIRE-PB

Convention et financeurs : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB)

Responsable de l'étude : Alix Lafitte

Chef de l'équipe en charge du programme : Yorick Reyjol

Contributeurs et experts mobilisés : Dakis-Yaoba Ouédraogo, Romain Sordello

Relecteurs : Dakis-Yaoba Ouédraogo, Romain Sordello, Yorick Reyjol, Joseph Langridge, Hervé Jactel

Référence du rapport conseillée :

Lafitte A., Ouédraogo D.-Y., Sordello R., Reyjol Y. 2024. Méta-analyse de l'impact des centrales photovoltaïques sur les communautés végétales. PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD), Paris, 23p.

PatriNat

Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel



Dans une unité scientifique associant des ingénieurs, des experts et des spécialistes de la donnée, PatriNat rapproche les compétences et les moyens de ses quatre tutelles que sont l'OFB, le MNHN, le CNRS et l'IRD.

PatriNat coordonne des programmes nationaux d'acquisition de connaissance pour cartographier les écosystèmes, les espèces et les aires protégées, surveiller les tendances de la biodiversité terrestre et marine, répertorier les zones clés pour la conservation de la nature (Znieff), et produire des référentiels scientifiques et techniques (TaxRef, HabRef, etc.). Ces programmes associent de nombreux partenaires et fédèrent les citoyens à travers des observatoires de sciences participatives (tels que Vigie-Nature, INPN espèces ou Vigie-terre).

PatriNat développe des systèmes d'information permettant de standardiser, partager, découvrir, synthétiser et archiver les données aussi bien pour les politiques publiques (SIB, SINP) que pour la recherche (PNDB) en assurant le lien avec les systèmes internationaux (GBIF, CDDA, etc.)

PatriNat apporte son expertise dans l'interprétation des données pour accompagner les acteurs et aider les décideurs à orienter leurs politiques : production d'indicateurs, notamment pour l'[Observatoire national de la biodiversité](#) (ONB) et des livrets de chiffres clés, élaboration des Listes rouges des espèces et écosystèmes menacés, revues systématiques, préparation des rapports pour les directives européennes, élaboration d'outils de diagnostic de la biodiversité pour les acteurs des territoires, ou encore évaluation de l'efficacité des mesures de restauration. PatriNat organise également l'autorité scientifique CITES pour la France.

L'ensemble des informations (de la donnée brute à la donnée de synthèse) est rendu publique dans les portails NatureFrance, INPN et Compteur BIOM.

En savoir plus : www.patrinat.fr

Direction : Laurent PONCET et Julien TOUROULT

Naturefrance

Le service public d'information sur la biodiversité



Naturefrance représente le service public d'information sur les politiques publiques de biodiversité en France. Il se décline dans plusieurs portails d'information, dont le portail général naturefrance.fr. Destiné à un public aussi large que possible, il propose des clés de lecture des grands enjeux liés à la biodiversité et à son évolution, aux pressions qu'elle subit, et aux réponses de la société. Naturefrance présente des chiffres clés, des indicateurs développés dans le cadre de l'ONB (Observatoire national de la biodiversité), des articles et des publications, issus de l'analyse scientifique des données provenant des politiques publiques de conservation ou d'activités socio-économiques favorables ou défavorables à la biodiversité.

Dans le cadre de cette mission confiée par l'OFB, PatriNat gère ce portail et participe au traitement, à l'analyse et à l'interprétation d'une partie des données versées sur Naturefrance : par exemple, celles provenant du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (SINP) ou encore du Système d'information de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (SI CITES).

En savoir plus : naturefrance.fr

Inventaire national du patrimoine naturel

Le portail de la biodiversité et de la géodiversité françaises, de métropole et d'outre-mer



Dans le cadre de Naturefrance, l'Inventaire national du patrimoine naturel (INPN) est le portail de la biodiversité et de la géodiversité françaises, de métropole et d'outre-mer (www.inpn.fr). Il regroupe et diffuse les informations sur l'état et les tendances du patrimoine naturel français terrestre et marin (espèces animales, végétales, fongiques et microbiennes actuelles et anciennes, habitats naturels, espaces protégés et géologie) en France métropolitaine et ultramarine.

Les données proviennent du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (SINP) et de l'ensemble des réseaux associés. PatriNat organise au niveau national la gestion, la validation, la centralisation et la diffusion de ces informations. L'inventaire consolidé qui en résulte est l'aboutissement d'un travail associant scientifiques, collectivités territoriales, naturalistes et associations de protection de la nature, en vue d'établir une synthèse régulièrement mise à jour du patrimoine naturel en France.

L'INPN est un dispositif de référence français pour la connaissance naturaliste, l'expertise, la recherche en macroécologie et l'élaboration de stratégies de conservation efficaces du patrimoine naturel. L'ensemble de ces informations sont mises à la disposition de tous, professionnels, amateurs et citoyens.

En savoir plus : www.inpn.fr

Compteur Biodiversité Outre-mer

Le portail des indicateurs, des enjeux et des initiatives sur la biodiversité en outre-mer



Dans le cadre de Naturefrance, le Compteur de la biodiversité Outre-mer (BiOM) développe une entrée dédiée aux territoires ultramarins français qui abritent une part importante de la biodiversité mondiale. Portail accessible, actualisé et pérenne, il favorise la rencontre des citoyens et des acteurs de la biodiversité, autour de trois objectifs : partager la connaissance scientifique, valoriser les actions des territoires ultramarins, et encourager chacun à agir. Cette démarche vise à relater les contextes culturels et mettre en avant des enjeux spécifiques de chaque territoire, pour répondre à un engagement du Livre bleu des Outre-mer.

Des études auprès des citoyens viennent compléter l'initiative : par exemple le premier panorama des programmes de sciences participatives dans les territoires, et une enquête sur la perception de la nature et l'utilisation des outils numériques.

PatriNat assure la mise en œuvre du projet et avec la participation des acteurs des outre-mer, suivant trois axes : production d'indicateurs de biodiversité (connaissances, espèces menacées, espaces protégés, etc.), relai des actions de mobilisation et de sciences participatives (écogestes, inventaires participatifs, etc.) et gestion technique du portail

En savoir plus : biodiversite-outre-mer.fr

Sommaire

Résumé graphique	2
Contexte	2
Objectif	4
Méthode	4
Critères d'inclusion/exclusion des métadonnées	5
Méthode d'extraction des métadonnées et des données quantitatives pour la méta-analyse ...	5
Synthèse quantitative et méta-analyse.....	7
Résultats	10
Méta-analyses	14
Limites de la méthode et de la base de connaissance	17
Discussion	18
Conclusion	21
Références	21

Résumé graphique



Figure 1. Résumé graphique illustrant les effets des panneaux photovoltaïques sur les communautés végétales. Les flèches rouges montrent la diminution statistiquement significative de la diversité végétale sous les panneaux photovoltaïques par rapport à la zone en inter-rang située entre les panneaux. Aucun effet statistiquement significatif des panneaux photovoltaïques sur l'abondance de la végétation n'a en revanche été détecté.

Contexte

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique [1], les installations de production d'énergie renouvelable sont amenées à rapidement se développer [2]. Celles-ci sont considérées comme des alternatives prometteuses aux énergies fossiles traditionnelles, leur production de gaz à effet de serre étant jugée comme beaucoup plus faible [3]. L'énergie solaire, en particulier, connaît aujourd'hui une expansion spectaculaire, à tel point que la capacité mondiale en électricité photovoltaïque aura probablement dépassée celle du charbon à partir de 2027 [2,4]. En France aussi, la production d'électricité photovoltaïque est amenée à fortement se renforcer, notamment en lien avec l'ambition du gouvernement de tripler la puissance installée en énergie solaire pour atteindre 48 GW en 2030, ce qui permettrait, en partie, de remplir l'objectif d'un mix énergétique français composé à 33% d'énergie renouvelable à cette même date [5].

Toutefois, ces installations photovoltaïques présentent un risque pour la biodiversité et les écosystèmes, notamment pendant leur construction et leur démantèlement mais aussi tout au long de leur phase de fonctionnement. D'abord, les installations photovoltaïques ont une emprise au sol conséquente et occupent donc de grandes surfaces [6]. Elles peuvent donc potentiellement impacter les habitats naturels, dont ceux protégés et ayant une forte importance écologique [7–9]. Des travaux scientifiques montrent que les installations photovoltaïques sont notamment susceptibles d'entraîner des modifications de la pédofaune et des communautés végétales [10,11], des changements de comportement chez les insectes [12] et d'activité chez les chiroptères [13] ou bien même des mortalités pour l'avifaune [14]. L'expansion rapide des installations photovoltaïques laisse donc imaginer un impact potentiellement fort sur la biodiversité et les écosystèmes naturels.

Dans ce contexte, PatriNat (OFB–MNH–CNRS–IRD) a mené un travail de carte systématique ayant pour objectif de recenser de manière la plus exhaustive possible la littérature disponible concernant les

effets des installations photovoltaïques sur les espèces sauvages terrestres et semi-aquatiques. Ce travail a été mené en suivant des lignes directrices standardisées à l'échelle internationale et a donné lieu à une publication dans la revue *Environmental Evidence* [15]. Cette carte systématique montre en premier lieu un manque substantiel d'études pour la plupart des espèces et taxons et aussi sur les potentiels impacts des centrales photovoltaïques. Cette carte systématique a également permis de mettre en évidence que **les communautés végétales représentaient le groupe taxonomique le plus étudié**. Avec 186 métadonnées identifiées, ce taxon semblait suffisamment conséquent pour envisager la réalisation d'une synthèse de résultats sous la forme d'une méta-analyse (Figure 2).

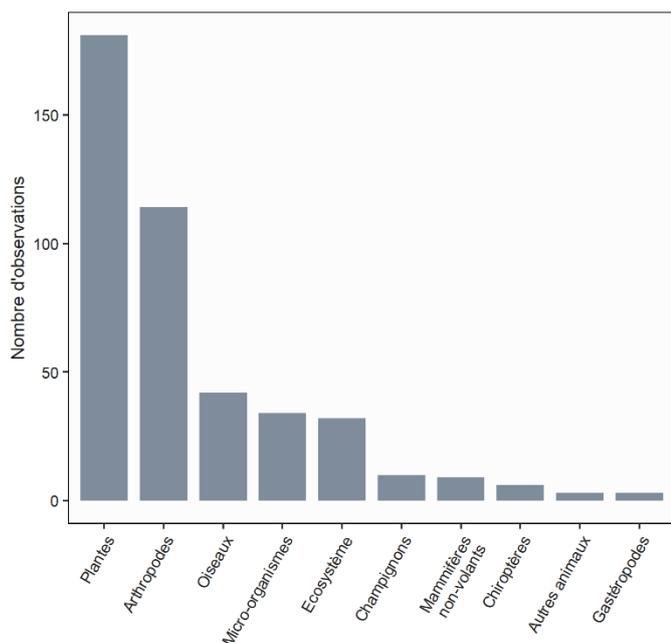


Figure 2. Nombre de métadonnées identifiées dans la carte systématique par taxon. Adapté de Lafitte *et al.* [15]. Ecosystème indique les études menées à l'échelle d'un écosystème entier et non d'un unique taxon.

étaient moins nombreuses dans les zones situées sous les panneaux, qui étaient plutôt dominées par les poacées. En revanche, en climat aride, l'effet exactement inverse a été décrit par Liu *et al.* [17] avec un gain de diversité et de biomasse sous les panneaux et dans l'inter-rang par rapport à leur référence située hors de la centrale photovoltaïque.

L'importante quantité d'études disponibles dans la littérature portant sur la flore a d'ores et déjà amené Zhang *et al.* [18] à réaliser une méta-analyse étudiant les effets des panneaux photovoltaïques sur certains paramètres abiotiques ainsi que sur les communautés végétales. Leur synthèse a montré que la couverture et la biomasse végétale étaient généralement supérieures sous l'influence des panneaux photovoltaïques alors que la richesse et la diversité de la végétation ne semblaient pas être impactées. Zhang *et al.* [18] ont aussi étudié l'influence du contexte, et notamment la nature de l'habitat initial, sur les effets observés des installations photovoltaïques. Ainsi, ils ont pu observer, en contraste avec les effets globaux que, dans le cas spécifique des habitats forestiers, la couverture et la richesse végétales étaient inférieures sous les panneaux photovoltaïques et que dans le cas des déserts, la biomasse végétale n'était

pas significativement impactée par leur présence. Cette synthèse, bien que représentant un premier jalon pour affiner notre compréhension des effets des panneaux photovoltaïques sur la flore, se base sur un nombre d'études limité, et dont la majorité ont été menées en Chine, ce qui représente donc un biais géographique fort. De plus, la nature des témoins utilisés dans les études agrégées par Zhang et al. [18] n'est pas clairement explicitée. Il est donc impossible de savoir si le témoin utilisé par les auteurs se situe en inter-rang [16,19,20], dans des zones ouvertes au sein des centrales photovoltaïques [10,16,19] ou bien en dehors des centrales [21,22]. Nous avons donc décidé de mettre à profit la littérature identifiée de manière standardisée et exhaustive au sein de notre carte systématique afin d'étudier les impacts des installations photovoltaïques sur la flore avec plus de précision et également d'obtenir des résultats plus généralisables.

Objectifs

Cette synthèse a pour but de déterminer **l'effet de la présence des installations photovoltaïques, notamment les centrales photovoltaïques, sur l'abondance, la biomasse et la diversité des communautés végétales**. Elle a également pour objectif de caractériser avec précision le gradient de pression associé aux installations photovoltaïques : depuis la zone *P* située sous les panneaux photovoltaïques, dans la zone *I* située en inter-rang entre les panneaux, et jusqu'aux zones témoins *T* ouvertes situées au sein des centrales mais hors de l'influence des panneaux. Enfin, cette synthèse a aussi pour but de mieux caractériser **l'influence du contexte climatique** sur les réponses des communautés végétales aux installations photovoltaïques.

Méthode

Cette synthèse se base sur les résultats de la carte systématique traitant des effets des installations photovoltaïques sur la biodiversité, récemment publiée par PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD) [15]. Cette carte intégrait tous types d'installations photovoltaïques qu'elles consistent en de simples panneaux photovoltaïques, des tables de plusieurs panneaux alignés (par exemple, toitures végétalisées) ou bien même des centrales photovoltaïques. La méthode appliquée dans cette carte suivait les recommandations de la *Collaboration for Environmental Evidence* (CEE) [19] et consiste en : (i) une recherche standardisée de la littérature disponible, (ii) le tri des références extraites, et (iii) l'extraction des métadonnées permettant de décrire ces études avec précision. Dans le cadre de cette carte systématique, une analyse critique a aussi été réalisée permettant de déterminer, selon des critères standardisés et définis *a priori*, le degré de confiance qui pouvait être accordé à la base de connaissance identifiée. Cette étape est souvent absente des revues de littérature traditionnelles [20,21] alors que pourtant, l'évaluation des risques de biais des études est indispensable pour pondérer les résultats dans un travail de synthèse [22,23].

Critères d'inclusion/exclusion des métadonnées

Nous avons uniquement sélectionné les métadonnées de la carte systématique traitant de l'effet de la présence des installations photovoltaïques sur la flore (et non celles étudiant l'effet de la gestion ou du type d'installation par exemple). Ces publications portaient essentiellement sur les communautés de plantes herbacées, les seules étant amenées à se développer au sein des installations photovoltaïques, un milieu nécessairement gardé ouvert pour limiter l'ombrage des panneaux photovoltaïques et donc optimiser la production d'énergie. Seules les métadonnées portant sur les types de mesures les plus étudiés d'abondance (par exemple, pourcentage de couverture, densité), de composition et de diversité des communautés végétales (par exemple, richesse, indice de Shannon, indice de Simpson) et de biomasse végétale (notamment, masse sèche) ont été conservées pour des raisons de taille d'effectifs. Ces métadonnées étudiaient la plupart du temps la pression exercée par les panneaux photovoltaïques sur la flore en comparant des zones *P* sous les panneaux photovoltaïques, *I* en inter-rang entre les panneaux et *T* témoins et ouvertes situées au sein des installations photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux (Figure 3). Parfois, les auteurs ont également étudié des zones *R* de références ou bien des zones PV plus généralistes, soumises à l'influence des panneaux photovoltaïques mais sans distinction précise de localisation (par exemple, l'ensemble d'une centrale photovoltaïque). Enfin, nous nous sommes uniquement concentrés sur les études de recherche dite « primaire », qu'elles soient expérimentales ou bien observationnelles ; les études de modélisation n'ont donc pas été considérées.

Ce sous-échantillon de la carte systématique a finalement représenté un volume de 30 publications et de 80 métadonnées provenant de la carte systématique (une publication ayant pu produire plusieurs métadonnées différentes au cours de l'extraction, par exemple si plusieurs espèces ou plusieurs types de mesure ou *outcome* avaient été étudiés dans cette publication).

Méthode d'extraction des métadonnées et des données quantitatives pour la méta-analyse

Les 80 métadonnées provenant de la carte systématique ont été décomposées en cas d'études, chaque cas d'études correspondant à une espèce et à un type de mesure de la végétation (par exemple, pourcentage de recouvrement de l'espèce *Lolium perenne* L.).

La méta-analyse nécessitant une base de données quantitatives standardisées, les résultats des publications ont été extraits sous la forme : n taille d'échantillons, μ moyenne et SD écart-type. Nous avons en priorité calculé ces paramètres à partir des données brutes si celles-ci étaient fournies par les auteurs. Dans la majeure partie des cas cependant, ces paramètres ont été extraits des tableaux ou bien des figures grâce au paquet *metaDigitise* [24] disponible sous le logiciel R (version 4.3.1) [25]. Parfois, les auteurs ont pu renseigner leur résultat sous la forme $\mu \pm SE$, avec SE , l'erreur standard. Si la valeur de la taille d'échantillon n était connue, ces valeurs d'erreur standard ont été transformées en valeurs d'écart-type pour permettre l'analyse des données. Dans les cas où les auteurs avaient renseigné une mesure de

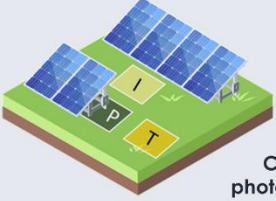
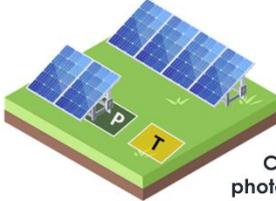
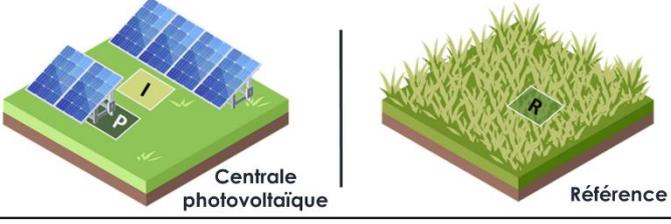
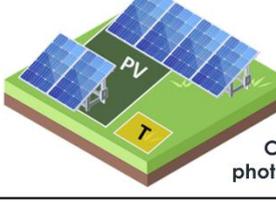
Type de comparaison	Exemple illustré	Description
<u>PIT</u>	 Centrale photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison des traitements P sous les panneaux photovoltaïques et I en inter-rang entre les panneaux et du témoin T en zone ouverte au sein des centrales mais hors de l'influence des panneaux
<u>PT</u>	 Centrale photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison du traitement P sous les panneaux photovoltaïques et du témoin T en zone ouverte au sein des centrales mais hors de l'influence des panneaux
<u>PI</u>	 Centrale photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison des traitements P sous les panneaux photovoltaïques et I en inter-rang entre les panneaux
<u>PIR</u>	 Centrale photovoltaïque Référence	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison des traitements P sous les panneaux photovoltaïques et I en inter-rang entre les panneaux et de la référence R située hors de la centrale photovoltaïque
<u>PVT</u>	 Centrale photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison du traitement PV correspondant à l'installation photovoltaïque et du témoin T en zone ouverte au sein des centrales mais hors de l'influence des panneaux photovoltaïques
<u>PVR</u>	 Centrale photovoltaïque Référence	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison du traitement PV correspondant à l'installation photovoltaïque et de la référence R située hors de la centrale photovoltaïque

Figure 3. Schéma présentant les différents types de comparaisons et de traitements ayant été étudiés dans la littérature. La première ligne grisée correspond au gradient de pression spécifiquement étudié au sein de la méta-analyse. Les comparaisons soulignées sont celles pour lesquelles des données ont pu être analysées au sein de la méta-analyse. Par souci de concision, seules les comparaisons menées au sein des centrales photovoltaïques sont montrées mais ces types de comparaison peuvent également s'appliquer dans les autres types d'installations photovoltaïques.

variation mais dont la nature restait imprécise (et invérifiable), nous l'avons considéré comme étant une mesure d'erreur standard, choix qui nous a semblé le plus conservateur [26].

En plus des métadonnées déjà présentées dans la carte systématique, des métadonnées additionnelles et utiles pour l'interprétation des résultats ont été extraites. Elles concernent :

- le type d'exposition : âge de l'installation photovoltaïque, angle et orientation des panneaux photovoltaïques, hauteur des panneaux, largeur de l'inter-rang, surface occupée par les panneaux, surface occupée par la centrale photovoltaïque (au sein de la clôture) ;
- l'espèce au niveau le plus précis étudié ;
- le type de mesure : masse sèche, pourcentage de recouvrement, densité, composition, richesse spécifique, indices de Shannon ou de Simpson, etc. ;
- la localisation dans la publication et la nature précise de la donnée extraite ont également été enregistrées ; plus spécifiquement, sa complétude et si toutes les données nécessaires au calcul des tailles d'effet étaient présentes ou bien si la taille d'échantillon et/ou la mesure de variation manquaient.

En ce qui concerne les données pour la synthèse narrative, elles ont uniquement été extraites des études présentant des comparaisons testées statistiquement et sont fournies dans le tableau d'extraction des données (base de données finale en Appendices).

Synthèse quantitative et méta-analyse

Pour réaliser la méta-analyse, nous avons uniquement sélectionné les données complètes d'abondance, de biomasse et de diversité végétale (excepté les mesures de diversité fonctionnelle trop peu nombreuses et jugées non homogènes), c'est-à-dire qui comprenaient toutes au moins une valeur de taille d'échantillon n , de moyenne μ et une valeur d'écart-type SD . En raison de la faible disponibilité des données, nous avons dû concentrer nos analyses sur P , la zone sous les panneaux photovoltaïques, I , la zone en inter-rang entre les panneaux et T , la zone témoin ouverte située au sein des installations photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux (cf. *PIT* Figure 3). Il faut noter que les mesures de composition des communautés végétales étant la plupart du temps non quantitatives et plutôt descriptives, elles n'ont donc pas été analysées au sein de cette méta-analyse.

Nous avons suivi le guide proposé par Nakagawa *et al.* [27] qui vise à optimiser la réalisation des méta-analyses dans le contexte des sciences environnementales. Tout d'abord, nous avons calculé les tailles d'effet sous forme de différences de moyennes standardisées (SMD, g de Hedges) pour chaque type de comparaison : PI , taille d'effet entre les traitements P sous les panneaux photovoltaïques et I en inter-rang entre les panneaux ; IT , taille d'effet entre le traitement I en inter-rang et le témoin T en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux ; PT , taille d'effet entre le traitement P sous panneau et le témoin T . Ces tailles d'effet peuvent être définies comme étant une comparaison entre un traitement et un témoin et pour laquelle des données quantitatives complètes sont fournies par les auteurs. La formule suivante permet de calculer la différence de moyennes standardisée (g de Hedges) pour la comparaison PI :

$$d_{i,PI} = \frac{\bar{x}_{i,Inter-rang} - \bar{x}_{i,Panneau}}{SD_{groupé_i}} \times J_i$$

avec $\bar{x}_{i,Panneau}$ et $\bar{x}_{i,Inter-rang}$, les moyennes des traitements P sous panneau et I en inter-rang pour une i -ème étude et $SD_{groupéi}$, l'écart-type total calculé selon la formule suivante :

$$SD_{groupéi} = \sqrt{\frac{(n_{i,Inter-rang} - 1)SD_{i,Inter-rang}^2 + (n_{i,Panneau} - 1)SD_{i,Panneau}^2}{n_{i,Inter-rang} + n_{i,Panneau} - 2}}$$

avec $n_{i,Panneau}$ et $n_{i,Inter-rang}$, les tailles d'échantillon des traitements P sous panneau et I en inter-rang pour une i -ème étude et $SD_{i,Panneau}^2$ et $SD_{i,Inter-rang}^2$, les écart-types des traitements P sous panneau et I en inter-rang pour une i -ème étude. Avec une telle formule, une taille d'effet $d_{i,PI}$ positive signifie que la variable de réponse est plus importante dans l'inter-rang I que dans la zone P sous les panneaux, l'effet des panneaux photovoltaïques est donc jugé comme étant négatif, tandis qu'une taille d'effet négative signifie, à l'inverse, que la variable de réponse est plus importante dans la zone P sous les panneaux que dans l'inter-rang I . Une taille d'effet nulle signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements P sous panneau et I en inter-rang. J_i représente une correction pour les petites tailles d'échantillon :

$$J_i = 1 - \frac{3}{4(n_{i,Inter-rang} + n_{i,Panneau} - 2) - 1}$$

La variance de $d_{i,PI}$ qui intervient dans le calcul du poids des tailles d'effet dans les modèles est calculée par :

$$var(d_{i,PI}) = \frac{n_{i,Inter-rang} + n_{i,Panneau}}{n_{i,Inter-rang} n_{i,Panneau}} + \frac{d_{i,PI}^2}{2(n_{i,Inter-rang} + n_{i,Panneau})}$$

Dans un souci de concision, ces formules ne sont rappelées que pour la comparaison entre les traitements P sous les panneaux et I inter-rang mais s'appliquent de la même manière pour les comparaisons IT , entre le traitement I en inter-rang et le témoin T et PT , entre le traitement P sous panneau et le témoin T .

Comme certaines études incluses dans notre méta-analyse ont pu comparer à la fois les traitements P sous les panneaux et I inter-rang ainsi que le témoin T (cf. *PIT* Figure 3), les 165 cas d'études identifiés lors de l'extraction des données quantitatives ont produit 233 tailles d'effet différents (comparaisons de traitements deux à deux). Le fait qu'une étude de recherche primaire ait pu produire plusieurs tailles d'effet différentes entraîne une dépendance statistique dans le jeu de données qu'il est nécessaire de prendre en compte dans les méta-analyses ($N = 17$ publications de recherche primaire mais $k = 233$ tailles d'effet différentes, produisant donc une dépendance statistique de $k/N = 13,7$). Plus spécifiquement, dans le cas de ce jeu de données, la dépendance statistique peut aussi être générée par (i) la multiplicité des types de mesures effectuées sur une seule et même population (par exemple, richesse spécifique et indice de Shannon) et par (ii) le fait que les témoins au sein d'un même étude peuvent être partagés entre plusieurs tailles d'effet (notamment, designs expérimentaux comparant T le témoin, une zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques, avec à la fois un traitement P sous panneau ainsi qu'avec un traitement I en inter-rang). Ainsi, pour prendre en compte la dépendance entre tailles d'effet, nous avons utilisé des modèles de méta-régression mixtes avec en effet aléatoire l'identifiant de la taille d'effet imbriqué dans

l'étude. Pour prendre en compte la non-indépendance entre mesures de variation, nous avons également construit les matrices de Variance-Covariance, dont la constante de corrélation entre études ρ a été paramétrée à 0,5.

La première étape de l'analyse a consisté à calculer pour chaque comparaison *PI*, *IT* et *PT* (Figure 3), la taille d'effet globale et vérifier la présence d'une hétérogénéité au sein ou entre les tailles d'effet et ce, pour les deux variables de réponse d'abondance et de diversité de la végétation. Dans l'analyse, les mesures d'abondance comme le pourcentage de couverture ou la densité et les mesures de biomasse ont été regroupées dans une variable de réponse 'Abondance'. Les mesures de richesse spécifique et les indices de Shannon et de Simpson ont été considérés comme faisant parties d'une seule variable de réponse 'Diversité' et ont donc été analysés ensemble.

Dans le cas où l'hétérogénéité entre les tailles d'effet avait été vérifiée, nous avons cherché à l'expliquer en testant l'influence de variables explicatives ou « modérateurs » sur les tailles d'effet. Ainsi, comme la littérature semble indiquer que les effets des panneaux photovoltaïques sur les communautés végétales dépendent du contexte climatique, **le climat** (aride ou tempéré) a été inclus comme premier modérateur. **Le type de mesure** (pourcentage de couverture, de biomasse, de richesse spécifique, ou bien indices de Shannon ou de Simpson) a été intégré comme second modérateur dans les modèles de méta-régression. **La taille des placettes expérimentales** pouvant également influencer les tailles d'effet, cette variable (continue) a également été intégrée en tant que modérateur dans les modèles, ainsi que **le risque de biais** (soit faible, fort ou incertain) évalués lors de l'analyse critique de la carte systématique. Enfin, pour tester la présence de **biais de publication**, deux variables liées à la taille d'échantillon appelée « effet des petites études » (les études qui ont de faibles tailles d'échantillon ayant moins de chance de trouver un effet statistiquement significatif et donc d'être publiées), et à l'année de publication appelée « effet de déclin » (les études trouvant un effet statistiquement significatif ayant plus de chance d'être publiées rapidement) ont aussi été intégrées comme modérateurs dans les modèles [28].

Nous avons d'abord construits des modèles de méta-régression complets incluant tous les modérateurs précédemment cités (Tableau 1, Tableau supplémentaire 1). Cependant, en raison du faible nombre d'études de recherche primaire disponibles (N=17), certains modérateurs sont apparus comme étant trop peu représentés et n'ont donc pas pu être testés au sein de nos modèles, ayant considéré qu'un seuil minimum de deux études par modérateur devait être atteint (Appendices, Tableau supplémentaire 1). Pour chaque méta-analyse, nous avons ensuite cherché le modèle le plus parcimonieux permettant d'expliquer au mieux l'hétérogénéité observée des tailles d'effet. Pour cela, nous avons testé toutes les combinaisons possibles de modérateurs et calculé les différences de critère d'information d' Akaike corrigé (AICc) entre tous les modèles ($\Delta AICc$). Pour chaque méta-analyse, nous avons finalement sélectionné le modèle le plus parcimonieux qui remplissaient la condition $\Delta AICc \leq 2$ et dans les cas où plusieurs modèles remplissaient cette condition, ceux-ci ont été moyennés [29].

Tableau 1. Modèle de méta-régression complet testé pour les deux variables de réponse d'abondance et de diversité ainsi que pour chaque type de comparaison.

Structure du modèle	Variable à expliquer ~ Paramètres du modèle (variables explicatives ou « modérateurs »)
Modèle complet testé	Taille d'effet ~ Climat + Type de mesure + Taille des placettes expérimentales + Biais de publication + Risque de biais

Les biais de publication correspondent au biais lié à la taille d'échantillon appelée « effet des petites études » (les études qui ont de faibles tailles d'échantillon ayant moins de chance de trouver un effet statistiquement significatif et donc d'être publiées), et au biais lié à l'année de publication appelée « effet de déclin » (les études trouvant un effet statistiquement significatif ayant plus de chance d'être publiées rapidement). Les risques de biais proviennent des résultats de la carte systématique [15].

Pour vérifier la robustesse de nos résultats vis-à-vis des méthodes appliquées et des hypothèses formulées, nous avons conduit des analyses de sensibilité pour chaque modèle testant la taille d'effet globale (modèles sans modérateurs). Nous avons ainsi vérifié l'influence : (i) de la méthode de calcul de la non-indépendance entre mesures de variation, soit avec matrice de Variance-CoVariance (VCV), ou bien en suivant la méthode dite d'Estimation de Variance Robuste (RVE) ; (ii) des hypothèses formulées lors du calcul des matrices VCV, notamment en faisant varier la valeur de la constante ρ entre 0,3 et 0,9 ; et (iii) de la présence de valeurs extrêmes ou de publications pouvant potentiellement influencer sur les estimations de taille d'effet globale (analyses dites « *leave one out* »).

Dans tous les modèles, les tailles d'effet ont été pondérées de sorte que les tailles d'effet les plus précises aient le plus de poids dans l'analyse. Les paramètres des modèles ont été estimés par la méthode de la vraisemblance restreinte (dite procédure '*restricted maximum likelihood*' en anglais). Le faible nombre d'étude de recherche primaire disponibles (N=17) nous a conduit à paramétrer les tests statistiques des différents modèles de méta-régression avec une distribution *t* (et donc pas avec une distribution normale). Toutes les analyses ont été réalisées sous R (version 4.3.1) [25] grâce au paquet *metafor* [30]. Les figures ont été produites avec l'aide du paquet *ggplot2* [31] et du paquet *orchaRd 2.0* pour la visualisation des tailles d'effet globales [32].

Résultats

Nous avons extrait les données des publications identifiées dans la carte systématique portant sur l'abondance, la composition et la diversité des communautés végétales ainsi que celles traitant des effets des panneaux photovoltaïques sur la biomasse végétale. Au total, les 30 publications et 80 métadonnées de la carte systématique ont produit **434 cas d'études, dont 392 présentaient un résultat quantitatif (90,3%) et 207, un résultat utilisable (comparaison statistiquement testée) dans le cadre de la synthèse narrative (47,7%)** (Figure 4).

Schéma ROSES pour revues systématiques. Version 1.0

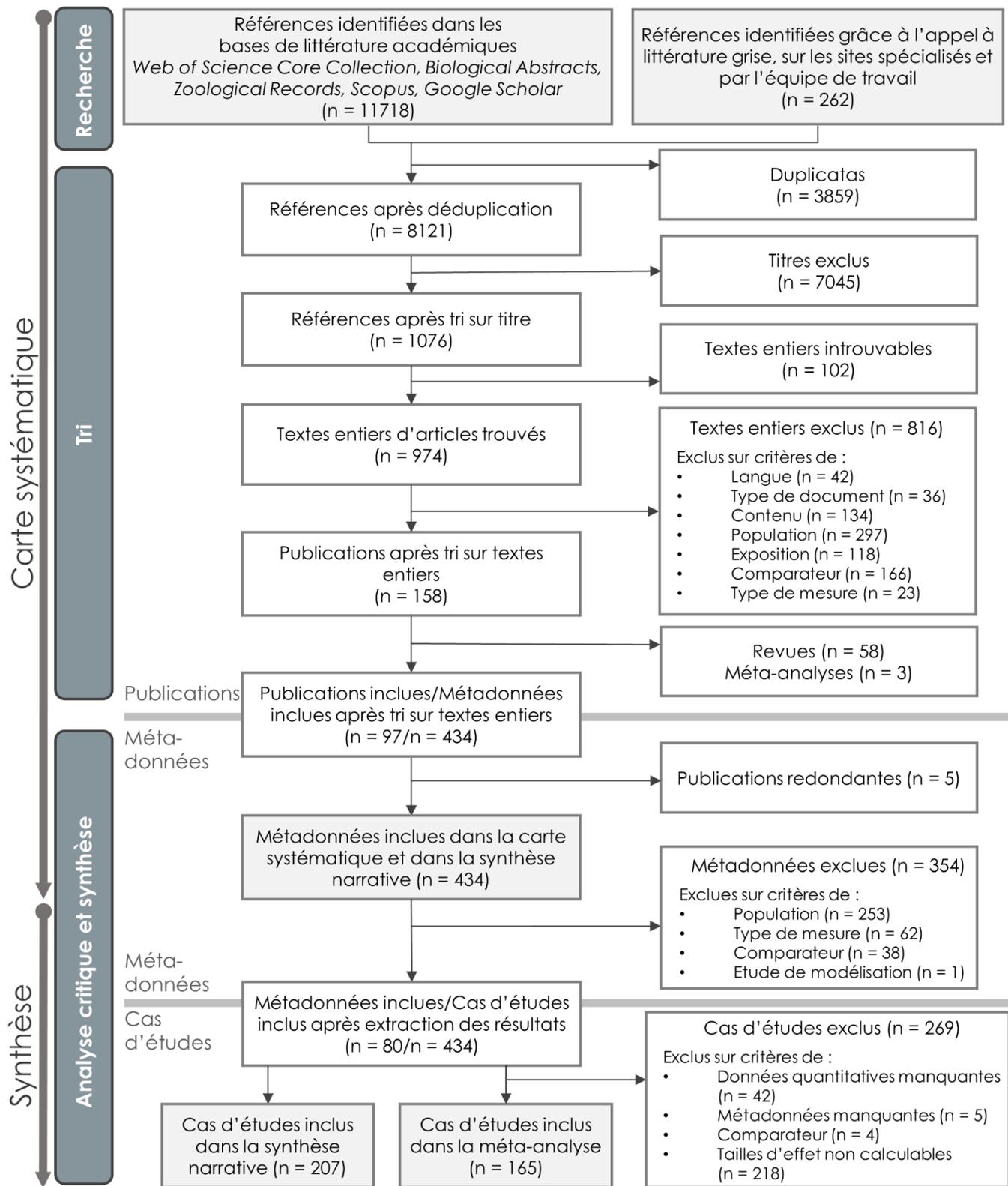


Figure 4. Schéma montrant les processus et étapes clés de la réalisation de la carte systématique et de cette synthèse. Schéma ROSES adapté de Haddaway et al. [32]. Métadonnées, publications de la carte systématique séparées par type d'exposition, par type de comparateur, par groupe biologique et type de mesure (ou *outcome*) étudiés. Cas d'études, niveau supérieur de précision où les métadonnées de la carte systématique sont encore séparées par espèce et type de mesure (ou *outcome*) de la végétation.

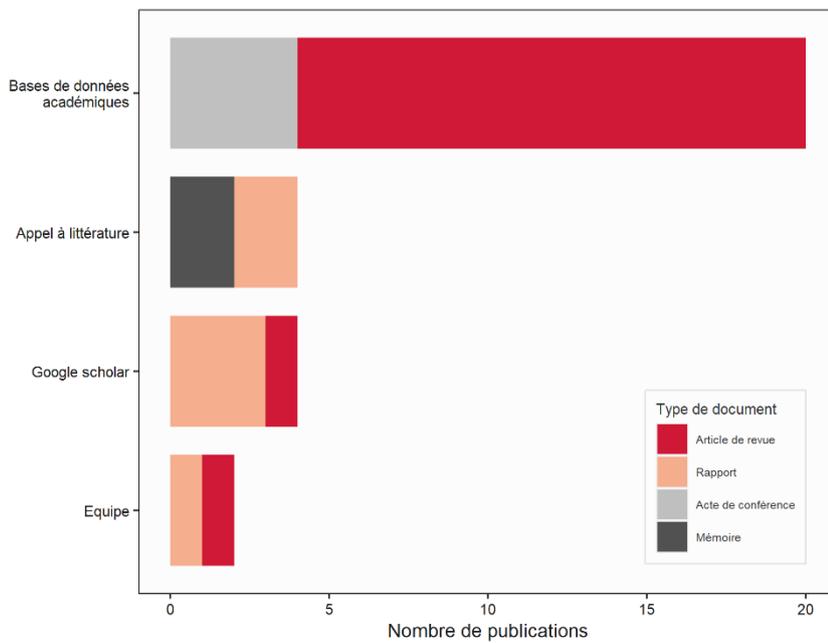


Figure 5. Nombre de publications par source et type de document.

Les publications ont principalement été fournies par les bases de données académiques (20 publications, 66.7%), Google Scholar (4 publications, 13.3%) et grâce à l'appel à littérature (4 publications, 13.3%) (Figure 5). Ces publications sont pour la plupart **des articles scientifiques (18 publications, 55.8%)** ou des rapports (6 publications, 9.1%) provenant majoritairement de la littérature anglophone (27 publications, 90%). Les premières études sur les effets des installations sur la flore ont été publiées en 2013,

ce qui montre que le sujet est encore tout juste émergent (Figure 6). Le nombre de publication semble néanmoins augmenter légèrement au cours du temps. La plupart des études ont été menées aux Etats-Unis (7 publications, 23.3%), suivis du Royaume-Uni (5 publications, 16.7%) et de la France (4 publications, 13.3%) (Figure 7). En revanche, si l'on ne considère pas les publications provenant de l'appel à littérature grise, auquel principalement des chercheurs français ont répondu, la Tchèque devient le troisième pays contribuant le plus à l'effort de recherche avec 4 publications (16.7% de ce sous-jeu de données).

Les cas d'études (métadonnées de la carte séparées par espèce et type de mesure) proviennent **majoritairement d'études observationnelles (318 cas d'études, 73,3%)** mais 116 cas d'études (26,7%) sont également issus d'études expérimentales. La plupart du temps **les études observationnelles ont été réalisées dans des centrales photovoltaïques au sol (301 cas d'études, 69,4%)** alors que les études expérimentales ont été plus souvent menées grâce à des panneaux photovoltaïques simulés (106 cas d'études, 24,4%), consistant par exemple en des planches obliques recouvertes de film noir. D'autres études enfin ont portées sur des installations photovoltaïques situées sur des toitures végétalisées (25 cas d'études, 5,8%). Bien que les risques de biais aient été évalués à l'étape de carte systématique [15], nous les rappelons ici en tant que nombre de cas d'études. La majorité des cas

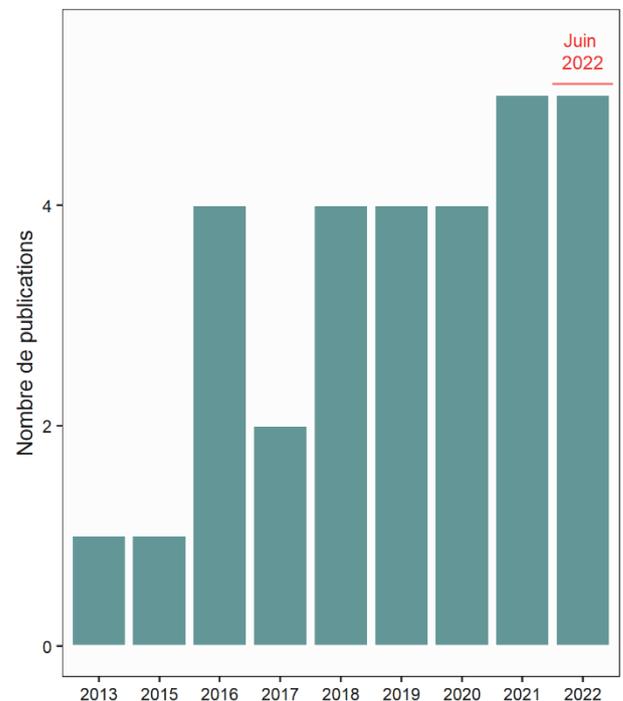


Figure 6. Nombre de publications par année. Les recherches de littérature ont été effectuées en juin 2022.

d'études présentait un risque de biais élevé (220 cas d'études, 50,7%), 181 un risque de biais faible (41,7%) et 33, un niveau évalué comme incertain (7,6%). Concernant les données quantitatives, **la plupart des mesures portent sur la couverture végétale (276 cas d'études, 70,4%) et la richesse spécifique (67 cas d'études, 17,1%)** (Figure 8). Souvent, à l'inverse d'indicateurs plus globaux comme la richesse spécifique ou les indices de Shannon et Simpson calculés par essence au niveau d'une communauté végétale, les mesures de couvertures végétales ont été partagées pour chaque espèce de la communauté végétale étudiée, expliquant en partie leur plus grande proportion au sein de notre jeu de données.

Les études *PIT* comparant les traitements *P* sous les panneaux photovoltaïques et *I* en inter-rang entre les panneaux avec le témoin *T* en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux, les études *PT* comparant le traitement *P* sous panneau et le témoin *T* ainsi que

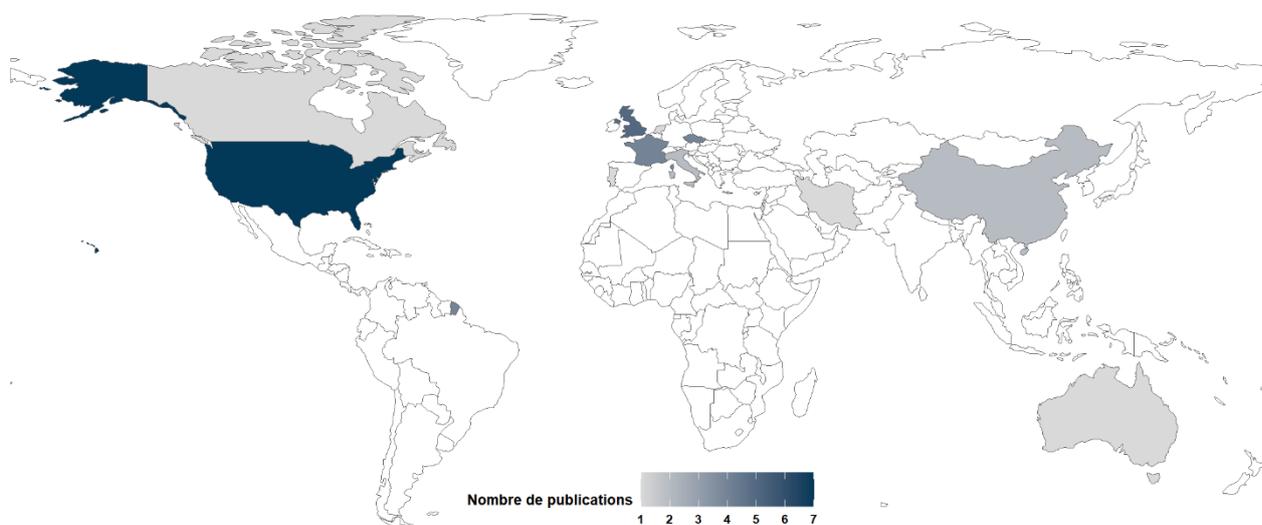


Figure 7. Nombre de publications par pays.

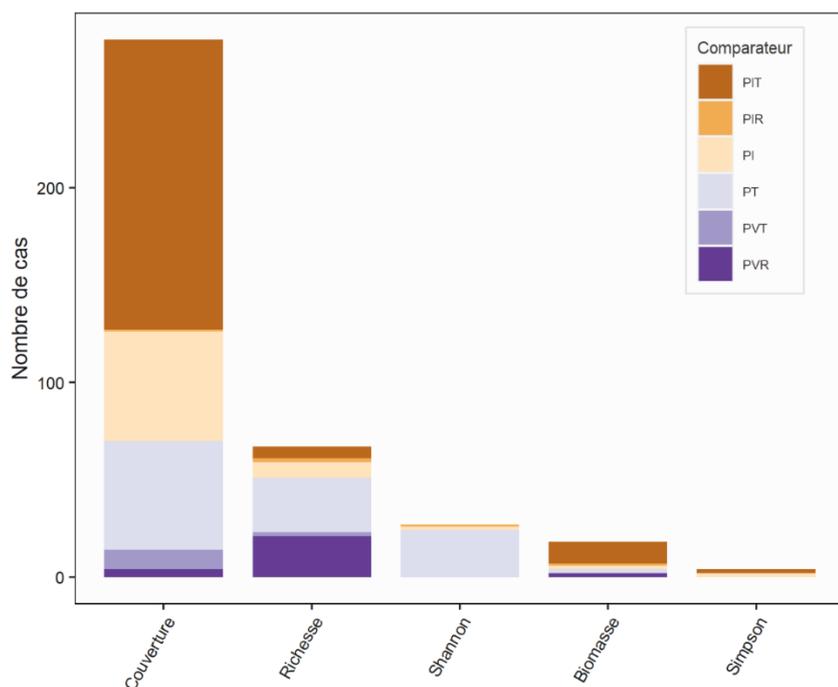


Figure 8. Nombre de cas d'études avec des données quantitatives par type de mesure effectuée et par type de comparaison. *PIT*

comparaison des traitements *P* sous les panneaux photovoltaïques et *I* en inter-rang entre les panneaux et du témoin *T* en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux ; *PIR* comparaison des traitements *P* sous panneau, *I* en inter-rang et de la référence *R* située hors des centrales photovoltaïques ; *PI* comparaison des traitements *P* sous panneau et *I* en inter-rang ; *PT* comparaison du traitement *P* sous panneau et du témoin *T* ; *PVT* comparaison du traitement *PV* correspondant à l'emprise de l'installation photovoltaïque et du témoin *T* ; *PVR* comparaison du traitement *PV* et de la référence *R*.

les études *PI* comparant les deux traitements *P* sous panneau et *I* inter-rang (Figure 3) ont produit le plus grand nombre de données quantitatives avec respectivement 168 cas d'études (42,9%), 110 cas d'études (28,1%) et 70 cas d'études (17,9%). Les études prenant comme témoin une zone de référence *R* hors des centrales photovoltaïques ou bien les études ne considérant qu'un traitement global *PV* prenant en compte la totalité d'une installation photovoltaïque ont, pour leur part, plus rarement été menées.

Concernant les données narratives, la couverture végétale et la richesse spécifique sont également les mesures les plus récurrentes (respectivement, 78 cas d'études (37,7%) et 67 cas d'études (32,4%)).

Méta-analyses

La méta-analyse n'a elle porté que sur les traitements *P* sous panneau, *I* en inter-rang et le témoin *T* présentant les données les plus abondantes. Au total, ce sont donc **17 publications et 27 métadonnées de la carte systématique** qui ont produit **165 cas d'études** analysables pour la méta-analyse. Concernant les autres publications, elles ont également produit 218 autres cas d'études (50,2%) mais qui n'ont pas pu être analysés car ne présentant pas données quantitatives complètes (Figure 4), c'est-à-dire avec une valeur de taille d'échantillon n , de moyenne μ et d'écart-type SD .

Ces données complètes ont permis de calculer 233 tailles d'effet sous la forme de différences de moyennes standardisées (SMD) comparant soit : *PI*, taille d'effet entre les traitements *P* sous les panneaux photovoltaïques et *I* en inter-rang entre les panneaux ; *IT*, taille d'effet entre le traitement *I* en inter-rang et le témoin *T* en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux ; *PT*, taille d'effet entre le traitement *P* sous panneau et le témoin *T* (Figure 3). Au total, six méta-analyses ont donc été réalisées, une pour chaque type de comparaison *PI*, *IT*, ou *PT* ainsi que pour chaque type de variable de réponse, soit des mesures d'abondance ou bien des mesures de diversité de la végétation.

Les résultats des méta-analyses testant l'effet global des panneaux photovoltaïques sur la flore montrent un effet statistiquement significatif des panneaux photovoltaïques sur la diversité des communautés végétales pour la comparaison *PI* (Tableau 2, Figure 9), dont la magnitude pourrait être considérée comme étant faible à modérée [33]. Autrement dit, **la diversité végétale est significativement inférieure dans les zones *P* sous les panneaux photovoltaïques comparativement aux zones *I* en inter-rang**. En revanche, aucune des autres comparaisons de diversité n'est ressortie comme statistiquement significative. De même, nos analyses ne montrent **pas d'effet statistiquement significatif des panneaux photovoltaïques sur l'abondance de la végétation** (Tableau 2, Figure 10).

Tableau 2. Résultats des méta-analyses testant l'effet global des panneaux photovoltaïques sur la flore.

Type de mesure	Type de comparaison	Estimation de l'effet	Intervalle de confiance à 95%	t-value	Degré de liberté	p-value
Abondance	<i>PI</i>	-0,159	[-0,588 ; 0,271]	-0,805	12	0,436
	<i>IT</i>	0,206	[-0,409 ; 0,821]	0,861	5	0,429
	<i>PT</i>	-0,065	[-0,508 ; 0,378]	-0,347	7	0,739
Diversité	<i>PI</i>	0,537	[0,082 ; 0,992]	2,792	7	0,027*
	<i>IT</i>	0,309	[-0,869 ; 1,488]	1,130	2	0,680
	<i>PT</i>	1,149	[-0,744 ; 3,043]	1,932	3	0,149

PI comparaison des traitements *P* sous les panneaux photovoltaïques et *I* en inter-rang entre les panneaux ; *IT* comparaison du traitement *I* en inter-rang et du témoin *T* en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux ; *PT* comparaison du traitement *P* sous panneau et du témoin *T*. Pour chaque type de comparaison, la deuxième lettre représente le témoin utilisé pour le calcul de la taille d'effet. En gras, les résultats des méta-analyses étant ressortis comme statistiquement significatifs. * p-value < 0,05.

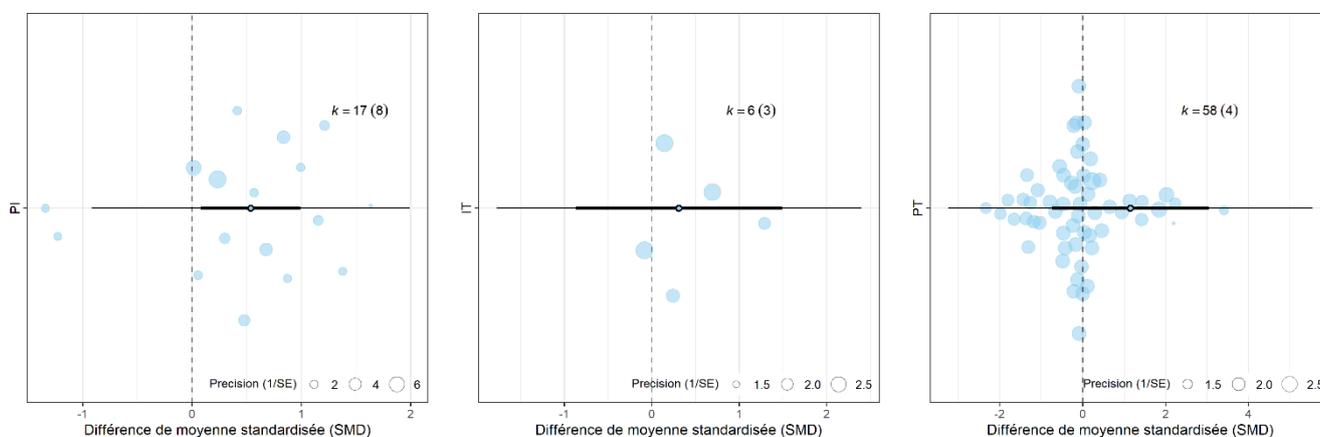


Figure 9. Orchard plot montrant les tailles d'effet globales sur la diversité végétale pour chaque type de comparaison. *PI* comparaison des traitements *P* sous les panneaux photovoltaïques et *I* en inter-rang entre les panneaux ; *IT* comparaison du traitement *I* en inter-rang et du témoin *T* en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux ; *PT* comparaison du traitement *P* sous panneau et du témoin *T*. Taille d'échantillon en nombre de tailles d'effet (*k*) et nombre de publications (entre parenthèses).

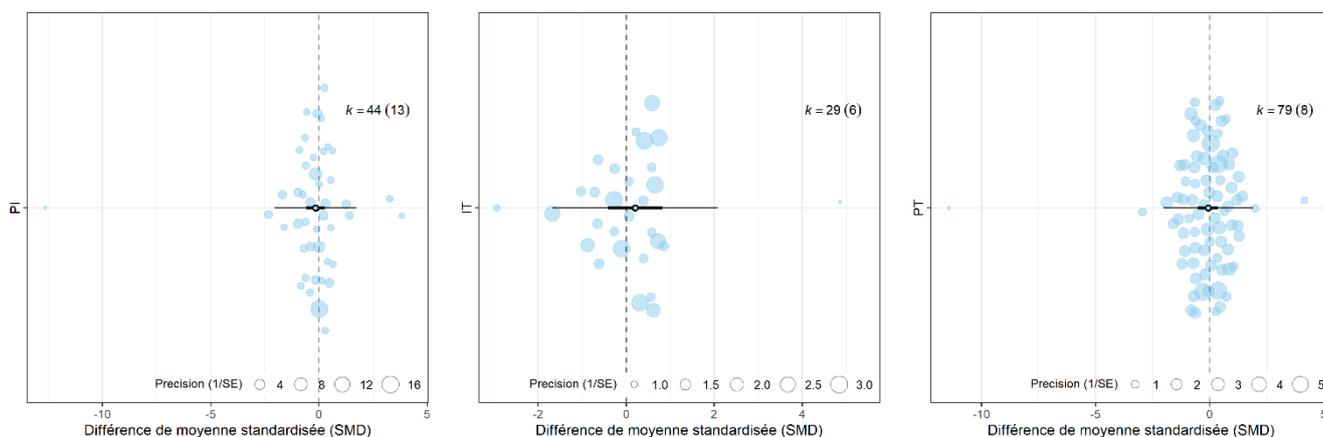


Figure 10. Orchard plot montrant les tailles d'effet globales sur l'abondance végétale pour chaque type de comparaison. *PI* comparaison des traitements *P* sous les panneaux photovoltaïques et *I* en inter-rang entre les panneaux ; *IT* comparaison du traitement *I* en inter-rang et du témoin *T* en zone ouverte au sein des centrales photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux ; *PT* comparaison du traitement *P* sous panneau et du témoin *T*. Taille d'échantillon en nombre de tailles d'effet (*k*) et nombre de publications (entre parenthèses).

Les six méta-analyses présentent une hétérogénéité très significative (Tableau supplémentaire 6) qu'il convient d'expliquer. Nous avons donc paramétré des modèles de méta-régression mixtes testant l'influence de modérateurs sur les estimations de tailles d'effet globales, pour les deux types de variables de réponse d'abondance et de diversité de la végétation ainsi que pour chaque type de comparaison *PI*, *IT*, et *PT*. Nous avons construit un modèle théorique comprenant tous les modérateurs d'intérêt, à savoir le climat, le type de mesure, la taille des placettes expérimentales ainsi que les risques de biais. Cependant, en raison de la faible quantité de données disponibles, certains modèles ont dû être simplifiés et ce pour remplir notre seuil minimum de deux publications par modérateur. Ainsi, seuls deux modèles ont permis de tester l'effet du climat, un seul l'effet des risques de biais et quatre pour le type de mesure ou *outcome*.

Après vérification de la bonne représentativité de chaque modérateur, nous avons sélectionné les modèles de méta-régression les plus parcimonieux. Dans le cas où plusieurs modèles présentaient un $\Delta AICc \leq 2$, ceux-ci ont été moyennés. Il en ressort que pour aucun des modèles de méta-régression, les modérateurs qui ont pu être testés ne présentent d'effets statistiquement significatifs. Nos résultats ne permettent donc pas de montrer que les effets des panneaux photovoltaïques sur la flore dépendent du climat ou bien du type de mesure (couverture, densité, etc.). Quand ils ont pu être testés, la taille des placettes expérimentales et les résultats de l'analyse critique de la validité interne des études n'ont pas non plus eu d'impact statistiquement significatif sur les estimations des tailles d'effet (Appendices, Partie V). A noter que, dû au très faible nombre de données ($k = 6$), l'effet de la taille des placettes n'a pu être testé dans la méta-analyse comparant la diversité entre le traitement *I* en inter-rang avec le témoin *T* et ce afin d'éviter de sur-paramétrer le modèle. De même, aucun des modèles de méta-régression ne présente de biais de publications statistiquement significatif, qu'ils soient liés à l'« effet des petites études », ou bien à l'« effet de déclin » (Appendices, Partie V).

Enfin, les analyses de sensibilité testant l'influence de la méthode du calcul de la non-indépendance entre mesures de variation, avec matrice de Variance-CoVariance (VCV) ou bien méthode dite d'Estimation de Variance Robuste (RVE), ne montrent pas de différences majeures dans les résultats produits par les deux méthodes (Appendices, Tableau supplémentaire 7). Seules les méta-analyses comparant l'abondance entre les traitements *P* sous panneau et *I* en inter-rang et l'abondance entre le traitement *P* sous panneau et le témoin *T* présentent des estimations de tailles d'effet globales sensiblement différentes, tout en restant toutefois non significatives. Les analyses de sensibilité testant différentes valeurs de constante ρ dans le calcul de la matrice VCV produisent toutes des résultats similaires et sans différences notables (Appendices, Tableau supplémentaire 8). Pour aucun des modèles testés, la présence de valeurs extrêmes de tailles d'effet qui pourraient affecter les estimations de tailles d'effet globales n'a été avérée (Appendices, Figures supplémentaires 19 et 20). En revanche, il est apparu, dans le cas de la méta-analyse comparant la diversité entre le traitement *P* sous les panneaux et *I* en inter-rang, que retirer certaines publications de l'analyse, à savoir celle de Vervloesem *et al.* [34], Brunod [35] et Madej [36], changeait l'estimation de la taille d'effet globale et la rendait non statistiquement significative, soulignant la pluralité des effets actuellement observés dans la littérature et donc le besoin de renforcer

ces premiers résultats dès que plus de données sur les impacts des panneaux photovoltaïques sur la flore auront été produites.

Limites de la méthode et de la base de connaissance

Les études analysées dans cette synthèse proviennent toutes de la carte systématique, qui bien que publiée en novembre 2023, est basée sur une recherche de littérature effectuée en juin 2022. De nombreuses publications et données ont sûrement été produites depuis et gagneraient à venir compléter notre analyse. De même, dû aux compétences linguistiques de l'équipe, seules les études rédigées en anglais et français ont été acceptées lors des étapes de tri de la carte systématique et ont par la suite été analysées au sein de cette synthèse. Cependant, de nombreuses publications ont probablement été rédigées dans d'autres langues, et ceux notamment car nous avons pu observer par ailleurs, pour de nombreux pays, un décalage entre le nombre de publications disponibles et la puissance installée en énergie photovoltaïque [15]. Ensuite, notons que, compte tenu du besoin urgent de mieux caractériser les impacts des installations photovoltaïques sur la biodiversité, une seule personne a effectué l'extraction des données de cette synthèse alors qu'une double vérification est normalement recommandée par la *Collaboration for Environmental Evidence* (CEE) [19]. De plus, l'analyse critique a uniquement porté sur l'évaluation de la validité interne (dont les résultats proviennent de la carte systématique) et ce alors que la CEE préconise également de vérifier la validité externe (c'est-à-dire à quel point les résultats extraits des études sont généralisables et également à quel point ils permettent de répondre à la question posée dans la synthèse de connaissance).

Les connaissances sur les effets des installations photovoltaïques sur les communautés végétales sont encore trop parcellaires. Nous n'avons pu extraire les données que de 30 études, parmi lesquelles seules 17 ont pu être analysées au sein de la méta-analyse dû à la faible qualité des informations renseignées par les auteurs. En effet, une proportion importante d'études ne présentait pas des données quantitatives complètes (218 cas d'études sur 392, 55,6% sans aucune valeur de taille d'échantillon ou bien de mesure de variation). Ces études ne pouvaient donc pas être intégrées dans notre méta-analyse. Une prise de contact avec les auteurs des publications n'a pas pu être menée en raison des contraintes de temps mais aurait pu permettre de récupérer des données additionnelles et ainsi d'améliorer la complétude de nos analyses. En conséquence, afin de faciliter la réalisation des synthèses de littérature, nous conseillons aux auteurs de bien renseigner leurs résultats sous la forme d'une moyenne suivie d'une mesure de variation (écart-type, erreur standard ou intervalle de confiance) et de bien rendre accessible les informations concernant leurs tailles d'échantillons. Aussi, les métadonnées concernant les caractéristiques techniques des centrales photovoltaïques (hauteur, largeur d'inter-rang, etc.) ou bien leur contexte (habitat pré-construction) devraient être plus systématiquement partagées par les auteurs afin de permettre la prise en compte de ces variables très pertinentes dans des analyses telles que celles menées ici.

Enfin, la faible quantité de données analysables dans le cadre de cette synthèse nous a amené à limiter la portée de nos analyses en nous concentrant sur le gradient de pression photovoltaïque le plus

étudié, à savoir les zones sous les panneaux photovoltaïques, en inter-rang entre les panneaux et témoins ouvertes situées au sein des installations photovoltaïques mais hors de l'influence des panneaux. Cependant, d'autres zones d'intérêt comme celles de références situées en dehors des centrales photovoltaïques ont parfois été étudiées et bien que leurs résultats aient été extraits (voir Appendice 1), ils n'ont pas pu être analysés car étant encore trop peu nombreux. Une prochaine actualisation de ce travail de synthèse pourrait donc potentiellement être enrichi par l'analyse de ces zones de références. De même, dû au trop faible nombre de données actuellement disponibles, certains modérateurs qui devaient être testés dans les modèles de méta-régression n'ont pas pu l'être. Il conviendrait donc de réactualiser nos analyses dès lors que plus de données seront disponibles afin de caractériser avec plus de précision les effets des variables climatiques, du type de mesure ainsi que des risques de biais sur les réponses mesurées des communautés végétales au sein des installations photovoltaïques.

Discussion

Nos méta-analyses ont montré qu'il existait un effet négatif des panneaux photovoltaïques sur la diversité des communautés végétales avec notamment **une diversité végétale significativement inférieure sous les panneaux par rapport à l'inter-rang**. Cette baisse de diversité pourrait par exemple s'expliquer par une plus forte présence d'espèces sciaphiles plus adaptées au manque de lumière mais moins diversifiées sous les panneaux photovoltaïques comparé à des zones plus ensoleillées comme les inter-rangs ou encore au plus fort développement d'espèces exotiques envahissantes sous les panneaux [11]. Il est aussi possible que la diversité de micro-habitats (humidité, température, ombre) [16,18,34,37–40] créés par les panneaux en inter-rang favorise une diversité floristique plus importante que sous les panneaux ou bien même en dehors de leur influence [37,41]. Les résultats de notre méta-analyse n'ont pas montré de réduction statistiquement significative de la diversité végétale sous les panneaux photovoltaïques par rapport aux zones témoins ouvertes au sein des centrales photovoltaïques, et ce alors que certaines études de la littérature scientifique pouvaient pourtant le laisser présager. En effet, Lambert *et al.* [11], dans une étude sur des centrales photovoltaïques réparties le long d'un gradient Nord-Sud en Vallée du Rhône, ont trouvé une plus faible richesse spécifique sous les panneaux photovoltaïques comparé à leur témoin situé en zone ouverte sans influence des panneaux photovoltaïques. Armstrong *et al.* [16], dans une étude sur une centrale photovoltaïque au Royaume-Uni, ont trouvé des résultats similaires avec moins d'espèces inventoriées sous les panneaux comparé à leur témoin. Toutefois, certaines études ont pu montrer des résultats plus contrastés. Par exemple, Graham *et al.* [37], au sein d'une étude menée dans une centrale photovoltaïque de l'Oregon, Etats-Unis, n'ont pas trouvé de différences significatives entre ces deux zones pour leur indicateur de richesse ou de diversité floristique et à l'inverse, Tanner *et al.* [42], dans des placettes expérimentales de panneaux solaires simulés (planches obliques recouvertes de film noir), situées dans le désert du Mojave en Californie, Etats-Unis, ont trouvé une richesse spécifique plus importante sous leurs panneaux que dans leurs témoins mais seulement pour certaines années plus sèches. Cependant, cette étude a été menée dans un climat aride avec des panneaux solaires simulés, limitant fortement sa généralisation au contexte de centrales photovoltaïques réelles situées dans un climat tempéré. De

même, les résultats de notre méta-analyse n'ont pas montré de différence statistiquement significative de diversité végétale entre les inter-rangs et les zones témoins ouvertes au sein des centrales photovoltaïques. Outre la faible quantité de données actuellement disponibles (3 publications et 6 tailles d'effet), la littérature semble montrer une forte hétérogénéité de la réponse, comme pour la comparaison entre les zones sous panneau et celles témoins ouvertes au sein des centrales. Par exemple, Graham *et al.* [37], Lambert *et al.* [10,11] et Vervloesem *et al.* [34] n'ont pas trouvé de différence statistiquement significative entre ces deux zones. En revanche, Armstrong *et al.* [16] ont trouvé une diversité légèrement plus importante en inter-rang par rapport à leur témoin et Bai *et al.* [41] ont, dans une étude réalisée en Chine continentale, observé une richesse et diversité augmentées en inter-rang et notamment dans les zones directement situées devant les panneaux (et donc recevant les écoulements d'eau de pluie). Liu *et al.* [39] ont trouvé, dans leur étude également menée en Chine continentale, une diversité supérieure en inter-rang par rapport à leur référence située à l'extérieur de leur centrale photovoltaïque.

Nos résultats n'ont pas montré d'effet statistiquement significatif des panneaux photovoltaïques sur l'abondance végétale, et ce alors même que de nombreux chercheurs ont pu trouver une abondance végétale réduite sous les panneaux [16,34,38]. En effet, Lambert *et al.* [11] ont observé une couverture végétale inférieure sous les panneaux par rapport à leurs zones témoins situées hors de leur influence. Armstrong *et al.* [16] au Royaume-Uni, Moscatelli *et al.* [38] en Italie, ou bien Li *et al.* [43] en Chine, ont trouvé une biomasse végétale inférieure sous les panneaux par rapport à l'inter-rang. Graham *et al.* [37], aux Etats-Unis, ont observé une plus grande densité de boutons floraux dans les inter-rangs que sous les panneaux ou bien dans leur témoin. Lambert *et al.* [44], dans une expérience de restauration écologique dans une centrale photovoltaïque du Sud-Est de la France, ont globalement trouvé une couverture végétale inférieure sous les panneaux par rapport à l'inter-rang pour toutes leurs années de relevés sauf une. Dans une autre étude mais dans la même centrale, Lambert *et al.* [10] n'ont en revanche pas trouvé d'effet statistiquement significatif des panneaux photovoltaïques sur la couverture végétale. Adeb *et al.* [40], dans une centrale photovoltaïque située dans l'Oregon, Etats-Unis, ont même trouvé une biomasse plus abondante sous les panneaux que dans les inter-rangs ou même dans leur témoin. Ces résultats soulignent la forte hétérogénéité des réponses observées dans la littérature, ce qui pourrait notamment expliquer pourquoi l'effet global des panneaux photovoltaïques sur l'abondance, étudié dans notre méta-analyse, ne soit pas ressorti comme statistiquement significatif.

Les résultats de notre méta-analyse diffèrent plus spécifiquement de ceux trouvés par Zhang *et al.* [18] dans leur méta-analyse étudiant les effets de la présence des panneaux photovoltaïques sur les communautés végétales. En effet, Zhang *et al.* [18] ont montré que la couverture et la biomasse végétales étaient généralement supérieures au sein des centrales photovoltaïques alors que la richesse et la diversité n'étaient à l'inverse pas impactées. Cependant, dans le cas spécifique des habitats forestiers, la couverture et la diversité végétales étaient inférieures sous les panneaux photovoltaïques. Ces différences dans les résultats de nos deux synthèses pourraient d'abord s'expliquer par le peu d'études en commun analysées dans nos synthèses respectives. En effet, bien que les volumes d'études analysées soient similaires entre nos deux synthèses (N = 15 pour Zhang *et al.* [18] et N = 17 pour notre méta-analyse), Zhang

et al. [18] ont extrait les données provenant de 9 publications rédigées en chinois (exclues de notre carte systématique), d'une étude américaine ne mesurant que des paramètres abiotiques (exclus) et d'une étude française publiée après que nous ayons réalisés notre équation de recherche, ce qui au final, ne représente que quatre études en commun entre nos deux méta-analyses. Cette situation souligne donc l'importance de l'exhaustivité dans le processus de synthèse, qui reste une vraie difficulté au vu des compétences plurilinguistiques nécessaires.

Finalement, notre méta-analyse n'a pas permis de montrer d'effet statistiquement significatif du climat sur les effets observés des panneaux photovoltaïques sur les communautés végétales. Cependant, dû à la trop faible quantité de données actuellement disponibles, il n'a été possible de tester ce paramètre climatique que dans deux des six méta-analyses de cette synthèse quantitative, et que dans le cas des variables de réponse d'abondance. Il conviendrait donc de tester à nouveau ce paramètre dès lors que plus de données seront disponibles et ce afin d'affiner nos premiers résultats, notamment pour les variables de réponse de diversité qui n'ont pu être testées. Aussi, il n'est pas exclu que la variable catégorielle climatique utilisée dans cette méta-analyse (tempéré ou aride) ne soit pas assez précise pour bien prendre en compte la variabilité climatique entre les installations photovoltaïques étudiées. Une actualisation de cette synthèse pourrait donc entreprendre l'extraction des données de microclimat plus fines liées par exemple à l'ensoleillement, à la température, ou bien à l'humidité, des variables parfois mesurées dans les études synthétisées [16,18,34,37-40]. Ces données pourraient ensuite être intégrées dans les modèles de méta-régression et ainsi permettre de caractériser avec plus de précision l'influence des paramètres climatiques sur la réponse des communautés végétales évoluant au sein des installations photovoltaïques. Zhang *et al.* [18], dans leur méta-analyse, ont d'ailleurs également étudié la variabilité de certains paramètres abiotiques au sein des centrales photovoltaïques mais sans les relier directement dans leurs analyses aux effets observés sur la végétation. En revanche, Zhang *et al.* [18] ont étudié l'influence du contexte, et notamment la nature de l'habitat initial, sur les effets observés de l'installation photovoltaïque sur les communautés végétales et ont trouvé un effet statistiquement significatif de l'habitat, notamment une diminution de l'abondance et de la richesse statistiquement significative sous les panneaux dans les habitats forestiers. Cependant, les deux seules études présentées comme étant en habitat forestier sont en fait celles de Lambert *et al.* [10,44] réalisées toutes deux sur d'anciennes friches viticoles en cours de fermeture en climat méditerranéen dans le Sud-Est de la France. Il semble donc, au regard de nos travaux respectifs, que trop peu de données soient, pour le moment, analysables et qu'il ne soit donc pas possible de déterminer avec suffisamment de précision l'influence du contexte pré-construction (le type d'habitat pour Zhang *et al.* [18]) ou bien du contexte climatique (dans le cadre de notre méta-analyse) sur les impacts mesurés des centrales photovoltaïques sur les communautés végétales.

Conclusion

Cette synthèse de connaissance sur les effets des panneaux photovoltaïques sur les communautés végétales a mis en évidence **une diminution statistiquement significative de la diversité floristique sous les panneaux par rapport à l'inter-rang**. En revanche, **aucun effet statistiquement significatif des panneaux n'a été mis en évidence sur l'abondance végétale**, compte tenu des études actuellement disponibles. Bien que peu de données soient pour l'instant disponibles, nos résultats tendent à montrer que les panneaux photovoltaïques modifient les communautés végétales se développant au sein des installations photovoltaïques. Cependant, la forte hétérogénéité des résultats rapportés dans la littérature indiquent que ces effets des panneaux photovoltaïques sont variables et pourraient notamment dépendre de nombreux facteurs comme la localisation de l'étude et son contexte climatique, l'habitat initial avant construction ou bien les modalités de gestion de l'installation photovoltaïque. Pour tester avec plus de précision les effets de ces variables et confirmer les premiers résultats, encore préliminaires de cette synthèse, il conviendrait donc que davantage d'études sur les effets des panneaux photovoltaïques sur la flore soient menées et que nos analyses soient ensuite rapidement mises à jour. En attendant, nous recommandons donc de rester prudent quant aux impacts potentiels que les panneaux photovoltaïques pourraient présenter sur la flore ainsi que sur la biodiversité dans son ensemble.

Références

1. Arias PA, Bellouin N, Jones RG, Naik V, Plattner G-K, Rogelj J, et al. 2021: Technical Summary. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S, Péan C, Berger S, et al., editors. *Clim Change 2021 Phys Sci Basis Contrib Work Group Sixth Assess Rep Intergov Panel Clim Change* [Internet]. Cambridge and New York: Cambridge University Press; 2021 [cited 2023 Aug 30]. p. 33–144. Available from: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
2. International Energy Agency. *Renewables 2022 - Analysis and forecast to 2027*. Paris: International Energy Agency; 2023 [cited 2023 Aug 30]. Available from: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
3. GIEC. Energy systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2014.
4. International Renewable Energy Agency. *Renewable capacity statistics 2023*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2023 [cited 2023 Aug 30]. Available from: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
5. Secrétariat général à la planification écologique. *Tableau de bord de la planification écologique*. 2023.
6. Van De Ven D-J, Capellan-Peréz I, Arto I, Cazcarro I, De Castro C, Patel P, et al. The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Sci Rep*. 2021;11:2907.
7. Rehbein JA, Watson JEM, Lane JL, Sonter LJ, Venter O, Atkinson SC, et al. Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Glob Change Biol*. 2020;26:3040–51.
8. Parker SS, Cohen BS, Moore J. Impact of solar and wind development on conservation values in the Mojave Desert. Magar V, editor. *PLOS ONE*. 2018;13:e0207678.
9. Dunnett S, Holland RA, Taylor G, Eigenbrod F. Predicted wind and solar energy expansion has minimal overlap with multiple conservation priorities across global regions. *Proc Natl Acad Sci*. 2022;119:e2104764119.
10. Lambert Q, Bischoff A, Cuff S, Cluchier A, Gros R. Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO₂ effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. *Land Degrad Dev*. 2021;32:5190–202.
11. Lambert Q, Bischoff A, Enea M, Gros R. Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands? *Front Environ Sci*. 2023;11:1137845.

12. Horváth G, Blahó M, Egri Á, Kriska G, Seres I, Robertson B. Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects: Polarized Light Pollution from Solar Panels. *Conserv Biol.* 2010;24:1644–53.
13. Szabadi KL, Kurali A, Rahman NAA, Froidevaux JSP, Tinsley E, Jones G, et al. The use of solar farms by bats in mosaic landscapes: Implications for conservation. *Glob Ecol Conserv.* 2023;44:e02481.
14. Kosciuch K, Riser-Espinoza D, Geringer M, Erickson W. A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern U.S. Zhang J, editor. *PLOS ONE.* 2020;15:e0232034.
15. Lafitte A, Sordello R, Ouédraogo D-Y, Thierry C, Marx G, Froidevaux J, et al. Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. *Environ Evid.* 2023;12:25.
16. Armstrong A, Ostle NJ, Whitaker J. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environ Res Lett.* 2016;11:074016.
17. Liu Y, Zhang R, Huang Z, Cheng Z, López-Vicente M, Ma X, et al. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem. *Land Degrad Dev.* 2019;30:2177–86.
18. Zhang Y, Tian Z, Liu B, Chen S, Wu J. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial ecosystems: A meta-analysis. *Front Ecol Evol.* 2023;11:1151182.
19. Collaboration for Environmental Evidence. Guidelines and standards for evidence synthesis in environmental management Version 5.1 [Internet]. Pullin A, Frampton G, Livoreil B, Petrokofsky G, editors. 2022 [cited 2023 Aug 30]. Available from: <http://www.environmentalevidence.org/information-for-authors/>
20. Pullin AS, Cheng SH, Jackson JD, Eales J, Envall I, Fada SJ, et al. Standards of conduct and reporting in evidence syntheses that could inform environmental policy and management decisions. *Environ Evid.* 2022;11:16.
21. Stanhope J, Weinstein P. Critical appraisal in ecology: What tools are available, and what is being used in systematic reviews? *Res Synth Methods.* 2023;14:342–56.
22. Cooke SJ, Birnie-Gauvin K, Lennox RJ, Taylor JJ, Rytwinski T, Rummer JL, et al. How experimental biology and ecology can support evidence-based decision-making in conservation: avoiding pitfalls and enabling application. *Conserv Physiol.* 2017;5.
23. Frampton G, Whaley P, Bennett M, Bilotta G, Dorne J-LCM, Eales J, et al. Principles and framework for assessing the risk of bias for studies included in comparative quantitative environmental systematic reviews. *Environ Evid.* 2022;11:12.
24. Pick J, Nakagawa S, Noble D. Reproducible, flexible and high throughput data extraction from primary literature: The metaDigitise R package. *BioRxiv.* 2018;1–25.
25. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [Internet]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2023. Available from: <https://www.R-project.org/>
26. Ouédraogo D-Y, Mell H, Perceval O, Burga K, Domart-Coulon I, Hédouin L, et al. What are the toxicity thresholds of chemical pollutants for tropical reef-building corals? A systematic review. *Environ Evid.* 2023;12:4.
27. Nakagawa S, Yang Y, Macartney EL, Spake R, Lagisz M. Quantitative evidence synthesis: a practical guide on meta-analysis, meta-regression, and publication bias tests for environmental sciences. *Environ Evid.* 2023;12:8.
28. Nakagawa S, Lagisz M, Jennions MD, Koricheva J, Noble DWA, Parker TH, et al. Methods for testing publication bias in ecological and evolutionary meta-analyses. *Methods Ecol Evol.* 2022;13:4–21.
29. Symonds MRE, Moussalli A. A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behav Ecol Sociobiol.* 2011;65:13–21.
30. Viechtbauer V. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *J Stat Softw.* 2010;36:1–48.
31. Wickham H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.* 2nd ed. 2016. Cham: Springer International Publishing; 2016.
32. Nakagawa S, Lagisz M, O'Dea RE, Pottier P, Rutkowska J, Senior AM, et al. orchaRd 2.0: An R package for visualising meta-analyses with orchard plots. *Methods Ecol Evol.* 2023;14:2003–10.
33. Gallardo-Gómez D, Richardson R, Dwan K. Standardized mean differences in meta-analysis: A tutorial. *Cochrane Evid Synth Methods.* 2024;2:e12047.
34. Vervloesem J, Marcheggiani E, Choudhury MAM, Muys B. Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. *Sustainability.* 2022;14:7493.
35. Brunod P. Étude préalable à l'évaluation du potentiel d'accueil de la biodiversité au sein des centrales photovoltaïques au sol. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France: Crexeco, Muséum national d'Histoire naturelle; 2019 p. 25.

36. Madej L. Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur 2 sites prairiaux pâturés [Internet]. UREP INRAE; 2020. Available from: <https://hal.inrae.fr/hal-03121955>
37. Graham M, Ates S, Melathopoulos AP, Moldenke AR, DeBano SJ, Best LR, et al. Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Sci Rep.* 2021;11:7452.
38. Moscatelli MC, Marabottini R, Massaccesi L, Marinari S. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Reg.* 2022;29:e00500.
39. Liu Y, Zhang R, Huang Z, Cheng Z, López-Vicente M, Ma X, et al. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem. *Land Degrad Dev.* 2019;30:2177–86.
40. Adeh EH, Selker JS, Higgins CW. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. Villarini M, editor. *PLOS ONE.* 2018;13:e0203256.
41. Bai Z, Jia A, Bai Z, Qu S, Zhang M, Kong L, et al. Photovoltaic panels have altered grassland plant biodiversity and soil microbial diversity. *Front Microbiol.* 2022;13:1065899.
42. Tanner KE, Moore-O'Leary KA, Parker IM, Pavlik BM, Hernandez RR. Simulated solar panels create altered microhabitats in desert landforms. *Ecosphere.* 2020;11.
43. Li C, Liu J, Bao J, Wu T, Chai B. Effect of Light Heterogeneity Caused by Photovoltaic Panels on the Plant–Soil–Microbial System in Solar Park. *Land.* 2023;12:367.
44. Lambert Q, Gros R, Bischoff A. Ecological restoration of solar park plant communities and the effect of solar panels. *Ecol Eng.* 2022;182:106722.

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, les installations photovoltaïques sont amenées à rapidement se développer, et notamment en France où le gouvernement ambitionne de tripler la puissance installée en énergie solaire d'ici 2030. Bien que permettant en théorie de limiter nos émissions de gaz à effet de serre, les panneaux photovoltaïques peuvent avoir des impacts sur les espèces et écosystèmes naturels. Dans ce contexte, PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD) a mené un travail de carte systématique ayant pour objectif de recenser la littérature disponible concernant les effets des installations photovoltaïques sur les espèces sauvages terrestres et semi-aquatiques. Ce travail a permis d'identifier une connaissance plus fournie concernant les effets des installations photovoltaïques sur les communautés végétales et pour laquelle une synthèse de résultats quantitatifs était envisageable. Cette synthèse a donc eu pour but de déterminer l'effet de la présence des installations photovoltaïques sur l'abondance, la biomasse et la diversité des communautés végétales évoluant au sein des installations photovoltaïques.

Nos résultats ont mis en évidence une diminution statistiquement significative de la diversité floristique sous les panneaux par rapport à l'inter-rang. Aucun effet statistiquement significatif des panneaux n'a, en revanche, été mis en évidence sur l'abondance végétale. En l'état actuel, au vu de la faible quantité de données disponibles et analysables, nos résultats restent partiels. Nous recommandons donc que nos analyses soient mises à jour rapidement et ce notamment, au vu de la forte hétérogénéité des effets des installations photovoltaïques identifiés jusqu'à présent dans la littérature.

PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD)
Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel
Jardin des Plantes
CP41 – 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire
75005 Paris
www.patrinat.fr

