



Efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de la production au sol d'énergie photovoltaïque sur la biodiversité animale terrestre

Synthèse des connaissances

CONTRIBUTEURS

COORDINATION ET RÉDACTION

Aurélie QUINARD
Joseph LANGRIDGE

CONTRIBUTIONS ET RELECTURES

Nicolas HETTE-TRONQUART
Hélène SOUBELET
Joseph LANGRIDGE
Marjolaine GARNIER
Claire SALOMON

CITATION

Quinard A. and Langridge J. (2026) Efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de la production au sol d'énergie photovoltaïque au sur la biodiversité animale terrestre. Synthèse de connaissances. Paris, France : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité

Table des matières

RÉSUMÉ EXÉCUTIF	6
INTRODUCTION	12
OBJECTIF PRINCIPAL DE LA REVUE	13
RÉSULTATS DESCRIPTIFS DES DOCUMENTS RETENUS	17
Recherche et sélection	17
<i>Processus de sélection des références bibliographiques</i>	<i>17</i>
<i>Sources et type des références sélectionnées.....</i>	<i>18</i>
Caractéristiques clés	18
<i>Validité des études</i>	<i>18</i>
<i>Évolution chronologique</i>	<i>19</i>
<i>Distribution géographique</i>	<i>20</i>
<i>Taxa étudiés.....</i>	<i>21</i>
<i>Types de mesures d'atténuation étudiées.....</i>	<i>23</i>
<i>Localisation de l'intervention : in situ vs ex situ</i>	<i>25</i>
SYNTHÈSE NARRATIVE	25
Amélioration de l'habitat - mesure en faveur de la biodiversité	26
<i>Amélioration de l'habitat pour les pollinisateurs et autres insectes</i>	<i>26</i>
<i>Restauration des sols et biote souterrain.....</i>	<i>27</i>
<i>Oiseaux nicheurs et gestion des habitats</i>	<i>27</i>
Ce qu'il faut retenir... ..	28
Gestion de la végétation : pâturage	28
Modification de la conception des infrastructures.....	29
Traitements surfaciques des panneaux visant à réduire l'effet « lac/miroir »	30
<i>Modifications optiques ciblant les insectes aquatiques</i>	<i>30</i>
<i>Modifications mécaniques/acoustiques ciblant les chauves-souris</i>	<i>31</i>
Dissuasion acoustique.....	32
DISCUSSION ET PERSPECTIVES : IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE ET LA PRISE DE DÉCISION	33
CONCLUSION DE LA REVUE RAPIDE.....	37
REGARD D'EXPERTS	38
Choix et efficacité des mesures de réduction des impacts : entre continuité écologique, habitats et gestion de la végétation.....	38
<i>Une diversité de mesures mises en œuvre selon les contextes de projets.....</i>	<i>38</i>
<i>Mesures jugées les plus efficaces pour la biodiversité</i>	<i>39</i>
<i>Réserves, mesures jugées peu efficaces, mal adaptées ou générant des effets indésirables.....</i>	<i>40</i>
Une efficacité encore difficile à documenter : limites méthodologiques et données éclatées	41
<i>Hétérogénéité des protocoles de suivi et faible comparabilité des résultats</i>	<i>41</i>
<i>Difficultés à mettre en place des dispositifs de type BACI (Before-After-Control-Impact) et des sites témoins</i>	<i>42</i>
<i>Décalage entre temporalité des projets industriels et temporalité de la recherche</i>	<i>43</i>
Freins et arbitrages sur le terrain : concilier biodiversité, incendie, agriculture et autres usages	43

<i>La défense incendie comme contrainte structurante</i>	43
<i>Agrivoltaïsme : concilier productivité agricole et objectifs écologiques</i>	44
<i>Multiplicité des acteurs et injonctions parfois contradictoires</i>	44
<i>Pressions économiques et poids de la compensation dans les arbitrages</i>	45
Structurer pratiques et capitalisation : vers une écoconception « standardisée » des centrales photovoltaïques	45
<i>Standardisation des suivis : un rappel synthétique des besoins</i>	45
<i>Guides d'écoconception et montée en compétences des acteurs</i>	46
<i>Orienter la R&D sur l'efficacité des mesures et la résilience des sols</i>	46
<i>Rôle des structures collectives et de l'État pour une trajectoire plus lisible</i>	46
Bilan de l'étape collaborative : vers des centrales photovoltaïques conçues comme opportunités pour les milieux ouverts	47
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES GÉNÉRALES	49
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SÉLECTIONNÉES POUR LA REVUE	50
ANNEXE I : MÉTHODES	i
Recherche d'articles	i
<i>Mots-clés et Équations de recherche</i>	<i>i</i>
<i>Raccourcis et limitations</i>	<i>ii</i>
<i>Sources de littérature</i>	<i>ii</i>
<i>Estimation de l'exhaustivité de la recherche</i>	<i>iii</i>
Critères d'éligibilité des articles et de sélection des études	iii
Analyse critique : évaluation de la validité des études	v
Synthèse narrative	v
ANNEXE II : DÉTAILS DES ÉQUATIONS DE RECHERCHE UTILISÉES POUR LES REQUÊTES	vii
ANNEXE III : ÉVALUATION DE LA CONFORMITÉ AUX CRITÈRES D'ÉLIGIBILITÉ PAR LES TESTS KAPPA DE RANDOLPH	x
ANNEXE IV : CRITÈRES D'ÉVALUATION DES RISQUES DE BIAIS	xi

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Contexte et enjeux

Le développement du photovoltaïque au sol s'accélère en France dans un contexte de transition énergétique visant la neutralité carbone à l'horizon 2050. Cette trajectoire implique une électrification accrue des usages et une montée en puissance des énergies renouvelables. Les centrales photovoltaïques au sol représentent une solution stratégique pour produire une électricité décarbonée à grande échelle.

Toutefois, ce développement soulève des enjeux environnementaux majeurs, en particulier pour la biodiversité. Les installations au sol occupent de grandes surfaces, souvent en milieux ouverts, agricoles ou naturels, et peuvent entraîner des effets négatifs sur la faune, les habitats et les continuités écologiques. Le respect de la séquence « Éviter – Réduire – Compenser » (ERC), inscrite dans le droit français, est aujourd'hui indispensable pour encadrer les projets et limiter leurs impacts.

Dans ce contexte, les mesures visant à atténuer les effets des installations sur la biodiversité sont de plus en plus mobilisées. Pourtant, leur efficacité reste encore mal connue, en raison d'un manque de données homogènes, d'un déficit de retours d'expérience évalués, et d'une faible capitalisation à l'échelle nationale. Mieux documenter ces mesures, identifier les plus efficaces, et structurer les efforts de suivi sont devenus des priorités partagées par les acteurs publics, les développeurs, les gestionnaires d'espaces et la communauté scientifique.

Objectifs de l'étude

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité avec le financement du Mirova Research Center, a mené une revue de la littérature scientifique, de type Revue Rapide (RR), afin d'évaluer l'efficacité des mesures mises en place pour limiter les impacts des centrales photovoltaïques au sol sur la faune. L'analyse a couvert l'ensemble de la faune terrestre, incluant les insectes (volants et terrestres), les petits et grands mammifères, les oiseaux, les chauves-souris, les reptiles, les amphibiens et les gastéropodes.

L'objectif principal était d'identifier les pratiques les plus efficaces, appuyées par des preuves scientifiques robustes. L'objectif secondaire visait à formuler des recommandations à la fois opérationnelles et stratégiques, fondées sur les données disponibles, afin d'améliorer les pratiques existantes et de promouvoir des solutions concrètes de réduction des impacts sur la biodiversité. Ces recommandations sont destinées à trois types d'acteurs : la communauté scientifique, les décideurs publics et les porteurs de projets photovoltaïques (développeurs, bureaux d'études, maîtres d'ouvrage).

Méthodologie

L'étude bibliographique a été menée en conformité avec les lignes directrices de la Collaboration for Environmental Evidence (CEE) relatives à la conduite des Revues Rapides (Rapid Reviews) en écologie et en environnement ([CEE, 2022](#)). La sélection des documents a couvert à la fois la littérature scientifique académique (articles à comité de lecture) et la littérature grise (rapports techniques, documents d'expertise, études de cas), identifiés via des bases de données spécialisées et des plateformes professionnelles. Les publications retenues ont été analysées qualitativement selon une approche narrative, avec pour objectif d'évaluer l'efficacité des mesures mises en œuvre pour réduire les impacts des centrales photovoltaïques au sol sur la faune.

En complément de cette revue, un atelier d'experts a été organisé en novembre 2025, réunissant une diversité d'acteurs (représentants d'agences publiques, bureaux d'études, développeurs, ONG). Cet atelier avait pour objectif de croiser les résultats de la synthèse scientifique avec les retours de terrain, d'identifier des leviers d'action concrets et de formuler des recommandations opérationnelles. Les échanges ont permis d'enrichir l'analyse par des savoirs pratiques et des retours d'expérience issus de contextes variés.

Aperçu des références bibliographiques retenus

Suite à un processus de sélection rigoureux, standardisé et transparent, 13 références pertinentes ont été retenues pour cette revue. Ce corpus inclut des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture ainsi que des rapports techniques. L'ensemble a été analysé selon des critères de fiabilité méthodologique, de précision des résultats et de clarté des protocoles.

Les documents recensés révèlent plusieurs tendances importantes :

- Les études sont essentiellement localisées en Amérique du Nord et en Europe, avec une forte dominante anglo-saxonne. La France ne compte qu'un nombre très limité de publications directement exploitables sur ce sujet.
- La diversité taxonomique couverte est très restreinte. Les insectes sont les mieux représentés dans les études, tandis que les oiseaux et les chauves-souris sont très peu documentés. Aucun travail spécifique n'a été identifié pour les autres groupes (petits et grands mammifères, amphibiens, reptiles, gastéropodes).
- Les principales mesures étudiées relèvent de deux catégories : d'une part, les actions favorables à la biodiversité (amélioration ou maintien des habitats, gestion de la végétation), et d'autre part, les caractéristiques des panneaux photovoltaïques eux-mêmes (réflectance, texture, orientation). Ces dernières ne sont abordées que dans des conditions ex situ, sans validation sur site. Un panel étendu de mesures ne fait l'objet d'aucune évaluation dans les études recensées.
- La majorité des références repose sur des études in situ, menées directement sur des centrales photovoltaïques en fonctionnement. Elles sont basées sur des observations avant/après aménagement ou sur des comparaisons entre sites.
- Les résultats portent principalement sur des variations d'activité des espèces (fréquentation, comportement, reproduction) ou sur la structure des communautés locales (diversité, abondance, composition spécifique). Les études évaluant directement l'effet d'une mesure restent rares.
- La grande majorité des études recensées rapportent des effets globalement positifs des mesures mises en œuvre sur la faune. Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence : les effets sont souvent mesurés à court terme, sur des sites peu nombreux, sans réplicas solides ni groupes témoins systématiques. Le manque de robustesse méthodologique limite donc la généralisation des conclusions.

Dans l'ensemble, ce corpus confirme l'existence d'un état des connaissances encore embryonnaire, géographiquement concentré et thématiquement limité, mais il permet d'identifier les premiers leviers d'action documentés et les lacunes à combler pour évaluer rigoureusement l'efficacité des mesures dans les années à venir.

Limites et niveau de preuve

Les résultats présentés doivent être interprétés avec prudence. La revue repose sur un corpus encore restreint (13 références), hétérogène en termes de contextes, de groupes biologiques, de types de mesures et de protocoles de suivi. Cette diversité ne permet pas, à ce stade, de comparer finement l'efficacité relative des différentes mesures ni de conduire une méta-analyse quantitative robuste.

Les effets positifs identifiés constituent néanmoins des signaux encourageants, mais encore fragiles, qui appellent à être consolidés par des suivis plus homogènes, pluriannuels et mieux comparables. Le renforcement et la standardisation des protocoles de suivi, ainsi que le partage des données, apparaissent comme des leviers essentiels pour améliorer la robustesse des évaluations futures.

Récapitulatif de la synthèse narrative sur l'efficacité des mesures d'atténuation

La décision concernant l'application des mesures doit être prise au cas par cas, en intégrant les spécificités du projet et de l'environnement après une étude approfondie. De plus, il est crucial de mener des recherches supplémentaires sur les espèces présentes sur le territoire national, la majorité des données scientifiques actuelles provenant d'espèces non présentes en France

Mesure	Description	Taxon	Référence bibliographique / Risque de biais / Page du rapport	Espèces	Pays	Niveau d'efficacité relevé (Selon la conception et les objectifs de l'étude, certaines études fournissent des résultats détaillés, d'autres des résultats plus succincts. Cela explique également pourquoi des résultats contrastés peuvent apparaître au sein d'une même étude ou entre différentes études)	Synthèse de l'efficacité
Amélioration de l'habitat / Mesure en faveur de la biodiversité	Implantation et gestion extensive d'une végétation diversifiée au sein des parcs photovoltaïques (prairies fleuries, semis d'espèces locales, transfert de matière végétale, réduction de la fauche intensive, maintien de structures (haies, marges, mosaïque d'habitats)) afin d'augmenter les ressources florales, les habitats et les refuges pour la faune.	Insectes	<i>Martin, 2022</i> Faible (n° 26)	<i>Pollinisateurs :</i> Abeilles sauvages Syrphes Papillons, etc. <i>Arthropodes :</i> Coléoptères Autres diptères Hémiptères Autres hyménoptères, etc.	États-Unis	* Diversité taxonomique et fonctionnelle des insectes du parc solaire "favorable aux pollinisateurs" (semis de plantes locales mellifères, fauche très réduite et lutte ciblée contre les invasives) équivalente à celle d'une prairie naturelle de référence. * Diversité taxonomique et fonctionnelle des insectes supérieure à celle d'un parc photovoltaïque en gazon.	Globalement, les études montrent qu'une gestion/restauration « biodiversité » des parcs photovoltaïques (prairies fleuries, gestion extensive, hétérogénéité structurelle) améliore la diversité et/ou l'abondance de plusieurs groupes faunistiques (pollinisateurs, insectes auxiliaires, oiseaux) par rapport à une gestion intensive (gazon ras) ou à des paysages agricoles. Les effets restent toutefois variables selon les micro-habitats. De plus, les mesures et protocoles mis en place sont encore trop peu nombreux et trop hétérogènes pour pouvoir dégager un consensus solide sur l'efficacité de mesures précises.
			<i>Walston et al., 2024</i> Faible (n° 26)	<i>Pollinisateurs :</i> Abeilles sauvages Bourdons Syrphes Papillons, etc. <i>Autres insectes :</i> Guêpes Frelons Coléoptères, etc.	États-Unis	*Augmentation de la diversité des groupes d'insectes d'environ 150 % en cinq ans après conversion des habitats en prairies riches en plantes mellifères. * Abondance totale d'insectes x3 après l'implantation de prairies fleuries. * Abondance des abeilles sauvages passe de valeurs quasi nulles à plus de 5 individus par transect après quatre ans.	
			<i>Biesmeijer et al., 2020</i> Moyen (n° 26)	<i>Pollinisateurs :</i> Abeilles Bourdons Syrphes	Pays-Bas	* Absence d'effet sur l'abondance des pollinisateurs quelque soit le mélange de graines comparé au témoin sans mélange. <i>Note des auteurs de l'article :</i> Le semis tardif a entraîné une faible présence des plantes issues des mélanges la première année et un entretien limité, ce qui a empêché d'identifier quel mélange était le	

					plus favorable aux pollinisateurs et à la gestion.
		<i>Lambert et al., 2024</i> Très faible (n° 27)	Mésafaune du sol : Acariens Collemboles Autres arthropodes	France	<p>* Augmentation de l'abondance des acariens prédateurs avec les traitements semis et transfert de matière végétale : l'abondance est ~3x plus faible dans les traitements contrôle et vermicompost que dans semis et transfert.</p> <p>* Augmentation des acariens détritvires : abondance ~3x plus faible dans le contrôle que dans semis et transfert.</p> <p>* Augmentation de l'abondance totale de la mésofaune : le semis est le traitement le plus élevé et le contrôle le plus faible ; l'abondance totale est ~1,5x plus élevée en semis qu'en contrôle et vermicompost.</p> <p>* Augmentation globale : acariens prédateurs et mésofaune totale sont ~2x plus élevés en semis et transfert qu'en contrôle et vermicompost.</p> <p>* Vermicompost : effets décrits comme faibles sur la mésofaune et pas significativement différents du contrôle (pour la mésofaune).</p>
	Oiseaux	<i>Copping et al., 2025</i> Faible (n° 27)	Oiseaux nicheurs de milieux agricoles et forestiers	Angleterre	<p>* Augmentation de l'abondance en parc avec gestion "mixte" de l'habitat (herbe plus haute, flore plus variée et haies ou arbres en bordure) comparé au parc avec gestion «simple» (herbe rase, peu de fleurs et absence d'éléments ligneux) : x2 toutes espèces confondues, x2 pour les espèces de milieux agricoles, x12 pour les espèces de milieux forestiers.</p> <p>* Augmentation de la richesse spécifique : x2.5 toutes espèces confondues, x3 pour les espèces de milieux agricoles, x9 pour les espèces de milieux forestiers.</p>

Gestion de la végétation - Pâturage	Mettre en place une gestion de la végétation compatible avec la biodiversité du sol, de type pâturage plutôt que fauche mécanique, afin de préserver les communautés d'arthropodes du sol et la qualité biologique des sols.	Insectes	<i>Menta et al., 2023</i> Très faible (n° 28)	Arthropodes terrestres	Italie	<ul style="list-style-type: none"> * Augmentation de l'abondance totale d'arthropodes dans le site géré par pâturage * Augmentation de l'indice QBS-ar (qualité biologique du sol via arthropodes) dans le site pâturé. * Augmentation des Acarina et Collembola dans le site pâturé. * Absence de différence pour Hymenoptera et Hemiptera. * En parallèle, les auteurs signalent un risque d'effet négatif local sous panneaux en cas de pâturage (animaux se reposant sous les panneaux), susceptible de dégrader l'habitat et de réduire localement certains arthropodes. 	Les résultats de l'étude sont prometteurs mais le nombre d'études (de surcroît très hétérogènes) n'est pas suffisant pour conclure sur l'efficacité de la mesure. D'autres études sont nécessaires pour confirmer les résultats.
Modification de la conception des infrastructures	Privilégier des dispositifs générant un ombrage plus « mobile » en utilisant des panneaux à suivi solaire plutôt que des panneaux fixes, permettant de limiter les conditions extrêmes entre panneaux, afin de réduire les modifications de microclimat et les changements de composition des communautés ; la zone ombragée peut servir de micro-refuge selon la technologie.	Insectes	<i>Suuronen et al., 2017</i> Faible (n° 29)	Arthropodes terrestres	Chili	* Réduction de l'ampleur des différences au sein du parc dans la centrale avec panneaux mobiles à suivi solaire comparé au parc avec panneaux fixes : pas de variation nette de composition des arthropodes entre les zones situées entre les rangées de panneaux et les zones situées sous les panneaux, suggérant un impact interne plus limité que dans le site avec panneaux fixes.	Les résultats de l'étude sont prometteurs mais une seule étude n'est pas suffisante pour conclure sur l'efficacité de la mesure. D'autres études sont nécessaires pour confirmer les résultats.
Traitements surfaciques des panneaux visant à réduire l'effet « lac/miroir »	Introduire des discontinuités non attractives sur/au-dessus de la surface lisse (ex. lignes/grillage blanc non polarisant, revêtement mat/anti-	Insectes	<i>Horváth et al., 2010</i> Fort (n° 30)	<i>Insectes aquatiques polarotactiques</i> (et diptères associés) : Éphémères, Trichoptères Diptères Dolichopodidae	Hongrie	* Réduction de l'attractivité lorsque la surface est fragmentée : les surfaces avec bordures/grillages blancs non polarisants sont 10 à 26 fois moins attractives que les surfaces homogènes équivalentes : - 10,3 x pour les diptères, - 16,7 x pour les éphémères et - 26,5 x pour les trichoptères.	Les 5 études convergent vers une efficacité globalement élevée des mesures visant à casser l'aspect « surface lisse homogène » des panneaux (fragmentation visuelle non polarisante, microtexturation/biomimétisme,

reflet, microtexturation biomimétique, fils) afin de réduire les signaux sensoriels (polarisation lumineuse/ « faux plan d'eau », réflexion spéculaire, échos) responsables d'un piège écologique.		<i>Black & Robertson, 2020</i> Faible (n° 30)	<i>Insectes aquatiques polarotactiques :</i> Trichoptères Simulies Éphémères	États-Unis <i>Ex-situ</i>	* Réduction de l'attractivité pour la plupart des taxons avec l'ajout de lignes blanches non polarisantes de 1 à 5 mm réduit l'attractivité de > 80% , avec seulement ~2-3% de réduction de surface active (ordre de grandeur).	obstacles fins au-dessus de la surface), particulièrement chez les insectes. Toutefois, il est nécessaire de poursuivre les recherches, d'une part, concernant les chauves-souris qui ne sont représentées que par une seule étude, et d'autre part, en étendant ces études en contexte réel au sein de parc photovoltaïque et à grande échelle.
		<i>Száz et al., 2016</i> Moyen (n° 31)	<i>Insectes aquatiques polarotactiques :</i> Éphémères Taons Chironomes	Hongrie <i>Ex-situ</i>	* Réduction de l'attractivité des taons avec une surface noire mate vs noire brillante selon différents comportements : - 3,4 x pour les vols en boucle (looping), - 5,6 x pour les contacts et - 5,2 x pour les atterrissages. * Augmentation de l'attractivité de 4 x pour les éphémères avec une surface noire mate vs noire brillante. * Aucune différence pour les Chironomes	
		<i>Fritz et al., 2020</i> Moyen (n° 31)	<i>Insectes aquatiques polarotactiques :</i> Éphémères Taons	Hongrie <i>Ex-situ</i>	* Réduction très forte des interactions pour la surface « rose-pétale » comparé à une surface lisse : - 95% chez les éphémères, - 91% chez les taons * Réduction moins forte pour la surface « rose-pétale » avec couche de verre comparé à la « rose-pétale » seule : - 25% chez les éphémères, aucune réduction chez les taons	
	Chauves-souris	<i>Abdul Rahman et al., 2024</i> Moyen (n° 31)	Pipistrelle de Kuhl (<i>Pipistrellus kuhlii</i> , majoritaire) Vespère de Savi (<i>Hypsugo savi</i>) Pipistrelle commune (<i>Pipistrellus pipistrellus</i>)	Hongrie <i>Ex-situ</i>	* Réduction de la fréquence d' « abreuvement » avec l'ajout de fils par rapport aux plaques lisses et diminution avec l'augmentation du diamètre (tendance non-linéaire). Par exemple, réduction de 60% avec des ficelles de 2,5mm. * À diamètre égal, réduction de la fréquence d' « abreuvement » supérieure avec des motifs croisés plutôt que des motifs parallèles : fréquence quasi nulle avec les motifs croisés.	

<p>Dissuasion acoustique (Mesure de dérangement controversée, hors atténuation ERC stricto sensu)</p>	<p>Installation d'un dispositif commercial d'effarouchement par son (alarme/ondes sonores) fonctionnant uniquement en journée.</p>	<p>Oiseaux</p>	<p><i>Itoh et al., 2018</i> Fort (n° 32)</p>	<p>Corbeaux</p>	<p>Japon</p>	<p>Efficacité : semble plutôt élevée (mais incertitude importante !). * Présence au sol et sur structure : 0 corbeau posé observé pendant la période avec son (contre 3 puis 6 corbeaux posés près du dispositif en périodes sans son). * Passages en vol : baisse de 3,8–4,5 corbeaux/jour sans son à 2,3 corbeaux/jour avec son, soit environ -39% à -49%.</p>	<p>Les résultats suggèrent que l'effarouchement sonore peut empêcher les atterrissages et réduire les passages de corbeaux à proximité immédiate. Toutefois, la preuve reste fragile, et nécessite confirmation par des suivis multisites et sur une durée plus longue. Par ailleurs, dans d'autres contextes que le photovoltaïque, l'effarouchement sonore chez les oiseaux est souvent décrit comme peu durable en raison de l'habituation, ce qui invite à le considérer comme une mesure plutôt ponctuelle/complémentaire qu'une solution de long terme. Cette mesure ne relève pas strictement d'une mesure de réduction des impacts au sens ERC, en l'absence d'impact avéré (ex. collisions). Elle est présentée ici à titre exploratoire et critique.</p>
--	--	----------------	--	-----------------	--------------	---	--

Base des recommandations

Les recommandations synthétisées dans les tableaux ci-après s'appuient conjointement sur les résultats de la revue rapide de la littérature et sur les échanges de l'atelier d'experts, afin de refléter à la fois l'état des connaissances et les retours du terrain.

Recommandations pour les développeurs et opérateurs de projets

Section	Recommandation	Action spécifique
Choix des mesures et écoconception	Prioriser les mesures jugées favorables à la biodiversité	– Mettre en œuvre des dispositifs de clôtures et passages à faune conçus en fonction des espèces et du contexte, avec une attention à leur entretien.
		– Déployer des gîtes pour chauves-souris, des mares et hibernaculums pour amphibiens et reptiles, ainsi que des nichoirs adaptés au contexte local
		– Maintenir des milieux naturels sans panneaux au sein des centrales lorsque cela est pertinent pour la biodiversité.
		– Utiliser autant que possible des semences locales et le ressemer à partir de graines produites sur la centrale.
		– Éviter l'implantation de projets dans les zones à forts enjeux écologiques.
Gestion de la végétation et des sols	Adapter la gestion pour concilier incendie, agriculture et biodiversité	– Limiter les pratiques de « nettoyage » intégral qui appauvrissent les habitats et peuvent devenir contre-productives pour la résilience des milieux.
		– Ajuster, lorsque c'est possible, le calendrier des fauches et du pâturage pour réduire les conflits avec les périodes favorables à la faune.
		– Intégrer la restauration des sols (infiltration, érosion, compaction après chantier) dans la conception et la gestion des projets.
		– Expérimenter des régimes de gestion différenciée de la végétation, en particulier en agri-PV, en tenant compte des contraintes assurantielles et agricoles.
Suivi et évaluation	Intégrer systématiquement les mesures de suivi et d'évaluation écologique dans les projets	– Prévoir dès la conception des projets des dispositifs de suivi incluant un état initial, des indicateurs définis et, lorsque possible, des zones témoins.
		– Allouer des moyens humains et financiers suffisants pour des suivis pluriannuels et des protocoles plus robustes.
		– Faciliter l'accès aux sites pour les équipes de suivi et de recherche.
		– Transmettre les données de suivi aux services de l'État et à l'Observatoire, dans des formats exploitables.

Arbitrages réglementaires et économiques	Anticiper les tensions entre biodiversité, incendie, agriculture, assurance et compensation	– Identifier en amont les contraintes de défense incendie (OLD, prescriptions locales) et co-construire avec les services compétents des solutions compatibles avec les objectifs écologiques.
		– Travailler avec les agriculteurs et éleveurs sur les obligations de lutte contre certaines espèces végétales et les marges d’ajustement possibles.
		– Intégrer dans le modèle économique les coûts de compensation et de gestion écologique, pour éviter des recalages tardifs et coûteux.
		– S’appuyer sur les guides d’écoconception et les retours d’expérience pour hiérarchiser les mesures offrant le meilleur bénéfice écologique au regard des contraintes.
Coopération et partage d’expérience	Renforcer la coopération avec la recherche et les acteurs locaux	– Participer aux dispositifs collectifs (Observatoire, programmes collaboratifs comme BIODIVoltaïque, démarches de type « écovoltaïsme »).
		– Contribuer aux formations et échanges inter-filière en partageant les réussites mais aussi les difficultés rencontrées sur le terrain.
		– Associer collectivités, associations et riverains aux réflexions sur le choix des mesures et présenter les résultats de suivi pour renforcer l’acceptabilité des projets.

Recommandations pour la communauté scientifique

Section	Recommandation	Action spécifique
Axes de recherche prioritaires	Élargir les contextes étudiés et les groupes taxonomiques	– Renforcer l'étude de sites en France et en Europe, en documentant prioritairement les milieux méditerranéens, tropicaux et, le cas échéant, arides.
		– Développer des études dédiées aux pollinisateurs, aux oiseaux, aux chauves-souris, aux petits et grands mammifères, aux reptiles et aux amphibiens.
	Diversifier les types de mesures évaluées	– Tester plus systématiquement les leviers d'habitat et de gestion de la végétation pour les vertébrés, y compris leurs effets saisonniers.
		– Analyser différentes approches de dissuasion (acoustique, visuelle, lumineuse) et les options de conception des infrastructures.
		– Orienter la R&D vers l'influence de la hauteur des panneaux et de la distance inter-rangs, la restauration des sols et les mesures en faveur des pollinisateurs et de la petite faune, y compris en agri-PV.
Méthodologie et designs d'étude	Renforcer la robustesse des dispositifs expérimentaux	– Mettre en place des designs de type BACI avec répliques et suivis pluriannuels.
		– Intégrer explicitement les facteurs confondants dans les analyses.
		– Multiplier les validations in situ des solutions testées ex situ et élargir la base d'essais ex situ à d'autres contextes et équipes.
		– Harmoniser les métriques entre cadres contrôlés et sites réels pour comparer directement l'efficacité des mesures.
Standardisation et données	Développer des protocoles et indicateurs harmonisés	– Contribuer à l'élaboration de référentiels communs de suivi par taxon, avec indicateurs et fréquences partagés à l'échelle nationale.
		– Stabiliser les protocoles dans le temps pour dégager des tendances robustes.
		– Publier en libre accès les jeux de données associés aux travaux de recherche portant sur les centrales photovoltaïques
		– Documenter et publier les résultats, y compris neutres ou négatifs, en assurant la transparence sur les financements et conflits d'intérêts.
Coopération avec la filière	Co-construire les suivis avec les acteurs de terrain	– Associer développeurs, bureaux d'études et gestionnaires dès la conception des protocoles et des dispositifs BACI.
		– Appuyer les dispositifs collectifs (Observatoire des énergies renouvelables et de la biodiversité, programmes comme BIODIVoltaïque) en y apportant une expertise scientifique.

		<ul style="list-style-type: none"> – Identifier les besoins prioritaires de connaissances des développeurs et de les traduire en question de recherche.
		<ul style="list-style-type: none"> – Participer à la rédaction de guides opérationnels et aux formations « photovoltaïque et biodiversité ».
Valorisation et formation	Renforcer la diffusion des connaissances	<ul style="list-style-type: none"> – Traduire les résultats de recherche en recommandations opérationnelles pour les guides d'écoconception et les outils techniques existants.
		<ul style="list-style-type: none"> – Contribuer à la montée en compétences des bureaux d'études, développeurs et services publics via des formations et ateliers.
		<ul style="list-style-type: none"> – Articuler connaissances scientifiques et retours de terrain pour améliorer en continu les pratiques et prioriser les mesures les plus efficaces.

Recommandations pour les agences gouvernementales

Section	Recommandation	Action spécifique
Cadre réglementaire et compensation	Clarifier et stabiliser les exigences de compensation environnementale	– Clarifier les critères de dimensionnement des mesures de compensation et leur articulation avec les surfaces forestières ou agricoles.
		– Limiter les situations de double compensation et rendre le régime plus lisible pour les porteurs de projet.
		– Intégrer les mesures « sans regret » (éviter les zones à forts enjeux, contribuer à la conservation des milieux ouverts) comme attentes centrales des projets plutôt que comme bonus.
Articulation des politiques publiques	Mieux coordonner biodiversité, défense incendie et politiques agricoles	– Harmoniser l’interprétation des OLD et des prescriptions de défense incendie entre départements pour réduire les injonctions contradictoires.
		– Adapter les obligations de gestion de la végétation (y compris la lutte contre certaines espèces) pour qu’elles restent compatibles avec les objectifs de biodiversité.
		– Mettre en place une coordination interministérielle et entre services déconcentrés (environnement, agriculture, incendie, etc.) afin d’offrir un cadre cohérent aux projets.
Standardisation des suivis	Mettre en place des référentiels nationaux de suivi écologique	– Coordonner l’élaboration de protocoles harmonisés par taxon, avec indicateurs, fréquences et méthodes partagés à l’échelle de la filière.
		– Stabiliser ces protocoles dans le temps pour permettre l’analyse de tendances sur dix à quinze ans.
		– Intégrer, dans les procédures d’autorisation, des exigences explicites de suivi avant et après projet, lorsque possible de type BACI.
Données et transparence	Centraliser et valoriser les données environnementales	– Soutenir l’Observatoire des énergies renouvelables et de la biodiversité comme plateforme nationale de données et centre de ressources.
		– Encourager le partage des données brutes et la transparence sur les financements et conflits d’intérêts afin de faciliter les analyses et méta-analyses.
Soutien à la R&D et à l’écoconception	Orienter la R&D vers l’efficacité des mesures et la résilience des sols	– Financer des programmes ciblant l’influence de la hauteur des panneaux et de la distance inter-rangs sur les habitats et la circulation de la faune.
		– Soutenir les travaux sur la restauration et la conservation des sols (infiltration, érosion, compaction après chantier).
		– Encourager les études sur les pollinisateurs, la petite faune et la gestion de la végétation en contexte agri-PV.

		<ul style="list-style-type: none"> – Prioriser les projets qui comparent l’efficacité des mesures plutôt que de multiplier des études isolées.
Guides et formation	Développer guides d’écoconception et montée en compétences	<ul style="list-style-type: none"> – Soutenir la production et la mise à jour de guides d’écoconception des centrales photovoltaïques et d’écovoltisme « nourris par la littérature et les retours de terrain.
		<ul style="list-style-type: none"> – Appuyer la mise en place de formations dédiées « photovoltaïque et biodiversité » pour les services de l’État, bureaux d’études, développeurs et agriculteurs.
		<ul style="list-style-type: none"> – Valoriser les retours d’expérience des projets pilotes, notamment en agri-PV, dans ces outils.
Rôle de tiers garant	Renforcer le rôle de l’État comme arbitre et facilitateur	<ul style="list-style-type: none"> – Organiser une analyse structurée des suivis transmis et un retour aux porteurs de projets.
		<ul style="list-style-type: none"> – Participer activement aux espaces de dialogue locaux pour aider à arbitrer entre exigences de sécurité, d’agriculture et de biodiversité.
		<ul style="list-style-type: none"> – Contribuer à sécuriser un cadre lisible et stable permettant aux acteurs économiques et scientifiques de se projeter dans la durée.

INTRODUCTION

L'urgence climatique impose une transformation rapide et profonde de nos systèmes de production énergétique. Compte tenu des tendances actuelles, un dépassement temporaire de 1,5°C du réchauffement planétaire est aujourd'hui inévitable (Copernicus Climate Change Service, 2026). Néanmoins, limiter ce dépassement et revenir vers 1,5°C nécessite des réductions rapides et profondes des émissions de gaz à effet de serre dès cette décennie (IPCC, 2023). Le secteur de l'électricité, encore largement dépendant des énergies fossiles, est responsable d'environ 42 % des émissions mondiales de CO₂ (International Energy Agency, 2022). La transition vers des énergies renouvelables constitue ainsi un levier majeur pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, comme le prévoit l'Accord de Paris (UNFCCC, 2015). En parallèle, l'électrification croissante des usages, y compris dans les transports et le bâtiment, renforce la nécessité de produire une électricité décarbonée en quantité suffisante. Cette transition ne peut toutefois ignorer les enjeux de biodiversité. Selon la cible 8 du cadre mondial pour la biodiversité de Kunming-Montréal, les actions de lutte contre le changement climatique doivent minimiser leurs impacts négatifs sur la nature tout en maximisant les effets positifs (CBD/COP/DEC/15/4, 2022). La production d'énergie, quelle que soit sa forme, doit ainsi concilier efficacité climatique et soutenabilité écologique (Stephen, 2023). Cela implique d'évaluer avec rigueur les effets des installations sur les écosystèmes et de mettre en œuvre des mesures adaptées pour les éviter, les réduire ou les compenser.

L'énergie photovoltaïque connaît un essor rapide depuis 2010. En France, sa puissance installée a franchi les 20 GW fin 2023, et les objectifs fixés par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) visent entre 35 et 44 GW à l'horizon 2028 (Ministère de la Transition écologique, 2023). Ce développement concerne de plus en plus des installations au sol, qui occupent de grandes surfaces et s'implantent parfois en zones naturelles ou agricoles. En 2025, la réglementation française a été renforcée pour encadrer ce déploiement. La loi d'accélération de la production d'énergies renouvelables (loi APER), promulguée en mars 2023, constitue désormais le socle du cadre réglementaire.

Malgré leur fonctionnement silencieux et leur production d'énergie sans émission directe, les centrales photovoltaïques au sol peuvent exercer divers impacts sur la faune terrestre. Ces effets concernent un large éventail de taxons : oiseaux, chauves-souris, insectes, reptiles, amphibiens et mammifères. Les impacts varient selon le contexte écologique local, le type d'aménagement, les pratiques de gestion et les phases du projet (installation, exploitation, démantèlement). Le premier effet identifié est la perte ou la transformation des habitats. L'implantation de panneaux solaires implique souvent un nivellement du sol, la pose de fondations, l'aménagement de chemins d'accès et parfois l'installation de clôtures. Ces modifications entraînent potentiellement la destruction d'habitats naturels, la fragmentation des milieux et l'exclusion de certaines espèces sensibles à l'artificialisation (Lafitte et al., 2023 ; LPO, 2022). La végétation, souvent entretenue par fauche rase ou pâturage intensif, devient moins favorable à une diversité d'espèces, notamment les insectes pollinisateurs, les oiseaux nicheurs au sol ou les petits mammifères. Des effets comportementaux sont également rapportés. Certaines espèces évitent activement les infrastructures, ce qui peut réduire leur accès aux ressources ou les contraindre à modifier leurs déplacements, notamment en l'absence de corridors écologiques fonctionnels (Hernandez et al., 2014 ; LPO, 2022). D'autres, au contraire, peuvent être attirées par les nouveaux aménagements, provoquant un déséquilibre écologique local. Les espèces opportunistes (corvidés, renards, sangliers) peuvent bénéficier des changements induits par les installations, parfois au détriment des espèces plus spécialisées. La présence de clôtures autour des centrales solaires constitue une barrière physique pouvant limiter la mobilité de la moyenne et grande faune en fonction de la hauteur et de la profondeur des clôtures : lapins, tortues, blaireaux, cervidés, renards, sangliers, etc. (Fleming et al., 2025). Cela peut fragmenter les populations, empêcher la recolonisation naturelle des habitats ou augmenter la mortalité liée aux routes si les animaux sont déviés vers les voies de circulation. Certains éléments techniques, comme les panneaux réfléchissants, peuvent perturber la perception visuelle d'insectes ou d'oiseaux aquatiques, entraînant des comportements inadaptés (Horváth et al., 2010). De même, la modification du microclimat (ombre, température, humidité) sous les panneaux influence la composition floristique et, indirectement, les

communautés animales (Armstrong et al., 2016 ; Graham et al., 2019). Enfin, les impacts indirects liés à la fréquentation humaine, au bruit ou aux travaux de maintenance ne doivent pas être négligés, en particulier pendant la phase de construction. Le dérangement temporaire ou répété peut affecter la reproduction de certaines espèces sensibles, notamment les oiseaux, les amphibiens ou les chauves-souris (Lafitte et al., 2023). Ces effets sont rarement homogènes et dépendent fortement des conditions locales. Leur cumul dans les territoires fortement équipés pourrait entraîner des conséquences plus importantes à moyen terme, ce qui souligne l'importance d'évaluations rigoureuses, d'un suivi écologique standardisé et d'une meilleure capitalisation des retours d'expérience.

Face aux impacts identifiés, la réglementation française impose aux porteurs de projets de mettre en œuvre la séquence ERC dans toutes les phases de développement des centrales photovoltaïques au sol. Ce principe constitue aujourd'hui le cœur des exigences environnementales (Légifrance, 2023 ; ADEME, 2024). Il vise à éviter en amont les atteintes significatives à la biodiversité, à réduire celles qui ne peuvent être évitées, puis à compenser en dernier recours les impacts résiduels. L'évitement est l'étape prioritaire. Il repose d'abord sur la planification spatiale : les projets doivent être implantés en priorité sur des espaces artificialisés, comme les parkings, friches ou bords d'infrastructures, afin de minimiser la pression sur les milieux naturels sensibles (France Renouvelables, 2023). Le décret d'application de la loi APER intègre cette logique en excluant les zones agricoles productives ou naturelles de haute valeur écologique, sauf exception justifiée (Hellio, 2024). L'évitement implique aussi de tenir compte des corridors écologiques, des sites de nidification ou d'hivernage d'espèces sensibles, et d'écarter les projets situés sur les routes de migration ou les zones humides (LPO, 2022). La réduction des impacts repose sur des mesures techniques et de gestion du site. Parmi les bonnes pratiques figurent les clôtures perméables à la faune, la suppression de l'éclairage nocturne, ou encore une hauteur des panneaux pour faciliter les déplacements des espèces (Lafitte et al., 2023 ; LPO, 2022). Une gestion écologique de la végétation, comme la fauche tardive ou le pâturage, favorise aussi les pollinisateurs et oiseaux nicheurs (ADEME, 2024 ; Graham et al., 2019). Pour limiter l'attraction visuelle, des panneaux moins réfléchissants ou marqués peuvent être utilisés (Horváth et al., 2010). Concernant les chauves-souris, il est recommandé d'éloigner la centrale photovoltaïque des gîtes et corridors boisés, et de préserver les haies et lisières (France Renouvelables, 2023). Des dispositifs de dissuasion acoustique ou visuelle sont en cours d'expérimentation (Lafitte et al., 2023). La compensation, lorsqu'elle est requise, reste une étape complexe et peu mise en œuvre dans la pratique. Lorsque nécessaire, elle peut prendre la forme de la restauration de milieux ouverts à proximité du projet, de la création d'habitats refuges (zones humides, prairies fleuries, haies), ou du financement de mesures de conservation ciblées (LPO, 2022). Cependant, ces compensations doivent être adaptées aux espèces affectées et inscrites dans la durée pour produire un effet écologique mesurable – ce qui nécessite un suivi rigoureux, encore rare à ce jour (Lafitte et al., 2023 ; ADEME, 2024). La mise en œuvre efficace de la séquence ERC dépend donc de plusieurs conditions : une planification territoriale cohérente, des outils de diagnostic précis en amont, des protocoles de suivi robustes et une évaluation régulière de l'efficacité des mesures. Ces éléments sont encore partiels ou inégalement appliqués. La littérature insiste sur la nécessité de renforcer les retours d'expérience, de standardiser les indicateurs de suivi, et de créer des bases de données accessibles aux porteurs de projets, chercheurs et autorités environnementales (Lafitte et al., 2023 ; France Renouvelables, 2023).

Aujourd'hui, la priorité est de mieux évaluer l'efficacité réelle de ces mesures. Une synthèse rigoureuse des connaissances est donc nécessaire pour identifier les leviers efficaces, adapter les pratiques, et garantir que le développement du photovoltaïque au sol se fasse dans le respect des objectifs climatiques et des impératifs de préservation de la biodiversité.

OBJECTIF PRINCIPAL DE LA REVUE

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité a initié une revue de la littérature scientifique et technique portant sur l'efficacité des mesures destinées à réduire l'impact des parcs photovoltaïque au sol sur la faune volante et terrestre. Ce projet s'inscrit dans un programme global financé par le fonds de dotation Mirova Research Center, visant à promouvoir des pratiques durables et responsables

dans le secteur des énergies renouvelable. Son objectif est d'identifier l'efficacité des mesures de réduction des impacts, telles que documentées par la recherche scientifique, afin d'accompagner les parties prenantes (agences gouvernementales, régulateurs, développeurs et opérateurs de projets) dans l'amélioration de leurs pratiques. Le projet entend fournir des recommandations opérationnelles basées sur des bases scientifiques solides pour optimiser le développement et l'exploitation des parcs photovoltaïque au sol tout en minimisant leurs impacts environnementaux.

Le programme repose sur une collaboration étroite entre divers acteurs et s'articule autour de trois grands axes complémentaires. Premièrement, il comprend des synthèses de connaissances scientifiques, incluant une mise à jour des synthèses traitant des impacts des énergies renouvelables — éolien terrestre, éolien marin et photovoltaïque — sur la biodiversité, ainsi que trois revues qui évaluent l'efficacité des mesures mises en œuvre pour minimiser ces impacts. Deuxièmement, il prévoit un appel à projets de recherche qui a permis de financer quatre projets innovants destinés à produire de nouvelles connaissances sur ces thématiques. Enfin, des ateliers d'experts rassemblant scientifiques et parties prenantes telles que les agences gouvernementales, les régulateurs, les développeurs et les opérateurs de projets visent à faciliter les échanges, enrichir les réflexions et optimiser les pratiques en matière de protection de la biodiversité.

Le programme se distingue par une approche intégrée et holistique des défis environnementaux posés par le développement des énergies renouvelables. Il analyse les impacts des principales technologies, de l'éolien terrestre à l'éolien marin en passant par le photovoltaïque, tout en s'appuyant sur une base scientifique rigoureuse pour proposer des solutions d'atténuation efficaces. De plus, sa dimension prospective, qui inclut le financement de recherches innovantes, souligne son engagement pionnier dans la production de nouvelles connaissances.

La Fondation pour la recherche sur la biodiversité, en partenariat avec Mirova Research Center, a proposé de piloter une synthèse des connaissances (ci-après dénommé « Revue rapide ») autour des interactions entre le développement photovoltaïque au sol et la biodiversité. Le conseil scientifique du programme a orienté la revue vers un état de la littérature académique et technique sur la question de l'efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de l'énergie photovoltaïque au sol sur une partie de la biodiversité animale volante et terrestre : oiseaux, chauve-souris, insectes, petits et grands mammifères, reptiles et batraciens. La revue rapide, forme optimisée de la revue systématique, a pour ambition de fournir des réponses pertinentes dans un temps plus réduit : meilleures pratiques, succès, échecs et lacunes de connaissances. Cette vue d'ensemble est de surcroît essentielle pour orienter les politiques et les pratiques futures, ainsi que pour optimiser les investissements financiers vers des projets vertueux pour la biodiversité. Ainsi, la question principale de la Revue est la suivante : « Quelle est l'efficacité des solutions existantes pour limiter les impacts des parcs photovoltaïques au sol sur les vertébrés et invertébrés terrestres et volants ? » (Figure 1). Les composantes de la question suivent une structure « PICO » (Population, Intervention, Comparateur, *Outcomes*¹) (Tableau 1).

Note aux lecteurs :

Pour une compréhension approfondie des méthodologies employées dans ce rapport, nous vous invitons à consulter les annexes (ANNEXE I). La section Méthodes y est détaillée, décrivant la stratégie de recherche bibliographique et les critères de sélection des documents retenus. Elle présente également les approches utilisées pour la synthèse narrative. Ces informations offrent un aperçu complet des démarches suivies pour garantir la rigueur scientifique et la robustesse des conclusions présentées.

¹ L'anglais "outcome" correspond en français à un effet.

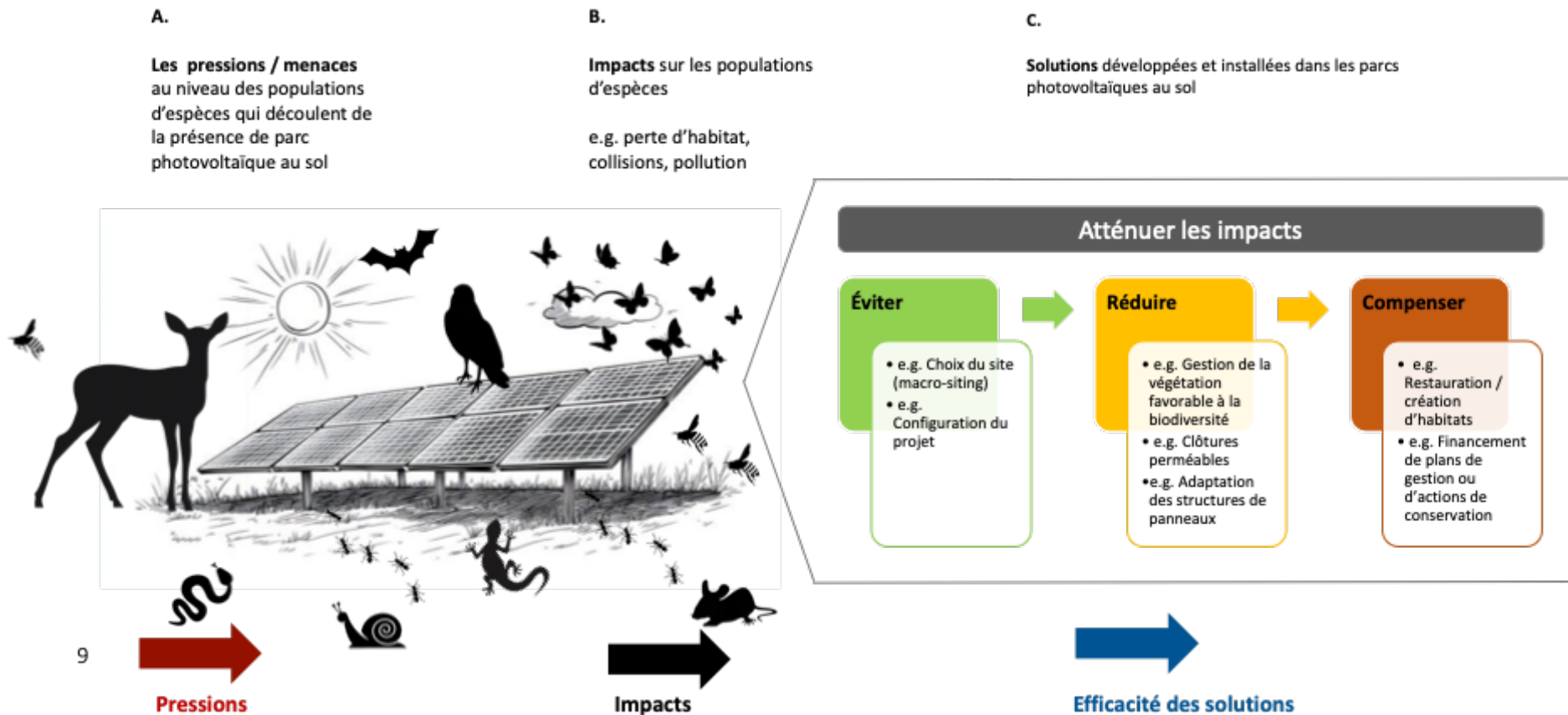


Figure 1. Schéma illustrant la théorie conceptuelle de la question de la revue. A. les pressions exercées sur les écosystèmes par le parc photovoltaïque au sol, entraînant B : des impacts sur les populations d'espèces tels que des pertes d'habitats. C : les solutions mises en œuvre pour atténuer les impacts des parcs photovoltaïques au sol dans le paysage. [Illustration du panneau photovoltaïque : Adobe Stock, ID 1469513279v]

Tableau 1. Composantes de la question de la Revue Rapide

Composantes PICO*	Définitions	
Population	La majorité de la faune vertébrée, c'est-à-dire les oiseaux, les petits et grands mammifères terrestres et volant (chauve-souris), les amphibiens et les reptiles, et quelques invertébrés, en particulier les insectes terrestres et volant et les gastéropodes.	
Intervention	Toutes les solutions d'atténuation mises en œuvre, que ce soit à l'échelle d'un seul panneau photovoltaïque, de plusieurs panneaux photovoltaïques, ou à l'échelle d'un parc photovoltaïque au sol, conformément à la séquence « ERC ».	
	Évitement	Incluant les solutions permettant d'éviter les impacts. (par ex. non destruction d'une zone humide).
	Réduction	Incluant des solutions reposant sur des dispositifs ou aménagements intégrés aux installations photovoltaïques au sol existantes afin de réduire leurs impacts sur la biodiversité. Par exemple : clôtures perméables à la faune, suppression ou adaptation de l'éclairage nocturne, gestion écologique de la végétation (fauche tardive, pâturage extensif), ou encore création de micro-habitats favorables.
	Compensation	Incluant des solutions impliquant des actions de restauration écologique (dont gestion d'habitats) ailleurs en raison des pertes écologiques sur le site des parcs photovoltaïques.
Comparateur	Comparaisons spatiales (par exemple, sites où des solutions sont mises en œuvre pour atténuer les impacts vs. sites sans solutions mises en œuvre) ou temporelles (par exemple, avant la mise en œuvre de la solution vs. après la mise en œuvre). Celles-ci peuvent se traduire par des études dites « Avant-Après », « Contrôle-Intervention », « Avant-Après-Contrôle-Intervention ».	
Effets (EN : *Outcomes)	Tous les impacts sur la taille, la densité ou le fonctionnement des populations animales, tels que la mortalité directe (e.g. collisions), les comportements d'évitement, les modifications d'activité ou de fréquentation du site, les déplacements, ainsi que les variations d'abondance ou de diversité.	

RÉSULTATS DESCRIPTIFS DES DOCUMENTS RETENUS

Recherche et sélection

Processus de sélection des références bibliographiques

Les recherches effectuées dans diverses bases de données de publications en ligne ont renvoyé 1446 références pour Web of Science, 631 pour BASE et 818 pour Google Scholar. En outre, des recherches complémentaires dans des revues systématiques concernant les impacts du photovoltaïque au sol sur la biodiversité ont permis de récupérer 1 référence scientifique complémentaire.

Sur les 2895 références initialement trouvées, 1968 références uniques ont été conservées après l'élimination des doublons (Figure 2). L'examen des titres et résumés simultanément a permis de retenir 72 citations. 8 références (11,1 %) n'ont pas pu être récupérées en texte entier. Après l'examen des textes complets, 12 documents pertinents ont été sélectionnés. Les textes complets ont été principalement exclus en raison d'interventions (41,7 %) et de comparateurs (27,7 %) évalués comme non pertinents.

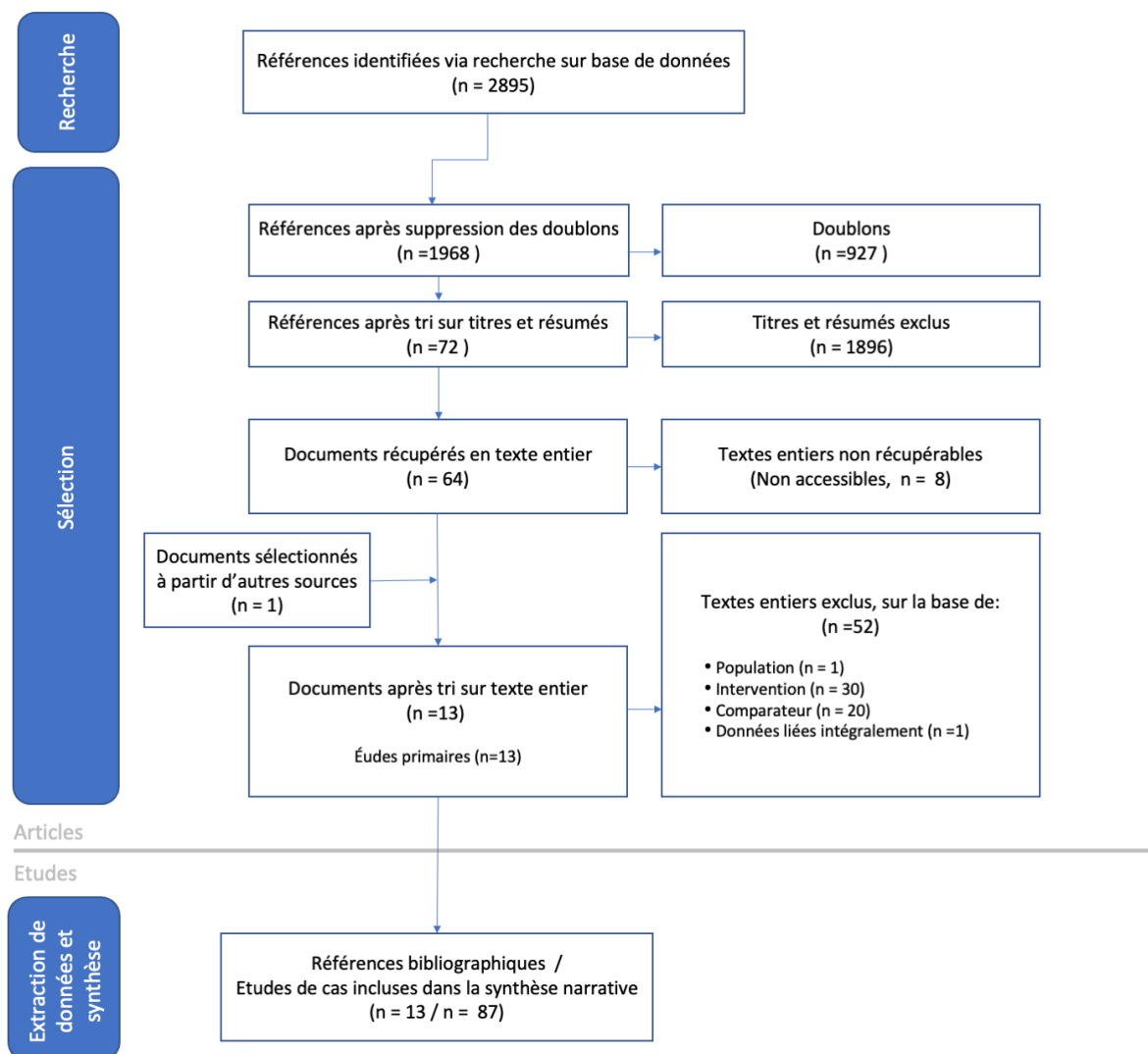


Figure 2. Diagramme de flux ROSES rapportant le processus de sélection des références bibliographiques incluses dans la carte systématique et la synthèse narrative.

Sources et type des références sélectionnées

Environ un sixième des articles retenus ont été trouvés grâce aux recherches principales dans les bases de données de publications en ligne, avec une prédominance des références provenant de la base de données Web of Science (sept articles, 53,8 %) (Figure 3). Parmi celles-ci, toutes sont des articles scientifiques, ce qui indique que cette source est particulièrement riche en publications académiques évaluées par des pairs. La base de données BASE fournit deux références bibliographiques (15,4 %), dont un mémoire de thèse et un article scientifique. Il est important de noter que de nombreuses références issues de BASE ont été supprimées en raison de doublons avec celles trouvées dans Web of Science. Google Scholar a fourni également deux références (15,4 %), toutes étant des articles scientifiques. À l'instar de BASE, de nombreuses références provenant de Google Scholar ont été supprimées en raison de doublons avec celles trouvées dans Web of Science ou BASE. La recherche additionnelle compte deux références bibliographiques (15,4 %), dont un article scientifique et un rapport technique. Toutes deux proviennent de la lecture des revues systématiques les plus pertinentes et récentes sur les impacts du photovoltaïque au sol sur la biodiversité.

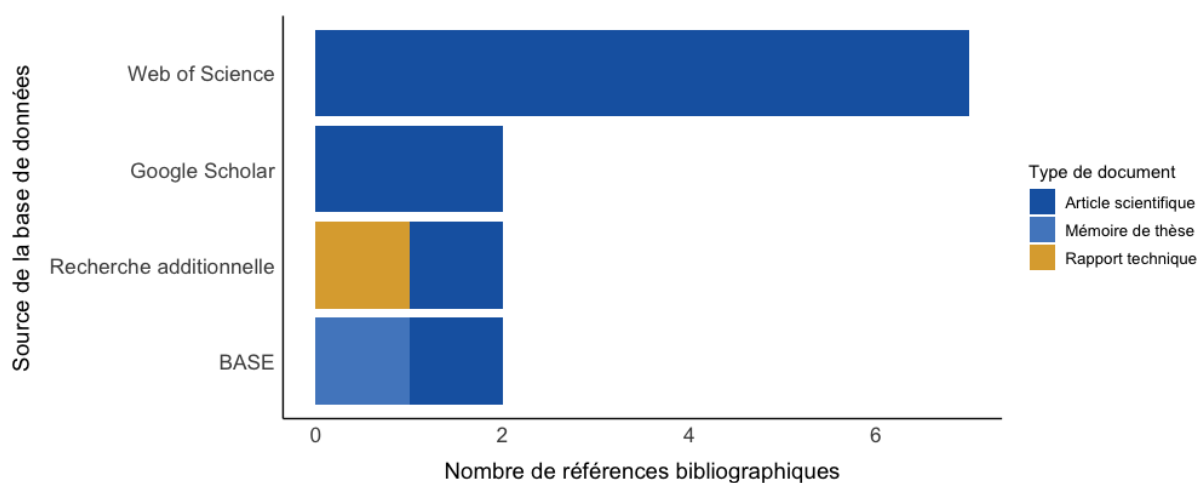


Figure 3. Nombre de références bibliographiques sélectionnées en fonction de sa source et du type de document.

Caractéristiques clés

Validité des études

Sur l'ensemble du corpus, la majorité des références bibliographiques, 5 études dans cette catégorie, soit 38,5% du total, présentent un risque de biais global faible (Figure 4). Viennent ensuite les références avec un risque de biais moyen, au nombre de 4 (30,8%). Les catégories extrêmes sont moins représentées : seules 2 références (15,4%) ont été classées avec un risque de biais global fort, 2 (15,4%) avec un risque de biais très faible, et aucune avec un risque de biais global très fort. Ainsi, la plupart des documents se situent dans une zone intermédiaire de robustesse méthodologique, tandis que les situations très favorables ou très défavorables restent minoritaires.

Il est toutefois important de rappeler que cette évaluation repose sur un nombre restreint de critères d'évaluation, 6 au total, principalement en raison de contraintes de temps qui ont conduit à privilégier un ensemble limité mais jugé représentatif (contexte d'étude, facteurs de confusion, modalités de sélection et de détection, qualité des analyses statistiques, transparence sur les financements et conflits d'intérêts). En conséquence, le niveau de risque de biais global doit être interprété avec prudence : il fournit un indicateur synthétique, utile pour comparer les études entre elles, mais il ne reflète pas nécessairement toute la complexité ni toutes les nuances de la qualité méthodologique de chaque travail pris individuellement.



Figure 4. Nombre de références bibliographiques sélectionnés en fonction du risque de biais global de l'étude.

Évolution chronologique

La première publication retenue par notre recherche et sélection bibliographique date de 2010, suivie d'une absence de travaux jusqu'en 2016, révélant un désintérêt relatif et prolongé pour l'étude de l'efficacité des mesures d'atténuation des impacts du photovoltaïque au sol sur la biodiversité animale (Figure 5). En effet, le nombre de références recensées oscille entre 1 et 3 de 2016 à 2025, sans augmentation apparente et franche. Dans leur carte systématique sur les impacts du photovoltaïque sur la biodiversité végétale et animale, Laffite et al. (2023) ont montré une première parution en 2005, avec une vraie accélération du nombre d'articles publiés seulement à partir de 2015. On constate une parenté de rythmes de publication entre les études d'impact et les travaux dédiés aux solutions. Toutefois, un décalage temporel est attendu entre ces deux corpus : la conception, la mise en œuvre et le suivi des mesures retardent leur diffusion par rapport à la caractérisation des impacts. Ce décalage tient également au temps nécessaire à la prise de conscience des impacts, à la maturation de la réflexion sur les modalités de leur réduction, puis à l'élaboration de protocoles permettant de tester, dans des conditions robustes, les solutions développées. Nos résultats s'inscrivent dans cette logique. Il est à noter que notre recherche bibliographique a été réalisée mi-juin 2025, rendant la revue incomplète pour cette année particulière.

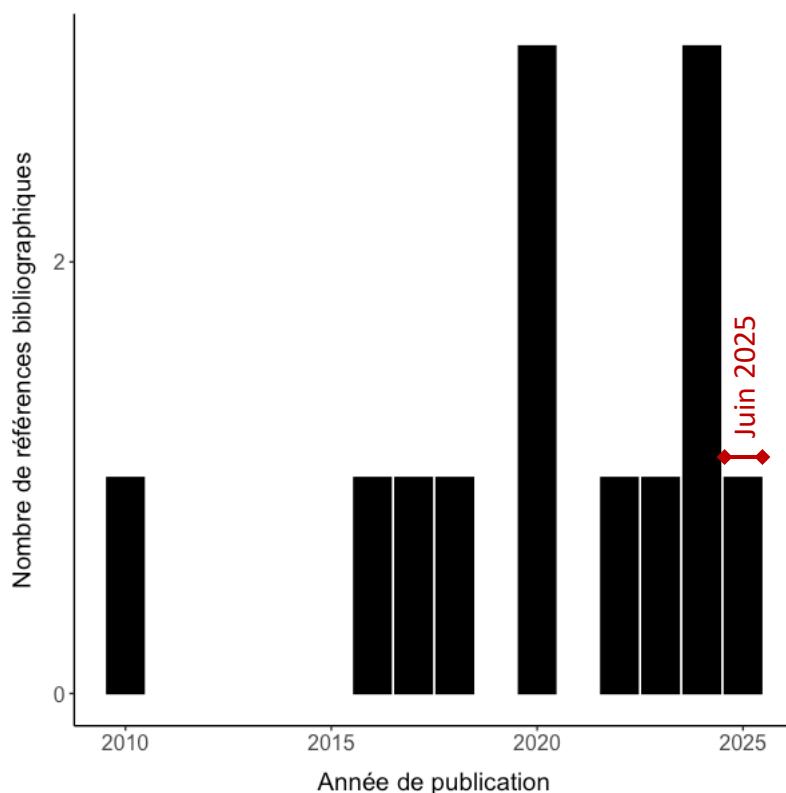


Figure 5. Nombre de références bibliographiques sélectionnées par année de publication. La recherche a été conduite mi-juin 2025.

Distribution géographique

On observe une couverture géographique clairsemée et très inégale (Figure 6). Les références se concentrent dans quelques pays, avec un contingent plus élevé aux États-Unis et un noyau en Europe occidentale et centrale (notamment Hongrie, Royaume-Uni, France, Italie). En Amérique du Sud, seules quelques occurrences isolées apparaissent (par ex. cône sud et zone andine). À l'inverse, de vastes régions restent absentes : Afrique, Moyen-Orient, Asie (y compris Chine/Inde), et Océanie. L'échelle (1 à 4 références) confirme un corpus encore restreint, dominé par quelques foyers nationaux.

Cette distribution suggère plusieurs biais structurants :

- Un biais climatique et d'implantation vers les contextes tempérés où le photovoltaïque au sol est historiquement bien développé ;
- Un biais de capacité de recherche et de financement (pays disposant de programmes de suivi et de publication) ;
- Un biais linguistique et d'accessibilité des données, qui défavorise des régions pourtant en plein essor solaire (MENA, Asie du Sud et de l'Est). Elle implique que la transférabilité des résultats reste limitée : les solutions testées ont été peu évaluées dans des biomes secs, méditerranéens ou tropicaux, pourtant cruciaux pour le déploiement mondial.

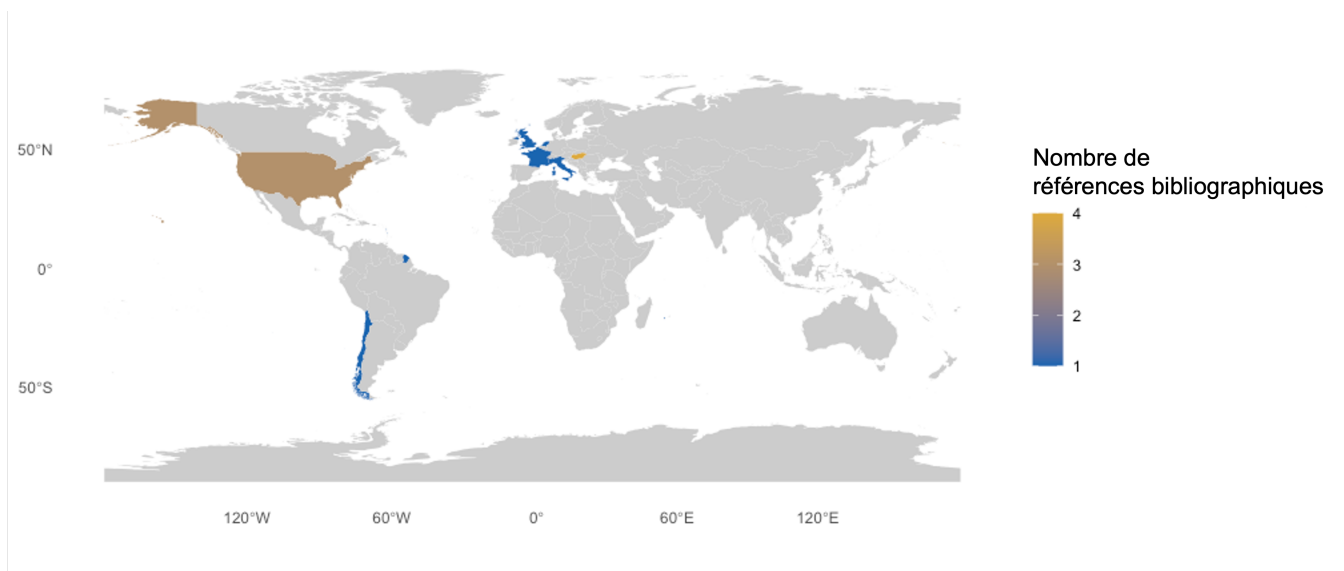


Figure 6. Distribution géographique des références bibliographiques.

Taxa étudiés

Au total, la base réunit 87 études de cas issues de 13 références bibliographiques. Les insectes dominent largement l'ensemble du corpus, avec 10 références (76,9 %) couvrant 72 études de cas (c'est-à-dire : un résultat unique associé à une solution d'atténuation unique sur une population unique, ex. une espèce ou un groupe d'espèces) (82,8 %) (Figure 7 - haut). Ils devancent de loin les oiseaux, représentés par 2 références (15,4 %) pour 8 études (9,2 %), ainsi que les chauves-souris, avec 1 seule référence (7,7 %) regroupant 7 études (8,0 %). En revanche, aucun travail n'a été recensé pour les petits mammifères, les grands mammifères, les reptiles et les batraciens. Cette distribution a des conséquences pratiques : les preuves disponibles renseignent surtout sur l'efficacité de mesures favorables aux communautés d'insectes, tandis que l'on manque d'éléments probants pour des groupes à forts enjeux de conservation — petits et grands mammifères, reptiles, amphibiens — pourtant susceptibles d'être affectés par la perméabilité des clôtures, la fragmentation ou la disponibilité de micro-habitats.

Au sein des insectes, la distribution des travaux est très inégale (Figure 7 - bas). Près de la moitié des études concerne les espèces polarotactiques liées aux milieux aquatiques, avec 34 études (47,2 %) incluses dans 4 références bibliographiques, ce qui reflète la problématique des panneaux comme « pièges » à lumière polarisée. Viennent ensuite des suivis plus larges d'arthropodes terrestres, 22 études (30,6 %) incluses dans 3 références bibliographiques, puis des catégories à résolution grossière, les espèces volantes non précisées (10 études, 13,9 %, 2 articles). Les pollinisateurs — pourtant centraux pour les services écosystémiques — restent nettement sous-représentés, avec seulement 6 études (8,3 %) incluses dans 2 références bibliographiques.

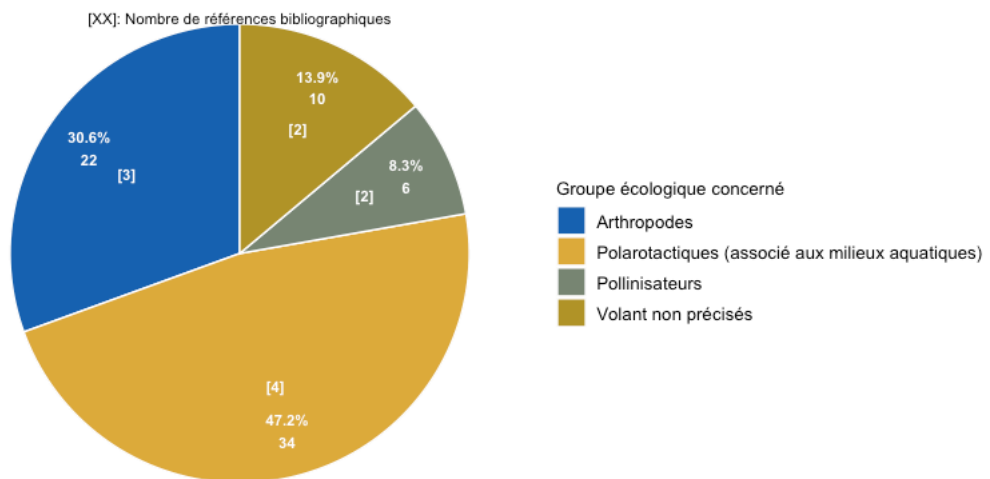
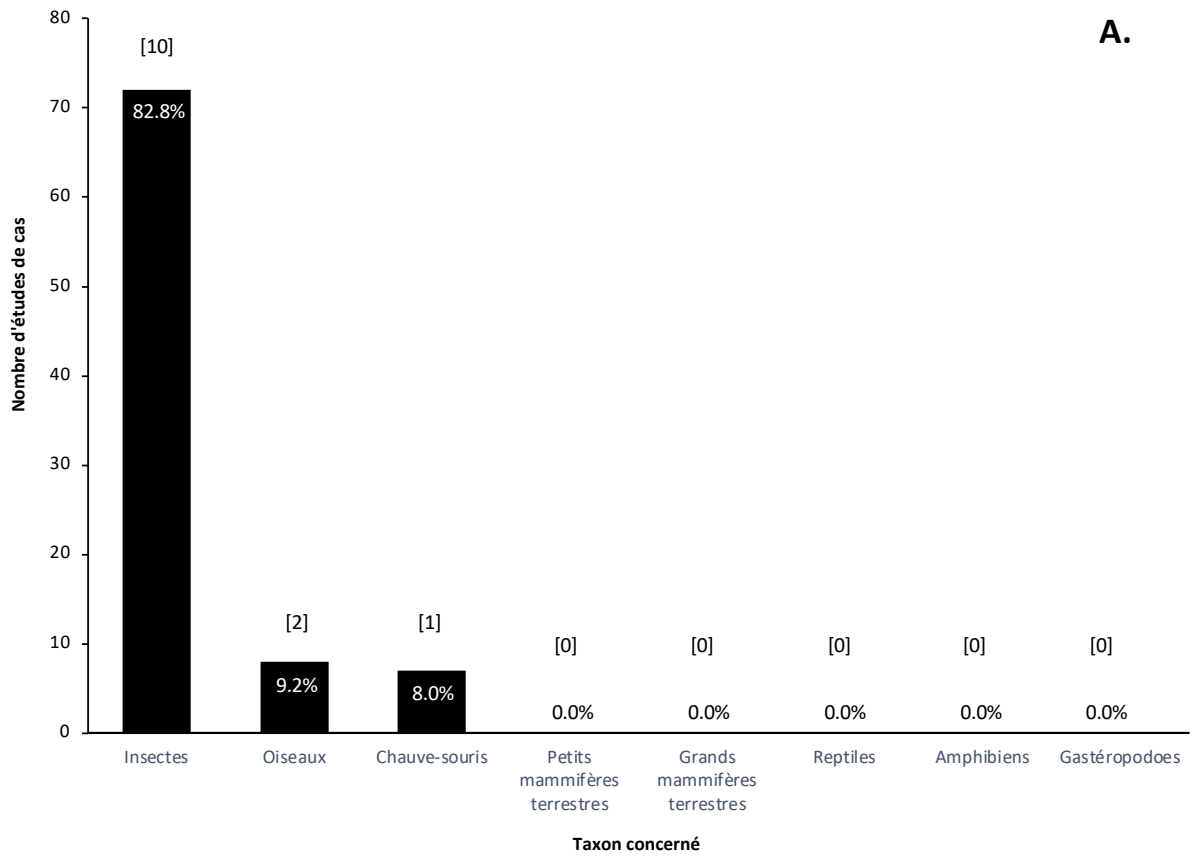


Figure 7. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques (entre crochets []) selon le taxon étudié (A) et le groupe écologique concerné chez les insectes (B).

Types de mesures d'atténuation étudiées

La figure 8 met en évidence une forte concentration des essais sur quelques couples taxon × type de mesure (Figure 8 - A.). Chez les insectes, deux axes dominant très nettement : les traitements surfaciques des panneaux visant à réduire l'effet « lac/miroir » (34 études de cas incluses dans 4 références bibliographiques) et les mesures d'amélioration de l'habitat/en faveur de la biodiversité (31 études de cas incluses dans 4 références bibliographiques). Les autres leviers apparaissent marginaux : gestion de la végétation – pâturage (6 études de cas incluses dans 1 unique référence bibliographique) et modification de la conception des infrastructures (1 étude de cas incluse dans 1 références bibliographique). Les oiseaux totalisent 8 études de cas (2 références bibliographiques), réparties entre des mesures d'amélioration de l'habitat (6 études de cas incluses dans 1 unique référence bibliographique) et une dissuasion acoustique encore très peu documentée (2 études de cas incluses dans 1 références bibliographique). Les chauves-souris ne sont représentées que par 7 études de cas (1 seule référence bibliographique), liées aux traitements surfaciques des panneaux. Ce profil traduit un double biais :

- thématique, avec une focalisation sur les solutions «panneaux» (cohérente avec la problématique de polarotaxie²) et sur les mesures d'amélioration de l'habitat / en faveur de la biodiversité;
- taxonomique, au profit des invertébrés.

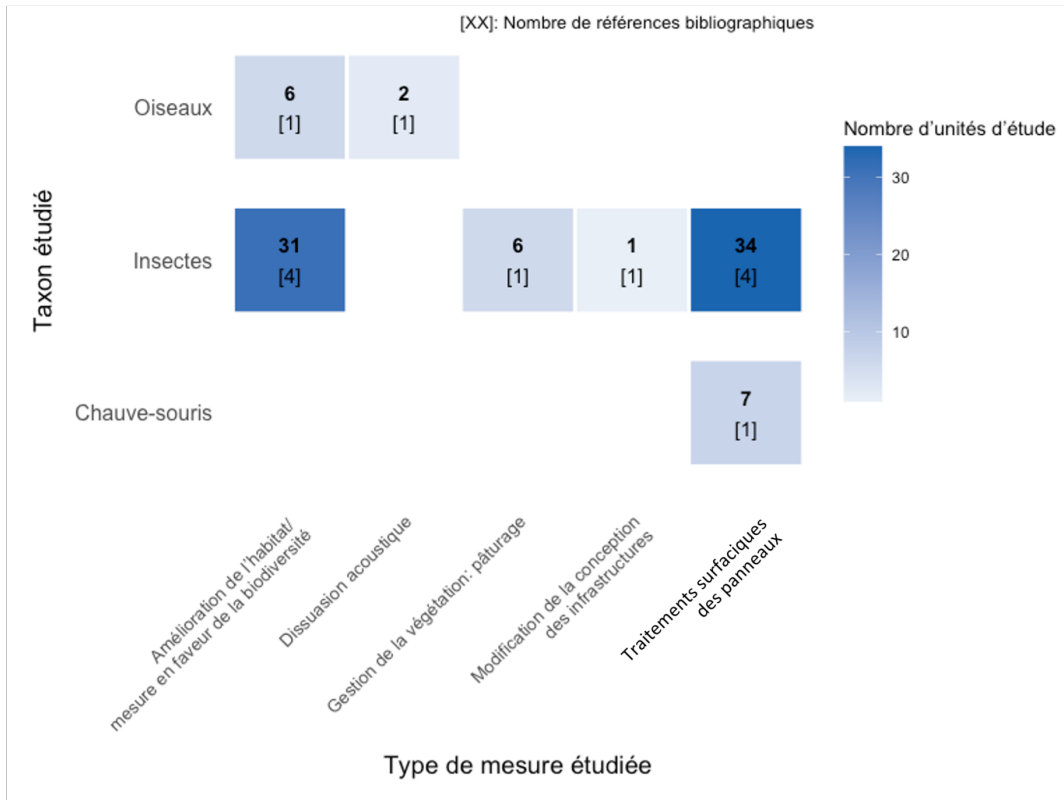
De nombreuses combinaisons restent vides, et de nombreux leviers sont quasi, voire complètement, inexplorés (conception des infrastructures : 1 référence seulement ; aussi, voir encadré « *Synthèse des mesures d'atténuation issues des guides ADEME (2023) et LPO (Marx, 2022)* » de la section « *Discussion et Perspectives* » pour un panorama des mesures d'atténuation possibles).

Si l'on se concentre sur les insectes, la matrice met en évidence une forte spécialisation des essais selon le couple groupe écologique × type de mesure (Figure 8 - B.). D'un côté, les espèces polarotactiques³ associées aux milieux aquatiques sont exclusivement étudiées via les traitements surfaciques des panneaux destinées à réduire l'effet « lac/miroir » : 34 études de cas (≈47,2 %) incluses dans 4 références bibliographiques. De l'autre, les interventions d'amélioration de l'habitat / mesures en faveur de la biodiversité se répartissent entre arthropodes (15 études de cas pour 1 référence bibliographique), espèces volantes non précisées (10 études de cas pour 2 références bibliographiques) et pollinisateurs (6 études de cas pour 2 références bibliographiques), soit 31 unités (≈43,1 %) au total. Les leviers de gestion de la végétation au travers du pâturage restent ponctuels (6 études de cas pour 1 référence bibliographique, uniquement chez les arthropodes) et la modification de la conception des infrastructures est anecdotique (1 étude de cas).

² La **polarotaxie** est un comportement d'orientation d'un animal qui se dirige en réponse à la lumière polarisée, par exemple en suivant la lumière polarisée horizontalement réfléchiée par l'eau.

³ Une **espèce polarotactique** est une espèce dont les individus s'orientent en étant attirés par la lumière polarisée (notamment la lumière polarisée horizontalement réfléchiée par des surfaces comme l'eau ou certains matériaux artificiels).

A.



B.

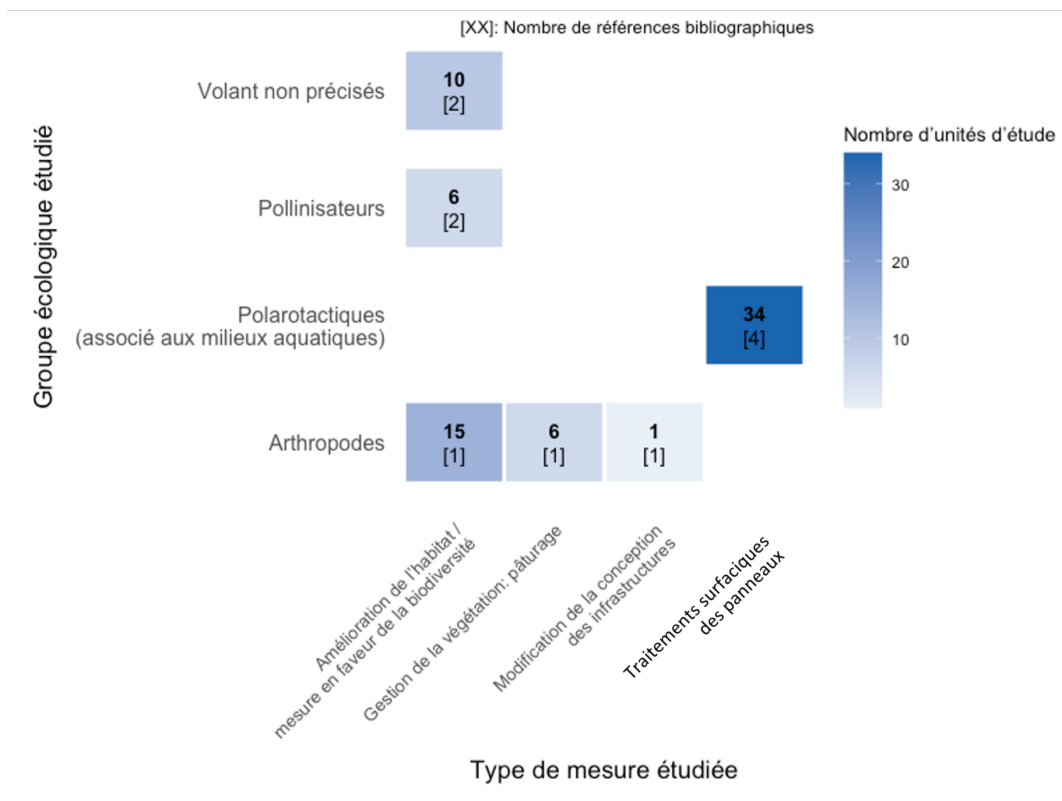


Figure 8. Carte « thermique » du nombre d'études (et nombre d'articles entre crochets []) de cas par type de mesure d'atténuation étudiée et par : taxon étudié (en haut) et groupe écologique étudié au sein des insectes (en bas). Le nombre de références bibliographiques correspondant est présenté entre crochets.

Localisation de l'intervention : in situ vs ex situ

La figure suggère un équilibre numérique entre dispositifs in situ et ex situ, plutôt qu'un « équilibre quasi parfait » au sens strict (Figure 9). En effet, les études menées sur sites représentent 46 études de cas (52,9 %) incluses dans 8 références bibliographiques, tandis que les protocoles ex situ comptent 41 études de cas (47,1 %) incluses dans 5 références bibliographiques. Autrement dit, le volume d'études de cas est proche, mais la diversité des sources ne l'est pas : l'ex situ est concentré dans un plus petit nombre d'articles qui génèrent de multiples cas, alors que l'in situ s'appuie sur davantage de références, donc sur une variété légèrement plus large de contextes.

À noter que les 5 références ex situ portent spécifiquement sur le test de différents traitements surfaciques des panneaux photovoltaïques pour atténuer l'effet lac/miroir lié à la polarisation, en évaluant la réponse d'insectes et, plus marginalement, de chauves-souris. Cette concentration est utile pour affiner les mécanismes et comparer finement des variantes techniques, mais elle réduit la diversité contextuelle et peut introduire des dépendances entre cas issus d'un même programme expérimental. À l'inverse, les études in situ offrent un réalisme opérationnel et une transférabilité potentiellement plus large, au prix d'un contrôle moindre des facteurs confondants.

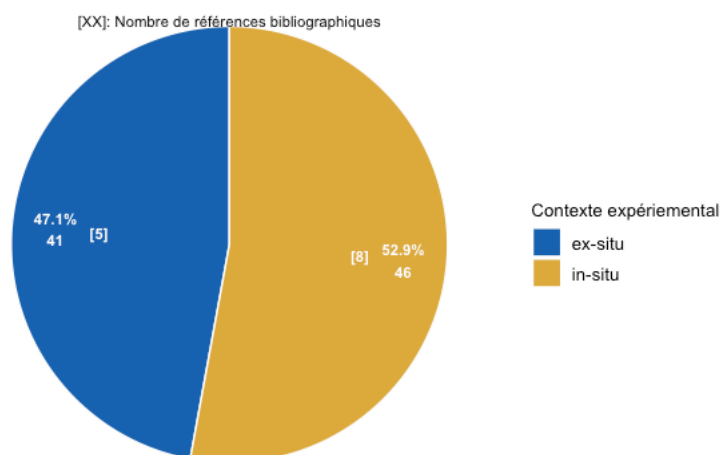


Figure 9. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques sélectionnées (entre crochets) par contexte expérimental, i.e. in situ vs ex situ (en contexte de parcs photovoltaïque vs hors parc photovoltaïque).

SYNTHÈSE NARRATIVE

La synthèse qui suit propose une lecture qualitative et structurée des 13 références retenues, en les regroupant par grands types de mesures d'atténuation. L'objectif n'est pas de conduire une méta-analyse formelle, rendue impossible par le faible nombre d'études, la diversité des protocoles et l'hétérogénéité des indicateurs, mais de dégager les principaux enseignements disponibles pour chaque catégorie de mesures.

Pour chaque type de levier (amélioration de l'habitat, gestion de la végétation par pâturage, modification de la conception des infrastructures, adaptation de la surface des panneaux, dissuasion acoustique), les études sont présentées de manière synthétique, puis accompagnées d'un court encadré « Ce qu'il faut retenir... » mettant en avant les résultats clés, les co-bénéfices éventuels et les principales limites. Cette approche vise à offrir une vision concrète et nuancée de ce que montrent, à ce stade, les travaux empiriques sur l'efficacité des mesures mises en œuvre dans les centrales

photovoltaïques au sol, en gardant à l'esprit que les données probantes restent encore parcellaires et fortement contextuelles.

Amélioration de l'habitat - mesure en faveur de la biodiversité

Dans les centrales photovoltaïques au sol, la création ou la restauration d'habitats consiste à transformer des surfaces initialement simplifiées, souvent en gazon ou issues de cultures, en milieux plus structurés et diversifiés. L'enjeu est de considérer le parc solaire comme une composante à part entière du paysage, capable d'abriter une flore et une faune variées, plutôt que comme une zone principalement technique. Concrètement, cela peut passer par l'implantation de prairies fleuries pour les pollinisateurs, la restauration de sols dégradés, le maintien de végétation plus haute ou de friches, ou encore l'ajout d'éléments comme des haies, bosquets ou petites zones humides.

Ces choix de gestion modifient la composition et le fonctionnement de plusieurs compartiments écologiques. Ils concernent les communautés végétales, les pollinisateurs et autres insectes, la faune du sol ainsi que les oiseaux nicheurs. Les cinq études disponibles montrent que les réponses observées dépendent fortement du contexte local, de l'usage antérieur des sols et du temps écoulé depuis la mise en place des aménagements.

Amélioration de l'habitat pour les pollinisateurs et autres insectes

- Martin, 2022 (risque de biais global faible) a comparé trois sites en Virginie, États-Unis : un parc solaire favorable aux pollinisateurs (« pollinator-friendly ») avec deux zones de gestion (sous panneaux et zone ouverte), un parc solaire en gazon tondu, et une prairie de référence non solaire. Très schématiquement, la gestion favorable aux pollinisateurs combinait ici un semis de plantes locales mellifères, une fauche très réduite et une lutte ciblée contre les invasives. Insectes et végétation ont été échantillonnés durant la saison de croissance en 2021. Les inventaires montraient que la richesse en insectes et la diversité des groupes écologiques étaient proches de celles de prairies naturelles voisines. À l'inverse, les sites en gazon court présentaient une plus faible diversité, avec une forte dominance de moustiques et d'autres espèces hématophages. Les analyses microclimatiques suggéraient que la végétation herbacée diversifiée abaissait légèrement la température des panneaux, d'environ 1 à 2 °C lors des périodes de fort ensoleillement. Le modèle associé indiquait un gain potentiel de production de l'ordre de 0,5 % à l'année, jusqu'à 1 % en été. L'étude a conclu que des aménagements favorables aux pollinisateurs pourraient bénéficier également à la performance technique, tout en rappelant l'absence de suivi long terme.
- Walston *et al.*, 2024 (risque de biais global faible) ont suivi pendant cinq ans (2018-2022) deux centrales solaires du Minnesota, États-Unis, converties à partir de cultures annuelles en habitats prairiaux riches en plantes mellifères. Les auteurs ont suivi la végétation et les insectes sur des transects permanents durant tous les étés. La richesse spécifique des plantes en fleurs a été multipliée par sept entre le début et la fin de l'étude. Dans le même temps, l'abondance des pollinisateurs et des insectes bénéfiques a été multipliée par trois. L'abondance des abeilles sauvages a augmenté de plus de vingt fois, avec plus de 80 % des observations après la deuxième année. Dans les champs de soja voisins, les visites des abeilles sur les fleurs était environ deux fois plus élevée en bordure de parc solaire qu'au bord de routes, et 2,5 fois plus élevée qu'au sein des parcelles. Les auteurs ont souligné toutefois que l'effet sur la pollinisation des cultures restait modeste à l'échelle du paysage agricole, et que les résultats concernaient des parcelles pilotes intensément restaurées.
- Biesmeijer *et al.*, 2020 (risque de biais global moyen) ont décrit le fonctionnement d'un grand parc solaire installé sur une friche industrielle abandonnée depuis 2 ans à Moerdijk, aux Pays-Bas. Le parc a permis de tester cinq mélanges de graines variés, plus un témoin sans mélange. Chaque mélange contenait six espèces végétales, sauf un qui ne comprenait que des graminées. Les suivis réalisés entre avril et août 2019 ont permis de recenser notamment les

abeilles et les syrphes et de réaliser des relevés botaniques. Le résultat principal a montré une absence de différence significative entre les différents mélanges de graines sur l'abondance des pollinisateurs. Néanmoins, les auteurs indiquent que : « Cela pourrait être dû au fait que les espèces végétales issues des mélanges de semences ont eu un démarrage tardif et n'ont représenté, au cours de leur première année, qu'une faible proportion de la végétation totale. Il n'a donc pas été possible, cette année, de déterminer quel mélange de semences était le plus favorable aux pollinisateurs et à l'entretien, en raison du semis tardif, de la faible proportion des plantes issues des mélanges et du faible niveau d'entretien qui en a découlé. »

Restauration des sols et biote souterrain

- Lambert *et al.*, 2024 (risque de biais global très faible) ont étudié un parc solaire implanté sur d'anciennes vignes en Occitanie, France. Un dispositif expérimental croisant quatre traitements de restauration des sols et la présence ou non de panneaux avait été mis en place en 2016. Les traitements testés étaient l'absence de restauration, l'apport de vermicompost, un semis simple de *Brachypodium retusum* (une plante herbacée) et un transfert de matériel végétal contenant des graines d'une communauté végétale proche du site expérimental. Quatre ans après l'installation, le vermicompost avait augmenté les teneurs totales en carbone et en azote, qui restaient toutefois inférieures à celles d'un site de référence non cultivé. Le semis simple et surtout le transfert de végétation avaient augmenté l'abondance de la mésofaune du sol, en particulier les collemboles et les acariens prédateurs, jusqu'à des niveaux proches de la référence. Les panneaux modifiaient la température, l'humidité, l'activité microbienne et les réseaux trophiques. Ils avaient tendance à réduire l'abondance de décomposeurs et de prédateurs. Sous panneaux, les prédateurs étaient environ 25 % moins abondants, les collemboles 50 % moins abondants et l'abondance totale des décomposeurs et de la mésofaune était divisée par deux, sans changer l'ordre de performance relatif des traitements de restauration. Selon les auteurs, des pratiques actives de restauration permettrait une convergence partielle vers l'état de référence malgré les effets microclimatiques des panneaux.

Oiseaux nicheurs et gestion des habitats

- Copping *et al.*, 2025 (risque de biais global faible) ont comparé les communautés d'oiseaux nicheurs sur six parcs solaires et des parcelles de grandes cultures voisines dans les Fens, en Angleterre. Les parcs avaient été classés en deux types de gestion. Le premier type correspondait à une gestion simple, avec herbe rase, peu de fleurs et absence d'éléments ligneux. Le second type correspondait à une gestion mixte, avec herbe plus haute, flore plus variée et haies ou arbres en bordure. Les relevés standardisés au printemps 2023 montraient que l'abondance prédite de l'ensemble des oiseaux était environ deux fois plus élevée dans les parcs en gestion mixte que dans ceux en gestion simple. Pour les espèces de milieux agricoles, l'abondance prédite était aussi multipliée par deux. Pour les espèces de milieux boisés, elle était environ douze fois plus élevée en gestion mixte. La richesse spécifique totale était environ 2,5 fois plus élevée dans les parcs en gestion mixte. Pour les espèces agricoles, la richesse spécifique était trois fois plus élevée et, pour les espèces des milieux boisés, environ neuf fois plus élevée. Ces gains d'abondance et de richesse concernaient aussi les espèces d'intérêt de conservation classées en liste rouge ou orange. Ainsi, les parcs solaires pourraient enrichir les communautés d'oiseaux dans les paysages céréaliers, à condition d'intégrer des habitats variés et une gestion peu intensive.

Ce qu'il faut retenir...

Les travaux regroupés dans cette catégorie montrent qu'une **amélioration ciblée de l'habitat** dans les centrales photovoltaïques au sol pourrait augmenter la richesse et l'abondance des pollinisateurs, des insectes bénéfiques, des organismes du sol et des oiseaux nicheurs. La conversion de cultures ou de gazons en prairies fleuries et en habitats structurés s'accompagnerait de forts gains de diversité végétale et d'augmentations marquées des pollinisateurs, parfois avec des bénéfices indirects pour les cultures voisines. La restauration des sols par apports organiques et transferts de végétation favoriserait aussi la mésofaune et la fonction de décomposition, même sous l'influence microclimatique des panneaux. Enfin, la présence de mosaïques d'habitats et d'éléments ligneux dans les parcs solaires renforcerait l'abondance et la diversité des oiseaux par rapport aux seules grandes cultures. Ces études restent toutefois peu nombreuses, souvent limitées à quelques sites et à des suivis de courte durée, ce qui appelle des évaluations plus longues et plus diversifiées avant de généraliser ces mesures d'amélioration de l'habitat dans la conception et la gestion des parcs photovoltaïques au sol.

Gestion de la végétation : pâturage

La gestion de la végétation par pâturage dans les centrales photovoltaïques au sol peut être une alternative aux pratiques d'entretien purement mécaniques (fauche, broyage), avec l'idée de limiter les intrants, réduire le dérangement et potentiellement favoriser certains compartiments de biodiversité, notamment la faune du sol. Les effets réels de ces pratiques restent toutefois peu documentés pour les centrales photovoltaïques au sol. Dans notre corpus bibliographique, un seul article a comparé de manière détaillée des parcs gérés par fauche mécanique ou par pâturage dans des centrales photovoltaïques au sol, en s'intéressant à la fois aux propriétés du sol et à la communauté d'arthropodes édaphiques⁴.

- Menta *et al.*, 2023 (risque de biais global très faible) ont étudié deux centrales photovoltaïques au sol dans le nord de l'Italie, en Lombardie et Émilie-Romagne, l'une gérée par fauche mécanique, l'autre par pâturage (moutons et ânes). Dans chaque parc, trois types de microhabitats ont été échantillonnés : sous les panneaux, entre les rangées de panneaux et en zone témoin extérieure gérée de la même façon que le parc adjacent. Deux campagnes de prélèvements ont été réalisées, en juin et octobre 2021. Pour chaque échantillon, les auteurs ont mesuré le pH, la teneur en matière organique du sol, la communauté d'arthropodes identifiée au niveau ordre et taxon, et l'indice de qualité biologique du sol. Les résultats révélaient que les conditions microclimatiques générées par les panneaux (ombrage, humidité) influençaient la composition faunique et les propriétés du sol. La zone située entre les panneaux présentait une diversité et une abondance en arthropodes proches de celles observées dans les zones témoins, tandis que les zones situées directement sous les panneaux montraient une biodiversité réduite, notamment sur le site géré par fauche mécanique. Le pâturage avait enrichi le sol en matière organique, particulièrement en zone témoin, mais avait aussi généré une forte hétérogénéité sous les panneaux, probablement à cause du piétinement. L'abondance de certains groupes, tels que les Acarina et les Collembola, était fortement liée à la teneur en matière organique. Des différences saisonnières avaient aussi été observées, avec une plus grande abondance d'Hyménoptères et d'Hémiptères au printemps. Les auteurs ont conclu que la conception des parcs et leur mode de gestion influençaient fortement leur capacité à soutenir la biodiversité du sol. Les espaces inter-rangées, s'ils étaient bien gérés, pouvaient jouer un rôle de refuge pour la faune édaphique. L'étude souligne l'importance d'intégrer des critères écologiques dans l'aménagement et l'entretien des

⁴ Les **arthropodes édaphiques** sont des arthropodes vivant principalement dans le sol (litière, humus, interstices), tels que collemboles, acariens, cloportes ou certains insectes, contribuant à la décomposition organique et à la structuration du sol.

installations photovoltaïques au sol afin de concilier production d'énergie et conservation de la biodiversité.

Ce qu'il faut retenir...

Cette étude suggère que la gestion de la végétation par pâturage dans les centrales photovoltaïques pourrait, à l'échelle du parc, augmenter la matière organique du sol et favoriser l'abondance et la qualité biologique des communautés d'arthropodes, mais que ces effets positifs pourraient être contrebalancés localement sous les panneaux lorsque les animaux y stationnent et compactent le sol. Dans les deux types de gestion, les zones inter-rang pourraient jouer un rôle de hotspot de biodiversité du sol au sein des parcs photovoltaïques. En tant qu'unique étude disponible sur la gestion par pâturage, ce travail apporte un premier éclairage opérationnel, mais reste limité par le faible nombre de sites, l'absence de gradients de charge animale et la courte durée de suivi, ce qui appelle des recherches complémentaires avant de généraliser ces résultats.

Modification de la conception des infrastructures

La modification de la conception et de l'agencement des centrales photovoltaïques au sol (type de montage, espacement entre les rangées, technologie fixe vs suivi du soleil) peut influencer fortement les conditions microclimatiques locales et, par ricochet, les communautés d'invertébrés du sol. Ces paramètres de conception pourraient agir comme des leviers potentiels pour limiter les impacts sur la biodiversité ou, à l'inverse, comme des facteurs pouvant accentuer les perturbations dans des milieux déjà fragiles. Notre revue de la littérature n'a détecté qu'une seule étude abordant les effets de centrales photovoltaïques au sol en lien avec ces aspects de conception, offrant un premier éclairage sur cette catégorie de mesures d'atténuation.

- Suuronen *et al.*, 2017 (risque de biais global faible) ont étudié deux centrales photovoltaïques au sol situées dans le désert d'Atacama, au nord du Chili : une petite centrale à structures fixes orientées vers le nord, construite sur d'anciennes terres agricoles, et une grande centrale à suivi solaire, panneaux sur suiveur est-ouest. Dans chaque centrale, les auteurs ont défini trois types de micro-habitats : Soleil (entre les rangées de panneaux, zones en plein soleil aux heures chaudes), Ombre (sous les panneaux) et Reference (zone témoin en dehors du parc). Le microclimat (température, humidité, point de rosée) a été suivi près du sol, et les arthropodes ont été échantillonnés par pièges-fosses. Les structures fixes serrées ont accentué les extrêmes thermiques en Soleil (températures très élevées et faible humidité), tandis que les zones Ombre étaient plus fraîches et plus humides, jouant un rôle de micro-refuges. Dans la centrale à suivi solaire, plus espacée, les contrastes microclimatiques entre Soleil, Ombre et Reference étaient moins marqués. La richesse et la composition des communautés d'arthropodes variaient selon les micro-habitats, avec une diversité souvent plus élevée et une faune distincte sous les panneaux dans la centrale à structures fixes. Ceci pourrait être attribué à un effet de refuge ou à des microclimats plus favorables. Enfin, les auteurs soulignent que, dans des environnements désertiques, les installations photovoltaïques pourraient jouer un rôle d'îlot de fraîcheur et favoriser localement la biodiversité. Toutefois, ces effets pourraient aussi modifier les dynamiques écologiques régionales, ce qui justifie une planification prudente de l'implantation des centrales sur de grandes surfaces et un suivi à long terme. Ils proposent plusieurs recommandations de conception, notamment l'augmentation de l'espacement entre rangées pour limiter les extrêmes thermiques, la prise en compte du type de sol et la minimisation des perturbations lors de la construction.

Ce qu'il faut retenir...

Cette étude montre que la **conception des centrales photovoltaïques au sol** (fixe vs suivi solaire, densité des rangées, taille de l'emprise) influence à la fois le microclimat au niveau du sol et la composition des communautés d'arthropodes. Les montages fixes serrés peuvent créer des conditions très chaudes et sèches entre les rangées, tout en offrant des micro-refuges plus frais et humides sous les panneaux, alors que des installations à suivi solaire plus espacées semblent générer des gradients microclimatiques moins marqués. Ces résultats suggèrent que des choix de conception (espacement, orientation, type de structure, prise en compte du sol) pourraient être utilisés comme leviers d'atténuation pour limiter les impacts sur la faune du sol dans les environnements désertiques. Toutefois, il s'agit d'un travail préliminaire basé sur deux sites non directement comparables et sur un suivi de courte durée, ce qui appelle des études complémentaires (multi-sites, long terme) avant de généraliser ces recommandations.

Traitements surfaciques des panneaux visant à réduire l'effet « lac/miroir »

La surface des panneaux photovoltaïques (texture, motifs de surface, revêtement, capacité à réfléchir ou polariser la lumière) influence fortement leur interaction avec la faune. Certaines surfaces lisses, sombres et brillantes peuvent agir comme des pièges sensoriels, en imitant les signaux visuels ou acoustiques de milieux naturels, notamment les plans d'eau (« effet miroir » ou « effet lac »). Ce phénomène affecte principalement les insectes aquatiques dits polarotactiques tels que les éphéméroptères, trichoptères et coléoptères aquatiques qui utilisent la polarisation horizontale de la lumière pour localiser les sites de ponte. Trompés, ils peuvent pondre sur les panneaux, entraînant des échecs reproductifs. De manière similaire, certaines chauves-souris peuvent interpréter les panneaux lisses comme des points d'eau, entraînant des tentatives avortées d'abreuvement et une perte d'énergie et de temps, voire des collisions. D'autres groupes faunistiques pourraient également être affectés : des oiseaux aquatiques ont été observés tentant de se poser sur des panneaux confondus avec de l'eau. Les cinq études regroupées ici examinent les solutions visant à réduire ces effets d'attraction impactant, en modifiant la structure optique ou mécanique des panneaux pour en diminuer l'attractivité tout en préservant leur efficacité énergétique.

Modifications optiques ciblant les insectes aquatiques

- Horváth *et al.*, 2010 (risque de biais global fort) ont étudié des panneaux photovoltaïques fortement polarisants et montré qu'ils pourraient agir comme de puissants pièges écologiques pour plusieurs groupes d'insectes aquatiques (éphéméroptères, trichoptères, dolichopodidés, tabanidés). En condition ex-situ, les panneaux orientés horizontalement présentaient des degrés de polarisation proches de 100 %, supérieurs à ceux de l'eau, et attiraient plus de comportements de reproduction et d'oviposition que les surfaces de référence. L'ajout de bordures et de grilles blanches non polarisantes a cependant réduit drastiquement cette attractivité : les panneaux « fragmentés » étaient 10 à 26 fois moins attractifs que les mêmes panneaux sans grille, pour une perte de surface active limitée (~1,8 % de surface noire en moins). Ainsi, un simple motif blanc non polarisant, intégré au dessin des modules, pourrait fortement atténuer la pollution lumineuse polarisée tout en maintenant une baisse modérée de production.
- Black & Robertson, 2020 (risque de biais global faible) ont affiné ce concept en testant expérimentalement, sur des panneaux simulés, l'effet de la largeur et de la densité des lignes blanches sur l'attraction de quatre groupes d'insectes (trichoptères, éphéméroptères, chironomidés, simulies). En comparant différents motifs de quadrillage à un témoin noir lisse, ils ont montré que l'ajout de lignes blanches de 1 à 5 mm de largeur a suffi à réduire de plus de 80 % les captures pour la plupart des taxons, avec seulement 2 à 3 % de surface active perdue, et que l'augmentation de la densité des lignes apportait relativement peu de gain

supplémentaire. Les courbes de compromis « perte de surface noire / réduction de captures » étaient proches de celles obtenues par Horváth et al. (2010), ce qui suggère que c'est surtout la proportion de surface non polarisante dans le champ visuel, plus que le motif exact, qui conditionne la diminution d'attractivité.

- Száz *et al.*, 2016 (risque de biais global moyen) ont évalué l'effet de verres antireflet mats (ARC) par rapport à des surfaces lisses « brillantes » mimant des panneaux standards, en combinant polarimétrie et tests de terrain avec des taons (Tabanidae), des éphémères (Ephemeroptera) et des chironomes (Chironomidae). Sous ciel dégagé, les panneaux brillants émettaient un signal de lumière horizontale polarisée depuis toutes les directions, alors que les panneaux mats n'étaient attractifs que lorsque le soleil était en face ou derrière l'observateur. En cohérence, les surfaces brillantes étaient 3,4 à 7,5 fois plus attractives pour les taons que les surfaces mates, alors que les chironomes ne montraient pas de différence nette. En revanche, sous un éclairage diffus, lorsque les panneaux sont à l'ombre ou par temps couvert, les éphémères ont montré une préférence pour les panneaux mats. Ces surfaces semblaient mieux imiter des eaux calmes, en raison d'une polarisation légèrement plus faible et d'un angle de polarisation plus constant. Selon les auteurs, les verres antireflet mats réduisaient effectivement la pollution lumineuse polarisée dans certaines conditions. C'était le cas notamment pour les taons, en plein soleil. En revanche, ces mêmes surfaces pouvaient renforcer l'attractivité pour d'autres groupes, comme les éphémères, en lumière diffuse. Ces résultats soulignent l'importance de combiner les revêtements mats à d'autres mesures complémentaires. Par exemple, l'ajout de grillages blancs ou l'éloignement des installations par rapport aux milieux aquatiques pourraient contribuer à limiter ces effets indésirables.
- Fritz *et al.*, 2020 (risque de biais global moyen) ont testé une approche biomimétique en évaluant des revêtements polymères microtexturés par copie de la surface des pétales de rose. Après avoir confirmé leurs bonnes performances optiques (faible réflectance, bon captage de lumière), les auteurs ont comparé en conditions de champ l'attractivité de trois surfaces pour un éphémère et des taons : un plastique noir lisse, un revêtement « pétale de rose » seul et un revêtement « pétale de rose » recouvert de verre. Chez les éphémères, le plastique lisse était de loin le plus attractif (89% des individus), la surface texturée recouverte de verre, et la surface texturée seule presque totalement non attractifs (respectivement 8% et 3%). Des comportements de ponte n'étaient observés que sur les surfaces lisses, plastique noir et surface texturée recouverte de verre. Chez les taons, la surface texturée seule ne déclenchait aucun atterrissage, et restait nettement moins attractive que les surfaces lisses de contrôle lorsque celles-ci étaient ajoutées (90%). Les analyses ont montré que la micro-texture réduisait la proportion et la régularité de la polarisation horizontale par rapport à une surface plane, tout en maintenant un bon rendement optique. Les auteurs ont proposé ainsi les couches « pétale de rose » comme solution de conception capable de limiter la pollution lumineuse polarisée sans perte notable d'efficacité photovoltaïque.

Modifications mécaniques/acoustiques ciblant les chauves-souris

- Abdul Rahman *et al.*, 2024 (risque de biais global moyen) ont analysé les effets de modifications mécaniques simples d'une surface lisse sur le comportement d'abreuvement des chauves-souris. Ils ont utilisé une plaque plastique noire horizontale posée à la surface d'un étang, analogue à un « plan d'eau artificiel », comme pourrait l'être un champ de panneaux. Ils ont comparé le comportement de plusieurs espèces de chauves-souris au-dessus : de l'eau libre, d'une plaque lisse, de la même plaque équipée de ficelles parallèles de diamètres variés (0,25 à 2,5 mm), et d'un motif croisé de ficelles. Le taux de tentatives de boisson au-dessus de la plaque diminuait de façon non linéaire lorsque le diamètre des ficelles augmentait : de 41,4 % sans ficelle à 17,1 % avec des ficelles de 2,5 mm, soit une réduction de près de 60 %. Un effet déjà significatif était observé dès 0,25 mm de diamètre. À diamètre égal (0,5 mm), un motif croisé réduisait davantage les tentatives (25,7 %) qu'un motif parallèle

(32,9 %), cohérent avec l'idée que les cordes renvoient plus facilement un écho vers la chauve-souris lorsqu'elles couvrent plusieurs directions. Les auteurs ont suggéré que des structures linéaires fines (fils, câbles) disposées en surface pourraient contribuer à désamorcer les pièges sensoriels que représentent certaines surfaces lisses pour les chauves-souris, y compris des panneaux photovoltaïques, mais cette piste resterait à tester spécifiquement dans un contexte solaire.

Ce qu'il faut retenir...

Les études regroupées sous la catégorie « surface des panneaux » montrent que des modifications relativement modestes de la surface des modules peuvent réduire très fortement leur attractivité pour la faune, en particulier pour les insectes aquatiques polarotactiques, et potentiellement pour les chauves-souris. Par exemple, l'ajout de grilles ou de bordures blanches non polarisantes permet de fragmenter le signal lumineux réfléchi, ce qui diminue l'attractivité de plusieurs groupes d'insectes d'un facteur supérieur à 10, avec une perte de surface active limitée, de l'ordre de 1 à 5 %. De leur côté, les verres mats antireflet atténuent la polarisation réfléchie et réduisent sensiblement l'attractivité pour les taons en plein soleil. Toutefois, leurs effets varient selon les espèces et les conditions : certains éphémères montrent même une préférence pour ces surfaces en lumière diffuse. Les revêtements microtexturés bio-inspirés, tels que ceux imitant la surface des pétales de rose, apparaissent également prometteurs pour concilier rendement énergétique et réduction de la pollution lumineuse polarisée, en rendant les panneaux presque invisibles pour certaines espèces sensibles. Chez les chauves-souris, l'ajout de fils ou cordes fines sur des surfaces lisses modifie la signature acoustique perçue par écholocation, ce qui peut réduire fortement les tentatives de boisson inappropriées. Ces adaptations structurelles simples pourraient donc être envisagées sur les installations exposées.

*Dans l'ensemble, ces travaux indiquent que la conception optique et mécanique des panneaux peut jouer un rôle dans les stratégies d'atténuation. Toutefois, ils reposent sur un nombre limité de sites, de taxons et de conditions expérimentales, concernent souvent de petites surfaces testées sur le court terme, et surtout, ont été réalisés **sur des panneaux photovoltaïques simulés, en dehors de parcs solaires et en l'absence de conditions réelles d'exploitation**. Il serait donc nécessaire de confirmer ces résultats par des études menées **en contexte opérationnel**, sur de véritables centrales photovoltaïques au sol.*

Dissuasion acoustique

La dissuasion acoustique représente une piste d'atténuation encore peu explorée dans le contexte du photovoltaïque au sol, où les interactions entre les installations et l'avifaune restent moins documentées que dans le secteur éolien. Le principe repose sur l'émission de signaux sonores perçus comme dérangeants ou menaçants, afin de réduire la présence ou le stationnement des oiseaux à proximité des infrastructures. À notre connaissance, une seule étude publiée s'est spécifiquement intéressée à l'évaluation d'un dispositif acoustique pour effaroucher les corvidés dans une centrale photovoltaïque. Notons néanmoins que cette étude a été conçue pour réduire les dommages matériels plutôt que l'impact écologique. Elle réduit potentiellement des impacts tels que des collisions ou des confusions, mais est susceptible de créer d'autres impacts comme des pertes d'habitats, de zones de chasses, ou d'accouplement. Elle a été conservée dans cette revue à titre illustratif.

- Itoh *et al.*, 2018 (risque de biais global fort) ont mené une étude expérimentale entre octobre et décembre 2017 dans une centrale photovoltaïque au Japon afin d'évaluer l'efficacité d'un système dissuasif acoustique contre les corvidés. L'étude s'est concentrée sur deux zones d'observation : une proche et une éloignée du dispositif sonore. L'équipement dissuasif, émettant des sons pendant la journée (6h–18h), était couplé à un système de caméras haute définition (30 images/s) capable de détecter automatiquement les trajectoires de vol sur une période d'un mois. L'expérimentation s'est déroulée sur trois périodes de 20 jours : avant,

pendant et après l'activation du dispositif sonore. Aucun corbeau ne s'est posé dans la zone équipée durant la phase sonore, contrairement aux périodes sans son (3 et 6 corbeaux observés respectivement). Le passage de corbeaux a également diminué de 3,8 à 2,3 corbeaux/jour, soit d'environ 45 %. Ainsi, le dispositif dissuasif semblait efficace pour réduire la fréquentation des corbeaux, tout en soulignant que la durée d'étude limitée et le faible nombre d'événements ne permettaient pas de démonstration statistique formelle.

Ce qu'il faut retenir...

*Bien que l'étude n'ait pas été spécifiquement conçue pour diminuer l'impact du photovoltaïque sur les oiseaux, ses résultats suggèrent que ce type de **dispositif d'effarouchement acoustique** pourrait être envisagé comme mesure d'atténuation potentielle, à confirmer par des études complémentaires et sur le long terme. Notons néanmoins que cette mesure d'atténuation induit elle-même des impacts en créant de larges zones non accueillantes pour la biodiversité. Il sera donc nécessaire d'évaluer les impacts de cette solution.*

DISCUSSION ET PERSPECTIVES : IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE ET LA PRISE DE DÉCISION

La présente synthèse visait à établir un état des connaissances sur l'efficacité des mesures mises en place pour limiter les impacts du photovoltaïque au sol sur la biodiversité animale. Le processus de revue a conduit à un corpus restreint de 13 références bibliographiques, représentant 87 études de cas. La recherche ayant été arrêtée mi-juin 2025, la revue reste incomplète pour cette année. En effet, nous avons depuis été informés de la parution de trois nouvelles publications qui auraient pu, a priori, entrer dans le corpus (Lec'Hvien, 2025; Szoldatits et al., 2025; Walston et al., 2025). Néanmoins, le respect strict du protocole ne nous a pas permis de les intégrer à l'analyse. Le périmètre retenu demeure néanmoins suffisamment structuré pour dégager des tendances sur les types de mesures testées, les taxa ciblés et la qualité méthodologique des études, tout en mettant en évidence les lacunes importantes qui subsistent pour accompagner le déploiement du photovoltaïque au sol dans une perspective de conservation de la biodiversité.

La dynamique temporelle des publications met en évidence un champ encore jeune. La première référence de notre corpus date de 2010, puis aucun travail n'a été recensé jusqu'en 2016. À partir de cette date, le nombre de références oscille entre 1 et 3 par an jusqu'en 2025, sans véritable augmentation nette ni changement d'échelle. Cela traduit moins une montée en puissance continue qu'une série de contributions ponctuelles, dispersées dans le temps. Cette trajectoire est à rapprocher de celle des études d'impact du photovoltaïque au sol, telles que synthétisées par Laffite et al. (2023), qui rapportent des premières publications dès 2005 et une accélération marquée à partir de 2015. Nos résultats suggèrent ainsi un décalage logique entre la caractérisation des impacts et l'évaluation des solutions : prise de conscience des enjeux, conception des mesures, mise en œuvre sur le terrain, puis suivi avant publication. Le temps nécessaire pour boucler ce cycle explique que les travaux sur l'efficacité des mesures arrivent plus tardivement et restent peu nombreux.

De plus, la couverture géographique était très inégale. Les références se concentraient surtout aux États-Unis, ainsi que dans plusieurs pays d'Europe occidentale et centrale. En Amérique du Sud, seules quelques occurrences isolées apparaissent. À l'inverse, aucune étude de notre corpus ne provient d'Afrique, du Moyen-Orient, d'Asie ou d'Océanie, alors que le photovoltaïque se développe dans des pays tels que, entre autres, l'Afrique du Sud, l'Égypte, les Émirats Arabes Unis, la Chine, l'Inde ou l'Australie. Cette répartition reflète plusieurs biais possibles. D'abord, un biais d'implantation et de climat : les études proviennent surtout de régions où le photovoltaïque au sol est historiquement bien développé, dans des contextes plus tempérés. Ensuite, un biais de capacité de recherche et de financement : les pays disposant de programmes de suivi et de recherche structurés sont surreprésentés. Enfin, un biais linguistique et d'accessibilité est probable, avec une sous-

représentation de la littérature publiée dans d'autres langues ou dans des supports moins accessibles. Ces biais limitent la transférabilité des résultats. Les mesures évaluées l'ont été presque exclusivement dans des paysages tempérés. Elles restent très peu testées dans les biomes arides, méditerranéens ou tropicaux, alors même que ces régions sont centrales pour le déploiement futur du photovoltaïque au sol. Les réponses écologiques y sont pourtant susceptibles de différer fortement, en raison de climats plus extrêmes, de régimes hydriques différents et de communautés d'espèces distinctes. Cette situation appelle plusieurs priorités. Il est nécessaire d'élargir les sites d'étude au-delà de l'Amérique du Nord et de l'Europe, et de documenter davantage les contextes arides et tropicaux. Il apparaît également important d'harmoniser les indicateurs et les protocoles pour pouvoir comparer l'efficacité des mesures entre régions. Enfin, des suivis partenariaux avec les développeurs et gestionnaires de parcs pourraient faciliter l'accès aux sites et la mise à disposition des données, en particulier dans les zones aujourd'hui sous-représentées. Il faut aussi garder en tête qu'une agrégation des résultats à l'échelle du pays masque souvent une forte hétérogénéité intra-pays et peut sous-représenter des dispositifs multi-sites.

Le corpus présente également un fort déséquilibre entre groupes taxonomiques. Les insectes dominent nettement : 10 références sur 13 leur sont consacrées plus de 80 % du total. Les oiseaux ne sont présents que dans 2 références et les chauves-souris ne sont représentées que par 1 référence. Aucun travail n'a été identifié pour les petits et grands mammifères terrestres, les reptiles, les amphibiens ou les gastéropodes. Ce biais taxonomique a des conséquences directes. Les résultats disponibles renseignent surtout l'efficacité de mesures favorables aux communautés d'insectes. À l'inverse, les éléments probants manquent pour des groupes à fort enjeu de conservation, comme les mammifères terrestres, les reptiles ou les amphibiens. Ces groupes sont pourtant concernés par des questions clés : perméabilité des clôtures, fragmentation interne des parcs, disponibilité de refuges et de micro-habitats, gestion des zones humides. Au sein des insectes, la répartition des efforts est elle-même très inégale. Près de la moitié des études concerne des espèces polarotactiques liées aux milieux aquatiques. Il s'agit de 34 études de cas centrées sur l'effet « lac/miroir » des surfaces lisses. Viennent ensuite les suivis d'arthropodes terrestres (22 études). Les pollinisateurs, pourtant centraux pour les services écosystémiques, restent sous-représentés (6 études). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce profil. Le suivi des invertébrés est souvent plus simple et standardisé : pièges au sol, pièges à bac jaune, protocoles déjà éprouvés en écologie des communautés. À l'inverse, l'étude des vertébrés demande des moyens plus lourds : suivi acoustique ou télémétrique, autorisations réglementaires, tailles d'échantillon plus importantes, suivis pluriannuels. Ces contraintes freinent probablement le déploiement d'études dédiées aux mammifères, reptiles ou amphibiens. Ces biais appellent des priorités de recherche claires. Il s'agit d'abord de rééquilibrer l'effort vers les taxa sous-étudiés. Il convient aussi de tester des interventions dédiées à ces groupes : clôtures perméables et passages, mosaïques d'habitats, refuges thermiques, gestion hydrique des zones humides. Enfin, il serait souhaitable de développer des protocoles robustes (designs de type BACI, suivis multi-annuels, indicateurs fonctionnels comme les visites de fleurs ou le succès de reproduction). Ces évolutions sont nécessaires pour mieux comparer l'efficacité des mesures entre taxa et pour renforcer la pertinence des recommandations de conservation.

Les types de mesures testées ne sont également pas répartis de façon homogène. La plupart des études se concentrent sur deux grands axes chez les insectes :

- les traitements surfaciques des panneaux visant à réduire l'effet « lac/miroir » lié à la polarisation ;
- les mesures d'amélioration de l'habitat/en faveur de la biodiversité.

Les autres leviers restent marginaux : une référence bibliographique pour le pâturage et la modification de la conception des infrastructures. Chez les vertébrés, la situation est encore plus critique. Les oiseaux sont représentés par deux références. L'une porte sur des mesures d'amélioration de l'habitat et compare des parcs gérés en « *simple habitat solar* » (herbe rase, gestion intensive, absence d'éléments ligneux) à des parcs « *mixed habitat solar* » (gestion moins fréquente, herbe plus haute, présence de fleurs sauvages et de haies ou arbres en bordure). L'autre porte sur une mesure de dissuasion acoustique, qui ne relève pas d'une mesure d'atténuation au sens ERC et présente des biais importants ainsi qu'une finalité non écologique. Les chauves-souris ne sont représentées que par une

référence, liée aux traitements surfaciques de panneaux. Aucun autre type de levier n'a été testé pour ce groupe dans le corpus.

En pratique, cela traduit un double biais. D'une part un biais thématique, au profit des solutions appliquées directement aux panneaux et des mesures d'habitat. D'autre part un biais taxonomique, au profit des invertébrés. Si l'on zoome sur les insectes, la spécialisation est nette. Les espèces polarotactiques associées aux milieux aquatiques sont étudiées uniquement via les traitements surfaciques de panneaux. À l'inverse, les interventions d'amélioration de l'habitat se répartissent entre arthropodes, espèces volantes non précisées et pollinisateurs. Les autres leviers (pâturage, conception des infrastructures) restent anecdotiques en nombre de cas. Deux enseignements se dégagent. Premièrement, chaque type de mesure est largement porté par un seul groupe (traitements surfaciques des panneaux ↔ polarotactiques ; habitat ↔ arthropodes/volants/pollinisateurs), ce qui laisse de nombreuses combinaisons inexplorées. Deuxièmement, la base de preuves repose sur peu de références dans chaque cas, ce qui traduit une littérature concentrée dans quelques programmes expérimentaux plutôt que dans une diversité de contextes indépendants. En pratique, ces résultats suggèrent de :

- poursuivre les validations in situ des solutions sur traitements surfaciques de panneaux, en élargissant les taxa étudiés (oiseaux, autres vertébrés) et les types de sites ;
- tester plus systématiquement des leviers d'habitat et de gestion de la végétation pour les vertébrés, y compris leurs effets saisonniers ;
- diversifier les options de conception des infrastructures ;
- renforcer la robustesse des designs (BACI, répliques, suivis pluriannuels) afin d'améliorer la comparabilité et la transférabilité des résultats entre mesures, taxa et contextes.

Les cinq références ex situ, réalisées hors contexte de parc photovoltaïque réel, portent spécifiquement sur le test de différentes surfaces de panneaux pour atténuer l'effet « lac/miroir » lié à la polarisation. Elles évaluent la réponse d'insectes, et plus marginalement de chauves-souris, dans des conditions contrôlées ou semi-contrôlées. Cette concentration est utile pour comparer finement des variantes techniques et explorer les mécanismes. Elle réduit toutefois la diversité des situations écologiques. À l'inverse, les études in situ offrent un réalisme opérationnel plus fort. Elles intègrent les contraintes de fonctionnement des parcs, les interactions avec la matrice paysagère, et les facteurs confondants difficiles à reproduire en conditions contrôlées. Elles couvrent différents types de mesures (habitat, gestion de la végétation, traitements surfaciques des panneaux, dissuasion), mais souvent avec des effectifs réduits et des contextes géographiques encore limités. Pour renforcer la robustesse des conclusions, il serait souhaitable de :

- multiplier les validations in situ des solutions testées ex situ ;
- élargir la base de références ex situ à d'autres équipes et contextes ;
- harmoniser les métriques entre cadres contrôlés et sites réels afin de comparer plus directement l'efficacité des mesures.

Ces premiers éléments dressent le portrait d'un champ encore jeune, géographiquement restreint, centré sur quelques taxa et quelques types de mesures seulement, avec des designs souvent hétérogènes. Ils montrent surtout que la base de preuves disponible ne couvre qu'une partie des leviers mobilisables en pratique. Or, de nombreux leviers sont déjà proposés dans les guides techniques et issus des retours d'expérience (ADEME, 2023; Marx, 2022; voir encadré ci-dessous), mais n'ont pas encore fait l'objet d'une évaluation scientifique formalisée de leur efficacité sur la biodiversité animale. Cela invite à examiner plus largement ces mesures existantes ou potentiellement possibles, même lorsqu'elles restent peu ou pas évaluées.

Synthèse des mesures d'atténuation issues des guides ADEME (2023) et LPO (Marx, 2022) :

En amont, plusieurs mesures relèvent de l'évitement. Il s'agit par exemple de privilégier des sites déjà artificialisés ou dégradés, et d'écartier les milieux à forts enjeux de conservation, les zones humides ou les corridors écologiques. Le choix fin du site et la comparaison de scénarios d'implantation sont susceptibles de réduire fortement les impacts, mais très peu d'études quantifient ces effets à partir de données biologiques.

Pour les projets effectivement implantés, de nombreuses mesures de réduction sont possibles. Le design du parc peut être modulé : densité de panneaux, hauteur minimale, espacement entre rangées, gestion des eaux de ruissellement. La gestion de la végétation peut être ajustée : fauche tardive ou extensive, pâturage extensif, limitation des herbicides, introduction ou maintien d'éléments semi-naturels (lisières, haies, bandes enherbées, surfaces minérales). La perméabilité des clôtures, via des ouvertures pour la petite faune ou des passages ciblés, est aussi un levier pour limiter la fragmentation interne. Ces options sont largement décrites comme bonnes pratiques, mais restent très peu testées de manière formelle sur la faune, en dehors de quelques cas centrés sur les arthropodes. D'autres mesures visent des impacts plus spécifiques. Des ajustements des propriétés optiques des panneaux (revêtements, textures, marquages) sont proposés pour limiter l'attraction des espèces polarotactiques. Des aménagements particuliers peuvent être envisagés pour maintenir ou restaurer des zones humides adjacentes, ou pour créer des refuges thermiques et des micro-habitats. Là encore, la plupart de ces pistes sont documentées sous forme de recommandations, mais rarement accompagnées d'évaluations robustes avant/après ou avec témoins.

Les mesures de compensation restent encore plus difficiles à évaluer. Par exemple, la création ou l'« ouverture » de milieux en périphérie des parcs, par débroussaillage ou défrichage, est parfois présentée comme une réponse aux pertes d'habitats. Toutefois, ces actions peuvent elles-mêmes réduire la complexité structurale des milieux, la séquestration de carbone et certaines fonctions écologiques. Les données manquent pour juger de leur capacité réelle à compenser les impacts sur la biodiversité, et sur les services écosystémiques associés.

Enfin, plusieurs outils de suivi écologique existent déjà ou sont en cours de structuration. Des protocoles de type BACI⁵, des indices synthétiques de qualité écologique et des boîtes à outils multi-taxons ont été développés pour suivre la flore, certains groupes d'invertébrés et l'évolution des habitats. Leur usage reste cependant inégal, et les résultats sont encore peu mutualisés.

Dans ce contexte, un enjeu central est de réduire le décalage entre la richesse des mesures proposées et le faible nombre de celles dont l'efficacité a réellement été évaluée. Il s'agit de faire évoluer les bonnes pratiques vers de véritables hypothèses testables, intégrées aux plans de suivi des projets. Des partenariats plus étroits entre développeurs, bureaux d'études et équipes de recherche pourraient permettre de co-concevoir des mesures, de les documenter avec des designs robustes, et de partager les données produites. C'est à ce prix que les recommandations de gestion pourront gagner en solidité et en transférabilité, et accompagner de manière crédible le développement du photovoltaïque au sol.

Cette revue met en évidence un état des connaissances encore émergent sur l'efficacité des mesures d'atténuation des impacts du photovoltaïque au sol sur la biodiversité. Le corpus analysé demeure limité en nombre de références et fortement hétérogène, tant du point de vue des contextes étudiés que des groupes taxonomiques, des types de mesures et des indicateurs mobilisés. Cette hétérogénéité complique les comparaisons directes entre études et ne permet pas, à ce stade, de conduire une méta-analyse quantitative robuste.

⁵ Un **dispositif de type BACI (Before-After-Control-Impact)** est un protocole expérimental en écologie conçu pour détecter les impacts d'une perturbation ou d'une mesure de gestion. Il compare les conditions avant (« Before ») et après (« After ») l'intervention sur une zone impactée (« Impact ») et des sites témoins contrôlés (« Control »), permettant d'isoler les effets spécifiques de l'action par rapport aux variations naturelles.

L'évaluation du risque de biais repose sur un nombre volontairement restreint de critères, choisis pour rester opérationnels dans le cadre d'une revue rapide. Le score global obtenu doit ainsi être interprété comme un outil de comparaison relative entre études, et non comme une évaluation exhaustive de leur qualité méthodologique.

Ces constats soulignent la nécessité de renforcer, dans les travaux futurs, l'harmonisation des protocoles de suivi, la transparence méthodologique et le partage des données, afin de consolider progressivement la base de preuves disponible et d'améliorer l'évaluation de l'efficacité réelle des mesures mises en œuvre.

CONCLUSION DE LA REVUE RAPIDE

Les résultats de cette synthèse montrent que la base de connaissances sur l'efficacité des mesures d'atténuation des impacts du photovoltaïque au sol reste jeune, restreinte et biaisée. Ils permettent toutefois de dégager plusieurs recommandations concrètes.

Sur le plan de la recherche, il apparaît nécessaire de :

- **Élargir les contextes étudiés**, en couvrant une plus grande diversité de milieux (arides, méditerranéens, tropicaux), notamment dans les territoires français métropolitains et ultramarins.
- **Rééquilibrer l'effort entre taxa**, en développant des études dédiées aux pollinisateurs, aux oiseaux, aux chauves-souris, mais aussi aux petits et grands mammifères, aux reptiles et aux amphibiens.
- **Diversifier les types de mesures**, en allant au-delà des traitements surfaciques des panneaux et des seules mesures d'habitat, pour tester aussi la gestion de la végétation, la perméabilité des clôtures, les dispositifs de dissuasion, la conception des infrastructures et les mesures de compensation.
- **Renforcer la robustesse des designs**, en privilégiant lorsque c'est possible des approches de type BACI, des suivis pluriannuels, des répliques indépendants et une prise en compte explicite des facteurs confondants.

Sur le plan méthodologique :

- Un effort de **standardisation** serait utile. L'harmonisation des protocoles (périmètres d'échantillonnage, fréquences de suivi, indicateurs de réponse) et des formats de rapport (statistiques de base, incertitudes, description détaillée des méthodes) faciliterait les comparaisons entre études et la réalisation future de méta-analyses.
- La **transparence sur les financements et les conflits d'intérêts**, ainsi que le **partage des données brutes** lorsque cela est possible, renforceraient la confiance dans les résultats et leur réutilisation.

Du point de vue de la gestion, il serait souhaitable de :

- mieux **ancrer l'évaluation dans les projets eux-mêmes**. Chaque mise en place de mesure (gestion de la végétation, adaptation de la conception, dispositifs sur les panneaux, aménagements de clôtures, compensation) représente une occasion d'intégrer un suivi structuré, avec un comparateur adapté. Les parcs photovoltaïques peuvent ainsi devenir de véritables sites d'expérimentation pour tester et comparer les mesures dans des conditions réelles, à coût marginal limité. Cela suppose des **partenariats** plus étroits entre développeurs, bureaux d'études, gestionnaires et chercheurs.

Dans cette optique, une étude récente pilotée par le **Syndicat des Énergies Renouvelables, Enerplan, l'ADEME et Biotope** (Bodez et al., 2023) a proposé un cadre structurant pour les recherches à venir sur les interactions entre photovoltaïque et biodiversité. Ce travail s'appuie sur un diagnostic partagé entre experts scientifiques, développeurs et acteurs institutionnels. Il identifie cinq priorités écologiques (**avifaune, chiroptères, habitats ouverts, zones humides fonctionnelles, biodiversité aquatique**), et propose des **protocoles standardisés** pour guider la mise en œuvre et l'analyse des suivis. Il souligne également l'importance de **capitaliser les données**, de **construire des indicateurs robustes**, et de **mutualiser les efforts au niveau national**. Cette initiative représente une avancée

majeure vers une évaluation plus rigoureuse, transparente et opérationnelle de l'efficacité des mesures environnementales. Elle constitue une opportunité pour mettre en œuvre, à large échelle, les recommandations issues de cette revue.

Enfin, il est important de replacer ces recommandations dans le contexte plus large de la transition énergétique. Le photovoltaïque au sol va continuer à se développer. La question n'est donc pas seulement de « réduire les impacts » de façon ponctuelle, mais de **construire un socle de preuves solide** permettant d'orienter la planification, la conception et la gestion des parcs vers des solutions réellement favorables à la biodiversité. Accélérer et structurer la production de connaissances sur l'efficacité des mesures est une condition clé pour concilier, durablement, développement du solaire et conservation des milieux vivants.

REGARD D'EXPERTS

Dans une dynamique de co-construction des connaissances autour des **mesures d'atténuation des impacts du photovoltaïque au sol** sur la biodiversité animale, une réunion d'experts a été organisée pour discuter collectivement des résultats de la synthèse bibliographique présentée ci-dessus. Elle a rassemblé des représentants de la filière photovoltaïque (développeurs, bureaux d'études, fédérations professionnelles telles que France Renouvelables et le Syndicat des Énergies Renouvelables), d'établissements publics comme l'Office Français de la Biodiversité et l'ADEME, d'organisations de protection de la nature telles que France Nature Environnement et l'IUCN, afin de favoriser un retour d'expérience ancré dans la réalité opérationnelle des projets. Un questionnaire écrit a été diffusé à l'ensemble des participants et partenaires identifiés à l'issue de l'atelier.

Atelier et questionnaire visaient à :

- Approfondir les retours sur notre synthèse de connaissance et sur les pratiques d'atténuation : leur application concrète, leur efficacité perçue, les freins rencontrés,
- Identifier les besoins en matière de recherche, de coordination et de cadre réglementaire.

En croisant les apports de la réunion et les réponses au questionnaire, cette section du rapport – « Regards d'experts » – restitue la diversité des points de vue, identifie les consensus et les controverses et nourrit les recommandations finales d'une compréhension plus fine des pratiques, contraintes et attentes exprimées sur le terrain.

Choix et efficacité des mesures de réduction des impacts : entre continuité écologique, habitats et gestion de la végétation

Une diversité de mesures mises en œuvre selon les contextes de projets

Les échanges de l'atelier décrivent une palette large de mesures mises en œuvre autour des **centrales photovoltaïques au sol** et, plus récemment, **en agrivoltaïsme**. Elles s'inscrivent dans le cadre ERC et conduisent à raisonner non seulement en dehors de l'emprise spatiale du projet, mais aussi à l'intérieur même des parcs.

Ces mesures se regroupent en plusieurs grandes familles :

- actions liées à la continuité écologique, avec des choix de clôtures et de passages à faune ;
- conservation ou création d'habitats : gîtes pour chauves-souris, mares et hibernaculum pour amphibiens et reptiles, nichoirs pour l'avifaune, patchs de milieux naturels maintenus au sein des centrales ;
- gestion de la végétation, qui mobilise le choix de semences (y compris locales), les modalités d'ensemencement et les pratiques de fauche.

L'atelier met aussi en lumière des différences de contexte entre centrales au sol et projets agrivoltaïques. Dans ces derniers, les mesures proposées proviennent souvent de « banques de mesures » conçues pour des centrales classiques, alors que le contexte agricole apporte des contraintes agronomiques, réglementaires et techniques plus fortes (obligations de lutte contre

certaines plantes, passage aux systèmes pâturés, sensibilité de certains milieux comme les pelouses sèches, objectifs de rendement).

De façon générale, le choix des mesures résulte d'un croisement entre écologie des espèces, faisabilité technique, exigences de sécurité (notamment incendie et assurances) et contexte agricole, en s'appuyant sur l'accompagnement des bureaux d'études et des associations naturalistes. Les sections suivantes détaillent, à partir de ces mêmes échanges, les mesures jugées les plus efficaces et celles qui apparaissent moins adaptées ou génératrices de difficultés.

Mesures jugées les plus efficaces pour la biodiversité

Dans cette diversité de pratiques, plusieurs intervenants convergent sur un point : **certaines mesures donnent des résultats positifs en termes de biodiversité**, même si l'on manque encore de recul scientifique sur de longues périodes. Les retours de terrain, parfois sur cinq à six ans de suivi, permettent néanmoins de dégager quelques dispositifs considérés comme particulièrement efficaces.

Un premier ensemble de retours porte sur les **dispositifs de clôture et de passages à faune**. Plusieurs développeurs soulignent l'intérêt des clôtures dites « d'autoroute inversées », avec de grandes mailles en bas et des mailles plus petites en haut. Ce dispositif est jugé simple à mettre en œuvre en phase de construction et permet à la petite faune, notamment les lièvres et les renards, de circuler en se créant des passages dans la clôture. Sur certains parcs où les passages sont très rapprochés, avec des trous d'environ 10 cm de haut sur 20 cm de large tous les quinze mètres, les retours indiquent que ces ouvertures sont bien utilisées par les lapins et les lièvres. Les intervenants en concluent que la densité et la répartition des passages jouent un rôle important dans leur efficacité.

Les **mesures en faveur de l'habitat des chauves-souris** sont également citées comme concluantes. Sur un parc, trois gîtes hypogés accueillant petit et grand rhinolophe ont été conservés, dont un situé au centre de la centrale, entouré de panneaux et d'un bosquet maintenu. Pendant toute la durée des travaux, un suivi spécifique a été mené avec des visites régulières, des enregistreurs placés à la sortie des gîtes et des pièges photo aux entrées. Les chauves-souris sont restées présentes durant le chantier et continuent de fréquenter les gîtes après la mise en service du parc. Sur un autre site, des gîtes artificiels de pipistrelles installés après la démolition de bâtiments amiantés ont été occupés dès le premier printemps suivant leur mise en place, ce qui est considéré comme un signe fort de réussite.

Les retours sont aussi positifs pour les **mares et hibernaculum destinés aux amphibiens et reptiles**. Plusieurs experts mentionnent que, lorsque ces structures sont « bien faites » et placées au bon endroit autour des centrales, elles fonctionnent très bien. Par exemple, la plus grande population de crapaud calamite observée par un intervenant se trouve au sein d'une centrale photovoltaïque dans le sud-ouest, au milieu du parc. Ces mesures sont jugées relativement simples à évaluer, sur un mode présence/absence, en observant si les mares sont effectivement occupées par les espèces ciblées.

Les **nichoirs** sont également cités comme des mesures efficaces lorsqu'ils sont installés dans des milieux pauvres en cavités naturelles. Un intervenant évoque des nichoirs à rollier d'Europe dans le sud, en zone de garrigue, où il n'existe que de petits arbres et donc peu de possibilités naturelles de nidification. Dans ce contexte, les nichoirs ont été bien utilisés. L'efficacité de ce type de mesure apparaît cependant très dépendante du contexte local, notamment de la qualité des habitats alentour.

Un autre dispositif jugé favorable est la **conservation d'habitats d'intérêts à l'intérieur de l'emprise du parc**, en choisissant de ne pas y installer de panneaux. Des développeurs décrivent des **patchs de pelouses sèches ou de petits bosquets laissés intacts** au sein même des centrales. Sur plusieurs parcs, ces zones bénéficient d'un suivi sur cinq à six ans, avec l'accompagnement de bureaux d'études. Les retours indiquent une forte présence d'espèces, voire l'apparition de nouvelles espèces qui s'approprient ces espaces. Ces patchs sont décrits comme les zones où l'on observe le plus de biodiversité au sein des centrales, avec notamment de la nidification d'oiseaux de milieux ouverts. Ils peuvent créer une continuité « en pas japonais » à travers le parc et sont appréciés aussi pour leur rôle paysager et pour la possibilité de concentrer la fauche tardive sur ces zones, tout en gérant plus strictement la végétation ailleurs pour répondre aux contraintes de risque incendie.

Enfin, plusieurs intervenants mettent en avant l'intérêt du **recours à des semences locales pour la gestion de la végétation**. Le programme PictaGraine, porté par le Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Aquitaine, est cité comme exemple. Il consiste à brosser des prairies locales pour

récupérer les graines, les trier puis les ressemer. Initialement conçu pour des prairies agricoles, il est désormais utilisé sur des parcs photovoltaïques. Des développeurs indiquent avoir combiné cette approche avec des semences issues de fournisseurs labellisés et reconnus comme la marque de l'OFB « végétal local ». Ces choix, plus coûteux que des semences standard, sont jugés intéressants pour favoriser la repousse de plantes locales, dont certaines sont importantes pour des insectes comme l'azuré du serpolet, et pour reconstituer une flore cohérente avec le contexte du site. Des pistes sont également évoquées pour **phaser les ensemencements sur plusieurs années** et, à terme, récolter des graines produites sur la centrale pour ensemercer d'autres zones.

Dans l'ensemble, **ces retours soulignent que les mesures jugées les plus efficaces sont celles qui s'appuient fortement sur l'écologie des espèces ciblées (localisation des gîtes, conception des mares, choix des habitats à conserver) et qui tiennent compte du contexte local**. Elles offrent des résultats visibles en termes de présence d'espèces et sont relativement faciles à suivre, même si la formalisation d'indicateurs plus fins reste encore limitée.

Réserves, mesures jugées peu efficaces, mal adaptées ou générant des effets indésirables

Les échanges de l'atelier font aussi ressortir des **dispositifs perçus comme peu efficaces, mal adaptés ou porteurs d'effets indésirables**, notamment en contexte d'élevage, de gestion de la végétation ou de compensation.

Réserves concernant les passages à faune. Plusieurs intervenants évoquent des cas où des petits passages artificiels, pourtant installés en nombre autour des centrales, semblent très peu utilisés. Des pièges photo ont montré beaucoup plus de passages d'animaux dans un trou creusé spontanément sous la clôture que dans des passages de 20 × 20 cm aménagés à proximité. Cela interroge sur la réelle efficacité de ces petits ouvrages sur certains projets, leur emplacement et l'intérêt de multiplier ces dispositifs lorsqu'ils ne correspondent pas aux usages de la faune. À l'inverse, des passages plus grands ont parfois entraîné des effets non souhaités. Un développeur décrit ainsi des destructions de clôtures et des intrusions importantes, notamment de faune chassable comme les sangliers, sur certains parcs situés à proximité de zones forestières. Dans ces cas, des demandes de retour en arrière apparaissent, avec par exemple des propositions de clôtures électrifiées. Les intervenants parlent d'un véritable dilemme entre la conservation de grands passages, qui favorisent des intrusions problématiques, et le maintien de petits passages qui filtrent fortement le type de faune pouvant accéder au parc. Ces difficultés sont jugées particulièrement marquées en contexte agrivoltaïque, où l'on a des troupeaux à l'intérieur des centrales. Plusieurs éleveurs ont fait part de leurs craintes, voire de retours d'expérience, sur des intrusions de prédateurs facilitées par certains passages à faune. Des cas d'agneaux se coinçant la tête dans ces ouvertures sont également mentionnés. Les intervenants soulignent que cela peut poser problème dans des projets d'agri-PV avec élevage ovin, alors même que ces projets se développent fortement.

La gestion tardive de la végétation, souvent présentée comme bénéfique pour la biodiversité, peut devenir une source de problèmes dans certaines conditions. Des développeurs décrivent des « explosions complètes » d'espèces envahissantes, en particulier de chardons, sur des centrales implantées sur des terrains déjà dégradés et riches en graines de ces espèces. Les chardons peuvent atteindre 1,50 m de haut, créer de l'ombrage sur les panneaux et rendre les parcelles impropres au pâturage, les troupeaux refusant ces milieux très envahis. Les intervenants expliquent que le calendrier d'intervention joue ici un rôle central. Le chardon ne peut être géré efficacement qu'à partir de début mai, lorsqu'il est bien développé : une intervention trop précoce accroît sa vigueur. Or, dans certains cas, les équipes n'ont pas le droit de gérer mécaniquement la végétation au printemps et en été. La première année, aucune intervention n'a pu être réalisée sur cette période, les chardons sont montés en fleur, et l'année suivante la situation s'est encore aggravée. Les participants relient ces difficultés aux calendriers écologiques classiques des études d'impact, qui excluent souvent presque toute la période de mars à août. Cela conduit à concentrer les travaux en plein hiver, sur des sols très humides, augmentant fortement le risque d'altérer la structure du sol et ainsi les interactions sol-végétation-faune. Certains estiment que ces calendriers peuvent, dans ces conditions, devenir « contre-productifs » pour la résilience des milieux.

Dans le champ de la compensation, le diagnostic est également réservé (voir la sous-section « *Pressions économiques et poids de la compensation dans les arbitrages* » ci-dessous). Le cadre est décrit comme peu lisible, avec des exigences difficiles à anticiper et pouvant évoluer fortement lors du passage devant le CNPN. Les développeurs soulignent que cette incertitude sur le dimensionnement des mesures, ajoutée à des coûts déjà importants, rend la **compensation parfois dissuasive et complique l'intégration de mesures ambitieuses en faveur de la biodiversité**.

Enfin, les mesures d'effarouchement des oiseaux n'apparaissent pas comme réellement efficaces (accoutumance des oiseaux). Les limites techniques de ces systèmes sont soulignées : ils peuvent éventuellement détecter de grands rapaces, mais pas les petits passereaux. Aucun des participants à l'atelier n'a indiqué utiliser ce type de dispositif sur des parcs photovoltaïques. Les participants rappellent en outre que, dans d'autres secteurs (milieu agricole, aéroports), si l'effarouchement fonctionnait vraiment, cela se verrait déjà plus clairement. Ils estiment par ailleurs que les collisions d'oiseaux sur les panneaux sont probablement très anecdotiques et soulignent qu'aucun technicien ne rapporte de cas réguliers d'oiseaux percutant les panneaux sur les centrales. Pour eux, il serait nécessaire de commencer par quantifier l'impact réel avant de mettre en place des dispositifs d'effarouchement qui risquent de générer un dérangement important, notamment en période de nidification. Certains considèrent que la gestion de la végétation et ses effets sur les insectes et les autres animaux constitue un levier bien plus prioritaire que l'effarouchement aviaire.

Dans l'ensemble, ces retours montrent que certaines mesures, pourtant envisagées comme favorables, peuvent s'avérer peu efficaces ou poser des problèmes importants lorsqu'elles ne sont pas adaptées aux contextes locaux, en particulier en agri-PV, en gestion de la végétation ou en compensation. Les sections suivantes s'attachent à comprendre comment ces constats rejoignent les limites méthodologiques des suivis et les freins concrets rencontrés sur le terrain.

Une efficacité encore difficile à documenter : limites méthodologiques et données éclatées

Hétérogénéité des protocoles de suivi et faible comparabilité des résultats

Les retours présentés dans la première partie montrent qu'un certain nombre de mesures semblent bien fonctionner sur le terrain. Mais lorsqu'il s'agit d'évaluer rigoureusement leur efficacité, les intervenants pointent d'emblée un **obstacle majeur : l'absence de cadre commun de suivi et la grande hétérogénéité des protocoles utilisés d'un projet à l'autre**.

En effet, il n'existe pas, à ce jour, de méthodologie de suivi partagée à l'échelle de la filière photovoltaïque. Les suivis sont conçus et réalisés selon des approches très différentes, avec **des indicateurs, des fréquences de passage et des méthodes qui varient d'un bureau d'études à l'autre, d'un taxon à l'autre, d'un projet à l'autre**. Mis côte à côte, les résultats issus de plusieurs développeurs sur une même espèce ne permettraient pas de produire une analyse scientifique solide. Ce constat est décrit comme l'un des « gros points noirs » actuels pour le photovoltaïque. Les protocoles eux-mêmes évoluent au fil du temps. Des méthodes utilisées en 2018 ne sont plus tout à fait les mêmes en 2023. Sans continuité sur au moins dix à quinze ans, il devient difficile de dégager des tendances robustes. Même pour des groupes où des indicateurs sont mieux maîtrisés, comme les amphibiens, une « sensibilité propre » subsiste selon les équipes. Pour d'autres taxons, en particulier les oiseaux, l'hétérogénéité reste très forte. Cette situation est souvent comparée à celle de l'éolien terrestre, où les contraintes juridiques et les protocoles sont très encadrés depuis des années. À l'inverse, le photovoltaïque sort d'une phase où le secteur s'est rapidement ouvert, avec des pratiques moins homogènes. **L'harmonisation des suivis est désormais identifiée comme un besoin central**, mais elle reste encore largement à construire. Dans ce contexte, la demande qui ressort est celle d'un cadre de suivi clair et structuré. Il s'agirait de définir, par taxon, des protocoles partagés en termes de moyens, de matériel, de fréquence et d'indicateurs. **Sans cette base commune, les études resteront difficilement exploitables au-delà du niveau de chaque projet pris isolément, et les comparaisons entre parcs ou entre régions resteront limitées**.

Les limites ne tiennent pas seulement aux méthodes de terrain, mais aussi au **statut des données**. Les développeurs transmettent leurs rapports de suivi aux services de l'État, mais ces

services ne disposent pas des moyens suffisants pour les analyser systématiquement. **Les données sont déposées, mais rarement valorisées. Les porteurs de projet ont peu de retours sur l'efficacité réelle des mesures ou sur les ajustements possibles. L'idée d'une base de données nationale revient donc régulièrement.** Une telle base permettrait de centraliser les résultats, de documenter les effets cumulés des parcs et de tirer parti de l'ensemble des suivis réalisés. Aujourd'hui, cela reste très peu faisable : les données ne sont ni structurées, ni ouvertes de manière à permettre ce travail de synthèse. Les références à des dispositifs existants dans l'éolien montrent par ailleurs que l'existence d'une plateforme ne suffit pas si les données ne sont pas normalisées ni exploitées.

Des initiatives récentes vont toutefois dans le sens d'une meilleure structuration. Le projet BIODIVoltaïque vise à proposer un cadre de suivi et des analyses types à partir des données collectées. L'Observatoire des énergies renouvelables associant l'Office Français de la Biodiversité, l'ADEME et d'autres partenaires commence à jouer un rôle de centre de ressources, même si ses moyens sont jugés limités et ses productions encore lentes au regard des attentes.

Au final, le diagnostic est celui d'un décalage marqué entre la masse de données produites et la capacité à en extraire des enseignements consolidés. Tant que les protocoles resteront dispersés et que les données seront difficiles à rassembler et à exploiter, l'évaluation de l'efficacité des mesures restera partielle et fragile.

Difficultés à mettre en place des dispositifs de type BACI (Before-After-Control-Impact) et des sites témoins

Au-delà de la forte hétérogénéité des protocoles, se pose la question de dispositifs de suivi plus robustes, de type BACI⁶. Là encore, les retours de l'atelier décrivent des obstacles importants.

Un dispositif BACI suppose l'existence d'une zone témoin comparable au site de projet, mais non équipée. Concrètement, cela signifie identifier et mobiliser du foncier supplémentaire, en plus des surfaces déjà nécessaires au projet et aux mesures compensatoires. Dans des territoires où **le foncier est limité**, cette exigence entre en concurrence directe avec les besoins de compensation et rend la mise en place d'un vrai site contrôle très difficile.

À cela s'ajoutent des **contraintes de coût et d'organisation**. Mettre en place et suivre une zone témoin représente des moyens humains et financiers supplémentaires, alors que les budgets et les calendriers sont déjà tendus. Les inventaires initiaux peuvent être réalisés quatre ou cinq ans avant la mise en service de la centrale ; entre-temps, le contexte change, les priorités évoluent, et il devient complexe de maintenir un protocole BACI cohérent sur toute la durée du projet. Certains qualifient l'obtention de quelque chose de « réellement scientifique » de très difficile dans ces conditions.

La question de l'accès aux sites apparaît aussi, mais de manière nuancée. L'accès aux centrales elles-mêmes est généralement possible pour les chercheurs et les bureaux d'études, dans le cadre des règles de sécurité habituelles. Les difficultés concernent plutôt certaines zones de compensation, parfois éloignées ou situées dans des milieux naturels plus difficiles d'accès, où organiser des suivis réguliers devient compliqué.

Un malentendu persiste enfin sur l'accès aux données. Du point de vue des développeurs, les suivis réalisés sont bien transmis aux services de l'État, mais ces services ne disposent pas des moyens pour les exploiter. Les données existent, elles sont déposées, mais elles restent peu analysées et peu mobilisées dans une logique de protocole BACI structuré.

Au total, la combinaison de ces contraintes – foncier, coûts, calendrier, accessibilité des sites et traitement des données – limite fortement la possibilité de déployer des dispositifs BACI complets et comparables d'un projet à l'autre.

⁶ Un **dispositif de type BACI (Before-After-Control-Impact)** est un protocole expérimental en écologie conçu pour détecter les impacts d'une perturbation ou d'une mesure de gestion. Il compare les conditions avant (« Before ») et après (« After ») l'intervention sur une zone impactée (« Impact ») et des sites témoins contrôlés (« Control »), permettant d'isoler les effets spécifiques de l'action par rapport aux variations naturelles.

Décalage entre temporalité des projets industriels et temporalité de la recherche

Les limites liées aux protocoles de suivi ou de recherche s'inscrivent dans un problème plus large : les calendriers de l'industrie et de la recherche coïncident difficilement.

Côté développeurs, il est rarement possible de garantir, deux ans à l'avance, qu'un parc sera effectivement construit. Entre financements, instruction, contraintes locales et recours, un site suivi par des chercheurs peut finalement ne jamais voir le jour. Des équipes engagent alors du temps sur un an de suivi sans disposer, au final, d'une série exploitable sur la durée.

Le décalage se retrouve dans la gestion des sols et de la végétation. Des demandes apparaissent pour ensemercer plusieurs années avant la création des parcs, parfois trois ou quatre ans avant la mise en service. Cette anticipation expose à des risques financiers sur des sites non sécurisés et complique la planification. La première année d'exploitation reste de toute façon une phase de « cicatrisation » après le chantier, avec ornières et sols dégradés. En agrivoltaïsme, intervenir aussi tôt revient déjà à modifier le modèle agricole de l'exploitant, ce qui renforce la difficulté.

Sur le plan scientifique, une partie des efforts actuels porte sur les impacts des centrales (oiseaux, chauves-souris, zones humides, sols...). Des programmes comme ENVoltaïque sont cités, avec l'objectif d'obtenir d'ici 2030 une vision claire des principaux effets. Il ne s'agit pas de considérer que ces travaux seraient suffisants ou de renoncer à de nouvelles études sur les impacts, mais d'éviter une situation où l'on attendrait d'avoir une connaissance « complète » avant de s'intéresser aux **mesures d'atténuation**. L'idée défendue est au contraire de s'appuyer progressivement sur quelques études solides, en France et à l'étranger, tout en engageant dès maintenant des travaux sur l'évaluation des mesures (ce qui fonctionne ou non) et sur la comparaison entre recommandations scientifiques et pratiques déjà mises en œuvre par les développeurs.

La question de la coopération entre recherche et filière revient aussi. Des formats de travail communs existent déjà, par exemple, dans le domaine de l'éolien, ceux discutés lors de la Conférence on Wind energy and Wildlife impacts, qui réunit tous les deux ans chercheurs, bureaux d'études, développeurs éoliens, ONG et autorités autour des méthodes, outils et retours d'expérience sur les impacts de l'éolien sur la faune. Néanmoins, ils nécessitent un engagement réciproque : que chacun accepte de « faire un pas » vers l'autre, d'articuler questions de terrain et priorités de recherche.

Enfin, les capacités de recherche dépendent fortement de l'avenir politique et économique du photovoltaïque. Un ralentissement marqué, voire un moratoire, aurait des effets directs sur la possibilité de financer des programmes, de mettre des parcs à disposition et de maintenir des emplois dans ce domaine.

Dans ce contexte, les dispositifs collectifs déjà en place, et en particulier l'Observatoire des énergies renouvelables et les grands programmes de recherche, jouent un rôle clé pour mieux coordonner ces temporalités et structurer la production de connaissances, ce que la sous-section suivante approfondit.

Freins et arbitrages sur le terrain : concilier biodiversité, incendie, agriculture et autres usages

La défense incendie comme contrainte structurante

Après les questions de protocoles et de données, les freins se jouent aussi sur un terrain très concret : la défense contre l'incendie. **Les obligations légales de débroussaillage (OLD), portées localement par les SDIS et souvent mises en œuvre par l'ONF, pèsent directement sur la conception et la gestion des mesures en faveur de la biodiversité.**

Dans certains départements, comme la Gironde, l'interprétation des OLD est très stricte : la végétation doit être quasi entièrement rase autour des centrales. Des cas sont décrits où des patchs environnementaux, situés près des clôtures mais en dehors du parc, ont fait l'objet de mises en demeure de l'ONF, mandaté par le SDIS, pour être rasés au motif qu'ils augmenteraient le risque pour la centrale et les boisements voisins.

Les contrôles menés par les SDIS et l'ONF sur des parcs existants aboutissent parfois à des demandes de suppression de mesures environnementales déjà en place. Ces mesures fonctionnent pourtant (retour de biodiversité, habitats créés), mais sont jugées non tolérables au regard du risque incendie. Lorsque les porteurs de projet se tournent vers l'administration environnementale, la réponse renvoie à des démarches lourdes : demande de modification d'autorisation (DDEP) et nouveau passage devant le CNPN pour retirer des mesures, ou mise en place de nouvelles compensations pour ce qui serait détruit.

Cette situation crée un **conflit de normes** : d'un côté, des arrêtés et recommandations incendies présentés comme prioritaires (« le risque incendie est prioritaire sur tout »), de l'autre, des engagements pris pour restaurer ou maintenir des habitats. **Les développeurs se retrouvent « coincés » entre ces exigences, sans toujours savoir ce qui doit primer.**

Un arrêté interministériel sur les OLD, censé permettre une meilleure conciliation entre prévention incendie et biodiversité, doit être décliné par des arrêtés régionaux et départementaux. Mais ce travail n'est pas encore abouti partout. Dans les territoires où cette adaptation manque, les SDIS continuent à demander l'application stricte d'OLD peu compatibles avec les patches de végétation ou les bosquets conservés.

Dans ce contexte, certaines pratiques apparaissent comme des compromis : maintenir des patches en fauche tardive là où il n'y a pas de panneaux, et gérer plus intensivement la végétation ailleurs pour répondre aux exigences incendie. Cela permet de garder des zones favorables à la biodiversité, tout en limitant les conflits avec les prescriptions des SDIS.

Agrivoltaïsme : concilier productivité agricole et objectifs écologiques

Les tensions décrites autour du risque incendie se doublent, **en agrivoltaïsme, de contraintes fortes liées au maintien de la production agricole.** Les projets agri-PV doivent en général garantir une perte de rendement limitée, avec un objectif souvent fixé à moins de 10 % par rapport à la situation initiale. Cet impératif pèse directement sur le dimensionnement des mesures environnementales et sur les marges de manœuvre laissées aux exploitants.

S'ajoutent des obligations réglementaires de lutte contre certaines espèces végétales, en particulier les chardons. La destruction de ces plantes relève d'une obligation pour l'agriculteur. Dans les faits, cela conduit à intervenir parfois en pleine période de nidification, ou à des dates peu compatibles avec les recommandations de fauche tardive formulées pour la biodiversité.

Le calendrier des travaux agricoles (pâturage, fauche, rotations) ne coïncide pas toujours avec les périodes jugées favorables du point de vue écologique. Dans des surfaces converties au pâturage, notamment sur pelouses sèches, certaines pratiques peuvent fragiliser les milieux, alors même que ces habitats sont identifiés comme à enjeu. L'éleveur reste par ailleurs soumis à ses propres contraintes économiques (charges pastorales, objectifs de production), qui limitent la possibilité d'ajuster finement les pratiques à des calendriers naturalistes.

Un autre point récurrent est le recours à des « banques de mesures » pensées pour le photovoltaïque classique au sol. Les bureaux d'études proposent souvent, en agri-PV, les mêmes mesures que pour une centrale au sol (passages à faune, gestion de la végétation, dispositifs divers), **sans toujours les adapter aux réalités d'une parcelle exploitée** : présence de troupeaux, circulation du matériel agricole, contraintes d'entretien. Ces mesures se révèlent alors parfois peu adaptées, voire difficiles à appliquer dans la durée.

L'agri-photovoltaïsme se trouve ainsi au croisement de deux systèmes de contraintes : celles de la filière énergétique et celles du monde agricole. La compatibilité entre productivité agricole, obligations réglementaires et objectifs écologiques constitue l'un des freins majeurs identifiés pour le déploiement de mesures ambitieuses en faveur de la biodiversité dans ces projets

Multiplicité des acteurs et injonctions parfois contradictoires

Les tensions décrites pour l'agrivoltaïsme ne relèvent pas seulement des parcelles et des pratiques agricoles. Elles s'inscrivent dans un paysage où **de nombreux acteurs interviennent sur un même projet : service départemental d'incendie et de secours (SDIS), office national des forêts (ONF),**

services de l'État, monde agricole, chasseurs, services d'archéologie préventive, assurances, parfois armée. Chacun arrive avec son cadrage, ses priorités et son calendrier.

Sur le terrain, le développeur ne maîtrise pas toutes les décisions. Un éleveur peut par exemple décider de « nettoyer » un reliquat de végétation en plein été, parce qu'il juge la centrale « pas assez propre ». Ce type d'initiative entre facilement en conflit avec des mesures environnementales prévues ou déjà engagées sur le site.

Les contraintes assurantielles ajoutent une couche supplémentaire, surtout en agri-PV. Les assurances restent réticentes vis-à-vis de certaines configurations combinant installations photovoltaïques, animaux et présence de végétation. Les mesures en faveur de la biodiversité doivent alors rester compatibles avec le projet agricole de l'exploitant, ses pratiques et les exigences de l'assureur, ce qui réduit les marges de manœuvre.

La dimension locale renforce cette impression de mosaïque de règles. Les services déconcentrés sont nombreux, et certains ne participent pas aux espaces de dialogue proposés par la filière, même lorsqu'ils y sont invités. **Le sentiment exprimé est celui d'une filière qui « met de la bonne volonté », mais qui ne peut pas, seule, résoudre des contradictions entre objectifs d'énergie, de biodiversité, d'agriculture, de prévention incendie, d'archéologie ou de défense.**

Pressions économiques et poids de la compensation dans les arbitrages

Aux contraintes portées par la défense incendie, l'agriculture et la multiplicité d'acteurs, s'ajoutent des pressions économiques fortes, liées en particulier au régime de compensation environnementale.

Le cadre de la compensation est décrit comme peu lisible. Le dimensionnement des mesures reste difficile à anticiper : rayons de prospection, disponibilité foncière, types d'actions possibles sont mal cadrés au départ. Lors du passage devant le Conseil national de protection de la nature (CNPN), une proposition jugée suffisante en interne peut se voir doublée en termes de surfaces à compenser, sans que les critères de ce recalage soient clairs pour les porteurs de projet.

Des situations de double compensation sont mentionnées. Par exemple, la restauration de milieux ouverts par coupe de pinèdes peut entraîner, en plus, une compensation forestière pour la perte de ces boisements. Les coûts se cumulent alors : mesures environnementales d'un côté, compensation forestière de l'autre. **Dans certains cas, l'enveloppe totale de compensation atteint des montants très élevés, de l'ordre de plusieurs millions d'euros pour des projets de taille modeste.**

Ces incertitudes et ces montants pèsent directement sur les arbitrages. **L'intégration de mesures ambitieuses en faveur de la biodiversité devient difficile à soutenir lorsque les exigences de compensation restent mouvantes et potentiellement très lourdes par rapport à l'économie globale du projet.**

Structurer pratiques et capitalisation : vers une écoconception « standardisée » des centrales photovoltaïques

Standardisation des suivis : un rappel synthétique des besoins

Les constats posés dans la section II conduisent à un besoin clair : sortir de la mosaïque de suivis pour disposer d'un socle commun. Nous avons vu qu'il n'existe pas aujourd'hui de méthodologie partagée de suivi à l'échelle de la filière photovoltaïque, ni de protocole stable sur la durée.

Les attentes exprimées se résument en quelques points :

- mettre en place des référentiels communs de suivi, par taxon, avec des indicateurs, des fréquences et des méthodes harmonisés ;
- stabiliser ces protocoles dans le temps pour pouvoir dégager des tendances sur dix à quinze ans ;
- disposer d'une base de données nationale rassemblant les suivis des parcs (mesures mises en œuvre, résultats), afin de comparer entre sites, régions et types de projets et de travailler sur les effets cumulés.

Sans ces trois briques, les suivis restent surtout exploitables à l'échelle de chaque projet pris isolément, et la filière ne peut réellement capitaliser sur l'ensemble des expériences déjà accumulées.

Guides d'écoconception et montée en compétences des acteurs

La standardisation des suivis s'accompagne d'une autre attente forte : disposer d'outils pratiques pour concevoir et gérer les centrales.

Plusieurs pistes sont déjà engagées :

- un guide d'éco-conception des parcs photovoltaïques, porté par l'Observatoire des énergies renouvelables et de la biodiversité, réalisé par l'équipe du projet Remede, avec une post-doctorante chargée de faire le point sur les mesures et de préparer des ateliers avec bureaux d'études et développeurs ;
- l'appui sur des guides existants comme PIEZO, déjà utilisés par la filière pour les mesures ERC, mais jugés encore préliminaires et à approfondir scientifiquement.

À ces guides s'ajoute un besoin de montée en compétences : une formation OFB « photovoltaïque et biodiversité » est envisagée, sur le modèle de la formation déjà existante sur « chiroptères et éolien ». L'objectif est de diffuser plus largement les connaissances et de mieux relier cadre scientifique, retour de terrain et pratiques opérationnelles.

Orienter la R&D sur l'efficacité des mesures et la résilience des sols

À côté des guides et de la formation, la question se pose de **l'orientation de la recherche** : sur quoi porter l'effort dans les prochaines années ?

Plusieurs grands programmes en cours visent d'abord à mieux caractériser les impacts des centrales : avifaune, chauves-souris, zones humides, fonctionnement des sols. L'horizon évoqué est de disposer, d'ici 2030 environ, d'un socle de connaissances suffisamment solide sur ces effets.

L'enjeu ensuite est de déplacer le centre de gravité vers la comparaison des mesures et de leurs performances. Les pistes de travail citées portent notamment sur :

- l'influence de la hauteur des panneaux et de la distance inter-rangs sur les habitats et la circulation de la faune ;
- la restauration et la conservation des sols (pédologie, infiltration, érosion, compaction après chantier) ;
- les mesures en faveur des pollinisateurs et de la petite faune, en lien avec la composition de la végétation ;
- la gestion de la végétation en contexte agri-PV, en tenant compte des contraintes agricoles et assurantielles.

L'idée défendue est de **ne pas multiplier indéfiniment les études générales sur les impacts, mais de s'appuyer sur quelques résultats robustes, en France et à l'étranger, pour concentrer la R&D sur l'efficacité comparée des mesures et sur la capacité des projets à maintenir ou améliorer la résilience des sols et des milieux.**

Rôle des structures collectives et de l'État pour une trajectoire plus lisible

L'orientation de la R&D et la production de guides ne suffisent pas sans structures capables de porter et d'organiser la capitalisation. C'est dans ce rôle que s'inscrivent **l'Observatoire des énergies renouvelables et, plus largement, les services de l'État.**

Concernant l'Observatoire, le message est clair : les chantiers sont lancés (travaux de synthèse, réflexion sur l'écoconception, analyse d'études d'impact), mais les moyens humains et financiers ne suivent pas. Sans renforcement, l'Observatoire restera en deçà des attentes, avec beaucoup de données peu exploitées et une capitalisation lente.

Du côté de l'État et de ses services, les attentes portent sur la capacité à :

- clarifier et stabiliser les exigences de compensation (dimensionnement, critères mobilisés, articulation avec les surfaces forestières) ;
- mieux articuler les politiques biodiversité / incendie / agriculture, notamment via la déclinaison de l'arrêté interministériel sur les OLD au niveau régional et départemental ;
- jouer un rôle actif de tiers garant : analyse des suivis transmis, retours structurés aux porteurs de projets, participation aux espaces de dialogue.

L'objectif recherché est un cadre plus lisible, qui sécurise les engagements pris, limite les remises en cause tardives de mesures jugées efficaces et permette à la filière de se projeter dans la durée avec des règles mieux partagées.

Bilan de l'étape collaborative : vers des centrales photovoltaïques conçues comme opportunités pour les milieux ouverts

Les discussions montrent d'abord que les centrales photovoltaïques sont susceptibles d'accueillir la biodiversité. Certaines mesures fonctionnent déjà bien et transforment les sites en milieux ouverts structurés, parfois plus favorables que les situations initiales. C'est le cas des patchs de végétation conservés ou restaurés à l'intérieur des clôtures, qui concentrent souvent le plus de biodiversité et accueillent nidification et installation de nouvelles espèces. De même, des gestions de végétation en mosaïque inspirées de certains dispositifs OLD (comme en Occitanie ou en PACA) peuvent créer des milieux plus intéressants que des forêts très fermées ou les champs cultivés de façon intensive, lorsque la réglementation locale le permet.

Des mesures « sans regret » se dessinent : éviter des zones à forts enjeux pour l'implantation des centrales plutôt que d'avoir recours à la compensation, maintenir des zones refuges, aménager des mares, des gîtes ou des hibernacula lorsqu'ils répondent à une écologie d'espèce bien documentée, travailler la végétation comme support d'habitat, etc. À l'inverse, d'autres actions apparaissent moins prioritaires ou mal ajustées : passages à faune artificiels peu fréquentés, effarouchement à l'efficacité douteuse au regard des dérangements qu'il génère, mesures catalogues mal adaptées à l'agri-PV, compensations coûteuses aux bénéfices discutables. L'enjeu n'est donc pas d'empiler des mesures, mais de mieux hiérarchiser ce qui apporte réellement un gain écologique.

En parallèle, l'atelier met au jour des freins structurels : protocoles de suivi hétérogènes, données dispersées, difficultés à mettre en place des dispositifs de type BACI, décalage entre temporalités des projets industriels et de la recherche. À cela s'ajoutent les contraintes de défense incendie (OLD appliquées de manière très stricte dans certains départements), les exigences assurantielles, les injonctions parfois contradictoires entre agriculture, biodiversité et sécurité, ainsi que le poids de la compensation dans l'économie des projets. Ces tensions peuvent aller jusqu'à remettre en cause des mesures qui fonctionnent déjà, ou réduire les marges de manœuvre en phase d'exploitation.

Les pistes de solution sont toutefois clairement formulées. Elles passent par :

- la mise en place de protocoles harmonisés de suivi et d'une base de données nationale permettant de comparer les résultats entre parcs et d'exploiter réellement la masse de données déjà produites ;
- l'élaboration de guides d'écoconception et de guides techniques (écolvoltaïsme, REMED, PIEZO), nourris par la littérature et les retours de terrain ;
- une montée en compétences via des formations dédiées « photovoltaïque et biodiversité » ;
- une R&D davantage tournée vers l'efficacité comparée des mesures, en s'appuyant sur les grands programmes en cours et sur des sites pilotes, notamment en agri-PV.

Dans ce paysage, **l'Observatoire des énergies renouvelables et les services de l'État occupent une place charnière**. L'Observatoire dispose déjà de chantiers engagés (analyse d'études d'impact, guide d'écolvoltaïsme, réflexion sur la standardisation des suivis), mais manque encore de moyens pour répondre aux attentes de la filière. Les services de l'État sont, eux, attendus sur la clarification des

exigences de compensation, l'articulation entre biodiversité, incendie, agriculture et zones humides, et la stabilisation d'un cadre lisible dans le temps.

Enfin, l'atelier se conclut sur une note à la fois lucide et constructive. Lucide, car la trajectoire du photovoltaïque reste dépendante de choix politiques qui conditionneront les moyens de la recherche et la capacité des acteurs à investir dans les mesures. Constructive, car tous insistent sur l'intérêt de ces temps d'échange, sur la volonté de travailler ensemble et sur le potentiel des centrales comme lieux d'apprentissage collectif. L'idée qui se dégage est qu'en **combinant évitement, écoconception, gestion fine des milieux ouverts et cadre commun de suivi, les centrales photovoltaïques peuvent devenir, dans un nombre croissant de cas, des opportunités pour les milieux ouverts** plutôt que des menaces systématiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES GÉNÉRALES

- ADEME.** (2023). *Photovoltaïque, sol et biodiversité : Enjeux et bonnes pratiques*. Angers, France : ADEME Éditions.
- ADEME.** (2024). *Photovoltaïque et biodiversité : état des lieux et recommandations*. Agence de la transition écologique.
- Armstrong, A., Waldron, S., Whitaker, J., & Ostle, N. J.** (2016). Wind farm and solar park effects on plant–soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global Change Biology*, 22(2), 703–714.
- Atlansun.** (2024). *Décryptage du décret sur les ombrières photovoltaïques de parkings*. <https://atlansun.fr/actus/decret-article-40-de-la-loi-aper-resume/>
- Bodez J., Bourgogne P., Cerqueus D., Dupin A., Renier S., Neveux G., Fraix J., & Ziadi C.** (2023). Programme « Photovoltaïque et Biodiversité » : Identification des questions scientifiques à adresser et estimation des moyens pour y répondre. 51p
- CBD/COP/DEC/15/4.** (2022). *Décision 15/4 : Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal*. Convention sur la diversité biologique. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-fr.pdf>
- Copernicus Climate Change Service.** (2026). *Copernicus: 2025 was the third hottest year on record*. Retrieved January 26, 2026, from <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2025-was-third-hottest-year-record>
- Fleming, P. A.** (2025). All that glitters—Review of solar facility impacts on fauna. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 224, 115995.
- France Renouvelables.** (2023). *Photovoltaïque au sol et biodiversité : vers une filière responsable*. https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/12/France_renouvelables_Photovoltaïque_biodiversite_VFF.pdf
- FERME Solaire.** (2024). *ICPE et photovoltaïque : réglementation et obligations*. <https://www.fermesolaire.fr/magazine/icpe-photovoltaïque-les-infos-essentiels-pour-votre-activité>
- Graham, L. L. B., Baines, D., & Smith, J.** (2019). Pollinator-friendly solar farms increase wild bee abundance. *Ecological Applications*, 29(4), e01862.
- Haddaway, N. R., Collins, A. M., Coughlin, D., & Kirk, S.** (2015). The role of Google Scholar in evidence reviews and its applicability to grey literature searching. *PloS one*, 10(9), e0138237.
- Haddaway, N. R., Bethel, A., Dicks, L. V., Koricheva, J., Macura, B., Petrokofsky, G., Pullin, A.S., Savilaakso, S., & Stewart, G. B.** (2020). Eight problems with literature reviews and how to fix them. *Nature Ecology & Evolution*, 4(12), 1582-1589.
- Hellio.** (2024). *Décret agrivoltaïsme du 8 avril 2024 : principes et cadre d'application*. <https://www.hellio.com/actualites/reglementation/decret-agrivoltaïsme-2024>
- Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., Barrows, C.W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., & Allen, M. F.** (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766–779.
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., & Robertson, B. A.** (2010). Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology*, 24(6), 1644–1653.
- International Energy Agency.** (2022). *CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Overview*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- IPCC.** (2023). *Sixth Assessment Report – Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-synthesis-report/>
- James, K. L., Randall, N. P., & Haddaway, N. R.** (2016). A methodology for systematic mapping in environmental sciences. *Environmental evidence*, 5(1), 7.
- Lafitte, A., Sordello, R., Ouédraogo, D. Y., Thierry, C., Marx, G., Froidevaux, J., Schatz, B., Kerbirou, C., Gourdain, P., & Reyjol, Y.** (2023). Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. *Environmental Evidence*, 12(1), 25.

- Lec'Hvien, A., Bienvenu, L., Isselin-Nondedeu, F., Bischoff, A., Gros, R., & Schatz, B.** (2025). Effects of solar panels and management on pollinators and their interactions with plants in Southern French solar parks. *Biological Conservation*, 307, 111209.
- Légifrance.** (2023). *Loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables.* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047294244>
- LPO.** (2022). *Photovoltaïque au sol : Impacts sur la biodiversité et mesures d'atténuation.* Ligue pour la Protection des Oiseaux.
- Marx, G.** (2022). *Centrales photovoltaïques et biodiversité : Synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer* [rapport]. Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO).
- Ministère de la Transition écologique.** (2023). *Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).* <https://www.ecologie.gouv.fr/programmation-pluriannuelle-lenergie-ppe>
- Oise.gouv.fr.** (2024). *Photovoltaïque et parkings : obligations d'équipement en ombrières.* <https://www.oise.gouv.fr/>
- Stephen, M.** (2023). Reconciling renewable energy deployment and biodiversity conservation. *Nature Sustainability*, 6(1), 14–19.
- Szoldatits, K. E., Walston, L. J., Hartmann, H. M., Fox, L., Stanger, M. E., Steele, S. E., Hogstrom, I. & Macknick, J.** (2025). Bat activity at ecovoltaic solar energy developments in the Midwestern United States. *Global Ecology and Conservation*, e03864.
- UNFCCC.** (2015). *Paris Agreement.* United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Walston, L. J., Hartmann, H. M., Fox, L., Stanger, M. E., Steele, S. E., Narváez, N. R., Szoldatits, K. E., Hogstrom, I. & Macknick, J.** (2025). Ecovoltaic solar energy development can promote grassland bird communities. *Journal of Applied Ecology*, 00, 1–14.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SÉLECTIONNÉES POUR LA REVUE

- Abdul Rahman, N. A., Firtha, G., Szabadi, K. L., Jones, G., & Zsebők, S.** (2024). Mitigating the deceptive effects of smooth surfaces: subtle surface modifications can eliminate maladaptive drinking attempts by bats. *Animal Conservation*, 27(6), 788-801.
- Black, T. V., & Robertson, B. A.** (2020). How to disguise evolutionary traps created by solar panels. *Journal of Insect Conservation*, 24(2), 241-247.
- Biesmeijer, K., van Kolschoten, L., Wit, F., & Moens, M.** (2020). The effects of solar parks on plants and pollinators: The case of Shell Moerdijk. Naturalis Biodiversity Center.
- Copping, J. P., Waite, C. E., Balmford, A., Bradbury, R. B., Field, R. H., Morris, I., & Finch, T.** (2025). Solar farm management influences breeding bird responses in an arable-dominated landscape. *Bird Study*, 1-6.
- Fritz, B., Horváth, G., Hünig, R., Pereszlényi, Á., Egri, Á., Guttman, M., Schneider, M., Lemmer, U., Kriska, G. & Gomard, G.** (2020). Bioreplicated coatings for photovoltaic solar panels nearly eliminate light pollution that harms polarotactic insects. *PLoS One*, 15(12), e0243296.
- Itoh, N., Nakajima, C., Takeuchi, T., Ohta, F., & Kanno, J.** (2018). Inspection of the effect of the crow deterrent system using camera system for long-term monitoring of bird flight trajectories at photovoltaic power plant. *IFAC-PapersOnLine*, 51(28), 339-343.
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., & Robertson, B.** (2010). Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology*, 24(6), 1644-1653.
- Lambert, Q., Bischoff, A., & Gros, R.** (2024). Effects of habitat restoration and solar panels on soil properties and functions in solar parks. *Applied Soil Ecology*, 203, 105614.
- Martin, J. C.** (2022). Ecosystem Enriching and Efficient Solar Energy Facilities: Exploring the Effects of Pollinator-Friendly Solar Facilities on Ecological Function and Solar Panel Efficiency. The College of William and Mary.
- Menta, C., Remelli, S., Andreoni, M., Gatti, F., & Sergi, V.** (2023). Can grasslands in photovoltaic parks play a role in conserving soil arthropod biodiversity? *Life*, 13(7), 1536.

Suuronen, A., Muñoz-Escobar, C., Lensu, A., Kuitunen, M., Guajardo Celis, N., Espinoza Astudillo, P., Ferrú, Taucare-Ríos, A., Miranda, M., & Kukkonen, J. V. (2017). The influence of solar power plants on microclimatic conditions and the biotic community in Chilean desert environments. *Environmental management*, 60(4), 630-642.

Száz, D., Mihályi, D., Farkas, A., Egri, Á., Barta, A., Kriska, G., Robertson, B. & Horváth, G. (2016). Polarized light pollution of matte solar panels: anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation*, 20(4), 663-675.

Walston, L. J., Hartmann, H. M., Fox, L., Macknick, J., McCall, J., Janski, J., & Jenkins, L. (2024). If you build it, will they come? Insect community responses to habitat establishment at solar energy facilities in Minnesota, USA. *Environmental Research Letters*, 19(1), 014053.

ANNEXE I : MÉTHODES

Recherche d'articles

Mots-clés et Équations de recherche

Conformément à nos objectifs, nous avons combiné tous les termes relatifs au photovoltaïque au sol, à la faune, aux solutions d'atténuation, et aux résultats. Deux équations de recherche ont été définies : l'une pour la faune volante, l'autre pour la faune terrestre. Les équations de recherche finales ont été construites dans la base de données bibliographique « *Web of Science core collection* » (WOSCC), comme suit :

TS= ((insect\$ OR invertebrate\$ OR butterfly* OR moth\$ OR lepidoptera OR dragonfl* OR odonata OR avifauna OR aves OR avian OR bird\$ OR passerine\$ OR raptor\$ OR vulture\$ OR owl\$ OR piciforme\$ OR columbiforme\$ OR passeriforme\$ OR falconiforme\$ OR bat\$ OR chiroptera) AND (photovoltaic\$ OR "solar energ*" OR "solar farm\$" OR "solar panel\$" OR "solar plant\$" OR "solar park\$" OR "solar array\$" OR "solar power" OR "solar installation\$" OR conservoltaic OR agrivoltaic) AND (evaluat* OR solution\$ OR mitigat* OR assess* OR option\$ OR measur* OR priorit* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR adapt* OR interven* OR action\$ OR manag* OR protect* OR manipul* OR counteract* OR removal OR engineer* OR plan* OR strateg* OR offset* OR "flight divert*" OR "attract* remov*" OR "m?cro-siting" OR deterr* OR "habitat restoration\$" OR "habitat enhancement\$" OR "habitat creation\$" OR "ecological engineering" OR "site selection\$" OR "displacement\$" OR "buffer zone\$") AND (impact* OR effect* OR collision\$ OR behavio*r OR aversion\$ OR repulsion\$ OR disturb* OR mortalit* OR fatalit* OR carcass* OR "glass reflection" OR "reflective surface\$" OR "light pollution" OR "population size\$" OR "population densit*" OR abundance OR occurrence OR "habitat loss*" OR "habitat fragmentation\$" OR "habitat degradation\$" OR "breeding success" OR nesting OR reproduct* OR "site fidelit*" OR richness OR composition OR surviv*))

TS= ((reptiles\$ OR amphibian\$ OR frog\$ OR arthropod\$ OR arachnid\$ OR gastropod\$ OR mammal\$ OR rodent\$ OR lagomorph\$ OR hedgehog\$ OR ungulate\$ OR carnivore\$ OR canid\$ OR felid\$) AND (photovoltaic\$ OR "solar energ*" OR "solar farm\$" OR "solar panel\$" OR "solar plant\$" OR "solar park\$" OR "solar array\$" OR "solar power" OR "solar installation\$" OR conservoltaic OR agrivoltaic) AND (evaluat* OR solution\$ OR mitigat* OR assess* OR option\$ OR measur* OR priorit* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR adapt* OR interven* OR action\$ OR manag* OR protect* OR manipul* OR counteract* OR removal OR engineer* OR plan* OR strateg* OR offset* OR "flight divert*" OR "attract* remov*" OR "m?cro-siting" OR deterr* OR "habitat restoration\$" OR "habitat enhancement\$" OR "habitat creation\$" OR "ecological engineering" OR "site selection\$" OR "displacement\$" OR "buffer zone\$") AND (impact* OR effect* OR collision\$ OR behavio*r OR aversion\$ OR repulsion\$ OR disturb* OR mortalit* OR fatalit* OR carcass* OR "glass reflection" OR "reflective surface\$" OR "light pollution" OR "population size\$" OR "population densit*" OR abundance OR occurrence OR "habitat loss*" OR "habitat fragmentation\$" OR "habitat degradation\$" OR "breeding success" OR nesting OR reproduct* OR "site fidelit*" OR richness OR composition OR surviv*))

Toutes les équations de recherches utilisées pour chacune des requêtes effectuées (y compris via les moteurs de recherche, les bases de données de publications, et les sites web spécialisés) sont fournies dans le fichier additionnel ANNEXE II.

Raccourcis et limitations

Seuls les termes en anglais ont été inclus dans les requêtes de littérature. Cependant, les publications retenues étaient soit en anglais soit en français, en accord avec les compétences linguistiques de l'équipe. Aucune restriction de date ni de zone géographique n'a été appliquée aux recherches dans les bases de données.

Sources de littérature

Une seule base de données de publications a été consultée en utilisant les équations de recherche décrites ci-dessus : la base de données « Web Of Science Core Collection » (WOSCC) accessible aux auteurs via l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). La recherche a porté sur les index de citations suivants : SCI- EXPANDED, SSCI, AHCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, and IC.

Quatre requêtes complémentaires ont été effectuées sur :

- Google Scholar (<https://scholar.google.com/>). Nous avons utilisé le programme logiciel « Publish or perish (version 6) » pour extraire les citations. En raison des restrictions du moteur de recherche concernant le nombre maximum de caractères, les équations de recherche ont été simplifiées. De plus, nous avons priorisé la littérature académique, limitant ainsi chaque sous-recherche aux 50 premiers résultats, car il a été démontré que la pertinence des documents identifiés diminue rapidement (Haddaway et al., 2015).
- Bielefeld Academic Search Engine (BASE) (<https://www.base-search.net>). De même que pour Google Scholar, étant donné les limitations en termes de nombre maximum de caractères, les équations de recherche ont été simplifiées.

Nous avons effectué une recherche manuelle de documentations techniques pertinentes sur les cinq sites internet suivants :

- The International Renewable Energy Agency (IRENA): <https://www.irena.org/>
- The International Energy Agency (IEA): <https://www.iea.org/>
- The US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-and-renewable-energy>
- La Librairie « Énergies renouvelables, réseaux et stockage », Agence de la Transition Écologique (ADEME) <https://librairie.ademe.fr/2889-energies-renouvelables-reseaux-et-stockage>
- La page « Documentation et rapports », France Renouvelables : <https://www.france-renouvelables.fr/documentation-et-rapports/>

Anticipant un nombre final d'articles relativement faible dans notre corpus, nous avons complété la recherche automatisée par une identification manuelle de références issues de trois revues systématiques récentes :

- Blaydes, H., Potts, S. G., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2021). Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111065.
- Gómez-Catasús, J., Morales, M. B., Giral, D., del Portillo, D. G., Manzano-Rubio, R., Solé-Bujalance, L., Sardà-Palomera, F., Traba, J., & Bota, G. (2024). Solar photovoltaic energy development and biodiversity conservation: Current knowledge and research gaps. *Conservation Letters*, 17(4), e13025.
- Lafitte, A., Sordello, R., Ouédraogo, D. Y., Thierry, C., Marx, G., Froidevaux, J., Schatz B., Kerbiriou C., Gourdain P. & Reyjol, Y. (2023). Existing evidence on the effects of photovoltaic

panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. *Environmental Evidence*, 12(1), 25.

Aussi, une exploration ciblée de la littérature grise (brochures, rapports techniques, guides et documents institutionnels) a été conduite afin d'identifier d'éventuelles sources scientifiques ou retours d'expérience (REX) relatifs à des mesures d'atténuation des impacts du photovoltaïque au sol sur la biodiversité. Plusieurs documents francophones récents ont ainsi été consultés :

- Kraaijenbrink, M., & Dixon, R. (2024). Photovoltaïque & biodiversité : Concilier accélération et préservation [Brochure]. France Renouvelables.

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

- Bodez, J., Bourgogne, P., Cerqueus, D., Dupin, A., Renier, S., Neveux, G., Fraix, J., & Ziadi, C. (2023). Programme « Photovoltaïque et Biodiversité » : Identification des questions scientifiques à adresser et estimation des moyens pour y répondre. 51 p.

- Agence de la transition écologique (ADEME) & Office français de la biodiversité (OFB). (2023). Photovoltaïque, sol et biodiversité : Enjeux et bonnes pratiques [Brochure]. ADEME Éditions.

- UICN Comité français. (2023). Améliorer la prise en compte de la biodiversité dans la planification et la conception des projets éoliens et photovoltaïques : retours d'expériences et identification de bonnes pratiques en France métropolitaine.

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

Ces documents, majoritairement destinés à la sensibilisation ou à la diffusion de bonnes pratiques, visaient à rassembler des connaissances générales et des retours d'expérience. Dans certains cas, des exemples de sites y étaient mentionnés ; toutefois, la description des méthodes et des résultats était généralement insuffisante pour inclusion (absence de données chiffrées, pas d'indicateurs quantitatifs, effets rapportés pour un ensemble de mesures combinées sans possibilité d'attribuer les résultats à une mesure donnée).

Une recherche complémentaire a été menée pour tenter d'identifier des rapports techniques ou études de suivi associés à ces exemples. Toutefois, aucun rapport accessible et suffisamment documenté n'a été retrouvé dans le délai imparti à la réalisation de notre revue.

Estimation de l'exhaustivité de la recherche

Pour garantir la pertinence de la recherche, et un certain niveau d'exhaustivité, un processus itératif a été mené pour 'calibrer' l'équation de recherche par rapport à une liste prédéterminée de 6 articles de référence (ci-après dénommé « liste test »). Cette « liste test » était composée d'articles de journaux scientifiques pertinents, pré-identifiés par l'équipe. Nous avons testé différentes combinaisons de mots-clés et vérifié que les articles de référence étaient retrouvés. Si des articles de la « liste test » manquaient, des mots-clés étaient ajoutés pour améliorer sa sensibilité jusqu'à ce que tous les articles soient retrouvés.

Critères d'éligibilité des articles et de sélection des études

Deux étapes de tri ont été réalisées : 1) un tri sur « titres et résumés », et 2) un tri sur « résumés ». Nous avons examiné la pertinence des articles collectés à l'aide d'un ensemble de critères d'inclusion et d'exclusion (Tableau 2). Lors du tri sur titres et résumés, en cas de doute sur la présence d'un critère d'inclusion (ou si l'information était absente), l'article en question était automatiquement passé à l'étape suivante de sélection. Les documents récupérés par recherche manuelle sur les sites internet d'organisations ou dans les revues systématiques ont été évalués uniquement sur la base du texte intégral. Pour assurer la cohérence et la reproductibilité des décisions, la conformité aux critères

d'éligibilité a été comparée entre plusieurs évaluateurs à l'aide d'un test de Kappa au début de chaque étape de tri (ANNEXE III).

Tableau 2. Liste des critères d'éligibilité utilisés pour la sélection sur titres / résumés et sur textes intégraux

Critères PICO		Description	Définition(s)
Critères d'inclusion	Populations éligibles	Tous les vertébrés et invertébrés (i.e toutes les espèces de petits et grands mammifères terrestres et volants, d'oiseaux, d'insectes terrestres et volants, de reptiles, d'amphibien, de gastéropodes) affectés par les parcs photovoltaïques au sol.	Espèces sauvages – i.e., espèces en liberté présentes en milieux naturels (in-situ) ou espèces sauvages utilisées en laboratoires (ex-situ). Toutes espèces non domestiquées.
	Interventions éligibles	Solutions d'atténuation pour éviter, minimiser et compenser les impacts des parcs photovoltaïques au sol sur la biodiversité animale.	Solutions d'atténuation visant à limiter les impacts négatifs des parcs photovoltaïques au sol sur la biodiversité animale.
	Comparateurs éligibles	Études qui réalisent des comparaisons spatiales ou temporelles.	Schémas d'étude de type « Avant-Après », « Contrôle-Intervention », « Avant-Après-Contrôle-Intervention ».
	Effets et mesures éligibles	Tous les mesures et résultats pertinents démontrant un effet d'une solution d'atténuation d'impacts.	Mesures sur: des variations de taille ou de densité de population (e.g. via l'abondance, la richesse spécifique, les indices d'activité); la mortalité ou les collisions (e.g. comptages de carcasses, fréquence d'impacts); des changements comportementaux (e.g. évitement du site, altération de l'activité de vol, modification des trajets ou de l'occupation spatiale); des réponses fonctionnelles ou physiologiques (e.g. succès de reproduction, stress, alimentation); des effets sur la connectivité ou l'utilisation des habitats (e.g. traversées, fréquentation des corridors, occupation d'habitats compensatoires).
Critères d'exclusion	Populations inéligibles	Toute la flore	Les espèces végétales ne sont pas inclus dans cette revue.

	Interventions inéligibles	Solutions non axées sur l'évitement, la réduction ou la compensation des effets négatifs.	Toute intervention qui n'est pas destinée à minimiser les impacts des parcs photovoltaïques au sol sur les populations d'espèces, que ce soit par des actions mises en œuvre directement sur les parcs ou par des mesures prises en amont, en aval ou en parallèle de leur exploitation.
	Résultats inéligibles	Études qui n'étudient ni l'abondance, ni la diversité des espèces, ni la mortalité, ni les collisions, ni le comportement, etc.	Tous résultats non pertinents qui ne permettraient pas d'interpréter la réduction de l'abondance, la diversité, la mortalité, des collisions, de l'évitement, etc.

Analyse critique : évaluation de la validité des études

Nous avons effectué une analyse critique pour évaluer à la fois la validité interne (i.e., le risque de biais⁷ lié à différents facteurs) et la validité externe (i.e., la pertinence et l'aspect généralisable - Haddaway et al., 2020). Une série de critères a été prédéfinie en se basant sur l'Outil d'évaluation critique (« Critical Appraisal Tool ») fournies par la CEE. Chaque étude a été classée pour chaque critère comme étant à « faible », « moyen » ou « fort » risque de biais. La pondération du classement pour chaque critère (« faible » = 1, « moyen » = 0.5, « fort » = 0) a permis de calculer un coefficient de risque de biais global permettant de classer une étude comme à « très faible », « faible », « moyen », « fort » ou « très fort » risque de biais global. Pour chaque article de recherche, nous avons évalué sa robustesse, notamment en termes de méthode de sélection du site, de prise en compte de la pseudoréplication, de méthode d'échantillonnage et d'analyses (cf. Annexe IV pour plus de détails). Lorsqu'il y avait un manque important d'informations empêchant de porter un jugement objectif sur les critères donnés, nous l'avons automatiquement qualifié d'un risque de biais « élevé ».











Synthèse narrative

Pour structurer l'analyse et visualiser les tendances dans la littérature, une extraction standardisée des données a été réalisée à partir des documents retenus. Chaque référence bibliographique incluse a été examinée pour identifier une ou plusieurs études de cas distinctes. Conformément aux méthodes de cartographie (cf., James et al., 2016), une étude de cas représentait un résultat unique associé à une intervention unique (c'est à dire une solution d'atténuation) sur une population unique (c'est à dire une seule espèce ou groupe d'espèces). Dans les cas où plus d'une étude de cas était extraite d'un même article, chacune a été enregistrée comme une entrée unique dans la base de données Excel avec ses métadonnées correspondantes. En croisant les variables clés des métadonnées (par exemple, groupes biologiques x solutions x résultats), des figures et des tableaux de synthèse ont été produits pour identifier les lacunes de connaissances (c'est-à-dire les sous-thèmes nécessitant des recherches primaires supplémentaires) et les clusters de connaissances (c'est-à-dire les sous-thèmes suffisamment couverts par les études existantes pour permettre une synthèse quantitative). Ainsi, la répartition et la fréquence des études sur les solutions d'atténuation ont été présentées, par exemple, par des cartes de chaleurs.

⁷ Un **risque de biais** se réfère à la possibilité que certaines caractéristiques d'une étude influencent les résultats de manière systématique, entraînant des conclusions qui ne reflètent pas précisément la réalité. Cela peut résulter de méthodes de collecte de données, de sélection de sites d'études, ou d'analyse qui ne sont pas complètement neutres ou rigoureuses. Le risque de biais peut ainsi compromettre la validité et la fiabilité des résultats d'une recherche.

Après la production des figures visualisant les métadonnées d'intérêt, un travail de rédaction a été entrepris afin de restituer, pour chaque type de mesure, un résumé individualisé des études disponibles, incluant leurs principaux résultats et éléments contextuels. Chaque section se conclut par une brève synthèse transversale permettant de dégager les tendances observées. Cette étape permet de contextualiser les résultats quantitatifs issus des figures en apportant un éclairage qualitatif sur le contenu des études, leurs méthodes, leurs limites et leurs apports spécifiques. Elle contribue à mieux comprendre les conditions d'efficacité des mesures, les éventuels effets contrastés selon les contextes, ainsi que les points de convergence ou de divergence entre les sources. Cette section est suivie par une discussion transversale des résultats, visant à mettre en perspective les principales tendances observées, les lacunes identifiées et les biais potentiels du corpus. Elle explore également les implications de ces constats pour l'orientation des futures recherches et l'élaboration de recommandations opérationnelles.

Tableau 3. Les différents types de comparateurs utilisés lors de l'extraction des métadonnées.
Créé à partir d'icônes gratuites fournies par Vecteezy.

Type d'étude de comparaison	Exemple illustré		Exemples d'études comparatives
	Groupe contrôle	Groupe intervention	
Amélioration habitat – mesures en faveur de la biodiversité			<ul style="list-style-type: none"> • Implantation de prairies fleuries • Ajout de haies, de bosquets, d'arbres, ... • Restauration de sols dégradés
Gestion de la végétation – pâturage			<ul style="list-style-type: none"> • Pâturage par moutons et ânes
Traitements surfaciques des panneaux visant à limiter l'effet « miroir/lac »			<ul style="list-style-type: none"> • Ajout de différents motifs de grillage • Ajout de verres antireflets mats • Ajout de revêtements polymères microtexturés
Modification de la conception des infrastructures			<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux à suivi solaire
Dissuasion acoustique			<ul style="list-style-type: none"> • Emission de sons durant la journée

ANNEXE II : DÉTAILS DES ÉQUATIONS DE RECHERCHE UTILISÉES POUR LES REQUÊTES

Équations de recherche complètes, utilisée avec Web Of Science core collection (WOSCC):

• Équation « faune volante »:

TS= ((insect\$ OR invertebrate\$ OR butterfly* OR moth\$ OR lepidoptera OR dragonfl* OR odonata OR avifauna OR aves OR avian OR bird\$ OR passerine\$ OR raptor\$ OR vulture\$ OR owl\$ OR piciforme\$ OR columbiforme\$ OR passeriforme\$ OR falconiforme\$ OR bat\$ OR chiroptera) AND (photovoltaic\$ OR "solar energ*" OR "solar farm\$" OR "solar panel\$" OR "solar plant\$" OR "solar park\$" OR "solar array\$" OR "solar power" OR "solar installation\$" OR conservoltaic OR agrivoltaic) AND (evaluat* OR solution\$ OR mitigat* OR assess* OR option\$ OR measur* OR priorit* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR adapt* OR interven* OR action\$ OR manag* OR protect* OR manipul* OR counteract* OR removal OR engineer* OR plan* OR strateg* OR offset* OR "flight divert*" OR "attract* remov*" OR "m?cro-siting" OR deterr* OR "habitat restoration\$" OR "habitat enhancement\$" OR "habitat creation\$" OR "ecological engineering" OR "site selection\$" OR "displacement\$" OR "buffer zone\$") AND (impact* OR effect* OR collision\$ OR behavio*r OR aversion\$ OR repulsion\$ OR disturb* OR mortalit* OR fatalit* OR carcass* OR "glass reflection" OR "reflective surface\$" OR "light pollution" OR "population size\$" OR "population densit*" OR abundance OR occurrence OR "habitat loss*" OR "habitat fragmentation\$" OR "habitat degradation\$" OR "breeding success" OR nesting OR reproduct* OR "site fidelit*" OR richness OR composition OR surviv*))

• Équation « faune terrestre » :

TS= ((reptiles\$ OR amphibian\$ OR frog\$ OR arthropod\$ OR arachnid\$ OR gastropod\$ OR mammal\$ OR rodent\$ OR lagomorph\$ OR hedgehog\$ OR ungulate\$ OR carnivore\$ OR canid\$ OR felid\$) AND (photovoltaic\$ OR "solar energ*" OR "solar farm\$" OR "solar panel\$" OR "solar plant\$" OR "solar park\$" OR "solar array\$" OR "solar power" OR "solar installation\$" OR conservoltaic OR agrivoltaic) AND (evaluat* OR solution\$ OR mitigat* OR assess* OR option\$ OR measur* OR priorit* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR adapt* OR interven* OR action\$ OR manag* OR protect* OR manipul* OR counteract* OR removal OR engineer* OR plan* OR strateg* OR offset* OR "flight divert*" OR "attract* remov*" OR "m?cro-siting" OR deterr* OR "habitat restoration\$" OR "habitat enhancement\$" OR "habitat creation\$" OR "ecological engineering" OR "site selection\$" OR "displacement\$" OR "buffer zone\$") AND (impact* OR effect* OR collision\$ OR behavio*r OR aversion\$ OR repulsion\$ OR disturb* OR mortalit* OR fatalit* OR carcass* OR "glass reflection" OR "reflective surface\$" OR "light pollution" OR "population size\$" OR "population densit*" OR abundance OR occurrence OR "habitat loss*" OR "habitat fragmentation\$" OR "habitat degradation\$" OR "breeding success" OR nesting OR reproduct* OR "site fidelit*" OR richness OR composition OR surviv*))

Équation de recherche simplifiée dérivée des équations complètes initiales, utilisée avec Bielefeld Academic Search Engine (BASE) :

• Équation « faune volante »:

(insect OR invertebrate OR bird OR passerine OR raptor OR waterbird OR bat OR chiroptera) AND (photovoltaic OR "solar farm" OR "solar energy" OR "solar panel" OR "solar power" OR agrivoltaic) AND (deterrent OR strategy OR management OR intervention OR evaluation OR solution OR mitigation OR assessment OR measure OR reduce OR avoid OR compensate OR minimize OR offset) AND (impact OR effect OR collision OR behaviour OR aversion OR mortality OR "glass reflection" OR "light pollution" OR abundance OR "habitat loss" OR reproduction OR survival)

• Équation « faune terrestre »:

(reptile OR amphibian OR frog OR arthropod OR arachnid OR gastropod OR mammal OR rodent OR lagomorph OR hedgehog OR ungulate OR carnivore OR canid OR felid)

AND (photovoltaic OR "solar farm" OR "solar energy" OR "solar panel" OR "solar power" OR agrivoltaic)

AND (deterrent OR strategy OR management OR intervention OR evaluation OR solution OR mitigation OR assessment OR measure OR reduce OR avoid OR compensate OR minimize OR offset) AND (impact OR effect OR collision OR behaviour OR aversion OR mortality OR "glass reflection" OR "light pollution" OR abundance OR "habitat loss" OR reproduction OR survival)

Équations de recherche simplifiées et découpées, dérivées des équations complètes initiales, utilisées avec Google Scholar :

Équations « faune volante »:

• (insect OR invertebrate) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (impact* OR effect* OR collision OR behavio*r OR aversion OR mortalit*)

• (insect OR invertebrate) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND ("glass reflection" OR "light pollution" OR abundance OR "habitat loss*")

• (insect OR invertebrate) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (reproduct* OR surviv*)

• (bird OR passerine OR raptor OR waterbird) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (impact* OR effect* OR collision OR behavio*r OR aversion)

• (bird OR passerine OR raptor OR waterbird) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (mortalit* OR "glass reflection" OR "light pollution")

• (bird OR passerine OR raptor OR waterbird) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (abundance OR "habitat loss*" OR reproduct* OR surviv*)

• (bat OR chiroptera) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (impact* OR effect* OR collision OR behavio*r OR aversion OR mortalit*)

• (bat OR chiroptera) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND ("glass reflection" OR "light pollution" OR abundance OR "habitat loss*" OR reproduct*)

- (bat OR chiroptera) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (surviv*)

Équation « faune terrestre »:

- (reptile OR amphibian OR mammal) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (impact* OR effect* OR collision OR behavior OR aversion)
- (reptile OR amphibian OR mammal) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (mortalit* OR "glass reflection" OR "light pollution")
- (reptile OR amphibian OR mammal) AND (photovoltaic OR "solar energ*" OR "solar panel" OR "solar power") AND (evaluat* OR solution OR mitigat* OR assess* OR measur* OR reduc* OR avoid* OR compensat* OR minimiz* OR offset*) AND (abundance OR "habitat loss*" OR reproduct* OR surviv*)

ANNEXE III : ÉVALUATION DE LA CONFORMITÉ AUX CRITÈRES D'ÉLIGIBILITÉ PAR LES TESTS KAPPA DE RANDOLPH

Test Kappa de Randolph appliqué conjointement sur les titres et résumés :

- Deux évaluateurs ont réalisé le test sur une liste de 193 références bibliographiques, après un premier test de calibration portant également sur 10 références afin d'harmoniser les décisions de sélection. Le Kappa de Randolph a été choisi, car il est plus adapté aux analyses avec deux évaluateurs, contrairement au Kappa de Fleiss, conçu pour plusieurs évaluateurs.
- Résultats : *Kappa = 0,95*
 z = 41,46
 p-value < 0,001

Le résultat du test de Kappa révèle une forte concordance entre les évaluateurs à chaque étape de la sélection des références bibliographiques. Que ce soit pour le tri sur les titres et résumés (Kappa = 0,72) ou sur les textes entiers (Kappa = 0.80), les valeurs de Kappa indiquent une cohérence significative et reproductible dans les décisions des évaluateurs. Cette cohérence garantit la fiabilité, la reproductibilité et la robustesse de l'évaluation des critères d'éligibilité tout au long du processus de sélection des références bibliographiques.

Pour l'étape de sélection sur texte intégral, aucun second test d'accord inter-évaluateurs (kappa) n'a été réalisé, en raison de contraintes de calendrier et de temps, ainsi que de l'indisponibilité du second évaluateur au moment opportun. Mettre en place une double sélection à ce stade aurait entraîné un délai supplémentaire incompatible avec les échéances du projet. Ce choix est néanmoins étayé par :

- l'accord très élevé observé lors du tri sur titre et résumé (kappa de Randolph = 0,948), indiquant une application cohérente des critères d'inclusion/exclusion,
- l'expérience acquise lors de deux revues systématiques antérieures sur des thématiques proches, dans les contextes d'éolien terrestre et éolien marin, renforçant la confiance dans la rigueur du tri sur texte entier.

ANNEXE IV : CRITÈRES D'ÉVALUATION DES RISQUES DE BIAIS

Validité externe :

- L'exposition/ intervention a-t-elle lieu in-situ (sur site équipé de panneaux photovoltaïques) ?

Facteurs confondants :

- Existe-t-il de potentiels facteurs confondants pouvant influencer l'intervention et/ou le résultat ? Si oui, les auteurs les ont-ils identifiés, puis analysé/contrôlé, et les ont-ils pris en compte dans leur analyse ?

Sélection post-exposition :

- La sélection des sujets ou des zones après l'intervention ou l'exposition était-elle aléatoire ou systématique, et pourrait-on supposer l'interchangeabilité entre les groupes avant et après ?

Détection :

- La mesure des résultats pourrait-elle être influencée par la connaissance de l'exposition, de l'intervention, des sujets ou des zones, ou par le désir d'un certain résultat ?

Évaluation des résultats :

- Est-il probable qu'il y ait des erreurs ou des méthodes inappropriées dans les analyses statistiques appliquées (y compris : les hypothèses des statistiques inférentielles appliquées ont-elles été transgressées) ?

Conflits d'intérêts :

- Les auteurs précisent-ils les financements et les potentiels conflits d'intérêt ?