



Agir pour
la biodiversité

GUIDE POUR UNE MEILLEURE
INTÉGRATION DES ENJEUX CHIROPTÈRES
SUR LES CENTRALES SOLAIRES
PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL

PROJET PV-CHIROS



Credits photo - ©Moirenc - Matisse Moirenc

ÉDITO



Face aux changements climatiques qui s'accélèrent, se libérer de notre dépendance aux énergies fossiles est une priorité et passera par des efforts de sobriété incontournables mais également par la décarbonation de la production d'énergie.

Considérées comme une composante essentielle de cette production, les centrales solaires photovoltaïques (CSP) au sol doivent participer à la décarbonation de notre mix énergétique mais pas à n'importe quel prix.

Nous faisons aujourd'hui le constat que le manque de connaissances scientifiques des interactions entre ces installations et les chauves-souris, limite la compréhension fine des enjeux dans la conception des projets, et de fait, l'évaluation précise de leurs impacts sur ce cortège animal. Or, de celle-ci dépend l'efficacité des mesures d'évitement et de réduction des incidences.

Face à ce constat, c'est avec la volonté partagée de "mieux savoir pour mieux concevoir" que la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et la Ligue pour la Protection des Oiseaux Auvergne Rhône-Alpes (LPO AuRA) ont ensemble décidé d'engager le projet de recherche « PV-Chiros », auquel se sont associés l'Office Français pour la biodiversité (OFB) et le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Lancé en 2022, l'objectif du projet était double : mieux comprendre les effets des CSP au sol sur les chiroptères et produire des recommandations pour une meilleure prise en compte de ces espèces tout au long du cycle de vie d'une centrale, de la conception à l'exploitation en passant par la recherche de foncier, ou la construction.

C'est l'objet de ce guide technique dont l'élaboration s'est appuyée sur une démarche collective chère aux quatre partenaires du projet PV-Chiros. Riche des différents points de vue exprimés lors de nombreux temps de travail qui ont rassemblé services de l'Etat, filière professionnelle des énergies renouvelables, associations naturalistes et bureaux d'études, ce guide a l'ambition d'éclairer leurs futures actions. Il est organisé en deux sections, l'une présentant une synthèse des connaissances sur les interactions entre chiroptères et CSP (dont les résultats du projet PV-Chiros) et l'autre portant sur les recommandations identifiées par le projet.

Parce que la préservation de la biodiversité et la transformation de nos sources d'énergie sont indissociables, la coopération de tous les acteurs est déterminante. Ces ambitions partagées ont nourri le projet "PV-Chiros".

CNR – LPO AuRA – OFB – MNHN

SOMMAIRE



Crédits photo : ©Yoann Peyrard - Noctule commune

PARTIE A : MIEUX COMPRENDRE LE LIEN ENTRE CHIROPTÈRES ET CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

- 1 Les essentiels à savoir sur les chiroptères avant d'envisager un projet de centrale photovoltaïque au sol — P4
- 2 Les incidences potentielles des centrales photovoltaïques sur les chiroptères — P8
- 3 Les centrales photovoltaïques au sol modifient l'activité des chiroptères — P11
- 4 Les centrales photovoltaïques au sol modifient le comportement de vol des chiroptères insectivores et réduisent la fonctionnalité alimentaire de l'habitat — P21

PARTIE B : APPLIQUER CES CONNAISSANCES AUX PROJETS PHOTOVOLTAÏQUES

- 5 Comment inventorier un site concerné par un projet de centrale photovoltaïque — P28
- 6 Intégrer les enjeux chiroptères tout au long de la vie d'un projet photovoltaïque — P34

Bibliographie — P40



Crédits photo : ©CNR

PARTIE A : MIEUX COMPRENDRE LE LIEN ENTRE CHIROPTÈRES ET CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES



1 – LES ESSENTIELS À SAVOIR SUR LES CHIROPTÈRES AVANT D'ENVISAGER UN PROJET DE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE AU SOL

1 – LES CHIROPTÈRES, UN SUPER TAXON BIOINDICATEUR

L'évaluation de la qualité d'un habitat est un des objectifs des procédures d'instruction prévues au code de l'environnement. La forte valeur indicatrice des chiroptères en fait un taxon indispensable pour cela.

Les chiroptères montrent une longévité plus importante que d'autres groupes couramment étudiés, une forte survie des adultes et un **taux de reproduction faible** impliquant un taux de renouvellement des populations faible (voir schéma cycle de vie page 7). Ils sont donc **très sensibles à des pressions générant de la mortalité**, mais ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés pour étudier les réponses de la biodiversité à des pressions anthropiques récentes.



Le domaine vital des colonies de chiroptères peut être de plusieurs hectares, et va comprendre de nombreux terrains de chasse autour de la colonie (parfois distants de dizaines de kilomètres) leur permettant de sélectionner des habitats de qualité maximale à la fois pour la chasse et la reproduction. Le suivi des populations pourra alors refléter des pressions telles qu'un changement d'usage des sols, impactant la qualité des territoires de chasse ou de gîte.



Crédits photo : ©Yoann Peyrard
Oreillard roux

Les espèces de France métropolitaine sont toutes nocturnes et insectivores, avec un positionnement élevé dans la chaîne trophique ce qui permet d'obtenir des informations sur des groupes taxonomiques plus difficiles à étudier tels que les insectes nocturnes, qui représentent pourtant la majorité des insectes.

Enfin, la préservation des populations de chiroptères implique une bonne fonctionnalité des écosystèmes fréquentés ainsi que la conservation de couloirs de déplacements entre eux, que ce soit à l'échelle locale (entre sites de chasse et de gîte) ou nationale (migration saisonnière).

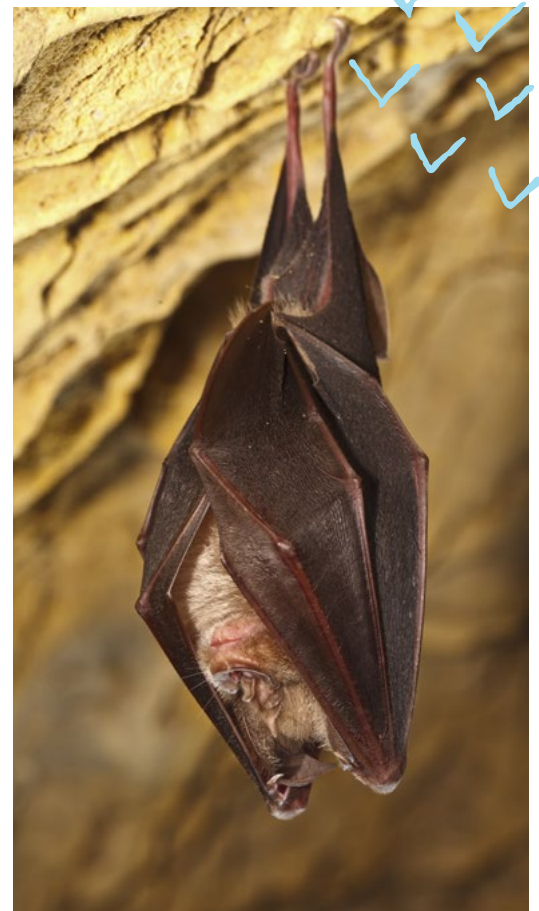
2 - L'ÉCHOLOCATION, UNE PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT À FINE ÉCHELLE

Les chiroptères analysent leur environnement grâce à leur système d'écholocation. Chaque espèce émet dans une gamme de fréquence qui lui est propre, et peut faire varier la structure du signal acoustique (fréquence, durée, intensité...) permettant notamment d'ajuster la portée de son cri ou la résolution de l'information reçue.

Les connaissances acquises ces deux dernières décennies sur les aspects relatifs à la bioacoustique des chiroptères ont amené à considérer des approches par guildes fonctionnelles et à définir des groupes acoustiques, reliant structure du signal acoustique et exigences écologiques. En Europe une approche assez classique considère trois grands groupes :

■ **Les short-range echolocators** (SRE, écholocation à courte portée) émettent des sons plus courts, de faible intensité, avec des fréquences souvent élevées et très modulées, qui ne permettent pas de recueillir des informations, via les échos, au-delà de quelques mètres, mais qui seront très informatives (détection d'insectes posés...). Ces espèces ont tendance à voler en milieux fermés (sous-bois), proche des éléments structurants du paysage et sont ainsi plus sensibles à la connectivité des habitats. Ce groupe rassemble les murins et oreillards ainsi que la Barbastelle d'Europe.

■ **La guilde des long-range echolocators** (LRE, écholocation à longue portée) inclut des espèces capables d'émettre des cris beaucoup plus longs, très puissants à basses fréquences, qui procurent alors aux individus une capacité de perception de l'environnement à longue distance mais moins fine. La traversée de milieux ouverts par ces espèces qui volent à haute altitude n'est alors pas un obstacle. Ce groupe est constitué par les noctules et sérotines ainsi que le Molosse de Cestoni.



Crédits photo : ©Yoann Peyrard
Petit Rhinolophe

Toutes les espèces situées entre les deux sont regroupées sous le terme de **mid-range echolocators** (MRE, écholocation à moyenne portée), avec principalement les pipistrelles, le Vespère de Savi et le Minioptère de Schreibers. Ce sont des espèces qui exploitent notamment les lisières et souvent relativement généralistes (c'est-à-dire qui se retrouvent dans une grande variété de milieux). Elles se sont adaptées à l'anthropisation des habitats.

Avec leur feuillet nasal distinctif, **les rhinolophes** accentuent l'effet Doppler de leurs écholocations, provoquant ainsi une signature acoustique bien particulière, les excluant des trois grandes guildes, mais se rapprochant du groupe des short-range echolocators d'un point de vue fonctionnel (distance de perceptions...).

3 - UN DÉCLIN, MALGRÉ DES MESURES DE PROTECTION FORTES

En France métropolitaine, les 36 espèces de chiroptères présentes sont protégées par les arrêtés ministériels des 9 juillet 1999 et 23 avril 2007.

Au niveau européen, la Directive Habitat-Faune-Flore renforce la protection des chiroptères, dont 12 espèces sont en Annexe II (espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation) et toutes en Annexe IV (espèces animales et végétales d'intérêt communautaire qui nécessitent une protection stricte). **À ce titre, la destruction ou le dérangement intentionnel d'individus ainsi que la destruction ou l'altération des sites de chasse, repos ou reproduction sont interdits.**

Compte tenu des menaces pesant sur ces espèces, **la France s'est dotée d'un Plan National d'Action (PNA) en faveur des chauves-souris.** Le troisième PNA pluriannuel (2016-2025) met l'accent sur la conservation de 19 espèces considérées comme prioritaires. Ce plan d'action est décliné à l'échelle régionale pour un meilleur ajustement aux enjeux locaux. Malgré ces efforts, le MNHN, au travers du protocole participatif Vigie-Chiro, a pu confirmer le déclin des populations de plusieurs espèces communes (Sérotine commune, Noctule commune, Pipistrelle commune, Pipistrelle de Nathusius, Bas et al., 2020)

La préservation des populations de chiroptères implique une bonne fonctionnalité des écosystèmes.
La destruction ou le dérangement intentionnel d'individus ainsi que la destruction ou l'altération des sites de chasse, repos ou reproduction sont interdits.

Au travers du protocole participatif Vigie-Chiro, le déclin des populations de plusieurs espèces communes a été confirmé.

CYCLE DE VIE DES CHIROS

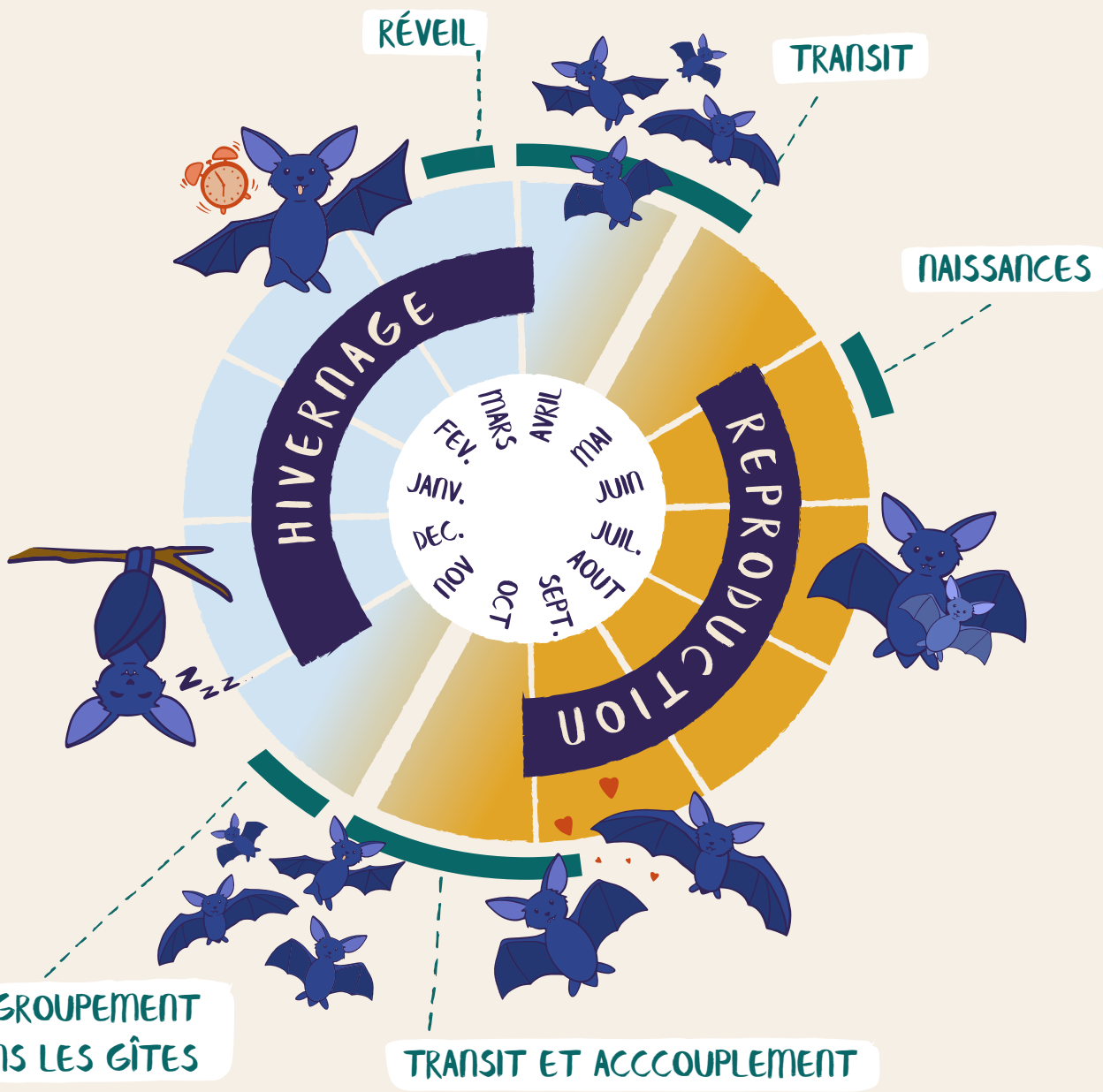


Illustration : ©Oriane Michaud



2 – INCIDENCES POTENTIELLES DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES SUR LES CHIROPTÈRES

Ce chapitre résume les incidences potentielles d'une centrale photovoltaïque sur les chiroptères, de la construction à l'exploitation, en se basant sur la littérature scientifique existante.

Les activités pendant la construction, telles que le défrichage, les fouilles archéologiques, les terrassements, et la création d'infrastructures, peuvent perturber les habitats des chiroptères. En phase d'exploitation, les panneaux solaires, les clôtures, la gestion de la végétation, les voies d'accès et les OLD - Obligations Légales de Débroussaillage - (si le projet est situé dans un secteur d'aléas pour les feux de forêt) peuvent également avoir des conséquences sur ce taxon. Pour une vue d'ensemble complète des impacts sur la biodiversité, vous pouvez consulter [la synthèse de la LPO France](#).

1 – PERTES D'HABITATS PAR DESTRUCTION OU MODIFICATION

De par l'installation de panneaux photovoltaïques, l'aménagement d'un parc constitue de fait une modification de l'occupation du sol.

De plus, la construction peut impliquer la **destruction potentielle de milieux boisés**, haies ou arbres gîtes, essentiels pour les chiroptères, car ils fournissent une protection contre les intempéries et la prédation diurne, un espace pour l'accouplement, les interactions sociales, ainsi qu'un abri pour les groupes de maternité et l'hibernation (Arthur and Lemaire, 2009).



Crédits photo : ©CNR - Camille Rollin

Pendant la construction des centrales photovoltaïques, **les éclairages nocturnes et le bruit** peuvent perturber l'activité des chiroptères. La présence de lumière artificielle la nuit peut diminuer leur activité (Voigt et al., 2021), tandis que le bruit du chantier peut restreindre leur attention et perturber leur recherche de nourriture (Bunkley et al., 2015).

Les centrales solaires pourraient constituer des sites de recherche de nourriture attrayants pour les espèces qui se sont adaptées aux paysages anthropisés. Cependant, une récente étude menée par Szabadi et al. (2023) a révélé que les espèces les plus courantes observées dans ces centrales, telles que le Vespère de Savi ou les pipistrelles de Kuhl et Nathusius, sont **moins fréquentes que dans les zones naturelles avoisinantes**. De plus, certaines espèces, notamment la Barbastelle d'Europe, la Pipistrelle pygmée et plusieurs espèces du genre murin, semblent être défavorisées dans ces paysages modifiés. **Ces environnements apparaissent moins propices pour elles que d'autres espaces ouverts**, comme l'ont également confirmé les observations de Tinsley et al. (2023). Leur étude a montré une **réduction de l'activité de six espèces** dans les centrales solaires par rapport à leur activité sur des sites témoins appariés, ce qui suggère une altération des conditions d'habitats dans les milieux naturels équipés de panneaux solaires, comparés aux milieux non équipés. **Ces recherches sont ainsi les premières à mettre en évidence une perte d'habitats pour les chiroptères, causée par les centrales photovoltaïques au sol.**

2 – FRAGMENTATION DU PAYSAGE

La création d'un parc solaire peut supprimer des éléments linéaires tels que des arbres et des haies, utilisés par les chiroptères pour se déplacer.

Cette perte de corridors de déplacement **isole les populations de chiroptères**, limitant leur mobilité et l'accès à d'autres habitats. Cette fragmentation entrave les échanges génétiques, réduit la diversité génétique, et augmente la vulnérabilité aux maladies et aux changements environnementaux, menaçant ainsi la survie à long terme des populations et des espèces (Razgour et al., 2014).

Autre source de fragmentation, les modifications de l'habitat par des centrales affectent les chiroptères malgré leur capacité à se déplacer. **La sensibilité des espèces dépend du coût énergétique de leurs déplacements**. En première approche, deux grandes catégories se distinguent : les espèces à grandes ailes (gilde SRE, coût important) et les espèces à ailes étroites (gilde LRE, faible coût).

Dans le cas des grandes ailes, les chiroptères sont moins mobiles en raison du coût énergétique élevé et pourraient avoir du mal à effectuer de longs déplacements au-dessus de zones inadaptées, comme les centrales solaires, avant de retrouver un espace favorable. Les espèces à ailes étroites se déplaçant avec moins d'efforts énergétiques (Bader et al., 2015) pourraient mieux s'adapter aux modifications du paysage causées par les centrales photovoltaïques et visiter plus facilement des zones favorables isolées.



3 – MODIFICATION DES RESSOURCES ALIMENTAIRES

La mise en place de centrales photovoltaïques engendre des perturbations du sol et des modifications des conditions environnementales,

notamment une réduction de la température, une augmentation de l'humidité, un ruissellement accru, ainsi qu'une acidification du sol (Armstrong et al., 2016). Ces changements dans le microclimat ont **des répercussions négatives sur la diversité des plantes**, entraînant une diminution significative de la richesse spécifique, de la biomasse végétale totale et de la photosynthèse, dans certaines conditions (Montag et al., 2016 ; Uldrijan et al., 2021).

Les modifications des cortèges végétaux dans les centrales photovoltaïques ont des **incidences sur les insectes**. La diminution de la production de nectar et de la détection des couleurs florales à cause de l'ombrage peuvent influencer la fréquentation des insectes (à noter que les études actuelles portent seulement sur les insectes diurnes et non sur les nocturnes dans ces espaces) (Graham et al., 2021; Grodsky et al., 2021). Dans le cas des parcs photovoltaïques, la diminution de l'abondance des insectes sur ces sites peut entraîner une perte de ressources alimentaires pour les chiroptères (Treitler et al., 2016).



Crédits photo : ©CNR - Camille Rolin

4 – PIÈGE SENSORIEL : CONFUSION, COLLISION

La recherche étudiant les impacts des panneaux solaires sur la perception de l'environnement par les chauves-souris est encore limitée.

Deux études menées par Greif et al. (2010, 2017) suggèrent que **les chauves-souris peuvent être désorientées par des surfaces lisses, qu'elles soient horizontales ou verticales, ce qui augmente le risque de collisions**. En extérieur, le degré de risque varie en fonction de l'inclinaison des panneaux, comme l'a montré une étude en Hongrie (Sándor Zsebők, pers.comm.). Cependant, il est important de noter que cette étude a été réalisée avec **des surfaces entièrement lisses**, ce qui diffère des panneaux solaires développés en France. En effet, les panneaux sont généralement rugueux, présentant des lignes blanches et un cadre métallique. La présence de surfaces horizontales homogènes peut tout de même dérouter les chiroptères, les incitant à éviter ces zones au profit d'environnements naturels familiers (Montag et al., 2016).



3 – LES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL MODIFIENT L'ACTIVITÉ DES CHIROPTÈRES

Les analyses présentées dans ce chapitre font l'objet d'un article scientifique, en cours de préparation.

1 – LA QUESTION

L'étude PV-chiros a été initiée suite à l'observation par de nombreux acteurs de la filière photovoltaïque, de la présence de chauves-souris fréquentant les centrales SP. Aussi, la question est la suivante : « **Quels sont les effets constatés des centrales photovoltaïques au sol sur les communautés de chauves-souris ?** »

Jusqu'à l'année 2023, aucune publication scientifique n'avait exploré leur activité, que ce soit en termes de description des communautés ou d'évaluation de leur abondance, soulignant l'intérêt et la nécessité de conduire de telles études.

En 2023, deux études ont été publiées : l'une menée en Hongrie (Szabadi et al., 2023) suggère que si des chauves-souris fréquentent les centrales PV certaines espèces, notamment des espèces à enjeux de conservation, ont été détectées moins fréquemment dans ces installations que dans d'autres habitats à proximité ; la seconde étude (Tinsley et al., 2023) menée en Angleterre a mis en évidence une **diminution de l'activité de six des huit espèces de chiroptères étudiées** dans les centrales photovoltaïques, comparativement à des sites témoins. Si les résultats de ces deux études convergent qualitativement, la généralisation de ces résultats à l'aire biogéographique méditerranéenne (habitats et communautés d'espèces spécifiques) demeure à confirmer.

Pour répondre à cette interrogation, nous avons entrepris en 2022 d'évaluer l'activité des chiroptères tant au sein des centrales qu'au niveau de la matrice paysagère environnante, en échantillonnant d'une part, les centrales SP (au cœur et sur leurs bordures internes) et d'autre part les principaux habitats présents dans le voisinage de ces centrales.

L'activité des chiroptères, mesurée par le nombre de contacts par espèce et par nuit, est fréquemment utilisée comme un indicateur fiable de leur abondance. Un niveau élevé d'activité est généralement corrélé à une présence importante d'individus (Mimet et al., 2020), ainsi qu'à d'importantes ressources en proies (Threlfall et al., 2012). Dans notre analyse, nous avons également exploré l'influence de certains facteurs de conception des centrales comme leur morphologie et la technologie photovoltaïque employée.

L'hypothèse formulée pour cette étude postule que **les centrales photovoltaïques représentent un nouveau type d'habitat au sein des mosaïques paysagères, induisant des activités spécifiques chez les chiroptères, distinctes de celles des habitats environnants.**



Crédits photo : ©Alice Baudouin

2 - NOTRE EXPÉRIENCE EN CONDITIONS RÉELLES

A - SITES D'ÉTUDES

Pour répondre à la question, notre étude s'est concentrée sur **15 centrales exploitées par la CNR**, principalement dans la vallée du Rhône, hormis quatre parcs situés dans les Hautes-Alpes à proximité de cours d'eau majeurs. Toutes ces centrales étaient situées dans un **contexte biogéographique méditerranéen** similaire. Les superficies des centrales variaient de 0,6 à 25 hectares (médiane = 6,05 ha), et leur puissance variait de 0,24 à 14 MW (médiane = 3,95 MW). Parmi eux, neuf parcs étaient équipés de panneaux fixes, tandis que six étaient équipés de panneaux trackers mono-axiaux Est-Ouest.

Les centrales étudiées ont été installées sur **d'anciens sites industriels, des zones de remblais résultant de la canalisation du fleuve, ou encore des friches industrielles**. Étant donné qu'il s'agissait exclusivement de centrales exploitées par la CNR, l'ensemble de ces centrales présentent une certaine **homogénéité quant à leurs caractéristiques**. Notamment l'espacement moyen entre les allées ($4,9 \pm 1,3$ m) ou les dimensions des panneaux ($2,4 \pm 0,4$ m de haut, $3,4 \pm 1,1$ m de large) sont relativement peu variables. Cela a limité la possibilité d'explorer l'influence de ces paramètres de construction sur l'activité des chiroptères mais réduit les sources potentielles de biais à prendre en compte. Ajoutons que le sol de l'ensemble de ces installations photovoltaïques dispose d'un couvert végétal.

B - DESIGN EXPÉRIMENTAL

Pour cette étude, nous avons utilisé des **enregistreurs passifs** de type SM4BAT (Wildlife Acoustic Inc., États-Unis). Entre 3 et 8 SM4 ont été positionnés à l'intérieur des centrales, et entre 2 et 4 SM4 ont été positionnés dans la matrice paysagère avoisinante (voir photo). Cette configuration nous a procuré un total de **47 points d'enregistrement dans la matrice paysagère et 70 au sein des centrales** (cœur et lisière). Les habitats échantillonnés dans la matrice paysagère avoisinante incluaient des zones cultivées (cultures annuelles ou vergers, les SM4 étaient positionnés en bordures de champs, souvent bocagers dans la zone d'étude), des zones arborées (forêts, haies, ripisylves), des prairies semi-ouvertes (landes, digues avec végétation arbustive).



Crédits photo : Google satellite

Les SM4 ont été configurés conformément aux recommandations du protocole **Vigie-chiro**, avec des enregistrements commençant 30 minutes avant le lever du soleil et se prolongeant jusqu'à 30 minutes après le coucher, pour une nuit unique. **Deux passages** ont été effectués sur chaque centrale, le premier entre le 18 mai et le 31 juillet 2022, et le second entre le 16 août et le 12 septembre 2022. Les enregistrements au sein des parcs et de la matrice paysagère avoisinante ont été réalisés la même nuit.

C – TRAITEMENT ACOUSTIQUE

Les enregistrements ont été découpés en séquences de 5 secondes puis attribués aux espèces à l'aide du logiciel d'identification acoustique **TADARIDA**. Le paramétrage du logiciel est un compromis entre probabilité d'identification des espèces et nombre de contacts pouvant être analysés.

Pour maximiser le volume de données analysées (nombre de contacts) une probabilité (ou seuil d'identification) de 0.5 a été considérée. Cette approche, développée par Barré et al., (2021), permet en effet à la fois de mieux considérer les contacts dont l'identification est certaine mais aussi ceux en plus grand nombre malgré une identification incertaine. La robustesse de cette approche a été confirmée en considérant une probabilité d'identification plus élevée (à 0.8) et correspondant à un jeu de données plus restreint.

Par la suite, nous avons regroupé toutes les identifications par catégorie d'espèces en fonction des guildes LRE/MRE/SRE (voir chapitre 1), ainsi que les rhinolophes. Nous sommes parvenus à une identification au niveau de l'espèce pour les quatre espèces de pipistrelles, les noctules de Leisler et commune, la Sérotine commune, les murins du groupe Natterer et de Daubenton, ainsi que pour l'Oreillard gris.

D – TRAITEMENT STATISTIQUE

Deux analyses ont été menées. La première, nommée analyse « **paysage** », qui englobait tous les points d'échantillonnage (intra centrale et matrice paysagère), avait pour objectif de permettre des comparaisons entre l'activité dans les parcs (cœur de centrale et périphérie) et les habitats présents dans le voisinage, en intégrant des co-variables d'ajustement (pollution lumineuse, météorologique...). La seconde, analyse « **intra-centrale** », incluait uniquement les points localisés à l'intérieur des centrales. Celle-ci nous a permis d'examiner l'impact de la surface du parc, de sa date de mise en service, de la technologie...

3 – NOS OBSERVATIONS

Dans ce guide, par souci de concision, nous ne présentons que les résultats significatifs de nos analyses.

Nous avons obtenu un total de 254 629 contacts,

- 91.5% issus de la guilde MRE,
- 5.5% de la guilde LRE,
- 3% de la guilde SRE,
- et moins de 1% pour les rhinolophes.



Crédits photo : ©Yoann Peyrard - Grand Murin et Murin de Bechstein

Les pipistrelles sont les espèces les plus contactées, par ordre décroissant Kuhl, commune puis pygmée (Tableau 1).

TABLEAU 1. Nombre de contacts pour chaque guildes et espèce.

Espèce/Guilde	Passages		Total
	Mai/Juin/Juillet	Août/Septembre	
MRE	109770	123227	232997
Pipistrelle de Kuhl	45758	49085	94843
Pipistrelle commune	33996	30057	64053
Pipistrelle pygmée	21509	32577	54086
Pipistrelle de Nathusius	3857	7614	11471
Vespère de Savi	3959	2969	6928
Minioptère de Schreibers	691	925	1616
LRE	3517	10323	13840
Noctule de Leisler	1522	5156	6678
Molosse de Cestoni	957	2003	2960
Noctule commune	279	1858	2137
Sérotine commune	755	1298	2053
SRE	3124	4246	7370
Murin de Naterrer/cryptique	933	1482	2415
Oreillard gris	822	1083	1905
Murins spp.	723	519	1242
Murin de Daubenton	545	623	1168
Barbastelle d'Europe	46	355	401
Oreillard montagnard	25	126	151
Oreillard roux	30	58	88
Rhinolophes	82	340	422
Grand Rhinolophe	50	181	231
Petit Rhinolophe	32	159	191
Total	116493	138136	254629

A – ANALYSE "PAYSAGE"»

ANALYSE COMPARATIVE DE L'HABITAT "CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE"

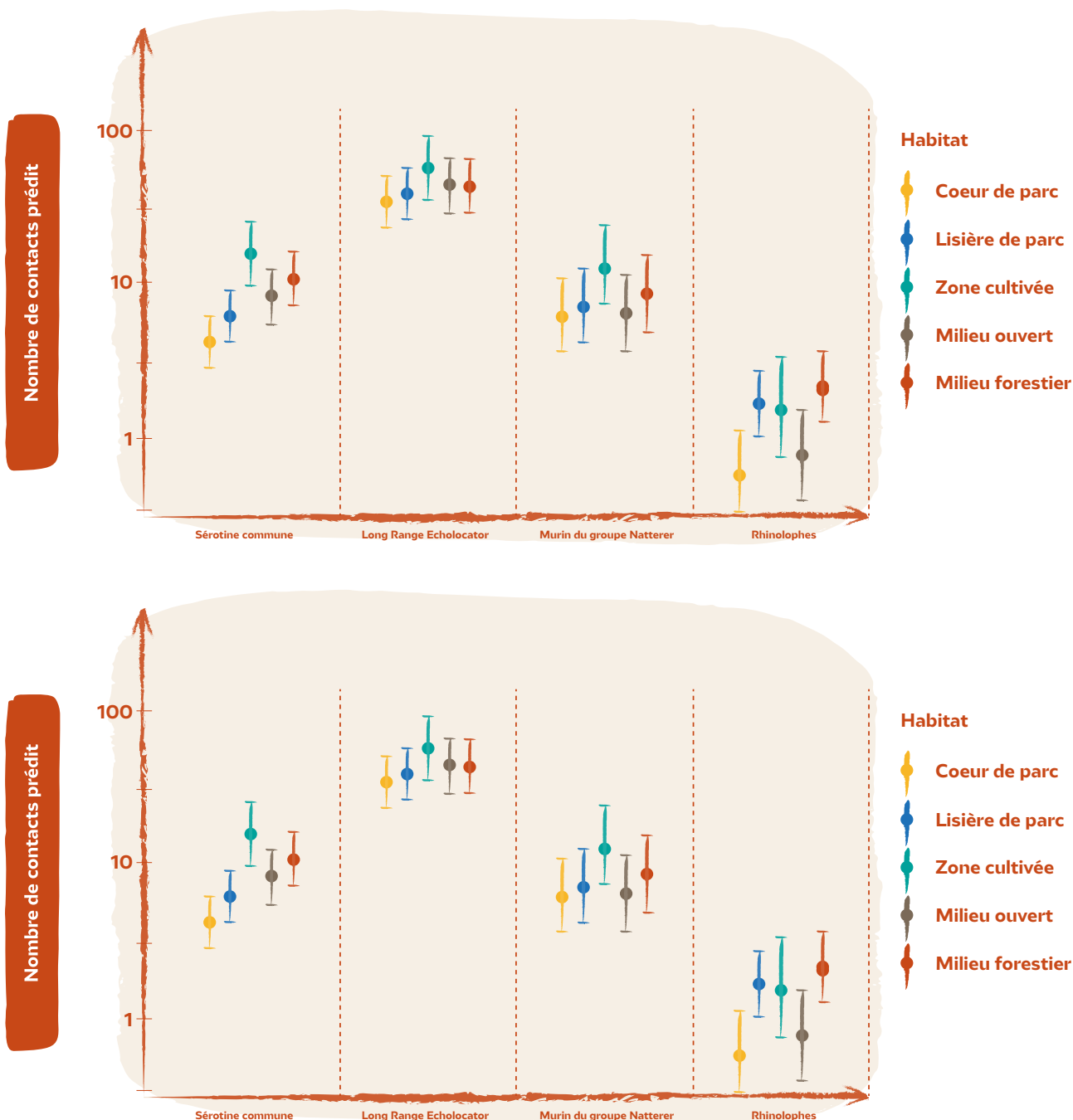
»

L'habitat «cœur de parc photovoltaïque» se distingue par une activité de chiroptères notablement plus faible pour 8 des 9 espèces ou groupes d'espèces examinés (Figure 2).

Ceci suggère qu'au sein d'une matrice paysagère, il y aura **moins de chauves-souris à l'intérieur des centrales que dans les habitats environnants**. Pour 6 des 9 espèces ou groupes d'espèces, l'habitat «lisière de parc» ressort comme le second habitat présentant le moins de contacts de chiroptères. Il s'agit de la première démonstration scientifique en contexte méditerranéen du manque d'attractivité des centrales SP, même en comparaison de zones cultivées. Ces constatations indiquent que **la présence des**

centrales photovoltaïques au sol diminue significativement l'activité des chiroptères, ce qui rejoint les résultats observés par Tinsley et al. (2023) en Angleterre. Qualitativement, notre étude démontre également que la baisse d'attractivité s'étend à un grand nombre d'espèces, et notamment celles généralistes du groupe des MRE, qui ont pourtant une plus grande adaptabilité aux modifications de leur environnement ainsi qu'aux milieux anthropisés.

FIGURE 2. Nombre de contacts prédits en fonction de l'habitat, pour chaque espèce ou groupe d'espèce. L'échelle est logarithmique¹



¹Sur une échelle logarithmique, les valeurs sont espacées de manière égale en termes de rapports plutôt qu'en termes de différences absolues.

DISCUSSION : ACTIVITÉS AU SEIN DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES RELATIVEMENT À LA MATRICE PAYSAGÈRE

Pour expliquer cette activité plus faible au sein des parcs photovoltaïques, comparativement aux autres habitats, plusieurs hypothèses peuvent être avancées, la principale reposerait sur un compromis entre ressources disponibles et coûts pour y accéder.

Les premières études sur les insectes, **proies des chiroptères**, indiquent une diminution de leur présence sur les centrales (Graham et al., 2021; Grodsky et al., 2021), rendant probablement ces milieux moins attractifs. Nos résultats concernant l'activité de chasse, présentés dans le chapitre 4 de ce guide, semble corroborer cette hypothèse. Une autre explication repose sur le **type d'habitat offert** par les centrales photovoltaïques. Il s'agit de grands milieux ouverts, ce que de nombreuses espèces évitent en raison de l'exposition accrue au vent et aux prédateurs. Ainsi, les centrales photovoltaïques pourraient être considérés comme des habitats offrant peu de ressources alimentaires et nécessitant un effort accru pour y accéder, ce qui **réduit le rapport coût/bénéfice** pour les chiroptères. Cette réduction d'attractivité de l'habitat « parc » serait également accentuée par le fait qu'ils ne fournissent pas d'opportunité de gîte.



Crédits photo : ©Yoann Peyrard - Murin à oreilles échancrées

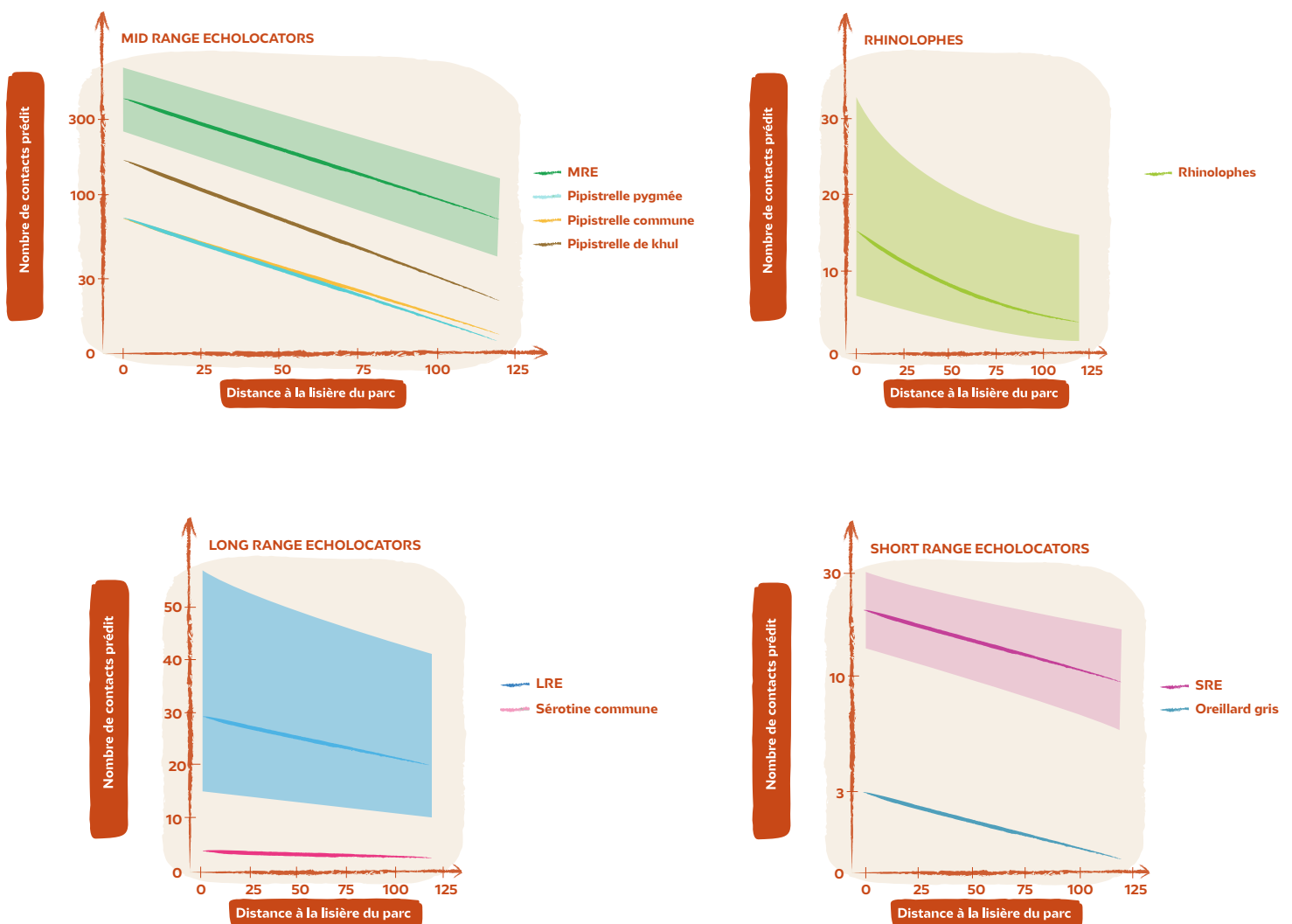
B - ANALYSE " INTRA - PARC "

DISTANCE À LA BORDURE

Au sein du parc, la distance par rapport à la bordure du parc se révèle être un facteur crucial pour l'activité des chiroptères.

En effet, à mesure que la distance à la clôture augmente, l'activité des chiroptères diminue (Figure 3). Autrement dit, **à mesure que l'on avance à l'intérieur du parc, il y a moins de chiroptères**. Ce résultat est cohérent avec le nombre de contacts observés lors de l'analyse « paysage ». Il suggère que des centrales réduisant la distance entre le centre du parc et la clôture, pourraient être plus propices à l'activité des chiroptères.

FIGURE 3 : Nombre de contacts prédits en fonction de la distance à la clôture du parc. La zone colorée représente l'intervalle de confiance à 95% pour les guildes. Les échelles sont logarithmiques pour les MRE et SRE.

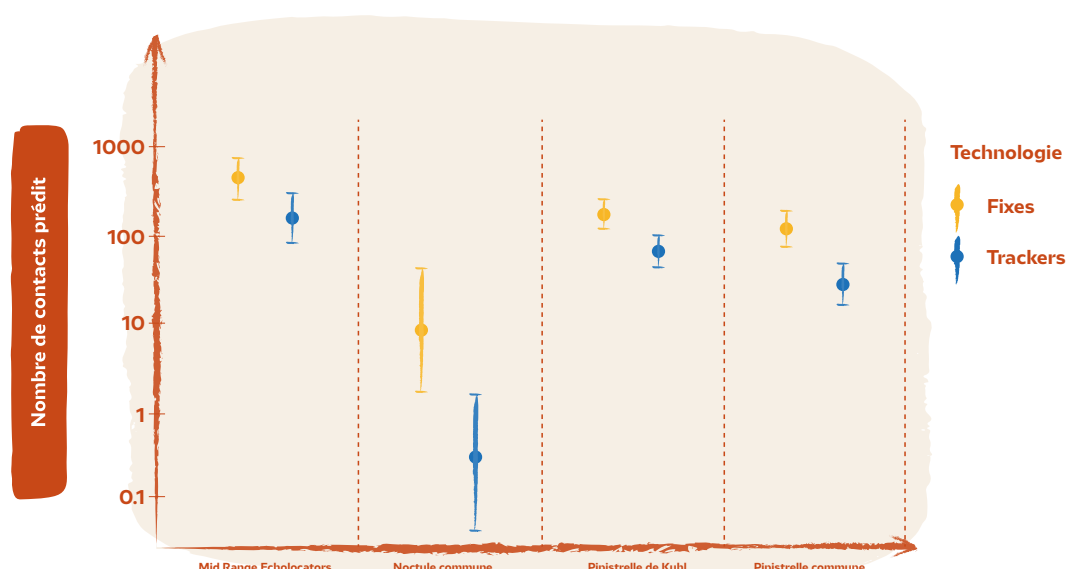


TECHNOLOGIE DES PANNEAUX

Nous avons exploré l'impact du type de technologie des panneaux sur l'activité des chiroptères et observé que, pour la guilda MRE, les pipistrelles de Kuhl et communes ainsi que la noctule commune, **les centrales équipées de panneaux trackers présentent une activité plus faible que celles avec des panneaux fixes** (Figure 4).

La principale distinction entre ces technologies réside dans l'angle d'inclinaison des panneaux ; en effet, la nuit, les panneaux trackers sont positionnés quasiment à l'horizontal. Ces faibles angles d'inclinaisons pourraient alors induire un risque de collision ou de tentatives d'abreuvement comme l'a montré Nor Amira Abdul Rahman pour des surfaces totalement lisses (comm. pers.). Dans le cas des panneaux utilisés par la CNR, bien que la surface ne soit pas totalement lisse, leur horizontalité modifie la réflexion des cris d'écholocation. Il est plausible que ces grandes surfaces soient mal perçues par les chiroptères, les incitant ainsi à les éviter.

FIGURE 4 : Nombre de contacts prédits en fonction de la technologie de panneaux installés sur le parc.

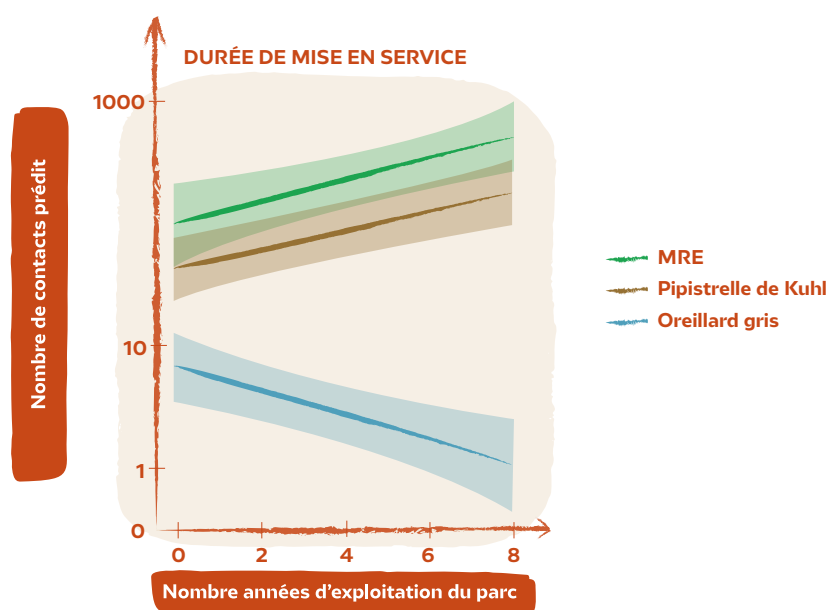


DURÉE D'EXPLOITATION DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

Nous avons également examiné l'influence de la durée d'exploitation des centrales, étant donné que notre jeu de données comprenait des centrales en service depuis 8 ans et d'autres récemment construites. Nous avons observé des réponses différentes en fonction des espèces considérées.

L'activité des pipistrelles de Kuhl et la guilda des MRE augmenterait au cours du temps suggérant peut-être un phénomène d'habituation aux centrales, ou une évolution du milieu, tandis que l'Oreillard gris est de moins en moins présent (Figure 5). Notons que, ne disposant pas d'une approche diachronique, ces résultats mériteraient d'être confortés par un dispositif robuste de type Before-After-Control-Impact (BACI, avant-après-contrôle-impact).

FIGURE 5 : Nombre de contacts prédits en fonction du nombre d'années d'exploitation du parc.



MODALITÉS DE GESTION DE LA VÉGÉTATION

Parmi les centrales étudiées, cinq étaient gérés par pâturage ovin et dix par fauche mécanique (2 fois par an). Nous avons donc voulu tester l'effet de la modalité de gestion de la végétation, mais **les résultats obtenus sont contrastés**. Pour les oreillards, il y a trois fois plus de contacts grâce au pâturage, comparativement aux centrales gérées par fauche mécanique. Cela peut s'expliquer par l'appétence des oreillards pour les espèces d'insectes coprophages. Pour la Pipistrelle de Kuhl c'est l'inverse, on observe deux fois plus de contacts dans les centrales fauchées.

Nous nous sommes également intéressés à la hauteur de la végétation sur les centrales, et notre première observation a été que la présence de moutons implique une végétation plus rase. Cependant, pour le groupe des MRE, les pipistrelles communes et de Nathusius, plus la végétation est haute, moins il y a d'activité.

Au vu de nos résultats, il est délicat d'établir quelle modalité de gestion est la plus favorable pour les chiroptères. Chaque espèce ayant un régime alimentaire différent, il est probable que la mise en place d'une **gestion différenciée** soit le plus bénéfique pour la communauté des chiroptères.

DISCUSSION : ACTIVITÉS AU SEIN DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

L'objectif de cet axe, qui porte sur les modalités de conception des centrales pouvant influencer l'activité des chiroptères, était de mettre en évidence des moyens d'atténuation des effets.

Même si les centrales de la CNR sont souvent construites selon des modalités similaires, nous avons réussi à identifier **plusieurs leviers d'action**.



En premier lieu, l'effet de la distance à la lisière du parc suggère de concevoir des centrales plus petites pour limiter les zones à faible activités chiroptérologiques : les coeurs de centrales. En cas de projets à la puissance brute et au besoin de foncier importants, différents scénarios d'emprise surfacique sont alors possibles pour en limiter les impacts :

1/ proposer plusieurs îlots séparés par des corridors écologiques ;
2/ créer un grand parc d'un seul tenant, mais nécessitant probablement un besoin compensatoire supérieur. Le choix du scénario de moindre impact peut être effectué à l'aide d'une

grille multicritères comparant les avantages et limites de chacun, en tenant compte des différentes contraintes et enjeux.

Enfin la **technologie des panneaux** a un effet convergent sur plusieurs espèces ou groupes d'espèces. Cela semble prometteur pour favoriser la présence des chiroptères sur les parcs.

Quant aux effets qui varient selon l'espèce considérée, cela nécessite une analyse plus approfondie en augmentant la taille de l'échantillon afin de déterminer si, grâce à une gestion adaptée, les espèces peuvent éventuellement revenir.

4 - RECOMMANDATIONS

Le travail réalisé ici met en évidence l'impact des centrales photovoltaïques au sol sur les chiroptères, avec une diminution de leur activité par rapport aux habitats environnants.

Ces effets sont observés sur **plusieurs espèces et groupes d'espèces**, et ils sont **significatifs**, même pour des espèces généralistes telles que les pipistrelles.

Il est important de noter que ces observations ont été faites sur des centrales pour lesquelles des mesures favorables à la biodiversité ont déjà été mises en place par le développeur (CNR), comme le réensemencement ou la plantation de haies, et qui ont été construits sur des milieux déjà dégradés et artificialisés. Cette étude souligne également l'existence de leviers d'actions potentiels pour limiter les impacts sur l'activité des chiroptères, bien que des compléments d'étude soient nécessaires pour mieux quantifier ces possibilités de mitigation. Par exemple, la modification de l'angle d'inclinaison nocturne des panneaux trackers, si elle est compatible avec la sécurité de la centrale, serait une mesure à tester et dont l'effet pourrait être observé rapidement.

En conclusion, cette étude appelle à la **prudence dans le choix des sites d'installation** des centrales photovoltaïques. Nous avons montré ici que l'habitat « centrales SP » est moins accueillant pour les chiroptères que les autres habitats testés. La conversion d'une zone favorable aux chiroptères en centrale photovoltaïque impliquera une perte de capacité d'accueil pour ces espèces. Par conséquent, il est recommandé d'éviter les zones naturelles présentant une forte activité et situées à proximité des colonies.





4 – LES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL MODIFIENT LE COMPORTEMENT DE VOL DES CHIROPTÈRES INSECTIVORES ET RÉDUISENT LA FONCTIONNALITÉ ALIMENTAIRE DE L'HABITAT

Ce chapitre est issu de l'article publié dans *Journal of Applied Ecology* que vous pouvez [retrouver ici](#). Nous vous encourageons à consulter la version originale pour plus de détails sur les méthodes et résultats.

1 – LA QUESTION

Après avoir évalué l'activité des chiroptères dans une centrale, nous nous sommes interrogés sur leur comportement au sein de cet environnement. Nous avons cherché à déterminer si les individus présents utilisaient le parc pour la chasse, comme cela est couramment rapporté dans les études d'impact, ou s'ils étaient simplement en transit vers d'autres zones de chasse.

Pour répondre à cette question, nous avons mis l'accent sur les tentatives de capture de proies en utilisant le cri distinctif que les chiroptères émettent lorsqu'ils s'approchent d'une proie, connu sous le nom de «buzz» de capture. Étant donné que ce cri n'est pas émis par toutes les espèces et qu'il n'est pas toujours détecté par les enregistreurs, nous avons opté pour l'utilisation complémentaire de deux autres paramètres liés au vol : **la vitesse de vol** et **la sinuosité** de la trajectoire de vol. Ces deux métriques ont déjà été employées dans la littérature scientifique (Barré et al., 2020 ; Gilmour et al., 2021 ; Grodzinski et al., 2009 ; Polak et al., 2011) comme des indicateurs pour étudier la chasse, notamment chez la Pipistrelle de Kuhl (Grodzinski et al., 2009).

Lorsque les chiroptères sont en phase de chasse, leur vitesse de vol diminue, la sinuosité de leur trajectoire augmente, et l'émission du «buzz» de capture est plus fréquente. L'emploi combiné de ces mesures nous a permis de caractériser le comportement des individus dans les centrales.

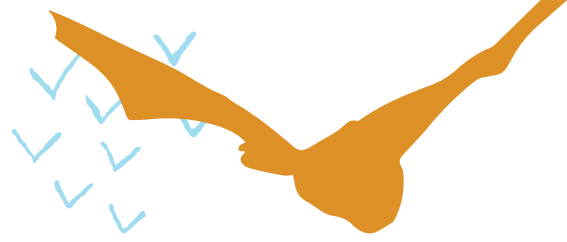
Nous avons fait l'hypothèse que l'activité de chasse des chiroptères diffère entre les centrales et les zones ouvertes témoins. Cela repose sur l'idée que les ressources alimentaires sont probablement moins abondantes dans les centrales photovoltaïques, comme discuté dans le chapitre 2.



Crédits photo : ©Alice Baudouin



2 - NOTRE EXPÉRIENCE EN CONDITIONS RÉELLES



A - SITES D'ÉTUDES

Pour répondre à notre questionnement, nous avons suivi les trois métriques retenues en associant chaque centrale à un site témoin situé entre 100m et 500m de distance. Cette distance garantissait que les individus détectés sur un site ne soient pas comptés deux fois, tout en maintenant le même contexte climatique. Chaque site témoin a été soigneusement choisi pour correspondre le plus possible au parc, en termes de distance à l'eau, proximité à la lisière boisée, type de recouvrement et hauteur de végétation. Ainsi, la seule différence entre centrale et site témoin était **la présence ou l'absence de panneaux photovoltaïques**.

Cette étude a été menée sur **neuf centrales photovoltaïques de la CNR** et autant de sites témoins, situés dans la vallée du Rhône, entre le 21 et le 30 septembre 2022. Les centrales variaient en surface (de 2,5 à 25 ha, médiane = 7,4 ha) et en puissance (de 2,5 MW à 14 MW, médiane = 4,2 MW). Sept centrales étaient équipées de panneaux solaires fixes (avec un angle d'environ 25 degrés), tandis que deux avaient des panneaux trackers, mobiles sur un axe Est-Ouest.

En moyenne, les panneaux solaires des centrales CNR avaient une hauteur de $2,4 \pm 0,4$ mètres, une largeur de $3,4 \pm 1,1$ mètre, et les allées entre les rangées de panneaux mesuraient $4,9 \pm 1,3$ mètres de large. Le sol des centrales étaitensemencé avec des espèces végétales locales, variant en hauteur de 0,2 à 1,1 mètre, couvrant de 20 à 90 % de la surface du sol selon les sites. Ces sites étaient soit **d'anciens sites industriels**, soit des **zones de remblais** issues de la canalisation du fleuve, situés à une distance moyenne de 233 ± 192 mètres de ses rives.

B - TRAJECTOGRAPHIE 3D

Pour estimer les deux paramètres liés au vol, nous avons mis en place un protocole de **trajectographie 3D**, utilisant une antenne spécifique (Trajecto V1, [Suva-tech](#), Phnom Penh, Cambodge), capable de mesurer les positions des chiroptères dans l'espace. Ce système comprend **quatre microphones** (FG 23329, Knowles Acoustics, Itasca, IL, États-Unis) disposés en triangle dont un au centre (voir photo page 21).

Chaque nuit, une antenne était positionnée au centre d'une allée dans une centrale photovoltaïque, tandis que la deuxième antenne de la paire était installée sur un site témoin.

Le dispositif 3D permet d'obtenir une **sphère de détection** d'un diamètre d'environ **30m**. La différence de temps d'arrivée des cris sur les trois microphones permet de déterminer la position des chiroptères dans l'espace. À partir de ces positions, les trajectoires de vol ont été reconstruites en utilisant la méthode de Barré et al. (2020, 2021).



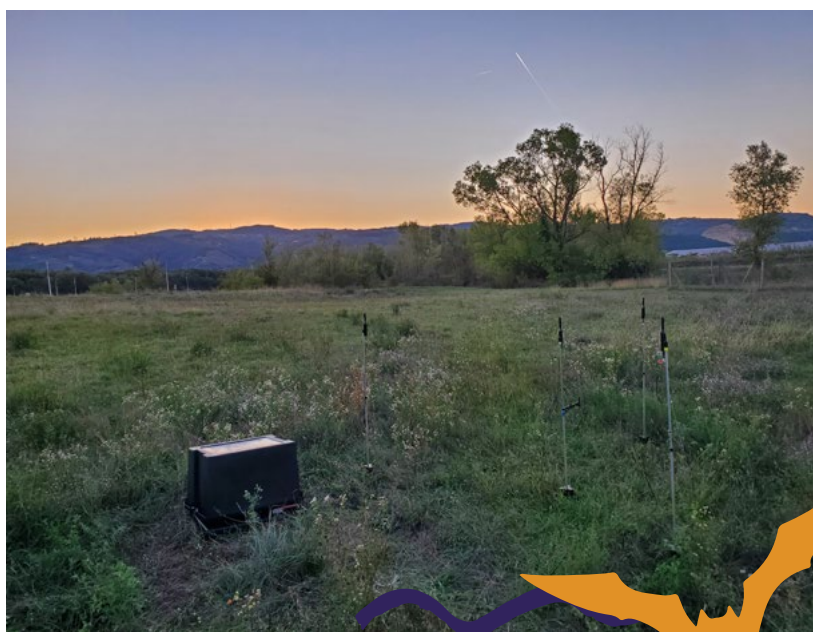
Crédits photo : ©Yoann Peyrard - Petit Murin

C – TRAITEMENT ACOUSTIQUE

Nous avons utilisé le logiciel **Tadarida** (Bas et al., 2017) pour attribuer les cris à des espèces, et le **classificateur de sonotype** de Roemer et al. (2021) pour estimer la probabilité de buzz. Ensuite, nous avons associé ces identifications aux trajectoires. En cas de multiples identifications pour une même trajectoire, nous avons retenu l'espèce la plus fréquemment identifiée avec le taux de confiance le plus élevé.

Nous avons regroupé toutes les identifications du genre Murin en raison de leur difficulté d'identification. Ensuite, nous avons regroupé les trajectoires par groupe d'espèces selon les guildes LRE/MRE/SRE (voir chapitre 1). Pour les pipistrelles commune, pygmée, de Kuhl, de Nathusius, la Noctule de Leisler et l'Oreillard gris, nous avons pu aller jusqu'à l'espèce car le nombre de trajectoires était suffisant (nombre de trajectoires supérieur au nombre de paires i.e. 16, Tableau 1).

Nous avons ensuite calculé les vitesses de vol et la sinuosité de chaque trajectoire. Nous avons exclu les trajectoires avec des vitesses supérieures à 20 m/s (O'Mara et al., 2021) car elles étaient peu probables, ce qui a entraîné la suppression de 2 % des trajectoires. Nous avons aussi éliminé les trajectoires avec une sinuosité supérieure au quantile à 95 % (soit une valeur de 70) pour retirer les valeurs aberrantes. Enfin, nous avons calculé les valeurs moyennes et maximales de probabilité de buzz sur les trajectoires.



Crédits photo : ©Alice Baudouin



D – TRAITEMENT STATISTIQUE

Nous avons évalué les variations de comportement de vol en présence ou en l'absence de panneaux photovoltaïques en utilisant des **modèles linéaires mixtes généralisés** (GLMM). Les métriques comportementales ont été considérées comme variables à expliquer, avec le type de site (traitement ou contrôle) comme variable explicative. Pour tenir compte des variables non contrôlées liées au parc et à la météo, nous avons inclus l'identité de la paire en tant que variable aléatoire. Au besoin, nous avons également intégré un facteur tenant compte de la précision des mesures, en attribuant un poids plus élevé aux positions les plus précises. Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R v.4.2.0 (R Core Team, 2020), en utilisant le package bestNormalize pour la transformation des données en distributions gaussiennes, et les résidus ont été vérifiés à l'aide du package DHARMA.

Crédits photo : ©Yoann Peyraud- Barbastelle d'Europe



3 – NOS OBSERVATIONS

Nous avons obtenu un total de **13450 positions 3D**, 87% étaient de la guilde MRE, 7% de la guilde SRE et 5% de la guilde LRE. En moyenne, les trajectoires reconstruites contenaient 12.5 positions pour les MRE, 9 pour les SRE et 6 pour les LRE.

TABLEAU 1. Nombre de positions et de trajectoires obtenues pour chaque guilde et espèces.

Taxon	Nombre de positions	Nombre de trajectoires
Mid-range echolocators	13450	1076
Vespère de Savi	86	7
Minioptère de Schrebeirs	17	3
Pipistrelle commune	1435	116
Pipistrelle de Kuhl	1919	140
Pipistrelle de Nathusius	5068	387
Pipistrelle pygmée	4925	423
Long-range echolocators	711	118
Sérotine commune	67	8
Noctule de Leisler	564	97
Noctule commune	80	13
Short-range echolocators	1112	123
Barbastelle d'Europe	72	10
Murins spp.	615	70
Oreillard gris	425	43

Nous avons constaté **une augmentation de la vitesse moyenne de vol** de 5 espèces et guildes de 9,7 % à 35,1 % dans les centrales photovoltaïques par rapport aux sites témoins, à l'exception de la Pipistrelle de Nathusius, qui a connu une réduction de 31,3 % (voir Figure 1 page 27). **La probabilité de buzz a diminué** de 17,5 % à 39,4 % sur les sites photovoltaïques pour la guilde MRE, la Pipistrelle de Nathusius et la Pipistrelle commune. **La sinuosité de la trajectoire a diminué** de 32,7 % sur les sites photovoltaïques par rapport aux sites témoins, uniquement pour la guilde SRE.

TABLEAU 2. Effets de la présence de centrales photovoltaïques sur la probabilité de buzz, la vitesse et la sinuosité des trajectoires.

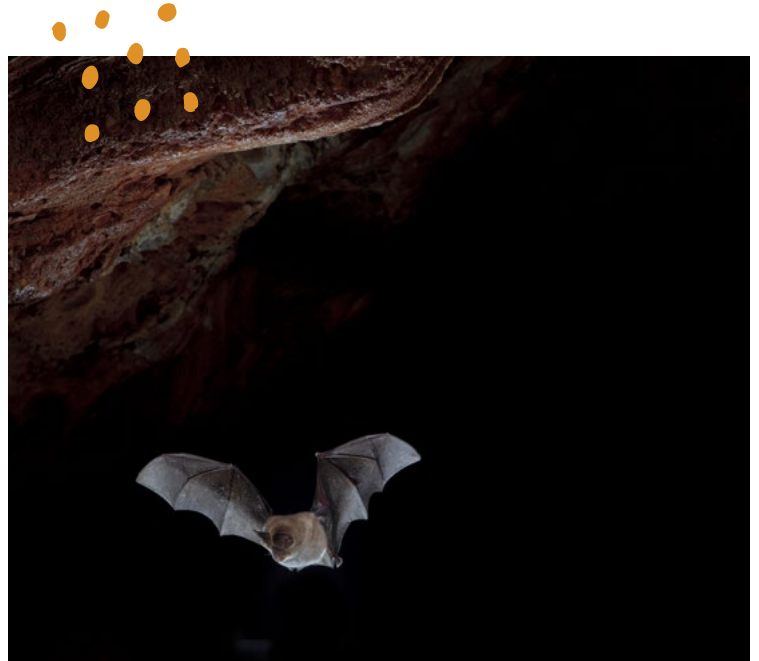
	Proba de buzz		Vitesse		Sinuosité
	Moyenne	Maximale	Moyenne	Maximale	
MRE	↓		↑		
Pipistrelle de Nathusius	↓		↓		
Pipistrelle commune	↓	↓			
Pipistrelle de Kuhl			↑	↑	
Pipistrelle pygmée			↑	↑	
SRE			↑	↑	↓
Oreillard gris			↑	↑	

A – LES CENTRALES SP ONT UN IMPACT SUR LE COMPORTEMENT DE VOL

En accord avec nos hypothèses, les chiroptères présentent des changements significatifs dans leur comportement sur les centrales photovoltaïques. **Les trois métriques examinées concordent pour suggérer une réduction de l'activité de chasse sur les centrales par rapport aux sites contrôles.** Grâce à notre design expérimental robuste, nous pouvons attribuer cette diminution de l'activité de chasse à la présence de panneaux photovoltaïques.

B – LIEN PROIE-PRÉDATEUR

La principale explication de cette réduction de l'activité de chasse semble résider dans **la diminution de la disponibilité des proies.** Les études précédentes sur les communautés végétales ont montré une réduction de la biomasse globale et de l'abondance florale sous les panneaux solaires (Armstrong et al., 2016 ; Graham et al., 2021), ce qui pourrait avoir un impact sur les communautés d'insectes nocturnes, proies des chauves-souris. Cependant, à ce jour, aucune étude n'a examiné spécifiquement les insectes nocturnes en relation avec la présence de parcs photovoltaïques.



Crédits photo : ©Yoann Peyrard - Rhinolophe sp

Une autre possibilité liée aux insectes serait leur **attraction par la lumière polarisée** émise par les panneaux solaires (Horváth et al., 2010). Les insectes polarotactiques, pensant pondre sur l'eau, se concentrent alors sur les surfaces des panneaux et ne sont pas disponibles pour les chiroptères non glaneurs (Schnitzler & Kalko, 2001).

Une dernière hypothèse concerne la **perturbation potentielle de l'écholocation** des proies à cause des panneaux solaires. Selon les études de Grief et al. (2017, 2020), bien que le risque de collision soit limité (voir chapitre 2), il est possible que la détection acoustique des panneaux perturbe l'activité de chasse des chauves-souris. Une approche intéressante pourrait consister à combiner la trajectographie 3D et l'imagerie pour mieux comprendre comment les chauves-souris interagissent avec les panneaux.

Pour approfondir notre compréhension de ces mécanismes, de futures études devraient se concentrer sur la relation entre les chauves-souris et les communautés d'insectes sur les centrales.



Crédits photo : ©Moirenc - Matisse Moirenc

C – CONSÉQUENCES POUR LES POPULATIONS

L'impact des centrales photovoltaïques révélé dans notre étude **est significatif, généralisé à plusieurs espèces et guildes**, ce qui suggère une perte d'habitat de chasse. Il est plausible que cette perte d'habitat force les individus à parcourir de plus longues distances pour trouver des zones de chasse optimales (Laforge et al., 2021), mais quantifier cette perte pour une population demeure complexe.

En l'absence de données morphologiques relevées lors de la trajectographie 3D, nous ne pouvons pas non plus déterminer si la vitesse de vol observée dans les centrales photovoltaïques correspond à un optimum énergétique. Par conséquent, il est difficile de conclure si l'augmentation de la vitesse de vol sur les centrales correspond à un passage à la vitesse de transit optimale (celle minimisant la dépense d'énergie) ou à un changement intermédiaire qui serait suboptimal.

Des études complémentaires sont donc nécessaires pour quantifier l'impact à l'échelle des populations, ainsi que pour explorer les variations saisonnières de ces résultats et étendre nos conclusions à d'autres zones bioclimatiques.

4 – RECOMMANDATIONS



Crédits photo : ©Alice Baudouin

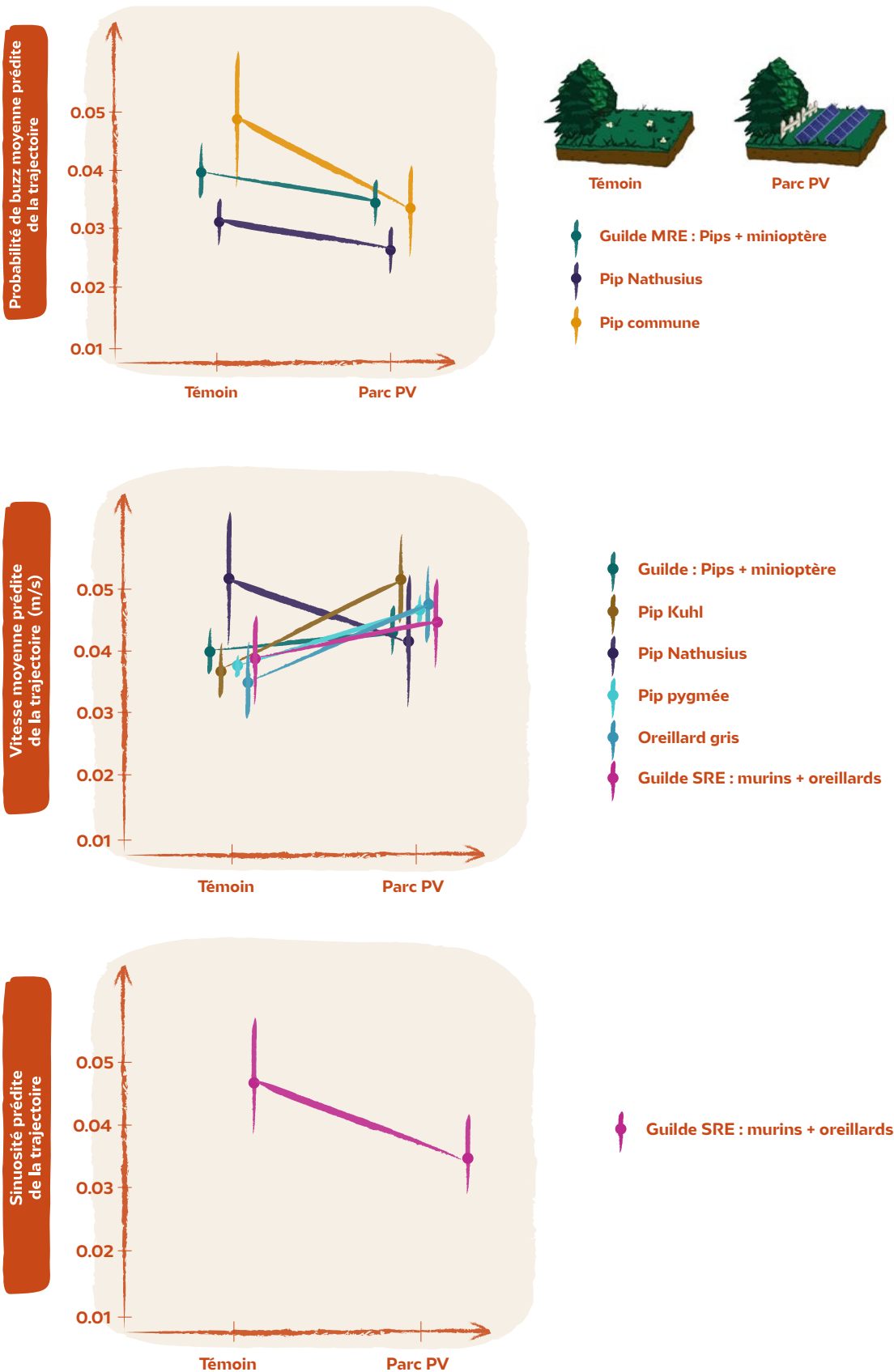
Au vu de ces résultats, il est essentiel de reconnaître que les centrales photovoltaïques représentent une **perte d'habitat de chasse** pour les chauves-souris. Sans attendre la quantification précise de cet impact sur les populations, le **principe de précaution** recommande d'éviter l'installation des parcs photovoltaïques dans les zones naturelles propices aux chiroptères ou constituant leurs habitats de chasse, comme les zones humides, les lisières forestières, les bords de cours d'eau ou les prairies semi-ouvertes.

Par ailleurs, nous recommandons de mettre en place des mesures visant à **favoriser une reprise végétale** lors de l'installation de parcs photovoltaïques. Une végétation appropriée soutiendra la présence d'insectes et donc la disponibilité de la nourriture aérienne (voir chapitre 7).

Il faut également continuer à **investir dans la recherche** pour améliorer la compréhension des effets des centrales SP sur les chiroptères et leurs habitats.

FIGURE 1 :

Prédiction des vitesses moyennes de vol, probabilité moyenne de buzz et sinuosité des trajectoires sur les sites photovoltaïques et les sites témoins issues de modèles linéaires mixtes généralisés. Seuls les effets significatifs sont représentés.



5 – COMMENT INVENTORIER UN SITE CONCERNÉ PAR UN PROJET DE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

Dans le cadre d'une étude d'impact, l'objectif de la campagne de relevés de terrain est d'effectuer un état initial du site d'implantation potentiel de la centrale et d'en déduire les fonctions biologiques associées, l'ensemble contribuant à évaluer la sensibilité environnementale du site (dits également «enjeux écologiques»)

Au regard des enjeux associés aux espèces de chiroptères présentes, la nature, l'ampleur et l'intensité des incidences du projet de CSP sur ce groupe d'espèces doivent être évalués avec plus ou moins de détail, conformément au principe de proportionnalité, en termes de gîte, d'habitat de chasse ou en termes de fonctionnalité.

1 – OBJECTIFS


Ce chapitre propose une méthodologie de diagnostic des enjeux chiroptérologiques préalablement à la réalisation d'un projet de centrale solaire au sol.

Cette méthodologie a été élaborée dans l'optique de **permettre la comparabilité des observations** de terrain et **garantir leur robustesse**. Ces deux paramètres étant nécessaires pour valider les zones les plus propices à l'installation de centrales photovoltaïques et évaluer l'efficacité des mesures environnementales mises en place dans le cadre d'un projet (dont la gestion post-implantation).

Bien que la réglementation ne l'impose pas dans le cadre d'une étude d'impact d'un projet photovoltaïque, une étude de type BACI apportera de la robustesse pour étudier les incidences de l'implantation d'un parc photovoltaïque. Cela implique la mise en place systématique d'au moins un site témoin, non impacté par l'aménagement d'une centrale, sur lequel des mesures de suivis doivent aussi être mises en oeuvre. Un autre point essentiel de cette approche est de conserver une méthodologie identique tout au long des suivis (de l'état initial aux suivis post-implantation).




Crédits photo : ©Benjamin Pastre



La méthodologie proposée constitue un optimal pour la caractérisation des enjeux, à adapter aux spécificités de chaque territoire d'implantation de projet photovoltaïque. Les choix définitifs de protocole restent sous la responsabilité des services instructeurs. Le socle proposé permettra de mettre en évidence des incidences moyennes à fortes, mais ne sera pas suffisant pour des incidences faibles.

Nous préconisons néanmoins que les éléments suivants soient les éléments de base à appliquer pour que toute campagne de terrain puisse être véritablement exploitée à des fins d'évaluation et suivi des impacts :

- ➔ L'utilisation d'acoustique passive (enregistreurs automatiques)
 - ➔ Le nombre de passages
 - ➔ Les périodes
 - ➔ Le positionnement des enregistreurs
 - ➔ Le suivi d'un site témoin
- 

Ces cinq éléments sont détaillés plus bas dans ce chapitre. Le nombre d'enregistreurs automatiques est pour nous l'unique élément qui peut être ajusté en fonction des éventuelles contraintes d'étude.

2 – CARACTÉRISATION DE L'ÉTAT INITIAL

A – MESURE DE L'ACTIVITÉ ET IDENTIFICATION DES CHIROPTÈRES

Type d'enregistreurs

Le développement des **enregistreurs acoustiques passifs** en font la **technique principale** et indispensable pour les études d'impact, permettant d'obtenir des données quantitatives et qualitatives.

- Matériels de détection passif : SM4bat, anabat, passive recorder...
- Paramétrage et pose des détecteurs : conformité avec le protocole national du MNHN Vigie-chiro pour générer des données comparables avec des référentiels nationaux-régionaux.
- Les enregistrements doivent débuter 30 minutes avant le coucher du soleil et s'interrompre 30 minutes après le lever du soleil.
- Les conditions météo doivent être **les plus optimales possibles** : pas de pluie prévue, pas de rafales de vent supérieures à 30km/h, température clémente en début de nuit afin d'être cohérents avec les besoins des chiroptères.

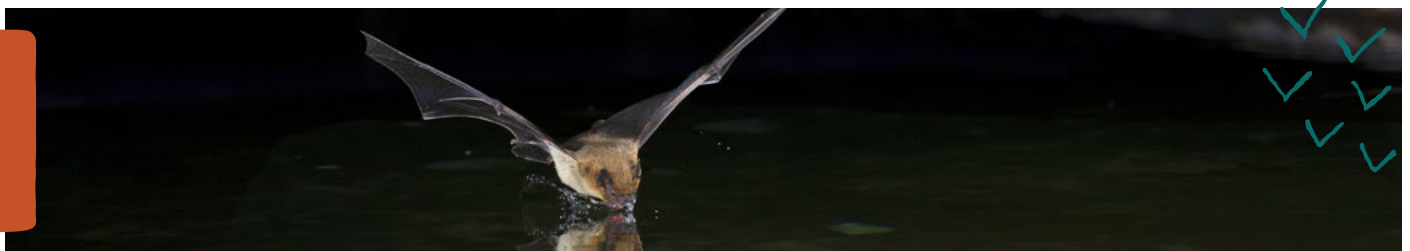
Organisation des passages

- Séries de passages : au moins **trois séries de passages annuels** sur le site, afin de capter les variabilités saisonnières, qui peuvent être fortes selon les espèces et les climats ou le terrain d'étude. Des passages supplémentaires permettront de mieux prendre en compte la variabilité journalière.

- La **périodicité** des passages cherchera à inventorier au moins trois des quatre grandes périodes biologiques de la phase active des chiroptères (voir chapitre 1), les périodes pouvant être adaptées pour coller au mieux au contexte local :
 - Le premier passage correspondra à la phase **pré-reproduction** et au transit pré-nuptial, généralement en avril-mai.
 - Le deuxième passage sera ciblé pendant la période de parturition, soit juin-juillet.
 - Le troisième passage vise à observer les mouvements de transit et de migration postnuptiaux, d'août à octobre.

Il est important de maintenir un écart suffisant (au moins six semaines) entre chaque passage afin de garantir qu'une même période chiroptérologique n'est pas observée d'un passage sur l'autre.

- **Nuits d'enregistrements** : pour chaque passage, **une seule nuit** complète d'enregistrement (si conditions météorologiques optimales) permettra d'obtenir l'essentiel de la communauté de chiroptères fréquentant régulièrement le site. L'augmentation du nombre de nuits d'enregistrement pourra localement permettre la détection d'espèces additionnelles (bien que souvent anecdotiques en termes de nombre de contacts et donc supposées utiliser marginalement le site). Néanmoins, l'enregistrement sur plusieurs nuits consécutives offre l'avantage de tenir compte de la variabilité quotidienne et de réduire l'impact d'événements météorologiques imprévus.



Crédits photo : @Yoann Peyrard - Pipistrelle commune

Nombre d'enregistreurs


Le nombre d'enregistreurs posés à chaque passage doit être cohérent avec la zone biogéographique et l'hétérogénéité paysagère du site.

- Dans les **paysages hétérogènes**, la limite basse serait de 5 enregistreurs (dont au moins un sur le site témoin) par tranche de 5 hectares.
- Dans les **paysages homogènes**, la limite basse est fixée à 3 enregistreurs (dont au moins un sur le site témoin) par tranche de 5 hectares.
- **Échantillonnage systématique** des habitats les plus favorables aux chiroptères (plans d'eau, ripisylves, lisières, haies et allées ou clairières forestières), et de **tous les types d'habitats** présents sur la zone d'étude. Un site sera considéré comme homogène si le site est recouvert par trois types d'habitats (ou moins) et hétérogène au-delà de trois types d'habitats différents, en s'appuyant sur la définition des habitats EUNIS (niveau 2).
- La **distance entre deux enregistreurs** sera optimisée pour permettre de dissocier les cortèges d'espèces présents et leurs enjeux associés. Un espacement d'environ **150m** est recommandé (Barataud, 2012).

Positionnement des enregistreurs

Le positionnement des points d'enregistrement doit être identique pour tous les suivis (a minima d'une même année), afin de suivre l'évolution de l'activité en fonction des périodes biologiques.

- Maintenir une **cohérence d'implantation entre les points d'enregistrement** placés lors de la caractérisation de l'état initial et ceux placés lors des suivis post-implantation de la centrale photovoltaïque.
- Placement et répartition des enregistreurs : les enregistreurs seront répartis dans la zone d'étude du projet pour faire varier les distances à chaque type de lisière (urbaine, forestière, agricole, etc.). Lorsque le nombre de points d'enregistrement est minimal (3 ou 5 selon le type de milieu), un 1er point d'enregistrement au cœur de la zone d'implantation potentielle du projet, un 2nd point en lisière de celle-ci ainsi qu'un 3ème en zone témoin.
- **Site témoin** : il doit se situer à une distance minimale de **150m de l'emprise** du parc et de ses voies d'accès. Il est recommandé de positionner le témoin dans un environnement similaire à celui du site d'étude. Si cela n'est pas possible, privilégier un habitat semi-naturel à faible probabilité d'évolution, non impacté par le projet. Eviter les zones urbaines et les milieux agricoles présentant de fortes variations intra et inter-annuelles. Pour les sites de plus de 25 hectares, il est recommandé de créer un deuxième point d'enregistrement témoin.



La mise en place de **sites témoins**, associés aux états initiaux, est une proposition d'évolution méthodologique du cadre de l'étude d'impact d'un projet photovoltaïque au sol. Les difficultés de sa mise en place seront à évaluer «au cas par cas». La mobilisation de sites témoins sera dépendante de la capacité du porteur de projet à mobiliser le foncier nécessaire, dans un rayon géographique cohérent. Une mutualisation des sites témoins entre plusieurs projets locaux d'aménagement peut être étudiée. Rappelons que les sites témoins permettront de déterminer si les variations d'activité chiroptérologique observées, post-construction du projet, sont imputables soit à l'aménagement solaire soit à des variations inter-annuelles.

B – DISPOSITIFS COMPLÉMENTAIRES DE MESURE DE L'ACTIVITÉ DES CHIROPTÈRES

Dans le cas d'un questionnement particulier, les méthodes d'imageries (thermique ou infrarouge), de trajectographie 3D ou les écoutes actives peuvent permettre d'approfondir ponctuellement la caractérisation de l'état initial. Par exemple, cette stratégie est pertinente pour évaluer l'utilisation d'un élément linéaire en tant que couloir de déplacement ou pour vérifier la présence/absence d'une colonie, en sortie de gîte.

C – RECHERCHE DE GÎTE

La recherche de gîtes doit être réalisée de manière systématique lors de l'état initial.

Une première étape d'étude bibliographique, nécessitant un accès facilité aux bases de données chiroptérologiques, est indispensable. La mise à disposition des données

de gîtes pour les bureaux d'études devrait être facilitée par les institutions détentrices de l'information Il convient ensuite d'inspecter le bâti de la zone d'étude de manière exhaustive. Enfin, une inspection poussée des arbres sur le site doit être menée afin d'identifier de potentiels arbres gîtes porteurs de dendrohabitats.

La recherche bibliographique doit être étendue au minimum à **10km** autour du site d'étude (Laforge et al., 2021), la recherche de bâti favorable et la recherche arboricole au minimum à **1km** autour du site d'étude.

3 – SUIVIS POST-IMPLANTATION

Les suivis post-implantation permettront de vérifier la concordance entre les impacts estimés dans l'étude d'impact sur la base de l'état initial, et les effets réels.

Ils permettent également aux pétitionnaires de s'assurer de l'efficacité des mesures d'évitement/réduction et de gestion mises en œuvre sur la centrale photovoltaïque.



Crédits photo : ©CNR

Le suivi post-implantation de la centrale photovoltaïque sera réalisé selon le **même protocole que l'état initial**, afin de quantifier l'évolution de l'activité. Pour ce faire, le bureau d'études réalisant l'étude d'impact indiquera dans son rapport l'emplacement des enregistreurs, le matériel utilisé, les dates de passages et tiendra à disposition les données brutes par exemple via le dépôt sur la plateforme Vigie-chiro (nombre de contacts, fichier d'enregistrement format .wav). Cette transparence sur l'acquisition des données est essentielle à une meilleure intégration des enjeux biodiversité et complémentaire aux informations transmises sur DEPOBIO.

Afin d'obtenir suffisamment de réplicats et de réaliser des analyses statistiques locales, le suivi sera réalisé a minima les **deux premières années post-implantation** (N+1, N+2). Il est recommandé de les poursuivre en année N+5 afin d'affiner les tendances observées. En effet, les chiroptères sont des espèces pouvant répondre rapidement à des changements locaux, mais leur longévité rend également important de les suivre sur du long terme pour observer leur adaptation à un nouvel environnement. Un suivi plus long peut également être exigé lors de l'instruction, car les pétitionnaires sont tenus de s'assurer de l'effectivité de leurs mesures aussi longtemps que durent les impacts.

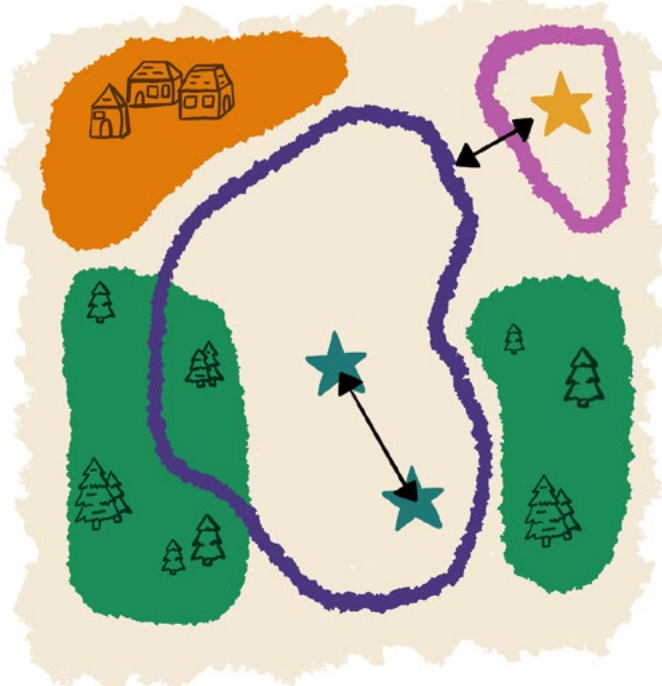
Le respect d'un protocole commun entre l'état initial et le suivi post implantation est la seule manière robuste de caractériser les incidences et l'effectivité des mesures ERCAS (Eviter - Réduire - Compenser - Accompagner - Suivre). Il offre aussi la possibilité de mettre en place une gestion adaptative des centrales, ajustant les mesures aux effets réellement observés sur les chiroptères.

PROTOCOLE TYPE

DIAGNOSTIC

SUIVI

HOMOGÈNE



HÉTÉROGÈNE




LÉGENDE

- | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Zone artificialisée |  Zone minérale |  Sm4 témoin |  Centrale photovoltaïque |
|  Forêt |  Friche |  Site d'étude |  Distance minimale de 150m |
|  Mare |  Sm4 |  Zone témoin | |



6 – INTÉGRER LES ENJEUX CHIROPTÈRES TOUT AU LONG DE LA VIE D'UN PROJET PHOTOVOLTAÏQUE

 Le développement du photovoltaïque tient une place centrale dans la plupart des scénarios prospectifs pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (ADEME TRANSITION 2050),

pouvant contrarier des objectifs de lutte contre l'érosion de la biodiversité (Tölgyesi et al., 2023). Lorsqu'ils sont situés dans des **paysages fortement anthropisés** (ex : paysage agricoles intensifs, friches industrielles) à faible niveau de biodiversité, les centrales photovoltaïques peuvent, cependant, constituer des **réservoirs** pour certains compartiments de la biodiversité comme les pollinisateurs (Blaydes et al. 2021), à conditions qu'ils soient conçus et **gérés** de façon à être **respectueux de l'environnement** (Blaydes et al. 2022) soulignant ainsi toute l'importance de mettre en œuvre des bonnes pratiques lors des phases de planification, de conception et de gestion des centrales. Ce chapitre établit une **liste non exhaustive** des mesures à mettre en place pour favoriser la présence des chiroptères sur les sites photovoltaïques au sol dans l'état actuel des connaissances.

Pour aller plus loin dans le déploiement de ces mesures, n'hésitez pas à consulter [les guides PIESO](#) : Guide technique d'éco-conception des centrales photovoltaïques, [WWF](#) : Démarche énergies renouvelables et durables – Module « Photovoltaïque au sol » et [ADEME](#) : Photovoltaïque, sol et biodiversité : enjeux et bonnes pratiques ainsi que l'article de Tölgyesi et al. (2023).

1 – ÉTAPE D'ÉVITEMENT ET DE PLANIFICATION TERRITORIALE



- Privilégier les **sites déjà fortement artificialisés** : toitures/parkings/friches industrielles. Ces sites à moindres enjeux environnementaux représentent des surfaces considérables en France (Bódis et al., 2019 ; Joshi et al. 2021) et si ce type de surfaces était systématiquement mobilisé, cela pourrait subvenir pour une **large part, voir l'intégralité**, des objectifs de la PFE ([Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations, 2013](#) ; [Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis, 2023](#)). Cette approche mérite d'être encouragée, tout en favorisant l'étude des leviers techniques/financiers pour la rendre plus accessible, d'autant que bien souvent l'installation sur toiture génère un effet de rebond par imitation (Irwin 2021).

Dans les cas où des sites déjà fortement artificialisés n'ont pu être mobilisés, **il faut éviter les milieux naturels et en particulier ceux utilisés par les chiroptères, comme les zones humides, ripisylves, forêts et lisières forestières.**

- Consacrer une attention particulière à la **préservation de la connectivité paysagère**, et à la prise en compte des **trames verte, bleue, noire et brune existantes**, non seulement au niveau du site, mais aussi à une échelle paysagère. Les exigences

écologiques des chiroptères les amènent à parcourir de vastes domaines vitaux (de quelques centaines d'hectares à plusieurs dizaines de milliers d'hectares, Laforge et al., 2021) et de nombreuses espèces sont particulièrement sensibles à la perte de connectivité au sein des paysages (Pinaud et al., 2018). Il faut donc veiller à ce que l'emplacement d'une centrale photovoltaïque ne contribue pas à affecter significativement la connectivité paysagère (notamment entre terrains de chasse et colonies de reproduction).

- Estimer les **effets cumulés** avec les projets photovoltaïques et autres projets d'aménagements sur le territoire, principalement en termes de connectivité paysagère.

2 – CONCEPTION

- Réaliser une étude d'impact robuste (voir chapitre 5).
- Prendre en compte l'impact des Obligations Légales de Débroussaillage dans les études d'impact. Ces dernières nécessitant potentiellement l'abattage d'arbres
- Réduire, tant que faire se peut, la distance entre le coeur de parc et la lisière (voir chapitre 3), ce qui serait visiblement aussi favorable aux pollinisateurs (Tölgyesi et al., 2023) et/ou séparer la centrale en différents îlots lorsque les enjeux de continuité écologique sont forts pour d'autres taxons (Buton, 2023).

Pour aller plus loin : PIESO : ER1, ER2 // WWF : 2.1.1, 5.1.1, 5.1.2, 7.2.1

3 – ÉTAPE DE RÉDUCTION, PROTECTION DES HABITATS LORS DES TRAVAUX

Pendant la phase des travaux, certaines actions simples permettent de limiter les impacts du chantier :

- Limiter le terrassement, le décapage et la compaction du sol, ainsi que sa pollution.
- Conserver les horizons de sols intacts.
- Éviter les travaux et éclairages nocturnes.
- Planifier les travaux d'abattage d'arbres de mi-septembre à début novembre pour
- éviter les périodes sensibles d'hibernation et de parturition. Réaliser une expertise de chaque arbre à abattre et pratiquer un abattage doux sur les arbres gîtes potentiels.

Pour aller plus loin : PIESO : ER3, ER4, ER6, ER7, ER8, ER12 // WWF : 7.2.2



Crédits photo : ©Yoann Peyrard - Oreillard gris

4 – GESTION DES HABITATS EN PHASE D'EXPLOITATION

Les mesures proposées visent l'expression d'habitats semi-naturels variés, favorables à la biodiversité.

A – ÉLÉMENTS ARBORÉS

- Maintenir/Créer des **structures linéaires végétales** qui ont une influence positive sur l'activité et la diversité des chiroptères (Foxley et al., 2023). En intégrant ou en renforçant ces éléments, il est possible de créer un environnement favorable et de promouvoir le maintien des populations et leur abondance ([ressource OFB](#)).
- Planter des **haies riches en lisière des centrales** (lorsque cela est compatible avec les OLD), avec des espèces végétales variées et adaptées au contexte local. La largeur minimale recommandée pour une haie est de trois mètres mais une largeur plus importante est conseillée pour favoriser la biodiversité (Graham et al., 2018).
- **Tailler les haies de manière raisonnée** ([ressource OFB](#)), tous les trois ans pour favoriser leur développement et la diversité d'insectes (Froidevaux et al., 2019a).
- Conduire la gestion de la haie pour l'amener à présenter du gros bois, **quitte à tailler les arbres en têtard** s'il existe des contraintes de hauteur de la haie (Lacoeuilhe et al. 2016, 2018).

B – VÉGÉTATION HERBACÉE

- **Réensemencer** dès la fin du terrassement et de préférence à l'automne avec des espèces locales, pour limiter le développement des espèces invasives, protéger le sol de l'érosion et faciliter la reprise de la végétation (Tölgyesi et al., 2023) ([Ressource AFB](#)).
- Ensemencer avec une **diversité d'espèces locales de graminées, de légumineuses et de fleurs sauvages** permettra de bénéficier d'une grande diversité d'espèces d'invertébrés. De plus, une variété de plantes avec des floraisons échelonnées offrira des sources de nectar pendant les périodes où les ressources alimentaires sont moins abondantes (Montag et al., 2016).
- Utiliser des **mélanges locaux optimisés en fonction du contexte local du site**, et différents pour les allées et sous les panneaux (Tölgyesi et al., 2023).
- Sélectionner des espèces végétales locales compatibles avec les fonctions essentielles de l'écosystème de type prairial, soit la pollinisation, la séquestration du carbone, la production de fourrage et la prévention de l'érosion des sols (Tölgyesi et al., 2023).



Crédits photo : ©Yoann Peyrard
Minoptère de Schreibers

- Créer des **marges fleuries**, le long des clôtures des centrales, peut participer à la création d'habitats temporaires de recherche de nourriture pour les insectes et les chiroptères associés. L'abondance des insectes dans les marges fleuries est corrélée positivement avec l'étendue de la couverture de fleurs sauvages, ce qui indique que la qualité de ces habitats pour les insectes est déterminée par la disponibilité des ressources florales (Peter et al., 2021). Ces bandes fleuries pourraient être au pied des haies/clôtures, ou alors dans le périmètre des OLD en sélectionnant des mélanges fleuris de faible hauteur (origan par exemple).

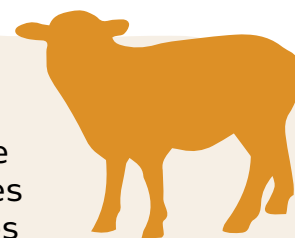
C – GESTION DE LA VÉGÉTATION

Le mode de gestion, qu'il s'agisse du pâturage ou du fauchage, a un impact sur la végétation de la centrale photovoltaïque (Rysiak et al., 2021).

Chaque pratique entraînera des compositions botaniques différentes, avec des assemblages d'insectes et d'arthropodes favorisés en fonction du mode de gestion. Par exemple, le pâturage agit comme une perturbation sélective, créant des ouvertures qui bénéficient aux plantes à faible et moyenne croissance, ainsi qu'aux papillons et aux araignées (Hudewenz et al., 2012). A contrario, le fauchage tardif, en étant non sélectif, semble maintenir une plus grande richesse en espèces et est, par exemple, plus favorable pour les sauterelles ou les vers de terre (Tälle et al., 2016).

- Favoriser la **gestion différenciée** pour avoir toujours une zone disponible avec de la végétation haute et en floraison.
- Travailler sur des **OLD moins impactantes**, en pas japonais, selon les dispositions du département.
- **Ne pas utiliser de produits phytosanitaires** sur le site photovoltaïque.
- Réaliser un premier passage pour la fauche mécanique en Janvier-Février et le second passage tardif entre Octobre-Novembre (Guide Pieso).

Le dilemme du pâturage : Ces dernières années, l'écopâturage a connu une expansion significative, étant considéré comme une solution idéale pour une gestion écologique, compatible avec les contraintes incendies et environnementales. De nombreux troupeaux ovins ont été constitués spécifiquement dans ce but. **Cependant, cette croissance exponentielle n'est pas exempte de conséquences.** Tout d'abord, ces troupeaux doivent trouver des lieux d'hivernage, ce qui pose problème dans certaines régions déjà en manque de terres agricoles. **Les laisser pâturer tout l'hiver sur des parcs photovoltaïques a un impact délétère sur le sol.** De plus, la charge pastorale est rarement contrôlée de manière adéquate. La rotation du pâturage dans le parc maintient une végétation de faible hauteur tout au long de la saison et sur tout le site. La présence de moutons sur un site devrait respecter plusieurs conditions, notamment **une faible charge pastorale, une présence limitée à quelques semaines** définies selon les enjeux floraux, pour maîtriser la végétation tout en lui permettant de repousser, un soutien exclusif aux filières agricoles déjà établies, **une utilisation réduite, voire inexistante, de traitements antiparasitaires, et une conformité aux normes de bien-être animal.**



D – AMÉNAGEMENTS ARTIFICIELS

Les aménagements artificiels sont conçus pour offrir un **refuge temporaire** à la biodiversité en attendant que l'écosystème puisse retrouver pleinement sa fonctionnalité. Aussi, compte tenu de l'incertitude sur la réussite ou non de ce type de mesures, et de son caractère artificiel, les gîtes artificiels sont considérés comme des mesures «d'accompagnement» et non de «compensation» des atteintes aux habitats de chiroptères.

- Installer des **gîtes** pour les chiroptères implique d'imiter au mieux les gîtes naturels, approche la plus efficace pour encourager leur occupation. Il est essentiel de prendre en considération les besoins spécifiques de chaque espèce plutôt que d'installer uniquement des gîtes « boîte aux lettres ». Il est recommandé de **diversifier l'orientation et la couleur** des gîtes afin de créer une variété de conditions thermiques au sein des sites. Ceci revêt une importance particulière dans les régions plus chaudes et arides, où la mortalité due à la chaleur constitue une préoccupation majeure.
- **Creuser des mares**, même si elles sont temporaires, lorsque cela est possible sur le site, contribue à accroître la diversité des proies disponibles pour les chiroptères. De même, la mise en place d'**hibernaculums** ou de **tas de bois mort** favorisent la présence d'une grande variété d'insectes.

E – SUIVI DES MESURES

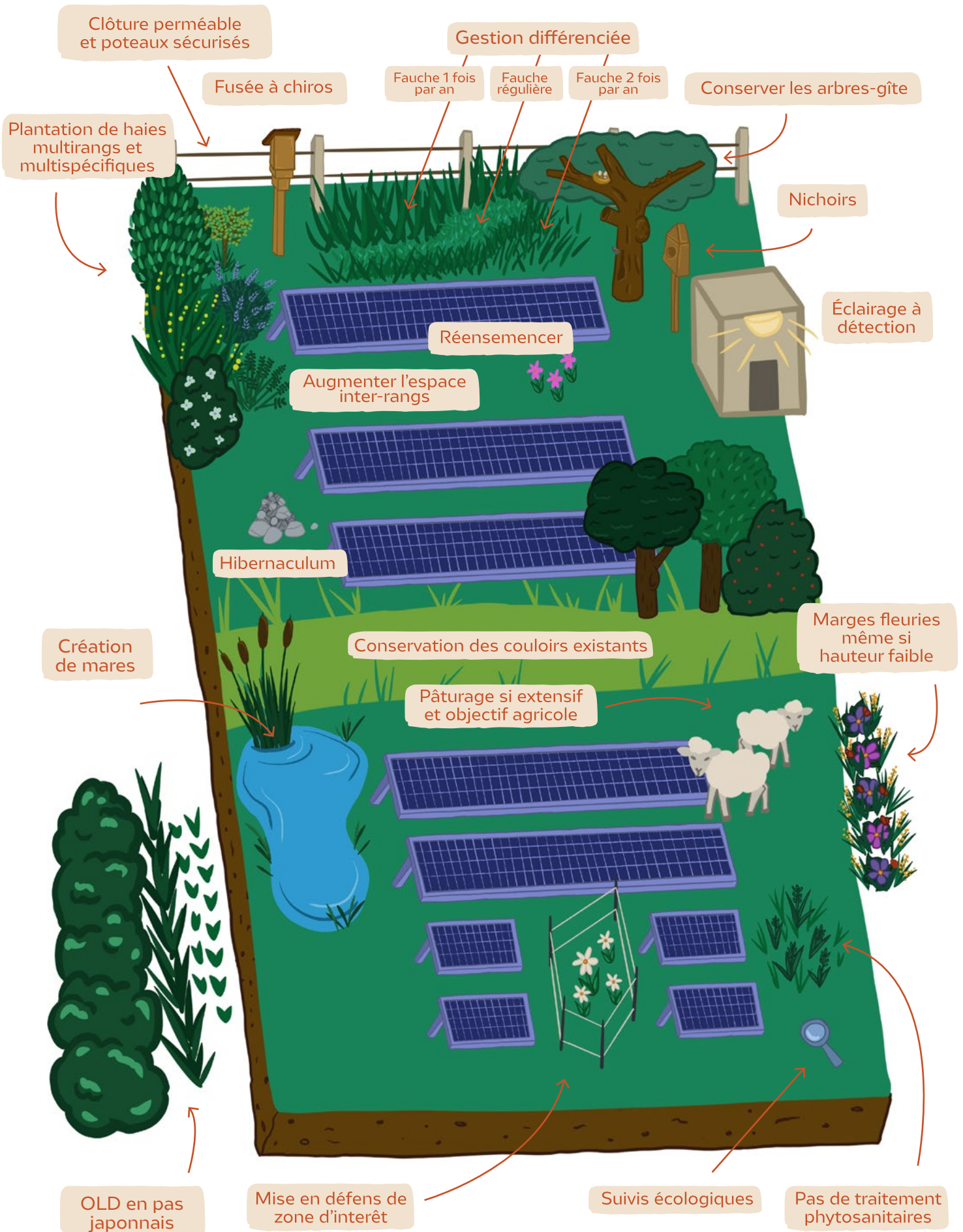
Bon nombre des mesures envisagées dans ce chapitre n'ont pas encore été expérimentées dans le contexte des centrales photovoltaïques, et leurs impacts potentiels demeurent à évaluer.

- **Vérifier l'efficacité** des mesures mises en place grâce à des protocoles de suivis robustes (voir chapitre 5) et ajuster au besoin.
- **Adapter les mesures** en fonction de l'évolution de la biodiversité sur le site (l'apparition/disparition d'espèces à enjeux). Par exemple, lorsque la mise en défens d'une zone vise à protéger une plante, elle peut entraîner la fermeture de l'écosystème et conduire à la disparition de cette plante. Il est donc important de retravailler régulièrement les objectifs de conservation, de rédiger un plan de gestion de biotope et de s'assurer de sa bonne mise en œuvre et efficacité..



Crédits photo : ©CNR - Matisse Moirenc

EXEMPLE D'AMÉNAGEMENTS À METTRE EN PLACE SUR UN PARC PHOTOVOLTAÏQUE



BIBLIOGRAPHIE



Crédits photo : ©Yoann
Peyraud - Murin à oreilles
échancrées

- Armstrong, A., Ostle, N.J., Whitaker, J., 2016. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environ. Res. Lett.* 11, 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Arthur, L., Lemaire, M., 2009. Les Chauves-souris de France Belgique Luxembourg et Suisse. BIOTOPE.
- Bader, E., Jung, K., Kalko, E.K.V., Page, R.A., Rodriguez, R., Sattler, T., 2015. Mobility explains the response of aerial insectivorous bats to anthropogenic habitat change in the Neotropics. *Biol. Conserv.* 186, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.02.028>
- Barataud, M., 2012. *Ecologie acoustique des chiroptères d'Europe : Identification des espèces, étude de leurs habitats et comportements de chasse*, Biotope. ed, Muséum national d'Histoire naturelle. Paris.
- Barré, K., Le Viol, I., Julliard, R., Pauwels, J., Newson, S.E., Julien, J.-F., Claireau, F., Kerbiriou, C., Bas, Y., 2019. Accounting for automated identification errors in acoustic surveys - Barré - 2019 - *Methods in Ecology and Evolution* - Wiley Online Library. *Methods Ecol. Evol.* 10, 1171-1188.
- Barré, K., Spoelstra, K., Bas, Y., Challéat, S., Kiri Ing, R., Azam, C., Zissis, G., Lapostolle, D., Kerbiriou, C., Le Viol, I., 2020. Artificial light may change flight patterns of bats near bridges along urban waterways. *Anim. Conserv.* 24, 259-267. <https://doi.org/10.1111/acv.12635>
- Bas, Y., Kerbiriou, C., Roemer, C., Julien, J.-F., 2020. Bat populations trends. *Muséum Natl. Hist. Nat.*
- Blaydes, H., Potts, S.G., Whyatt, J.D., Armstrong, A., 2021. Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 145, 111065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>
- Bódis, K., Kougiás, I., Jäger-Waldau, A., Taylor, N., Szabó, S., 2019. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 114, 109309. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109309>
- Bunkley, J.P., McClure, C.J.W., Kleist, N.J., Francis, C.D., Barber, J.R., 2015. Anthropogenic noise alters bat activity levels and echolocation calls. *Glob. Ecol. Conserv.* 3, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.11.002>
- Buton, C., 2023. *Impacts écologiques des clôtures et solutions de remédiation possibles. État des connaissances et bonnes pratiques spécifiques aux centrales photovoltaïques au sol*, Cabinet X-AEQUO
- Foxley, T., Lintott, P., Stone, E., 2023. What drives bat activity at field boundaries? *J. Environ. Manage.* 329, 117029. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117029>
- Gilmour, L.R.V., Holderied, M.W., Pickering, S.P.C., Jones, G., 2021. Acoustic deterrents influence foraging activity, flight and echolocation behaviour of free-flying bats. *J. Exp. Biol.* 224, jeb242715. <https://doi.org/10.1242/jeb.242715>
- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A.P., Moldenke, A.R., DeBano, S.J., Best, L.R., Higgins, C.W., 2021. Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Sci. Rep.* 11, 7452. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>
- Greif, S., Siemers, B.M., 2010. Innate recognition of water bodies in echolocating bats. *Nat. Commun.* 1, 107. <https://doi.org/10.1038/ncomms1110>
- Greif, S., Zsebők, S., Schmieder, D., Siemers, B.M., 2017. Acoustic mirrors as sensory traps for bats. *Science* 357, 1045-1047. <https://doi.org/10.1126/science.aam7817>
- Grodsky, S.M., Campbell, J.W., Hernandez, R.R., 2021. Solar energy development impacts flower-visiting beetles and flies in the Mojave Desert. *Biol. Conserv.* 263, 109336. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109336>
- Grodzinski, U., Spiegel, O., Korine, C., Holderied, M.W., 2009. Context-dependent flight speed: evidence for energetically optimal flight speed in the bat *Pipistrellus kuhlii*? *J. Anim. Ecol.* 78, 540-548. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2009.01526.x>

- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., Robertson, B., 2010. Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects. *Conserv. Biol.* 24, 1644–1653. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x>
- Hudewenz, A., Klein, A.-M., Scherber, C., Stanke, L., Tschardt, T., Vogel, A., Weigelt, A., Weisser, W.W., Ebeling, A., 2012. Herbivore and pollinator responses to grassland management intensity along experimental changes in plant species richness. *Biol. Conserv.* 150, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.02.024>
- Irwin, N.B., 2021. Sunny days: Spatial spillovers in photovoltaic system adoptions. *Energy Policy* 151, 112192. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112192>
- Joshi, S., Mittal, S., Holloway, P., Shukla, P.R., Ó Gallachóir, B., Glynn, J., 2021. High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation. *Nat. Commun.* 12, 5738. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25720-2>
- Lacoëuilhe, A., Machon, N., Julien, J.-F., Kerbiriou, C., 2018. The Relative Effects of Local and Landscape Characteristics of Hedgerows on Bats. *Diversity* 10, 72. <https://doi.org/10.3390/d10030072>
- Lacoëuilhe, A., Machon, N., Julien, J.-F., Kerbiriou, C., 2016. Effects of hedgerows on bats and bush crickets at different spatial scales. *Acta Oecologica* 71, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2016.01.009>
- Laforge, A., Archaux, F., Coulon, A., Sirami, C., Froidevaux, J., Gouix, N., Ladet, S., Martin, H., Barré, K., Roemer, C., Claireau, F., Kerbiriou, C., Barbaro, L., 2021. Landscape composition and life-history traits influence bat movement and space use: Analysis of 30 years of published telemetry data. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 30, 2442–2454. <https://doi.org/10.1111/geb.13397>
- Leroux, C., Le Viol, I., Valet, N., Kerbiriou, C., Barré, K., 2023. Disentangling mechanisms responsible for wind energy effects on European bats. *J. Environ. Manage.* 346, 118987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118987>
- LPO, Marx, G., 2022. Centrales photovoltaïques et biodiversité : synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer. Pôle protection de la Nature
- Mimet, A., Kerbiriou, C., Simon, L., Julien, J.-F., Raymond, R., 2020. Contribution of private gardens to habitat availability, connectivity and conservation of the common pipistrelle in Paris. *Landsc. Urban Plan.* 193, 103671. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103671>
- Montag, H., Parker, G. & Clarkson, T., 2016. The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity; A Comparative Study. Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity.
- O'Mara, M.T., Amorim, F., Scacco, M., McCracken, G.F., Safi, K., Mata, V., Tomé, R., Swartz, S., Wikelski, M., Beja, P., Rebelo, H., Dechmann, D.K.N., 2021. Bats use topography and nocturnal updrafts to fly high and fast. *Curr. Biol.* 31, 1311-1316.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.12.042>
- Peter, F., Brucia, L., Carstens, F., Götttsche, M., Diekötter, T., 2021. Sown wildflower fields create temporary foraging habitats for bats in agricultural landscapes. *Biol. Conserv.* 264, 109364. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109364>
- Pinaud, D., Claireau, F., Leuchtmann, M., Kerbiriou, C., 2018. Modelling landscape connectivity for greater horseshoe bat using an empirical quantification of resistance. *J. Appl. Ecol.* 55, 2600–2611. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13228>
- Polak, T., Korine, C., Yair, S., Holderied, M.W., 2011. Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert. *J. Zool.* 285, 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2011.00808.x>
- Razgour, O., Rebelo, H., Puechmaille, S.J., Juste, J., Ibáñez, C., Kiefer, A., Burke, T., Dawson, D.A., Jones, G., 2014. Scale-dependent effects of landscape variables on gene flow and population structure in bats. *Divers. Distrib.* 20, 1173–1185. <https://doi.org/10.1111/ddi.12200>
- Reusch, C., Paul, A.A., Fritze, M., Kramer-Schadt, S., Voigt, C.C., 2023. Wind energy production in forests conflicts with tree-roosting bats. *Curr. Biol.* 33, 737-743.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.050>
- Roemer, C., Julien, J., Ahoudji, P.P., Chassot, J., Genta, M., Colombo, R., Botto, G., Negreira, C.A., Djossa, B.A., Ing, R.K., Hassanin, A., Rufay, V., Uriot, Q., Participants, V., Bas, Y., 2021. An automatic classifier of bat sonotypes around the world. *Methods Ecol. Evol.* 12, 2432–2444. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13721>
- Rysiak, A., Chabuz, W., Sawicka-Zugaj, W., Jan Zdulski, Grzywaczewski, G., Kulik, M., 2021. Comparative impacts of grazing and mowing on the floristics of grasslands in the buffer zone of Polesie National Park, eastern Poland. *Glob. Ecol. Conserv.* 27, e01612. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01612>

- Schnitzler, H.-U., Kalko, E.K.V., 2001. Echolocation by Insect-Eating Bats: We define four distinct functional groups of bats and find differences in signal structure that correlate with the typical echolocation tasks faced by each group. *BioScience* 51, 557–569. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0557:EBIEB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0557:EBIEB]2.0.CO;2)
- Szabadi, K.L., Kurali, A., Rahman, N.A.A., Froidevaux, J.S.P., Tinsley, E., Jones, G., Görföl, T., Estók, P., Zsebők, S., 2023. The use of solar farms by bats in mosaic landscapes: implications for conservation. *Glob. Ecol. Conserv.* e02481. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02481>
- Tälle, M., Deák, B., Poschlod, P., Valkó, O., Westerberg, L., Milberg, P., 2016. Grazing vs. mowing: A meta-analysis of biodiversity benefits for grassland management. *Agric. Ecosyst. Environ.* 222, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.008>
- Threlfall, C.G., Law, B., Banks, P.B., 2012. Influence of Landscape Structure and Human Modifications on Insect Biomass and Bat Foraging Activity in an Urban Landscape. *PLOS ONE* 7, e38800. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038800>
- Tinsley, E., Froidevaux, J.S.P., Zsebők, S., Szabadi, K.L., Jones, G., 2023. Renewable energies and biodiversity: Impact of ground-mounted solar photovoltaic sites on bat activity. *J. Appl. Ecol.* 0, 1–11. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14474>
- Tölgyesi, C., Bátori, Z., Pascarella, J., Erdős, L., Török, P., Batáry, P., Birkhofer, K., Scherer, L., Michalko, R., Košulič, O., Zaller, J.G., Gallé, R., 2023. Ecovoltaics: Framework and future research directions to reconcile land-based solar power development with ecosystem conservation. *Biol. Conserv.* 285, 110242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110242>
- Treitler, J.T., Heim, O., Tschapka, M., Jung, K., 2016. The effect of local land use and loss of forests on bats and nocturnal insects. *Ecol. Evol.* 6, 4289–4297. <https://doi.org/10.1002/ece3.2160>
- Uldrijan, D., Kováčiková, M., Jakimiuk, A., Vaverková, M.D., Winkler, J., 2021. Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants. *Ecol. Eng.* 168, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106274>
- Voigt, C.C., Dekker, J., Fritze, M., Gazaryan, S., Hölker, F., Jones, G., Lewanzik, D., Limpens, H.J.G.A., Mathews, F., Rydell, J., Spoelstra, K., Zgamaister, M., 2021. The Impact Of Light Pollution On Bats Varies According To Foraging Guild And Habitat Context. *BioScience* 71, 1103–1109. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab087>



Crédits photo : ©Moirenc - Camille Moirenc

Réalisé par



Avec le soutien
financier de



Et le soutien
scientifique de



LPO Auvergne-Rhône-Alpes

DT Drôme-Ardèche, 18 place Génissieu
26120 Chabeuil

www.auvergne-rhone-alpes.lpo.fr

Mars 2024 - Conception graphique : [Oriane Michaud](#)