



Impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité

Mise à jour des connaissances

REFERENCE

Soubelet H., Salomon C., Silvain JF. (2024). Impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité. Mise à jour des connaissances. Fondation pour la recherche sur la biodiversité

COORDINATION ET REDACTION

Soubelet H., Salomon C., Silvain JF.

Cette publication a été réalisée dans le cadre du programme « **Impact des énergies renouvelables sur la biodiversité** ». Ce programme de financement de projets de recherche porté par la **Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB)** et le **Mirova Research Center** vise à mieux évaluer l'impact des énergies renouvelables sur la biodiversité et à produire des recommandations opérationnelles sur de meilleures pratiques à destination des acteurs de la filière.



SOMMAIRE

MISE A JOUR DES CONNAISSANCES	4
QUE SAIT-ON DES IMPACTS DE L'EOLIEN TERRESTRE SUR LA BIODIVERSITE ?	4
1. LES IMPACTS DE L'ENERGIE EOLIENNE TERRESTRE SUR LA BIODIVERSITE (SYNTHESE DES IMPACTS DE L'EOLIEN TERRESTRE SUR LA BIODIVERSITE, IDENTIFIES DANS LA REVUE DE LITTERATURE PUBLIEE PAR LA FRB EN 2020)	4
2. LES IMPACTS DE L'ENERGIE EOLIENNE TERRESTRE SUR LE DEPLACEMENT DE LA FAUNE (DECRYPTAGE DE LA PUBLICATION DE TOLVANEN ET AL. 2023)	8
3. LES DEPLACEMENTS D'IMPACTS : DE L'ATTENUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A LA PERTE DE BIODIVERSITE (DECRYPTAGE DE LA PUBLICATION DE WOOD HANSEN ET VAN DEN BERGH, 2024)	9
4. LES INSECTES, UN GROUPE PEU ETUDIE MAIS IMPACTE PAR LES INFRASTRUCTURES EOLIENNES TERRESTRES (DECRYPTAGE DE LA PUBLICATION DE THESS ET LENGSFELD, 2022).....	11
5. LES COMPROMIS EN TERMES D'USAGES DES TERRES	13
QUELLES SONT LES LACUNES DE CONNAISSANCES ENCORE EXISTANTES ?	15
BIBLIOGRAPHIE	16

MISE A JOUR DES CONNAISSANCES

D'après les données de l'agence internationale des énergies renouvelables, l'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide au monde et avec l'énergie solaire, elle représentait 88 % de la capacité renouvelable ajoutée en 2021. Par ailleurs, l'agence internationale de l'énergie estime que pour atteindre le scénario de zéro émission nette d'ici 2050, il faudra encore plus que doubler la capacité éolienne mondiale. Dans les années à venir, la majorité de l'énergie éolienne ajoutée sera toujours produite à terre, et des éoliennes dotées de tours plus hautes et de pales plus longues seront développées pour accroître la rentabilité et faire face aux conditions de vent faible. Il a été estimé qu'à l'échelle mondiale, plus de 11 millions d'hectares de terres naturelles pourraient être perdus à cause de l'énergie éolienne et solaire, ce qui aurait un impact sur plus de 3,1 millions d'hectares de zones clés pour la biodiversité et sur plus de 1 500 espèces d'animaux vertébrés menacées, en particulier dans les zones tropicales. Bien que l'augmentation de la capacité éolienne soit cruciale pour tenter d'atténuer le changement climatique, ses effets potentiels sur la biodiversité semblent nécessiter un compromis entre l'atténuation du changement climatique et les objectifs de conservation de la biodiversité.

QUE SAIT-ON DES IMPACTS DE L'EOLIEN TERRESTRE SUR LA BIODIVERSITE ?

Aujourd'hui, les impacts sur la biodiversité et les écosystèmes des éoliennes terrestres sont avérés, quoiqu'il reste des différences marquées en termes de recherche en fonction des taxons et des groupes d'êtres vivants, les vertébrés volants étant les groupes les plus étudiés.

La revue de littérature de la FRB en 2020 (Niang et Goffaux 2020) a identifié plusieurs types d'impacts. Un résumé est présenté dans le point 1, ci-après. En complément, Tolvanen *et al.* (2023) ont fait une synthèse pour essayer de quantifier les effets des déplacements d'espèces par les éoliennes, un des points qui avait été signalé comme une lacune de connaissance importante (voir point 2).

Une étude récente, (Wood Hansen et van den Bergh, 2024) a depuis montré que l'atténuation du changement climatique est à l'origine d'une transition (dans l'activité humaine, les systèmes énergétiques et l'utilisation des matériaux), qui déplacera potentiellement la pression du changement climatique vers d'autres problèmes environnementaux, mais que l'évaluation du transfert net d'impact n'est qu'imparfairement réalisée. Un résumé de leurs conclusions est présenté dans le point 3 de ce chapitre.

Thess et Lengsfeld (2022) se sont intéressé au coût social de l'énergie éolienne terrestre à travers trois cibles, peu étudiées de l'impacts, (1) les insectes, (2) la distribution spatio-temporelle de la vitesse de l'air, de la température, de l'humidité et des précipitations à proximité des parcs éoliens et (3) les humains à travers les émissions sonores. Un résumé de leurs conclusions relatives aux insectes est présenté dans le point 4 ci-après.

Lamhamadi et de Vries ont publié en 2022 une revue de littérature pour analyser trois aspects des implantations éoliennes, (1) les compromis entre les usages des terres des politiques d'aménagement, (2) les impacts environnementaux et (3) l'opposition du public. Ces trois aspects amènent de la contradiction aux discours dominants en faveur des énergies renouvelables et doivent être pris en compte pour ne pas mettre en péril la durabilité de l'investissement et donc l'objectif partagé de réduction des émissions de gaz à effets de serre. Un résumé des conclusions principales de la revue relatives aux impacts sur les terres et la biodiversité est présenté dans le point 5 ci-après.

1. **Les impacts de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité (synthèse des impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité, identifiés dans la revue de littérature publiée par la FRB en 2020)**

Les impacts négatifs des éoliennes terrestres sur la biodiversité sont documentés de façon variable. Il existe de nombreuses publications sur les vertébrés volants : chauves-souris et oiseaux, mais beaucoup moins sur les autres groupes d'espèces. Il est néanmoins difficile de généraliser les données quantitatives présentes dans ces publications pour estimer l'impact du parc éolien français sur les oiseaux, car les impacts dépendent aussi des conditions biogéophysiques locales.

Les impacts sur les composants de la biodiversité sont de différents types : (1) mortalité directe par collision, (2) mortalité indirecte par la diminution de la qualité de l'habitat et la disponibilité des ressources à proximité des éoliennes, (3) comportements d'évitements ou de déplacements en raison de perte de perchoirs, perte de nourriture, perte d'habitat, barrière écologique. Les espèces les moins mobiles sont particulièrement impactées : reptiles, amphibiens, invertébrés, flore. Le phénomène d'évitement est beaucoup moins documenté (sauf chez les chauves-souris et les oiseaux), car plus difficile à mettre en évidence, que la mortalité directe par collision. Notons que le défrichement d'espaces boisés peut avoir des effets contrastés, négatifs du fait de la perte d'habitats pour les espèces animales forestières mais qu'il peut également entraîner, à moyen ou long termes la création de milieux favorables comme les clairières et lisières forestières. On ne négligera pas le fait que la destruction de couverts forestiers impacte aussi le bilan carbone.

En complément de l'étude FRB, signalons que, même si cela est moins connu et moins documenté, les parcs éoliens peuvent avoir une incidence négative sur la diversité des espèces végétales locales, un phénomène à prendre en compte en cas de présence d'espèces végétales rares, endémiques et menacées (Urziceanu *et al.*, 2021)

Les oiseaux sont impactés par des collisions directes, la modification de leur habitat, le bruit et la lumière des éoliennes. Les espèces les plus tuées sont celles dont le vol correspond à l'aire d'action des turbines. C'est le cas de certaines espèces à fortes populations, menacées ou non, comme les alouettes (*Eremophila alpestris*, *Alauda arvensis*, *Chersophilus duponti*), mais également des espèces protégées, en particuliers les migrants et les rapaces. Les populations d'oiseaux sont également impactées par la gêne occasionnée par les installations avec des comportements d'évitement plus ou moins prononcé en fonction des espèces. Pour les rapaces diurnes, principalement impactés pendant la période de nidification, s'ajoute le fait qu'ils présentent souvent de faibles effectifs de population (quelques dizaines de couples nicheurs pour certains) : l'impact cumulé des collisions avec les éoliennes aggrave donc leur état de conservation.

- Une étude française de la LPO (2017) souligne que :
 - 81 % des cadavres retrouvés appartiennent à des espèces protégées ou présentant une préoccupation majeure quant à leur état de conservation.
 - 60% des cadavres retrouvés appartiennent à des oiseaux migrants.
- Une étude suisse (Aschwanden *et al.* 2018) relève que :
 - 55 % de décès concerne les roitelets (*Regulus* sp.), des migrants nocturnes (perte de visibilité de l'infrastructures la nuit ou en conditions météorologiques défavorables).
- Des études aux États-Unis (Smallwood, 2013 ; Walston *et al.*, 2018) estiment à :
 - 573 000 les décès annuels d'oiseaux dus aux éoliennes.
 - Dont 83 000 décès de rapaces.
- Plusieurs études montrent que le déplacement vers des habitats plus favorables entraîne une baisse d'efficacité de reproduction chez les rapaces et une diminution de leur abondance.
- Les turbines peuvent être perçues comme un risque de préation et donc induire une stratégie d'évasion/ évitement ? pour les espèces telles que l'alouette de Dupont.

- Les espèces ont des réponses contrastées à l'installation des parcs éoliens : Pearce-Higgins *et al.* (2012) en comparant les données de 12 parcs éoliens de montagne au Royaume-Uni, ont observé une diminution des densités de Tétras lyre (*Lagopus lagopus scoticus*), bécassines (*Gallinago gallinago*) et courlis (*Numenius arquata*), et une augmentation des densités de Tariers pâtre (*Saxicola rubicola*), d'Alouettes des champs (*Alauda arvensis*) et Pipits des prés (*Anthus pratensis*), et des comportements d'évitement des turbines et routes d'accès pour le Pluvier doré (*Pluvialis apricaria*) et la Bécassine des marais (*Gallinago gallinago*).
- Devereux *et al.*, (2008) ont indiqué que la majorité des oiseaux hivernant sur les terres agricoles au Royaume-Uni ne sont probablement pas affectés par les éoliennes en fonctionnement.
- Le Busard Saint-Martin (*Circus pygargus*) a montré un taux d'évitement des turbines de 93,5 % (Schaub *et al.*, 2020).
- Les comportements d'évitement peuvent dépendre du stade de développement du parc éolien (cas des Pygargues à queue cunéiforme *Aquila audax* et des Pygargues à ventre blanc, *Haliaeetus leucogaster*) (Schuster *et al.*, 2015).
- Jenkins *et al.*, (2018) ont montré de forts déplacements vers des zones d'alimentation alternatives à environ 50 km des Grands pélicans blancs dans une zone de parc éolien proche du littoral, coïncidant avec le cycle de reproduction.
- Les espèces migratrices comme les oies, les échassiers et les Grues cendrées (*Grus grus*), la Cigogne noire (*Ciconia nigra*) sont plus affectées par l'effet barrière (Schuster *et al.*, 2015).
- Le bruit des turbines impacte également les oiseaux en les assourdisant, ce qui diminue leur capacité à communiquer et a des effets sur la défense de leurs territoires, les appels à l'aide des petits, la recherche de partenaires sexuels et donc le succès reproductif.
- Certains oiseaux modifient leurs chants (par exemple, modification de fréquence chez l'alouette) ; ceci peut être un indicateur assez précoce d'une détérioration significative de l'environnement acoustique suite au démarrage du parc éolien (Szymanski *et al.*, 2017).
- Les systèmes d'éclairage nocturnes associés aux turbines peuvent avoir des impacts négatifs sur le comportement de certaines espèces ou peuvent augmenter l'épuisement et la probabilité de collision la nuit (Gómez-Catasús *et al.*, 2018).

Il existe des dispositifs techniques pour réduire la mortalité des rapaces : caméras couplées à des systèmes d'effarouchement sonore ou de mise à l'arrêt des machines, mais leur efficacité est controversée. La restauration des milieux et la préservation de zones sans infrastructures restent les mesures les plus efficaces. En France, les éoliennes qui tuent le plus d'oiseaux sont souvent les plus anciennes, implantées sans considération de la richesse en biodiversité (espaces naturels protégés, réseau Natura 2000) (LPO 2017).

Les chauves-souris peuvent être tuées soit par collision, soit par barotraumatisme (réduction soudaine de pression de l'air à proximité des pales en mouvement). Elles sont également impactées par la perte et la dégradation de leurs habitats et le bruit. Un grand nombre d'études montrent que la seule mortalité par collision pourrait menacer la viabilité des populations et entraîner un risque accru d'extinction. Alors que la plupart des études ont porté sur la mortalité des chauves-souris par collision, très peu ont quantifié la perte d'utilisation des habitats résultant de l'impact négatif potentiel des éoliennes. Des différences dans les résultats des études analysées suggèrent qu'il y a deux effets des éoliennes, l'un répulsif à l'échelle du parc éolien et l'autre attractif à l'échelle de l'éolienne elle-même.

Les collisions sont dues au fait que les chauves-souris pourraient ne pas détecter les pales en raison de la vitesse extrêmement élevée du rotor (jusqu'à 300 km/h à l'extrémité des pales), que pendant la migration ou la chasse elle peuvent voler dans l'aire d'action du rotor (bien documenté), ou qu'elles sont attirées par les turbines (voir ci-après).

L'attraction des chauves-souris pour les éoliennes fluctue selon l'espèce considérée, le sexe et l'âge des individus, la période de l'année ou l'emplacement des éoliennes (Reimer *et al.*, 2018). Elle peut être due à la présence d'un grand nombre d'insectes-proies à proximité des turbines, attirés par la couleur et l'émission de chaleur de la turbine (la majorité des cadavres de chauves-souris rousses (*Lasiurus borealis*) et de chauves-souris cendrées (*Lasiurus cinereus*) ont l'estomac plein indiquant que les individus avaient probablement été tués alors qu'ils cherchaient de la nourriture). Elle peut aussi être due à la présence de partenaire d'accouplement, de perchoirs, en particulier les chauves-souris arboricoles qui perçoivent les éoliennes comme des arbres (Cryan *et al.*, 2014 ; Cryan & Barclay, 2009).

- En Allemagne la mortalité des chauves-souris a été estimée à plus de 250 000 individus par an (FRB, 2017).
- Une étude aux États-Unis estime à 888 000 les décès annuels de chauves-souris dus aux éoliennes (Smallwood, 2013)
- Des études indiquent que :
 - la mortalité est plus élevée à la fin de l'été et en automne, en lien avec les migrations.
 - les espèces les plus sujettes aux collisions sont celles utilisant des appels d'écholocation adaptés aux espace ouvert (genres *Lasiurus*, *Lasionycteris*, *Perimyotis*, *Nyctalus*, *Pipistrellus*, *Vespertilio*, *Eptesicus* et *Chalinolobus*).
- L'effet d'évitement, lié en particulier à la lumière et aux bruits autour des turbines, pourrait gravement affecter les espèces de chauve-souris en Europe en diminuant la disponibilité de leurs habitats (Barré *et al.*, 2018) :
 - Il y aurait ainsi 2400 km de haies perdues pour les chauves-souris sur la base des relevés de terrains en Bretagne et Pays de Loire (FRB 2017).
 - L'effet d'évitement semble affecter la plupart des espèces de chauves-souris, jusqu'à 1000 m autour de chaque éolienne, y compris les chauves-souris glaneuses et d'autres espèces qui ne sont, par ailleurs, généralement pas considérées comme sensibles aux collisions (Barré *et al.*, 2018).
- L'effet barrière des grands parcs éoliens entraîne une perte d'habitat, limite les trajets quotidiens et déconnecte les sites de perchage et les sites d'alimentation (Roeleke *et al.*, 2016).
- En complément de la synthèse FRB, signalons que l'étude de Leroux *et al.* (2023) sur l'incidence sur les chauves-souris européennes de la taille des éoliennes, de leur densité et de leur vitesse de rotation moyenne suggère qu'il faut éviter une forte densité de turbines et les rotors de grande taille et qu'il faut installer les éoliennes le plus loin possible des habitats favorables comme les lisières forestières en veillant à ne pas installer les éoliennes entre ces habitats favorables et la source des vents dominants.
- Le bruit émis par les activités de construction peut endommager les capacités auditives de certaines espèces qui chassent régulièrement en écoute passive (grand murin ou oreillards) affectant ainsi la recherche de nourriture (DREAL, 2017).

Des recherches comparatives dans les parcs éoliens ont établi que les éoliennes pourraient être encore plus nuisibles pour les chauves-souris que pour les oiseaux (Cryan & Barclay, 2009 ; Smallwood, 2013).

2. Les impacts de l'énergie éolienne terrestre sur le déplacement de la faune (décryptage de la publication de Tolvanen *et al.* 2023)

Les perturbations causées par le mouvement du rotor, le bruit, les vibrations, les lumières vacillantes et la présence humaine accrue peuvent entraîner des changements de comportement tels que l'évitement et la modification des trajectoires de vol, en particulier chez les espèces migratrices (Drewitt et Langston, 2006 ; Marques *et al.*, 2019 ; Schuster *et al.*, 2015 ; Santos *et al.*, 2021). L'évitement peut se produire à différentes échelles, au niveau de l'ensemble du parc éolien (macro-échelle), au sein du parc éolien (mésos-échelle) ou à proximité immédiate des éoliennes (micro-échelle, Marques *et al.*, 2021). La connaissance du déplacement peut être utilisée pour estimer les seuils de distance au-delà desquels le développement de l'énergie éolienne aura des impacts limités sur la biodiversité. Cela améliore les possibilités d'atténuer les effets néfastes de l'énergie éolienne sur la faune.

Pour mieux comprendre l'étendue du déplacement, les auteurs ont conduit une revue systématique sur l'impact des éoliennes sur les oiseaux, les chauves-souris et les mammifères terrestres. Quatre-vingt-quatre études publiées entre 1993 et 2023 ont fourni 160 distances de déplacement distinctes que les auteurs ont analysées. Ces études sont assez mal équilibrées, comme attendu, avec 69 études sur les oiseaux (dont 3 communes avec les mammifères terrestres et une commune avec les chauves-souris), 13 sur les mammifères terrestres, 9 sur les chauves-souris. Elles ont été conduites principalement sur des éoliennes de moins de 100 mètres, quatre seulement ont concerné des éoliennes supérieures à 150 mètres, ce qui en soi est déjà un problème, car le nombre de ces infrastructures géantes augmente rapidement. Ces études ont été menées dans 22 pays différents, la majorité aux USA (23 études) en Espagne (10 études), au Royaume-Uni (10 études), en Norvège (6 études).

Leurs résultats montrent que 63 % des oiseaux, 72 % des chauves-souris et 67 % des mammifères, se sont déplacés pour éviter les éoliennes. Les grues, les hiboux et les rennes semi-domestiques se sont déplacés dans 100 % des cas jusqu'à 5 km. Les oiseaux se sont déplacés en moyenne de 5 km, mais dans certains cas, aucun déplacement n'a été enregistré. Les chauves-souris se sont déplacées en moyenne jusqu'à 1 km dans 21 cas sur 29. Les oiseaux aquatiques, les rapaces, les passereaux et les échassiers se sont déplacés en moyenne jusqu'à 500 m. Ces résultats suggèrent une perte importante d'habitat fonctionnel pour ces espèces. Pour les espèces volantes telles que les rapaces et les chauves-souris, les déplacements et les collisions créent une arme à double tranchant qui entraîne un déclin de la population, que le déplacement se produise ou non. Les informations sur les distances de déplacement rapportées dans cette étude peuvent être utilisées pour atténuer les effets négatifs de l'énergie éolienne en évitant les zones de grande importance pour les espèces menacées, en minimisant la perte d'habitat et les collisions à petite échelle causées par l'énergie éolienne, et en restaurant ou en créant habitats de haute qualité pour compenser la perte d'habitat fonctionnel.

La vulnérabilité des populations d'oiseaux au développement de l'énergie éolienne peut être élevée, en particulier parmi les espèces à longue durée de vie (longévives) et faible taux de reproduction. Par exemple, les hiboux et les rapaces ont des taux de maturation et de reproduction lents. Les déplacements influencent leur abondance pendant la saison de reproduction, augmentent l'abandon des nids ou diminuent le succès de la reproduction. Combinés avec les effets des collisions, ils peuvent entraîner des spirales d'extinction des populations locales. Aucune adaptation aux éoliennes n'a été documentée chez les rapaces, ce qui suggère que les changements de population peuvent être permanents.

Les chauves-souris sont à la fois attirées et déplacées par les éoliennes. La distance de déplacement maximale observée était d'un kilomètre, avec une probable sous-estimation, car les distances plus longues n'ont pas été étudiées. Le déplacement semble varier en fonction de l'habitat d'alimentation préféré (forêts, haies ou habitats ouverts), de l'aire d'écholocation et du schéma migratoire, mais en général, les mécanismes menant au déplacement restent largement inconnus. De nombreuses études font état d'effets négatifs sur la population et des extinctions sont anticipées si le développement de l'énergie

éolienne continue d'augmenter. Toutefois, malgré le déclin initial des populations et les changements dans la diversité des espèces dus au changement et au déplacement de l'habitat, certaines populations de chauves-souris peuvent se rétablir, comme le montre une étude portant sur 22 espèces de chauves-souris tropicales au Mexique (Briones-Salas *et al.*, 2017).

Il existe encore relativement peu d'études sur les distances de déplacement chez les mammifères terrestres. Le développement de l'énergie éolienne peut induire des changements dans l'utilisation de la zone et dans les schémas de migration des grands mammifères en raison de la fragmentation, de la modification de la qualité de l'habitat et des perturbations. Près de la moitié des études concernent des rennes semi-domestiques dans les zones montagneuses du nord de la Scandinavie, une région à fort potentiel pour le futur développement de l'énergie éolienne. Les longues distances de déplacement indiquent une nouvelle diminution des zones potentielles de pâturage pour les rennes, zones déjà dégradées en raison de la foresterie, de l'exploitation minière, du pâturage et du changement climatique. Néanmoins, les rennes semi-domestiques étant de plus en plus gardés dans des enclos et nourris pendant l'hiver, il est probable qu'ils finissent par s'adapter aux humains et, à long terme, s'habituer davantage au développement de l'énergie éolienne que les animaux sauvages. A contrario, l'abondance des grands mammifères prédateurs peut augmenter dans les zones de développement de l'énergie éolienne, car ils utilisent les routes ([Gómez-Catasús *et al.*, 2021](#)).

Les petits mammifères sont sensibles à la perte et à la fragmentation de leur habitat en raison de leur capacité limitée à se déplacer. Leur distance de déplacement peut donc être liée à la spécificité de l'habitat : si une espèce peut utiliser différents types d'habitats, le déplacement sera plus faible.

Le déclin de la biodiversité pourrait être atténué en situant les infrastructures éoliennes dans des habitats de mauvaise qualité écologique, en minimisant la perte d'habitat et les collisions à petite échelle et en créant des habitats de haute qualité pour compenser la perte d'habitat.

Il est également souhaitable d'intensifier les observations et travaux de recherche avant la construction d'un parc, ou d'un ensemble de parcs éolien, sur un territoire particulier afin de définir avec précision les zones où les éoliennes ne doivent pas être implantées afin de réduire les impacts sur les espèces migratrices soit au cours de leur phase de vol soit lors des périodes de repos nocturnes (Cohen *et al.*, 2022). L'élaboration de cartes de risques pour différentes espèces sensibles devrait permettre de développer une planification spatiale raisonnée du développement de l'éolien et de définir des zones d'exclusion (May *et al.*, 2021 ; Morant *et al.*, 2024). Il est aussi nécessaire d'encourager les études avant-après-contrôle-impact obligatoires pour l'approbation et les décisions liées au développement de l'énergie éolienne.

3. Les déplacements d'impacts : de l'atténuation du changement climatique à la perte de biodiversité (décryptage de la publication de Wood Hansen et van den Bergh, 2024)

Wood Hansen et van den Bergh ont cartographié la littérature sur le changement d'importance relative aux problèmes environnementaux dans le contexte des mesures prises en faveur de l'atténuation du changement climatique. A partir de plus de 10 000 articles scientifiques, les auteurs ont sélectionné 311 études empiriques pertinentes. La littérature sur le sujet est fournie, mais dispersée autour de termes aux frontières conceptuelles floues, comme compromis, effets secondaires, retombées. Les auteurs ont identifié 506 études pertinentes sur cette question, dont 311 sont empiriques, 47 sont conceptuelles et théoriques et 148 sont des synthèses ou des examens d'une option d'atténuation particulière. Ils ont identifié 128 changements distincts, 22 catégories d'options d'atténuation et 10 impacts environnementaux. Cette littérature ne couvre pas toutes les options d'atténuation identifiées par le Giec. De plus, certaines études surestiment systématiquement les impacts en ne prenant pas en compte les avantages environnementaux d'une réduction du changement climatique.

Leur premier résultat est l'identification de 21 termes utilisés pour désigner le déplacement de l'impact : compromis, co-bénéfice, interaction, déplacement, conséquence inattendue, effet secondaire, effet

couplé, déplacement du problème, effet retour, déplacement du fardeau, sous-produit, interconnexion, débordement, effet secondaire négatif, lien, effet cascade, effet auxiliaire, effet secondaire environnemental, interdépendant, co-impact.

Les auteurs ont cartographié 86 changements, pour 13 catégories d'options d'atténuation et 10 catégories d'impact environnementaux (tableau 1). Les impacts environnementaux les plus fréquents dans la littérature scientifique sont l'utilisation de l'eau douce et l'utilisation des terres.

Catégorie d'impact	Sous catégories
Utilisation de l'eau douce	Quantité Qualité
Utilisation et dégradation des terres	Utilisation des terres Dégradation des terres
Perte de biodiversité et fonctionnement des écosystèmes (y compris environnement marin)	Terrestre et eau douce Milieu marin
Eutrophisation & flux biogéochimiques	Azote Phosphore
Toxicité humaine (y compris rayonnements ionisants)	Substances toxiques cancérogènes et non cancérogènes Destruction de la couche d'ozone Rayonnement ionisant
Pollution de l'air	Polluants atmosphériques conventionnels (SO ₂ , NO _x , PM _{2,5} et PM ₁₀) Formation d'ozone
Épuisement des minéraux et des métaux	
Écotoxicité	Eau douce Terre Océan
Acidification (principalement SO ₂ , NO ₂ et NH ₃)	
Impacts environnementaux de l'exploitation minière (non spécifié)	

Tableau 1: Les différents impacts environnementaux des éoliennes terrestres

Concernant plus précisément l'énergie éolienne, 24 études ont été recensées. Elles montrent que les changements dans les impacts environnementaux dus au déploiement des éoliennes terrestres par rapport à l'usage des énergies fossiles sont :

- d'abord une augmentation des impacts sur la biodiversité et sur le fonctionnement des écosystèmes (point 1),
- ensuite un accroissement de la pression sur les terres (point 4),
- puis une tension sur les métaux et les minéraux, de la pollution de l'air, une toxicité pour les humains, une tension sur l'usage de l'eau douce, des impacts miniers et de l'écotoxicité.

L'énergie éolienne déplace les pressions vers les impacts sur la biodiversité en raison de la perturbation locale des écosystèmes, du risque de collision avec des espèces volantes et des impacts en cascade à travers les niveaux trophiques.

Les changements d'impacts d'une option d'atténuation varient en fonction du contexte géographique (par exemple, l'utilisation antérieure des terres ou la disponibilité de l'eau douce), des techniques utilisées (par exemple, la tailles des éoliennes) et, de la source d'énergie en amont. Il est important de démêler/distinguer ces mécanismes sous-jacents, car ils peuvent fournir aux régulateurs des leviers qui peuvent être exploités pour minimiser les changements d'impacts. Des politiques complémentaires, par

exemple financières incitatives ou réglementaires peuvent également minimiser le transfert d'impacts. Pour estimer les transferts d'impacts avec précision, les auteurs proposent de prendre en compte les impacts environnementaux qui se produiraient en l'absence de mesures d'atténuation, mais toutes les études ne le font pas, ce qui rend difficile la comparaison. Trois types d'évaluations ont été réalisées :

- évaluation de transferts bruts d'impacts (qui capture l'impact environnemental sans le comparer aux impacts d'un changement climatique non atténué)
- évaluation de transferts nets d'impacts par rapport à un scénario de référence sans atténuation (qui prend en compte les impacts évités grâce à l'atténuation, y compris les dommages dus au changement climatique et les impacts de la production et de l'utilisation continues de combustibles fossiles),
- transfert relatif d'impact (qui évite le besoin de références en comparant les impacts des options d'atténuation par rapport à une unité fonctionnelle commune, telle que le kWh produit). Par exemple, pour évaluer la mortalité des oiseaux par les éoliennes (c'est-à-dire un transfert brut), l'impact devrait idéalement être comparé aux impacts sur les oiseaux de la production d'énergie à base de combustibles fossiles et aux impacts d'un changement climatique non atténué (c'est-à-dire un transfert net).

Néanmoins, le transfert brut reste pertinent si les impacts environnementaux négatifs de l'atténuation se produisent localement et que les bénéfices s'accumulent à l'échelle mondiale. Ainsi, il est nécessaire de comprendre les problèmes d'équité qui se posent si le transfert d'impact implique d'atténuer un problème mondial (par exemple le changement climatique) en intensifiant les pressions environnementales locales (par exemple la perte de pollinisation).

L'omniprésence des compromis entre différents enjeux humains appelle à la conception de politiques garantissant une atténuation du changement climatique qui n'aggrave pas inutilement d'autres problèmes environnementaux. Pour y parvenir, les décideurs politiques peuvent réglementer les options d'atténuation (par exemple, dans le choix de la technologie ou de l'emplacement, notamment en sanctuarisant les espaces naturels à forte valeur écologique dont les aires protégées), et mettre en œuvre des politiques environnementales complémentaires.

4. Les insectes, un groupe peu étudié mais impacté par les infrastructures éoliennes terrestres (Décryptage de la publication de Thess et Lengsfeld, 2022)

Les insectes n'aiment pas les turbulences. Ils choisissent leur habitat dans des zones calmes, mais ils utilisent des vents forts et uniformes pour se déplacer, en particulier lors des migrations saisonnières de nombreux taxons dans de nombreuses régions du monde (ex : Lépidoptères Rhopalocères, Lépidoptères Noctuidae, Diptères Syrphidae, Hémiptères, Odonates, etc., (Satterfield *et al.* 2020).

Une étude documentaire et de modélisation du centre aérospatial allemand (Trieb, 2018) a montré que si, en effet, de nombreuses espèces d'insectes dans leurs déplacements quotidiens volaient entre 0 et 30 mètres, soit sous l'aire d'impact des pales éoliennes (entre 20GH et 750 GH), ce n'était plus vrai lors de leurs déplacements migratoires qui se situent à altitude plus élevée (entre 40 et 100 mètres), là où les vents directionnels, forts et non turbulents peuvent diminuer leurs dépenses d'énergie et optimiser leur déplacement. C'est d'ailleurs le même raisonnement qui a conduit les concepteurs d'éoliennes à placer les rotors juste au-dessus de la couche superficielle turbulente. Pour ces mêmes raisons de recherche d'optimisation et de conditions venteuses favorables, les implantations des parcs éoliens croisent souvent, pour ne pas dire presque toujours, les routes de migration des oiseaux ou des insectes. Aux États-Unis, une étude sur le papillon Monarque a ainsi démontré une coïncidence parfaite entre les routes migratoires des insectes volants et l'implantation des parcs éoliens.

Mais est-ce que l'impact est significatif ? La littérature scientifique est sur ce point divisée. S'il y a un consensus pour dire qu'il y a présence de cadavres d'insectes au pied des éoliennes et plus généralement impact physique des éoliennes sur les insectes volants (comme dans le cas des voitures, des trains, etc.), il

reste des discussions d'une part sur l'ampleur de l'effet de la perte d'insectes due à l'énergie éolienne par rapport à d'autres facteurs, et d'autre part sur la capacité des pièges utilisés à détecter correctement les insectes et leurs essaims dans la zone turbulente à proximité des pâles.

Les auteurs ont estimé la densité des insectes dans l'atmosphère en Allemagne à 3kg de biomasse d'insectes par kilomètres cube d'air (cette estimation prend en compte une perte de 75 % de la biomasse des insectes en 30 ans dans le pays comme établi par Hallemann *et al.* en 2017). Par ailleurs, ils ont estimé le débit volumique d'air à travers les 30 000 rotors éoliens allemands à 8 millions de kilomètres cubes. Ce qui conduit à une estimation de biomasse annuelle totale d'insectes, volant à travers les rotors éoliens allemands pendant le fonctionnement, de 24 000 tonnes, soit 24 000 milliards d'insectes. En considérant que 5% des insectes sont tués au cours de leur passage au travers des pâles, cela amène à un impact de 1 200 tonnes ou 1 200 milliards d'insectes tués par an.

En extrapolant ces chiffres au niveau mondial, les auteurs estiment que les impacts mondiaux totaux pourraient être 100 fois plus élevés, soit une perte potentielle induite par l'énergie éolienne de 120 000 tonnes de biomasse d'insectes, ou encore 120 000 milliards d'individus par an. Comme ces impacts ont lieu pendant la migration (voir plus haut), soit peu avant le processus de reproduction annuel, ils ont probablement des effets rebond sur les générations suivantes et la survie des espèces concernées. Malgré ces preuves, bien qu'un déclin mondial de la biomasse des insectes ait été rapporté dans de nombreuses analyses, il y a encore peu de prise en compte de l'énergie éolienne comme cause possible.

A contrario, un effort scientifique et industriel considérable a été fait ces trente dernières années pour développer des surfaces de pales de rotor qui résistent au choc avec les particules en suspension dans l'air (glace, sable et insectes volants) et à l'encrassement par ces particules (adhérence). En effet, l'érosion du bord d'attaque de la pale réduit la durée de vie économique d'un parc éolien, et les résidus collant à la surface de la pale réduisent l'efficacité de la production d'électricité.

Afin de comprendre le phénomène et d'identifier des mesures d'atténuation, une partie des essais techniques s'attachent à quantifier « l'efficacité de collecte des insectes » des profils aérodynamiques et la « vitesse de rupture » des insectes en fonction de leur taille et de la conception du profil aérodynamique. Une autre partie importante de la littérature technique est consacrée aux mesures pour protéger les pales du rotor contre les collisions et l'encrassement par les insectes. Enfin, une troisième catégorie de littérature technique est dédiée au nettoyage des pales de rotor afin de maintenir un rendement élevé.

Nous sommes donc dans une situation où un effort minimal a été fait pour éviter les impacts avec les insectes, mais des efforts considérables ont été consacrés à en éviter les conséquences, ce qui a abouti à des surfaces de lame plus robustes, antiadhésives et des produits de nettoyage plus efficaces. Ceci aggrave probablement les conséquences létales pour les insectes. Aujourd'hui, les collisions avec les insectes ne constituent donc plus un problème sérieux pour les éoliennes en termes d'efficacité et de durée de vie.

Un autre biais qui doit être pris en compte avant de conclure à l'absence significatif d'impact des parcs éoliens sur les insectes est l'effondrement concomitant de la biomasse des insectes. Par exemple, en Allemagne, en supposant que les 1 200 milliards d'insectes perdus au cours d'une saison laisseraient environ 10 % de leur poids corporel sous forme de résidus sur les pales, les résidus par mètre carré de pale de rotor s'élèveraient à une valeur de 15 g par an. Cela signifie que la formidable croissance du parc éolien allemand au cours des 30 dernières années, ainsi que la perte massive d'insectes, ont rendu l'impact des insectes pratiquement invisible. Les auteurs concluent que la réduction relative des résidus d'insectes visibles sur les pales du rotor depuis 1990 a été interprétée à tort comme une conséquence de l'augmentation de la hauteur de la turbine, censée amener les rotors hors de portée de la couche limite de vol des insectes et que ces installations pourraient avoir des impacts significatifs sur les populations d'insectes migrateurs.

Des solutions existent pour limiter les impacts sur les insectes volants. Le Lidar, en particulier, est une technologie capable de repérer les particules dans l'air à l'approche d'un parc éolien, prédire la vitesse du

vent, suivre les essaims d'insectes à la hauteur du rotor. Elle pourrait commander l'arrêt des pâles si les densités d'insectes à la hauteur du rotor deviennent critiques, réduisant ainsi les dommages causés aux insectes sans pertes considérables de rendement énergétique, en plus d'améliorer l'efficacité et de réduire les coûts de maintenance en gardant les pales du rotor propres.

Les effets secondaires de l'énergie éolienne sur tous les groupes d'êtres vivants potentiellement impactés devraient faire partie des critères de développement et de sélection du site. C'est en cours pour les oiseaux et les chauves-souris, mais pas pour les insectes.

5. Les compromis en termes d'usages des terres

A quantité d'énergie équivalente, les énergies renouvelables nécessitent beaucoup plus de terres/surfaces que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire. Par conséquent, la transition énergétique se heurte aux nécessaires arbitrages sur l'usage des espaces, naturels, agricoles, urbains, énergétiques.

Les systèmes de planification et les processus de choix d'emplacement éoliens qui n'ont pas su gérer la complexité des questions fondamentales et procédurales relatives aux droits fonciers et aux impacts sur la biodiversité sont donc voués à un nombre croissant de tensions et de conflits comme conséquence directe de ces efforts d'appropriation des terres. A tel point que l'accès à la terre, ressource de plus en plus rare, représente une contrainte biophysique, sociale et sociétale qui pourrait compromettre la transition dans le cadre socio-économique actuel, rendant nécessaire une gestion innovante et une planification plus efficace. Les principaux impacts positifs de ce développement des énergies renouvelables sont, en particulier, un accès plus large à une énergie décarbonée et a priori abordable, qui élimine un obstacle considérable au développement socio-économique et humain. Les coûts de l'électricité renouvelable ont donc nettement baissé au cours de la dernière décennie, motivés par les progrès technologiques, les économies d'échelle, les chaînes d'approvisionnement compétitives et l'expertise des développeurs. Cela a abouti au déploiement rapide de nombreuses technologies d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et éolienne. Soutenues par des incitations économiques, les technologies solaires et éoliennes ont dominé le marché au cours de la dernière décennie, et leur mise en œuvre continue de se développer rapidement. L'Agence internationale des énergies renouvelables a établi un plan optimiste selon lequel la production d'électricité décarbonée à partir d'énergies renouvelables devrait passer de 25 % en 2017 à 85 % en 2050. Dans les pays du sud en particulier, ces incitations et perceptions positives ont été à l'origine d'une acquisition de terres à grande échelle et à long terme par des administrations gouvernementales ou des investisseurs privés, entraînant par conséquent des changements majeurs dans les modèles d'utilisation des terres et les droits fonciers. Ces acquisitions entraînent des pertes des droits d'accès aux pâturages et aux points d'eau pour les principaux utilisateurs de ces terres, tels que les agriculteurs de subsistance, les éleveurs ou les populations autochtones, leur refusant ainsi l'accès aux ressources qui soutiennent leurs moyens de subsistance et favorisent leur identité culturelle. Ce phénomène est aussi accompagné par une perte de biodiversité, en raison de l'homogénéisation des paysages induit par la mise en place de grande fermes éoliennes par exemple.

Dans son dernier rapport, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) a reconnu que l'usage des terres constituait un « nexus » (c'est-à-dire un point de convergence de différents enjeux) pour la survie de la biodiversité et des humains (bien-être, approvisionnement en nourriture, en eau et en énergie). Il a également statué, de concert avec la plate-forme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (Ipbes), sur le fait que l'exploitation humaine affectait directement plus de 70 % de la surface terrestre mondiale libre de glace. Il existe donc une double tension entre ceux qui soutiennent l'expansion rapide des projets d'énergie renouvelable et ceux qui s'opposent à des déploiements particuliers en raison de préoccupations liées à la pression foncière, et les impacts sociaux et environnementaux qui en découlent.

Les parcs éoliens et les centrales solaires modifient radicalement l'identité visuelle des paysages ruraux en y ajoutant des formes de composants industriels et artificiels. De telles modifications paysagères constituent une source de conflits avec les communautés locales qui se sentent personnellement ou socialement affectées dans leur identification paysagère et peuvent exacerber les conflits villes (où l'essentiel de l'énergie produite est consommée) – campagnes (où l'essentiel des énergies renouvelables sont produites). Cela génère un potentiel de conflit à mesure que la production d'énergie devient plus visible, modifiant ainsi l'image commune de l'énergie en tant que marchandise impensée et suggérant une industrialisation de l'espace rural. Des critères tels que la conservation de l'environnement, la compatibilité environnementale, le patrimoine culturel et la préservation de la biodiversité et des écosystèmes naturels doivent être intégrés de manière adéquate dans la transition énergétique par le biais de politiques fortes de protection des paysages et de la biodiversité afin de minimiser les impacts des énergies renouvelables. Le développement des énergies renouvelables a un impact sur l'utilisation des terres à plusieurs étapes du projet, notamment la préparation du site, la construction sur place et les agrandissements à venir. La production d'électricité à partir de ressources renouvelables implique également la construction de couloirs de lignes électriques, de routes, de bâtiments de service et d'autres infrastructures qui font partie de tout projet de développement, d'extraction ou de transport d'énergie. Géométriquement, ces caractéristiques linéaires de la couverture terrestre correspondent davantage aux modèles d'utilisation des terres industrielles et urbaines, et sont moins compatibles avec les modèles d'utilisation des terres rurales, englobant l'agriculture, les parcours et les terres forestières. Les couloirs de lignes électriques et les routes n'occupent peut-être qu'une superficie relativement faible, mais la coupe de la végétation et le remaniement topographique dans ces couloirs provoquent une fragmentation des écosystèmes qui ont des effets cumulatifs importants sur la biodiversité, l'utilisation des terres et les droits fonciers.

Ainsi, le développement des énergies solaire et éolienne perturbe les modèles d'utilisation des terres et en particulier les stratégies de protection de la biodiversité (en France, la Stratégie nationale des aires protégées – Snap - et ses déclinaisons régionales). La planification des énergies vertes doit donc être alignée sur les préoccupations de justice sociale, spatiale et environnementale au niveau local en soutenant simultanément une utilisation durable des terres, des dispositions adéquates en matière de réhabilitation et de réinstallation, ainsi que des mécanismes de compensation appropriés à la fois pour la compensation écologique des impacts sur la biodiversité et les milieux et aussi pour toutes les personnes potentiellement affectées, ce qui peut se traduire par une confiance accrue dans les institutions publiques et l'acceptation sociale des projets mis en œuvre.

Quelle que soit l'urgence de la transition énergétique, le développement des énergies renouvelables doit se faire dans le respect de la réglementation environnementale, en France plus particulièrement dans le respect du zéro artificialisation nette (le ZAN) et le respect des procédures de dérogation espèces et habitats protégés (mesures ERC). Compte tenu des flux financiers importants associés au développement des énergies renouvelables, et aux tentations de privilégier l'artificialisation des terres que cela peut susciter chez certains acteurs, le rôle régulateur de l'État est ici essentiel.

Les conflits fonciers autour des projets d'EnR ont des conséquences environnementales et sociales divergentes, qui peuvent mettre en péril la durabilité de l'investissement. Pour être durable, l'investissement doit être socialement responsable, respectueux de l'environnement et économiquement réalisable. En outre, il devrait garantir des opportunités de développement rural, fournir des programmes de soutien pour la réduction de la pauvreté et ainsi générer une prospérité économique et une protection de l'environnement à long terme.

QUELLES SONT LES LACUNES DE CONNAISSANCES ENCORE EXISTANTES ?

Dans la prospective publiée en 2021 par la FRB (Soubrelet *et al.*, 2021), les lacunes suivantes ont été identifiées :

- Mieux évaluer l'importance quantitative et les conséquences sur les dynamiques de populations des mortalités par collision espèce par espèce et par période ou conditions éco physiologiques ;
- Évaluer des innovations technologiques (par exemple, les dispositifs de dissuasion acoustique) ou les changements opérationnels pour éviter les collisions (ralentissement ou arrêt des turbines en période de migration ou, pour les chauves-souris lors des pics d'activité et certaines condition météorologiques) ;
- Évaluer la perte d'habitats due aux parcs éoliens ou aux éoliennes individuelles et en estimer les conséquences écologiques ;
- Prendre en compte les effets cumulatifs sur les espèces et sur les chaînes trophiques de la multiplication dans un territoire donné du nombre de parcs éoliens ;
- Mieux caractériser les effets sur les populations des déplacements / évitements induits, en relation avec d'autres effets comme la perte d'habitat notamment ;
- Caractériser l'impact sur les individus et les populations de la perte des zones de chasse, d'habitat de nourrissage induite par la présence des installations ;
- Identifier les effets sub-létaux et comportementaux du bruit et des champs électromagnétiques.

A cette liste peut être ajouté :

- Quantifier et publier des recommandations pour éviter les impacts des éoliennes sur les insectes ;
- Caractériser les effets des parcs éoliens sur les conditions météorologiques locales et la structure du sol, en particulier les changements dans la vitesse moyenne de l'air, la température, l'humidité et les précipitations, et les impacts induits sur la faune et l'agriculture ;
- Mieux comprendre les impacts aigus et chroniques des bruits soniques et subsoniques émis par les éoliennes en fonctionnement sur la santé humaine et la biodiversité.

BIBLIOGRAPHIE

- Aschwanden, J., Stark, H., Peter, D., Steuri, T., Schmid, B., & Liechti, F. (2018). Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biological Conservation*, 220, 228-236.
- Barré, K., Le Viol, I., Bas, Y., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2018). Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation*, 226, 205-214.
- Briones-Salas, M., Lavariega, M. C., & Moreno, C. E. (2017). Effects of a wind farm installation on the understory bat community of a highly biodiverse tropical region in Mexico. *PeerJ*, 5, e3424.
- Cohen, E. B., Buler, J. J., Horton, K. G., Loss, S. R., Cabrera-Cruz, S. A., Smolinsky, J. A., & Marra, P. P. (2022). Using weather radar to help minimize wind energy impacts on nocturnally migrating birds. *Conservation Letters*, 15(4), e12887.
- Cryan, P. M., & Barclay, R. M. (2009). Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. *Journal of mammalogy*, 90(6), 1330-1340.
- Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Diehl, R. H., Huso, M. M., ... & Dalton, D. C. (2014). Behavior of bats at wind turbines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), 15126-15131.
- DeJong, J.; Millon, L.; Håstad, O.; Victorsson, J. Activity Pattern and Correlation between Bat and Insect Abundance at Wind Turbines in South Sweden. *Animals* 2021, 11, 3269.
- Devereux, C. L., Denny, M. J., & Whittingham, M. J. (2008). Minimal effects of wind turbines on the distribution of wintering farmland birds. *Journal of Applied Ecology*, 45(6), 1689-1694.
- DREAL. (2017). Guide de préconisation pour la prise en compte des enjeux chiroptérologiques et avifaunistiques dans les projets éoliens.
- FRB. (2017). Énergie renouvelable et biodiversité : Les implications pour parvenir à une économie verte. 26.
- Gómez-Catasús, J., Garza, V., & Traba, J. (2018). Wind farms affect the occurrence, abundance and population trends of small passerine birds: The case of the Dupont's lark. *Journal of applied ecology*, 55(4), 2033-2042.
- Gómez-Catasús, J., Barrero, A., Reverter, M., Bustillo-De la Rosa, D., Pérez-Granados, C., & Traba, J. (2021). Landscape features associated to wind farms increase mammalian predator abundance and ground-nest predation. *Biodiversity and Conservation*, 30, 2581-2604.
- Hallmann, C.A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörren, T.; et al. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 2017, 12, e0185809
- Hamed, T. A., & Alshare, A. (2022). Environmental impact of solar and wind energy-a review. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(2), 1-23.
- Jenkins, A. R., Reid, T., du Plessis, J., Colyn, R., Benn, G., & Millikin, R. (2018). Combining radar and direct observation to estimate pelican collision risk at a proposed wind farm on the Cape west coast, South Africa. *PloS one*, 13(2), e0192515.
- Lamhamadi, B. E. H., & de Vries, W. T. (2022). An Exploration of the Land-(Renewable) Energy Nexus. *Land*, 11(6), 767.
- Leroux, C., Le Viol, I., Valet, N., Kerbiriou, C., & Barré, K. (2023). Disentangling mechanisms responsible for wind energy effects on European bats. *Journal of Environmental*

Management, 346, 118987.LPO. (2017). Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune. Etude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015.

May, R., Jackson, C. R., Middel, H., Stokke, B. G., & Verones, F. (2021). Life-cycle impacts of wind energy development on bird diversity in Norway. *Environmental Impact Assessment Review*, 90, 106635.

Marques AT, Santos CD, Hanssen F, et al. Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds. *J Anim Ecol*. 2019;00:1–11

Morant, J., Arrondo, E., Sánchez-Zapata, J. A., Donázar, J. A., Margalida, A., Carrete, M., ... & Pérez-García, J. M. (2024). Fine-scale collision risk mapping and validation with long-term mortality data reveal current and future wind energy development impact on sensitive species. *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107339.

Niang D.M. et Goffaux R. État de l'art des connaissances sur les incidences des infrastructures de production d'énergie renouvelable sur la biodiversité. FRB. 2020. 121p.

Pearce-Higgins, J. W., Stephen, L., Langston, R. H., Bainbridge, I. P., & Bullman, R. (2009). The distribution of breeding birds around upland wind farms. *Journal of Applied ecology*, 46(6), 1323-1331.

Reimer, J. P., Baerwald, E. F., & Barclay, R. M. (2018). Echolocation activity of migratory bats at a wind energy facility: testing the feeding-attraction hypothesis to explain fatalities. *Journal of Mammalogy*, 99(6), 1472-1477.

Roeleke, M., Blohm, T., Kramer-Schadt, S., Yovel, Y., & Voigt, C. C. (2016). Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific reports*, 6(1), 28961.

Santos CD, Ferraz R, Muñoz A-R, Onrubia A, Wikelski M. (2021). Black kites of different age and sex show similar avoidance responses to wind turbines during migration. *R. Soc. Open Sci.* 8: 201933.

Satterfield, D. A., Sillett, T. S., Chapman, J. W., Altizer, S., & Marra, P. P. (2020). Seasonal insect migrations: massive, influential, and overlooked. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(6), 335-344.

Schaub, T., Klaassen, R. H., Bouteren, W., Schlaich, A. E., & Koks, B. J. (2020). Collision risk of Montagu's Harriers *Circus pygargus* with wind turbines derived from high-resolution GPS tracking. *Ibis*, 162(2), 520-534.

Schuster, E., Bulling, L., & Köppel, J. (2015). Consolidating the state of knowledge: a synoptical review of wind energy's wildlife effects. *Environmental management*, 56, 300-331.

Smallwood, K. S. (2013). Comparing bird and bat fatality-rate estimates among North American wind-energy projects. *Wildlife Society Bulletin*, 37(1), 19-33. <https://doi.org/10.1002/wsb.260>

Soubelet, H.; Silvain J.F.; Goffaux R.; Prospective scientifique sur les impacts des installations de production d'énergie renouvelables sur la biodiversité et lacunes de connaissances. FRB 2021. 50p.

Szymański, P., Deoniziak, K., Łosak, K., & Osiejuk, T. S. (2017). The song of Skylarks *Alauda arvensis* indicates the deterioration of an acoustic environment resulting from wind farm start-up. *Ibis*, 159(4), 769-777.

Thess, A. D., & Lengsfeld, P. (2022). Side Effects of Wind Energy: Review of Three Topics—Status and Open Questions. *Sustainability*, 14(23), 16186. Tolvanen, A., Routavaara, H., Jokikokko, M., & Rana, P. (2023). How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – A systematic review. *Biological Conservation*, 288, 110382.

Trieb, F. Interference of Flying Insects and Wind Parks (FliWip), Study Report, German Aerospace Center, October 2018.

Urziceanu, M., Anastasiu, P., Rozylowicz, L., & Sesan, T. E. (2021). Local-scale impact of wind energy farms on rare, endemic, and threatened plant species. *PeerJ*, 9, e11390.

Walston, L. J., Mishra, S. K., Hartmann, H. M., Hlohowskyj, I., McCall, J., & Macknick, J. (2018). Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States. *Environmental Science & Technology*, 52(13), 7566-7576.

Wood Hansen, O., & van den Bergh, J. (2024). Environmental problem shifting from climate change mitigation: A mapping review. *PNAS nexus*, 3(1), pgad448.