



Synthèse de connaissances

# Efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de la production d'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité



## CONTRIBUTEURS

### COORDINATION ET REDACTION

Aurélie QUINARD  
Joseph LANGRIDGE

### CONTRIBUTIONS ET RELECTURES

Louise DUPUIS  
Aurélien BESNARD  
Nicolas HETTE-TRONQUART  
Hervé JACTEL  
Claire SALOMON  
Marjolaine GARNIER  
Hélène SOUBELET

### CITATION

Quinard A., Dupuis L., Hette-Tronquart N., Besnard A., Jactel H and Langridge J. (2024) Efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité. Synthèse de connaissances. Paris, France : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité

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.



## Table des matières

Résumé exécutif.....	5
Introduction.....	21
Objectif principal de la revue.....	23
Résultats descriptifs des documents retenus.....	25
Recherche et sélection.....	25
Processus de sélection des références bibliographiques.....	25
Sources et type des références sélectionnées.....	25
Caractéristiques clés.....	27
Validité des études.....	27
Evolution chronologique.....	28
Distribution géographique.....	29
Taxa étudiés.....	30
Types de mesure d'atténuation étudiées.....	31
Localisation de l'intervention : in situ vs ex situ.....	33
Focus des études in situ sur le type de résultats étudiés par taxon et par type de mesures d'atténuation.....	34
Intégrabilité des études dans une méta-analyse.....	35
Synthèse narrative.....	37
Planification avant l'implantation des parcs éoliens.....	37
Prédiction de la mortalité avant implantation d'un parc éolien.....	37
Localisation : macro-siting et micro-siting.....	38
Bridage des turbines.....	39
Augmentation des vitesses de seuil de démarrage des turbines et orientation des pales.....	39
Ajustements des stratégies de bridage.....	41
Arrêt réactif des éoliennes.....	43
Intégration d'innovations et de technologies avancées.....	43
Effarouchement et techniques associées.....	45
Effarouchement acoustique par ultrason.....	45
Effarouchements acoustiques chez les oiseaux.....	49
Effarouchement radar.....	49
Effarouchement lumineux UV.....	50
Modification de la conception des turbines.....	51
Variation de la taille de la turbine.....	51
Peinture et texture de la turbine.....	52
Renouvellement d'un parc éolien (« Repowering »).....	54
Gestion des facteurs d'attraction.....	55
Exemples d'élimination de facteurs écologiques attractifs.....	55
Balisage lumineux nocturne de sécurité pour la navigation aérienne.....	57
Synthèse quantitative : principaux résultats.....	57
Discussion et Perspectives : Implications pour la Recherche et la Prise de Décision.....	59
Regard d'experts.....	62

Connaissances existantes et pratiques en place .....	63
Défis et contraintes .....	63
Identification des besoins opérationnels et scientifiques.....	64
Identification des lacunes dans les connaissances et des besoins opérationnels .....	64
Importance de l'accessibilité et de la mutualisation des données .....	65
Recommandations pour la recherche et le développement.....	66
Bilan de l'étape collaborative .....	67
Propositions pour l'avenir : Résumé conclusif des recommandations de la revue et de l'étape collaborative.....	67
Références bibliographiques générales .....	69
Références bibliographiques sélectionnées pour la revue .....	71
ANNEXE I : Liste des noms d'espèces abrégés utilisés dans le tableau récapitulatif de la synthèse narrative .....	i
ANNEXE II : Méthodes.....	ii
Recherche d'articles .....	ii
Mots-clés et équations de recherche.....	ii
Raccourcis et limitations .....	ii
Sources de littérature .....	ii
Estimation de l'exhaustivité de la recherche.....	iii
Critères d'éligibilité des articles et de sélection des études .....	iii
« Analyse critique » : évaluation de la validité des études .....	v
Synthèses.....	v
Méthodes de synthèse narrative .....	v
Méthodes de synthèse quantitative.....	vi
Traitement des données et analyses statistiques .....	vii
ANNEXE III : Détails des équations de recherche utilisées pour les requêtes.....	viii
ANNEXE IV : Evaluation de la conformité aux critères d'éligibilité par le test Kappa de Fleiss .....	x
ANNEXE V : Critères d'évaluation des risques de biais.....	xi
ANNEXE VI : Synthèse quantitative détaillée.....	xiii
Limites de la synthèse quantitative et remarques préliminaires .....	xiii
Méta-analyse réalisée.....	xiii
Résultats .....	xiv
ANNEXE VII : Tests préliminaires de faisabilité de la méta-analyse.....	xviii

# RESUME EXECUTIF

## Contexte et Enjeux

Dans le contexte de l'urgence climatique, la transition énergétique vers des sources renouvelables est essentielle pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. L'énergie éolienne terrestre, en pleine expansion, joue un rôle crucial dans cette transition. Cependant, son développement rapide soulève des défis environnementaux, notamment en termes d'impacts négatifs sur la faune volante. Ces impacts incluent des collisions d'oiseaux, de chauves-souris et d'insectes avec les éoliennes, des modifications de leur comportement, et des effets sur les communautés écologiques locales.

## Objectifs de l'Étude

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB), en partenariat avec Mirova Research Center, a mené une Revue Rapide (RR) de la littérature pouvolante (oiseaux, chauves-souris et insectes). L'objectif est de formuler des recommandations opérationnelles et stratégiques fondées sur des données scientifiques, dans le but d'améliorer les pratiques existantes et de promouvoir des solutions efficaces pour la réduction des impacts négatifs sur le vivant. Ce document présente une synthèse des recommandations spécifiquement élaborées pour trois groupes d'acteurs majeurs : la communauté scientifique, les décideurs gouvernementaux et les opérateurs éoliens. Ces propositions visent à harmoniser les impératifs de transition énergétique avec la nécessité de préserver la biodiversité volante.

## Méthodologie

L'étude bibliographique s'est réalisée en stricte concordance avec les lignes directrices sur la conduite et les standards de la "Revue Rapide" développées par la *Collaboration for Environmental Evidence* (le référentiel pour la synthèse des connaissances en écologie). Elle inclue des articles scientifiques (littérature académique) et techniques, ainsi que des rapports provenant de bases de données et de sites spécialisés (littérature grise). Les données collectées ont été analysées qualitativement et quantitativement à travers des approches narratives et méta-analytique pour évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation.

## Aperçu des études et documents retenus

Suite à un processus de sélection objectif, standardisé et rigoureux, 60 documents pertinents ont été retenus. Nous avons analysé la fiabilité des études dont la majorité (83,6 %) sont fiables, avec un faible à moyen risque d'erreur ou d'imprécision. Cependant, environ 16,3 % des études présentent un risque élevé d'erreurs.

Les documents recensés soulignent les éléments clés suivants :

- Les études sont majoritairement concentrées en Amérique du Nord (environ 70 %) et en Europe de l'Ouest (plus de 25 %), avec une sous-représentation notable des autres régions du monde.
- La France ne compte qu'un seul document répertorié.
- Les chauves-souris et les oiseaux sont les taxa les plus étudiés, représentant respectivement 60,6 % et 25,4 % des références bibliographiques. Les insectes sont nettement sous-représentés, avec seulement 5,6 % des références.
- Pour les chauves-souris, les mesures les plus étudiées sont l'effarouchement acoustique par ultrasons et l'augmentation de la vitesse de démarrage des éoliennes (EN : *cut-in speed*).
- Pour les oiseaux, l'ajustement des stratégies de bridage et la peinture des turbines sont les mesures les plus analysées.
- Une prédominance des études in situ, sur parc éolien, est observée, représentant 72,1 % des références. Les recherches ex situ, en captivité ou en milieu naturel en l'absence de turbines, constituent 27,9 % des références.
- Les études in situ se concentrent principalement sur deux types de résultats : l'activité et la mortalité des espèces affectées. Les résultats liés à la mortalité prédominent, représentant 68,4 % des cas d'étude.

De manière générale, les mesures recensées pour atténuer l'impact des éoliennes sur la biodiversité incluent une variété d'approches adaptées à différents contextes. Parmi ces mesures figurent :

- La **prédiction de la mortalité** ;
- Le **micro-siting et macro-siting**, qui consiste à optimiser l'implantation des éoliennes ;
- Différents types de **bridage** : augmentation de la vitesse de seuil de démarrage des turbines, ajustement de l'orientation des pâles, arrêt sélectif, et intégration de technologies avancées ;
- Divers dispositifs d'**effarouchement** : acoustique par ultrasons, mixte acoustique et lumineux, acoustique de moyenne fréquence, radar, et lumineux UV ;
- Des modifications structurelles des turbines, comme la **variation du diamètre des rotors**, la **peinture** des éoliennes ou encore l'application de **surfaces texturées** ;
- Des stratégies globales telles que le **renouvellement des parcs éoliens** (« repowering ») ou l'**élimination de facteurs écologiques attractifs** ;
- Enfin, l'effet du **balisage lumineux nocturne** pour la sécurité de la navigation aérienne a été évalué.

### Résultat de la méta-analyse

- Une seule mesure, le bridage par augmentation du seuil de démarrage des turbines en fonction de la vitesse du vent, a pu faire l'objet d'une méta-analyse. Les principaux obstacles comprenaient le faible nombre d'études disponibles pour chaque mesure, limitant la puissance statistique, ainsi que l'hétérogénéité des données.
- Les résultats de la méta-analyse ont montré que lorsque les éoliennes étaient réglées pour commencer à tourner à des vitesses de vent plus élevées, le nombre de chauves-souris tuées diminuait significativement, avec une réduction moyenne de **66,8 %** par rapport aux éoliennes qui démarraient à des vitesses de vent plus basses.
- Cependant, lorsque nous avons examiné d'autres facteurs comme les différentes vitesses de démarrage ou les conditions climatiques, nous n'avons pas trouvé d'effets significatifs.
- A cause du petit nombre d'études disponibles et de la diversité des données, il est nécessaire de poursuivre des recherches primaires pour affiner et confirmer ces résultats.

Récapitulatif de la synthèse narrative sur l'efficacité des mesures d'atténuation (voir liste des noms d'espèces abrégés en Annexe I)

<b>La décision concernant l'application des mesures doit être prise au cas par cas, en intégrant les spécificités du projet et de l'environnement après une étude approfondie. De plus, il est crucial de mener des recherches supplémentaires sur les espèces nationales, la majorité des données scientifiques actuelles provenant d'espèces non présentes sur le territoire français, en particulier pour les chauves-souris.</b>							
Mesure	Description	Taxon	Référence bibliographique / Risque de biais / Page du rapport	Espèces	Pays / Contexte environnemental	Niveau d'efficacité <i>(Selon la conception et les objectifs de l'étude, certaines études fournissent des résultats détaillés, d'autres des résultats plus succincts. Cela explique également pourquoi des résultats contrastés peuvent apparaître au sein d'une même étude ou entre différentes études)</i>	Synthèse de l'efficacité
<b>Prédiction de la mortalité</b>	Modèle développé pour évaluer le risque de collision des oiseaux avec des éoliennes.	Oiseaux	<a href="#">Smales et al., 2013</a> Faible (n° 28)	* Pygargue blagre * Aigle Tasmanie	<i>Tasmanie</i> Près de la côte	En utilisant un taux d'évitement des parcs par les oiseaux de 95%, la différence entre le taux de mortalité estimé (basé sur un modèle prédictif qui estime le nombre d'oiseaux susceptibles de mourir à cause des turbines) et le taux de mortalité observé (nombre réel d'oiseaux trouvés morts autour des turbines) est compris entre <b>0 et 0,4</b> . Le modèle a ainsi prédit avec précision la mortalité des oiseaux due aux turbines	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
<b>Micro-siting et macro-siting</b>	Optimisation de l'emplacement précis des éoliennes au sein d'une zone définie, en tenant compte des facteurs locaux comme le relief, la direction des vents et les impacts environnementaux pour maximiser la production d'énergie et minimiser les perturbations.	Chauves-souris	<a href="#">Million et al., 2015</a> Faible (n° 28)	* Pipist. * Séro. * Noct. * Oreill. * Myo.	<i>France</i> Paysage agricole intensif	* Augmentation de l'activité des C.-s. pour le groupe <i>Plecotus-Myotis</i> en présence de jachères. * Augmentation de l'activité pour les groupes <i>Pipistrellus</i> et <i>Eptesicus-Nyctalus</i> en présence de haies. * Augmentation de l'activité pour le groupe <i>Eptesicus-Nyctalus</i> en présence de bandes herbeuses.	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
		Oiseaux	<a href="#">Smallwood &amp; Thelander, 2005</a> Fort (n° 28)	Rapaces : * Aigle royal * Buse q. rousse * Crécerelle Am. * Chevêche terr. * Effraie cloch. * Grand-duc d'Amérique ( <i>Bubo virginianus</i> )	<i>Etats-Unis</i> Paysage montagneux avec pâtures	* Taux de mortalité pour les turbines placées dans des canyons plus élevé de <b>1,5 à 3 fois</b> . * Taux de mortalité pour les turbines placées près d'amas de roches plus élevé de <b>2,79 à 12 fois</b> .	

<b>Bridage par augmentation de la vitesse de seuil de démarrage des turbines (abrégé v.s.d. ci-après)</b>	Technique qui consiste à relever la vitesse minimale du vent à laquelle les turbines commencent à produire de l'électricité et se connectent au réseau. En augmentant ce seuil, les pales des turbines restent immobiles ou tournent à régime réduit en dessous de cette vitesse.	Chauves-souris	<a href="#">Brown &amp; Hamilton, 2006</a> Moyen (n° 29)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole	Taux de mortalité réduit de <b>32%</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 4 à 7 m/s.	Le bridage des turbines par augmentation de la v.s.d. est une méthode efficace pour réduire la mortalité des chauves-souris, avec une amplitude de réduction allant de <b>32% à 82%</b> , dépendant des conditions locales, des paysages et des ajustements de v.s.d.
			<a href="#">Arnett et al., 2011</a> Faible (n° 29)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier et de prairie ouverte	Taux de mortalité réduit de <b>82%</b> en 2008 et <b>72%</b> en 2009 pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 0 (sans bridage) à 5 m/s ou de 0 à 6,5 m/s (aucune différence de mortalité entre les v.s.d. 5 et 6,5 m/s).	
			<a href="#">Stantec Consulting Ltd, 2012</a> Moyen (n° 30)	Analyse globale	<i>Canada</i> Non précisé	Taux de mortalité <b>deux fois</b> moins élevé pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 0 (sans bridage) à 4,5 ou 5,5 m/s ( <b>aucune différence</b> concluante de mortalité entre les v.s.d. 4,5 et 5,5 m/s).	
			<a href="#">Măntoiu et al., 2020</a> Moyen (n° 30)	Analyse globale	<i>Roumanie</i> Paysage de pâture	Taux de mortalité réduit de <b>78%</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 4 à 6,5 m/s.	
			<a href="#">Bennett et al., 2022</a> Faible (n° 30)	Analyse globale	<i>Australie</i> Paysage de prairie et pâture	* Taux de mortalité réduit de <b>54%</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 3 à 4,5 m/s. * Résultats <b>non concluants</b> pour le taux d'activité.	
			<a href="#">Good et al., 2022</a> Faible (n° 30)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole, forestier et humide	Taux de mortalité réduit de <b>50%</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 3,0 m/s durant toute l'année à 3,5 m/s au printemps et 5,0 m/s à l'automne.	
			<a href="#">Baerwald et al., 2009</a> Moyen (n° 30)	* C.-s. cendrée * C.-s. argentée	<i>Canada</i> Paysage de pâture	* Taux de mortalité réduite de 57,5% pour les turbines dont la v.s.d. est passée de 4 à 5,5 m/s toutes espèces combinées. * Résultats non concluants par espèce séparée.	
<b>Bridage par ajustement de l'orientation de l'angle des pâles</b>	Technique qui consiste à ajuster l'orientation des pâles pour qu'elles soient parallèles au vent. Cette approche permet de ralentir ou d'arrêter la rotation des pâles. En fonctionnement normal, les pâles des turbines sont toujours orientées perpendiculairement au vent pour maximiser leur efficacité énergétique.	Chauves-souris	<a href="#">Baerwald et al., 2009</a> Moyen (n° 30)	* C.-s. cendrée * C.-s. argentée	<i>Canada</i> Paysage de pâture	Taux de mortalité réduit de <b>60%</b> pour les turbines dont l'angle des pâles était ajusté en dessous d'une vitesse de vent de 4 m/s.	L'ajustement de l'angle des pâles est une méthode partiellement efficace pour réduire la mortalité des chauves-souris, avec une réduction allant de <b>0% à 60%</b> , selon les conditions locales et les ajustements opérés.
			<a href="#">Young et al., 2011</a> Faible (n° 30)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier	* Taux de mortalité réduit de <b>47 %</b> pour les turbines dont l'angle des pâles était ajusté en dessous d'une vitesse de vent de 4 m/s pendant la première moitié de la nuit. * Résultats <b>non concluants</b> pour les turbines dont l'angle des pâles était ajusté en dessous d'une vitesse de vent de 4 m/s pendant la seconde moitié de la nuit.	
			<a href="#">Schirmacher et al., 2020</a> Très faible (n° 37)	C.-s. migratrices : * C.-s. cendrée * C.-s. rousse * C.-s. argentée	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole	* Taux de mortalité réduit de 0 à 38% pour les turbines dont l'angle des pâles était ajusté en dessous d'une vitesse de vent de 5 m/s toutes espèces combinées. * Résultats <b>non concluants</b> par espèce.	



<b>Ajustement des stratégies de bridage</b>	Augmentation de la v.s.d. à différent moment de la nuit	Chauves-souris	<a href="#">Hein et al., 2013</a> Moyen (n° 31)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier	* Taux de mortalité réduit de <b>47%</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passé de 3 à 5 m/s durant toute la nuit. * Résultats <b>non concluants</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passé de 3 à 5 m/s durant les quatre premières heures après le coucher du soleil.	Les différentes stratégies d'ajustement et de bridage des turbines montrent des résultats variables mais globalement encourageants pour réduire la mortalité des chauves-souris, avec des taux de réduction allant de <b>47 % à 100 %</b> selon les contextes et les méthodes appliquées.
	Augmentation de la v.s.d. en fonction de la température		<a href="#">Martin et al., 2017</a> Faible (n° 31)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier avec rivière	Taux de mortalité réduit de <b>62%</b> pour les turbines dont la v.s.d. est passé de 4 à 6 m/s lorsque les températures descendaient en dessous de 9,5°C.	
	* Ajustement de l'orientation des pale pour une vitesse de vent de 5 m/s, calculée sur une moyenne glissante de 10 minutes mesurée à une tour météorologique (traitement A) * Ajustement de l'orientation des pale pour une vitesse de vent de 5 m/s, calculée sur une moyenne glissante de 20 minutes mesurée à une tour météorologique (traitement B) * Ajustement de l'orientation des pale pour une vitesse de vent de 5 m/s, calculée sur une moyenne glissante de 20 minutes mesurée par des anémomètres individuels montés sur les turbines (traitement C)		<a href="#">Schirmacher et al., 2018</a> Très faible (n° 32)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier	* Résultats <b>non concluants</b> entre le traitement A et B, et A et C. * Taux de mortalité réduit de <b>81%</b> entre le traitement C et le traitement B (le traitement C présente le plus gros taux de mortalité).	
	Bridage des turbines activé à des vitesses de vent comprises entre 5,0 et 6,5 m/s, seuils définis sur la base de données montrant qu'à ces vitesses, moins de 1 % de l'activité totale des C.-s. avait été enregistrée lors des observations précédentes.		<a href="#">Rnjak et al., 2023</a> Faible (n° 32)	Analyse globale	<i>Croatie</i> Paysage de prairie et de garrigue	Taux de mortalité réduit de <b>78%</b> .	
	Arrêt complet des turbines durant les périodes de migration		Chauves-souris et oiseaux	<a href="#">Smallwood &amp; Bell, 2020</a> Moyen (n° 32)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole et montagneux	
<b>Bridage par arrêt sélectif</b>	Arrêt des turbines en cas de détection d'une situation à risque pour un oiseau de taille moyenne à grande. Détections faites par un observateur présent quotidiennement de l'aube au crépuscule. Dispositif mis en place sur 10% des éoliennes jugées les plus	Oiseaux	<a href="#">De Lucas et al., 2012</a> Moyen (n° 32)	Vaut. fauve	<i>Espagne</i> Non précisé	* Taux de mortalité réduit de <b>50%</b> sur deux ans.	Le bridage par arrêt sélectif des turbines montre une efficacité significative sur un unique projet, avec une réduction de la mortalité des oiseaux

	dangereuses durant la période migratoire.						allant de <b>50 % sur deux ans à 92,8 % sur 14 ans.</b>
	Arrêt des turbines en cas de détection d'une situation à risque pour un oiseau de taille moyenne à grande. Détections faites par un observateur présent quotidiennement de l'aube au crépuscule. Dispositif mis en place sur 10% des éoliennes jugées les plus dangereuses durant la période migratoire.	Oiseaux	<a href="#">Ferrer et al., 2022</a> Moyen (n° 32)	Vaut. fauve	Espagne Non précisé	* Taux de mortalité réduit de <b>92,8%</b> sur 14 ans.	Ces résultats prometteurs soulignent l'importance de poursuivre les recherches pour évaluer la durabilité de cette approche et son applicabilité à grande échelle.
<b>Bridage par intégration de technologies avancées</b>	Bridage intelligent par analyse de l'activité des C.-s. et des données de vitesse du vent, déclenché pour une vitesse de vent inférieure à 8 m/s, permettant de prendre des décisions en temps réel sur l'arrêt des turbines.	Chauves-souris	<a href="#">Hayes et al., 2019</a> Moyen (n° 33)	* C.-s. rousse * C.-s. cendrée * C.-s. argentée * Séro. brune * Petite C.-s. brune	Etats-Unis Paysage agricole, forestier et humide	Comparé à des turbines pleinement opérationnelles: * Taux de mortalité réduit de 84,5% toutes espèces combinées. * Taux de mortalité réduit de 82,5% chez la C.-s. rousse. * Taux de mortalité réduit de 81,4% chez la C.-s. cendrée. * Taux de mortalité réduit de 90,9% chez la C.-s. argentée. * Taux de mortalité réduit de 74,2% chez la Séro. brune. * Taux de mortalité réduit de 91,4% chez la Petite C.-s. brune.	Le bridage par intégration de technologies avancées a permis de réduire la mortalité des chauves-souris de <b>74,2 % à 91,4 %</b> , selon les espèces et les études considérées. Toutefois, compte tenu de certains résultats non concluants, notamment pour les oiseaux, il est nécessaire de poursuivre les recherches pour confirmer l'efficacité de ces méthodes et optimiser leur application.
			<a href="#">Rabie et al., 2022</a> Faible (n° 33)	Analyse globale	Etats-Unis Paysage agricole et forestier	Taux de mortalité réduit de <b>75%</b> par rapport à un bridage avec v.s.d. de 3,5 m/s.	
	<a href="#">Rodriguez et al., 2023</a> Fort (n° 34)	Analyse globale	Etats-Unis Non précisé	Résultats <b>non concluants.</b>			
	Bridage intelligent utilisant des capteurs acoustiques pour détecter la présence de C.-s. en temps réel et ajuster la vitesse de démarrage des éoliennes en conséquence (sans prise en compte de la vitesse du vent)						
	Bridage intelligent utilisant des caméras et des algorithmes pour détecter des oiseaux en vol, les classer et ordonner la mise à l'arrêt des turbines.	Oiseaux	<a href="#">McClure et al., 2021</a> Moyen (n° 34)	* Aigle royal * Pygargue tête bl.	Etats-Unis Non précisé	* Taux de mortalité réduit de <b>63%</b> après la mise en place du système. * Taux de mortalité réduit de <b>82%</b> sur le site avec système par rapport à un site sans bridage.	
Article critique de McClure et al., 2021 / Nouvelle analyse des données	Oiseaux	<a href="#">Huso &amp; Dalthorp, 2023</a> Très faible (n° 34)	* Aigle royal * Pygargue tête bl.	Etats-Unis Non précisé	Résultats <b>non concluants.</b>		
Emission d'ultrasons par des dispositifs placés sur les turbines visant à perturber l'écholocation des	Chauves-souris	<a href="#">Spanjer, 2006</a> Moyen (n° 35)	Séro. brune	Etats-Unis En captivité	Activité réduite de <b>92,4% à 100%</b> selon le test avec dispositif.	Le dispositif d'effarouchement acoustique par ultrason	

Effarouchement acoustique par ultrason	C.-s. pour les inciter à éviter les zones à risques de collision.		Szewczak & Arnett, 2006 . Moyen (n° 35)	Analyse globale	Etats-Unis Etangs	Tests en absence de turbine: activité réduite de <b>50%</b> avec dispositif.	montre une réduction de l'activité des chauves-souris de <b>30% à 100 %</b> . Les résultats sur la mortalité réelle des chauves-souris dans des environnements naturels varient également considérablement, avec des réductions de mortalité de <b>21% à 78,4 %</b> selon les études et les espèces, tandis que certains cas montrent des résultats <b>non concluants ou même une augmentation</b> de mortalité pour certaines espèces. Ces variations soulignent la nécessité de poursuivre les recherches pour optimiser l'efficacité de cette méthode, en prenant en compte les différences entre les contextes, les espèces et les configurations techniques.
			Szewczak & Arnett, 2007 Fort (n° 35)	Analyse globale	Etats-Unis Etangs	Tests en absence de turbine: activité réduite de <b>90%</b> à près de <b>100%</b> avec dispositif.	
			Horn et al., 2008 . Moyen (n° 35)	Analyse globale	Etats-Unis Paysage agricole et forestier	* Taux d'activité réduite de <b>46,3%</b> lors de la première période de test pour les turbines avec dispositif. * Résultats <b>non concluants</b> durant la seconde période de test.	
			Arnett et al., 2013 . Très faible (n° 35)	* C.-s. cendrée * C.-s. argentée	Etats-Unis Paysage montagneux et forestier	<u>Année 2009:</u> * Taux de mortalité global par éolienne réduit de <b>21% à 51%</b> pour les turbines avec dispositif. * Taux de mortalité chez la C.-s. cendrée et la C.-s. argentée réduits de <b>50%</b> pour les turbines avec dispositif. <u>Année 2010:</u> * Variation du taux de mortalité global par éolienne de <b>+2% à -64%</b> pour les turbines avec dispositif. * Taux de mortalité chez la C.-s. cendrée réduit de <b>50%</b> et chez la C.-s. argentée réduits de <b>75%</b> pour les turbines avec dispositif	
			Lindsey, 2017 Faible (n° 36)	C.-s. migratrices : * C.-s. cendrée * C.-s. rousse * C.-s. argentée	Etats-Unis Paysage de pâture avec parcelles boisées	<u>Année 2015:</u> * Taux d'activité réduit de <b>80 %</b> autour des étangs à 10 mètres par rapport à 30 mètres du dispositif de dissuasion. * Taux d'activité réduit de <b>75 %</b> autour des turbines à 10 mètres par rapport à 30 mètres du dispositif de dissuasion. * Résultats non concluants concernant les différences d'activité des C.-s. près des turbines. * Résultats <b>non concluants</b> sur les différences de réponses des C.-s. selon le type de signal ultrasonique utilisé (continu ou pulsé). <u>Année 2016:</u> * Taux d'activité réduit de <b>91 %</b> au printemps lors des essais de dissuasion par ultrasons. * Taux d'activité réduit de <b>84 %</b> en été lors des essais de dissuasion par ultrasons. * Taux d'activité réduit de <b>72 %</b> en automne lors des essais de dissuasion par ultrasons.	

		<p><a href="#">Romano et al., 2019</a> Très faible (n° 36)</p>	<p>C.-s. migratrices : * C.-s. cendrée * C.-s. rousse * C.-s. argentée</p>	<p><i>Etats-Unis</i> Paysage agricoles, forestier, d'espaces développés et de milieux humides</p>	<p><u>Année 2014</u> : Émetteurs montés sur les nacelles et les tours des éoliennes, émission continue. * Taux de mortalité réduit de <b>29,18 %</b> pour toutes les espèces combinées. * Taux de mortalité réduit de <b>25,98%</b> chez les C.-s. cendrées et de 38,66 % chez les C.-s. argentées, <b>non concluant</b> chez les C.-s. rousses. <u>Année 2015</u> : Émetteurs uniquement sur les tours. * Taux de mortalité réduit de <b>32,50 %</b> pour toutes les espèces combinées. * Taux de mortalité réduit de <b>35,89%</b> chez les C.-s. cendrées et de <b>56,93 %</b> chez les C.-s. argentées, <b>non concluant</b> chez les C.-s. rousses. <u>Année 2016</u> : Introduction d'un système à émission pulsée avec des émetteurs sur les nacelles et les tours. * Résultats <b>non concluants</b> pour toutes les espèces combinées. * Taux de mortalité réduit de <b>72,90 %</b> pour la C.-s. argentée, <b>non concluant</b> pour les autres espèces.</p>	
		<p><a href="#">Kinzie et al., 2019</a> Faible (n° 36)</p>	<p>* C.-s. rousse</p>	<p><i>Etats-Unis</i> Non précisé</p>	<p><u>Année 2015</u> : Avec un signal continu * Taux de mortalité réduit de <b>56 %</b>, <b>pour</b> les espèces autres que la C.-s. rousse (toutes espèces combinées), <b>non concluant</b> chez la C.-s. rousse. <u>Année 2016</u> : Avant l'installation de séparateurs air-eau et avec un signal pulsé * Taux de mortalité réduit de <b>38 %</b> pour les espèces autres que la C.-s. rousse (toutes espèces combinées), <b>non concluant</b> chez la C.-s. rousse. <u>Année 2016</u> : Après l'installation de séparateurs air-eau et avec un signal pulsé * Résultats <b>non concluants</b> pour les espèces autres que la C.-s. rousse (toutes espèces combinées), et chez la C.-s. rousse.</p>	
		<p><a href="#">Weaver et al., 2020</a> Faible (n° 37)</p>	<p>* C.-s. cendrée * Molosse Brésil * <i>Lasirius intermedius</i> (nom vernaculaire non disponible)</p>	<p><i>Etats-Unis</i> Paysage agricole et de prairie</p>	<p>* Taux de mortalité réduit de <b>50%</b> toutes espèces combinées. * Taux de mortalité réduit de <b>78,4%</b> chez les C.-s. cendrées, <b>54,5%</b> chez les Molosses du Brésil et résultats <b>non concluants</b> chez <i>Lasirius intermedius</i>.</p>	

			<a href="#">Gilmour et al., 2020</a> Moyen (n° 37)	* Pipist. commune * Pipist. pygmée	<i>Angleterre et Pays de Galles</i> Paysage riparien	* Activité réduite de <b>80%</b> toutes espèces combinées. * Activité réduite de <b>40 à 80 %</b> chez les Pipist. communes et de <b>30 à 60 %</b> pour les Pipist. pygmées, selon les sites ripariens testés.	
			<a href="#">Schirmacher et al., 2020</a> Très faible (n° 37)	C.-s. migratrices : * C.-s. cendrée * C.-s. rousse * C.-s. argentée	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole	* Résultats <b>non concluants</b> sur le taux de mortalité toutes espèces combinées. * Résultats <b>non concluants</b> sur le taux de mortalité chez les autres espèces. * Taux de mortalité augmenté de <b>1,3 à 4,2 fois</b> chez la C.-s. rousse avec dissuasion acoustique.	
			<a href="#">Cooper et al., 2021</a> Fort (n° 38)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage montagneux et forestier	Résultats <b>non concluants</b> entre les turbines avec et sans dissuasion acoustique, certainement dû à des défaillances techniques détectées.	
<b>Mesures combinées : bridage et effarouchement acoustique</b>	Bridage par augmentation du seuil de démarrage des turbines ou orientation des pales combiné à l'effarouchement acoustique par ultrasons	Chauves-souris	<a href="#">Good et al., 2022</a> Faible (n° 38)	* C.-s. cendrée * C.-s. argentée * Séro. brune	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricoles, forestier, d'espaces développés et de milieux humides	* Taux de mortalité réduit de <b>71,6%</b> chez la C.-s. argentée, <b>71,4%</b> chez la C.-s. cendrée et <b>58,1%</b> chez la Séro. Brune avec mesures combinées par rapport à un bridage seul à une vitesse de 3 m/s. * Taux de mortalité réduit de <b>14,8%</b> chez la C.-s. argentée, <b>65,4%</b> chez la C.-s. cendrée et <b>38,8%</b> chez la Séro. Brune avec mesures combinées par rapport à un bridage seul à une vitesse de 3 m/s.	Les mesures combinées, associant bridage et effarouchement acoustique par ultrasons, présentent des résultats contrastés. Les réductions de mortalité des chauves-souris varient de <b>11 % à 99 %</b> selon les espèces et les conditions étudiées. Cependant, les résultats restent <b>non concluants</b> pour certaines espèces ou lorsque toutes les espèces sont combinées, indiquant la nécessité de recherches supplémentaires.
			<a href="#">Schirmacher et al., 2020</a> Très faible (n° 37)	C.-s. migratrices : * C.-s. cendrée * C.-s. rousse * C.-s. argentée	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole	* Résultats <b>non concluants</b> sur le taux de mortalité toutes espèces combinées. * Taux de mortalité réduit de <b>11 % à 99 %</b> chez la C.-s. argentée avec la combinaison dissuasion acoustique et réduction de vitesse * Résultats <b>non concluants</b> sur le taux de mortalité chez les autres espèces.	
<b>Effarouchement mixte acoustique et lumineux</b>	Dissuasion mixte montée sur un drone émettant à la fois des signaux lumineux blanc et des ultrasons pulsés.	Chauves-souris	<a href="#">Werber et al., 2023</a> Moyen (n° 38)	Analyse globale	<i>Israël</i> Non précisé	Détection par LIDAR (évaluation de l'impact du dispositif en dessous de l'altitude de vol du drone): * Activité réduite de <b>40%</b> après activation du dispositif. Détection par RADAR (évaluation de l'impact du dispositif au-dessus de l'altitude de vol du drone): * Activité augmentée de <b>50%</b> après activation du dispositif.	L'activité des chauves-souris a été réduite de <b>40 %</b> en dessous de l'altitude de vol du drone, mais elle a augmenté de <b>50 %</b> au-dessus. Ces résultats suggèrent que cette

							méthode nécessite des ajustements et des recherches supplémentaires pour garantir son efficacité et minimiser les impacts indésirables.
<b>Effarouchement acoustique de moyenne fréquence</b>	Exposition à quatre types de signaux acoustiques différents, testant deux plages de fréquences (4–6 kHz et 6–8 kHz) et deux modèles de modulation temporelle (à large bande et à oscillation de fréquence)	Oiseaux	<a href="#">Thady et al., 2022</a> _ Faible (n° 38)	Diam. mandarin	<i>Etats-Unis</i> En captivité	* Augmentation de la distance minimale de vol par rapport aux obstacles physiques en présence de signaux acoustiques. * Augmentation de la précocité des ajustements de trajectoire de vol en présence de signaux acoustiques. * Pas de différences entre les types de signaux acoustiques.	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
<b>Effarouchement radar</b>	Emission de champs électromagnétiques par des radars placés stratégiquement pour perturber l'orientation des C.-s. et les dissuader d'approcher des zones à risque de collision	Chauves-souris	<a href="#">Nicholls &amp; Racey, 2007</a> _ Faible (n° 39)	Analyse globale	<i>Grande-Bretagne</i> Paysage forestier et riparien	Activité réduite sur les sites exposés aux radars (amplitude de l'effet non donné).	L'effarouchement par radar montre une efficacité mitigée pour réduire l'activité des chauves-souris. Les réductions d'activité varient de <b>13,3 % à 30,8 %</b> , selon les configurations de signal radar, mais les résultats sont souvent <b>non concluants</b> . Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer et valider l'efficacité de cette méthode.
		Chauves-souris et insectes	<a href="#">Nicholls &amp; Racey, 2009</a> _ Moyen (n° 39)	Analyse globale	<i>Ecosse</i> Paysage forestier et riparien	* Activité réduite de <b>13,3%</b> pour les essais impliquant un radar avec signal à impulsion courte. * Activité réduite de <b>30,8%</b> pour les essais impliquant un radar avec signal à impulsion moyenne.	
		Chauves-souris	<a href="#">Gilmour et al., 2020</a> Moyen (n° 37 et 39)	* Pipist. commune * Pipist. pygmée	<i>Angleterre et Pays de Galles</i> Paysage riparien	* Résultats <b>non concluants</b> sur l'activité des C.-s. lorsque le radar est utilisé seul (toutes espèces combinées et par espèce). * <b>Pas d'effet supplémentaire</b> observé lorsque le radar est combiné aux ultrasons par rapport à l'utilisation des ultrasons seuls (toutes espèces confondues et par espèce).	
<b>Effarouchement lumineux UV</b>	Emission de lumière ultra-violette dirigée à partir de ou vers les turbines afin d'exploiter la sensibilité des oiseaux et C.-s. à ces longueurs d'ondes pour rendre les obstacles plus visibles.	Oiseaux	<a href="#">May et al., 2017</a> _ Faible (n° 39)	Analyse globale	<i>Norvège</i> Paysage côtier	* Taux d'activité réduit de <b>27%</b> avec lumière UV. * Taux d'activité réduit de <b>12%</b> avec lumière violette.	L'effarouchement lumineux UV montre des résultats inégaux dans la réduction de l'activité des espèces ciblées. Les taux
		Chauves-souris et insectes	<a href="#">Gorresen et al., 2015</a> _ Moyen (n° 40)	C.-s. cendrées hawaïennes	<i>Hawaï</i> Paysage agricole	* Taux d'activité réduit de <b>44%</b> avec lumière UV. * Quantité d'insectes augmenté de <b>6 fois</b> avec lumière UV.	

		Chauves-souris, oiseaux et insectes	<a href="#">Cryan et al., 2022</a> Moyen (n° 40)	Analyse globale par taxon	<i>Etats-Unis</i> Paysage de pâture et urbanisé	* Résultats <b>non concluants</b> sur l'activité nocturne ni des C.-s., ni des oiseaux et ni des insectes. * Résultats <b>non concluants</b> sur les risques de collision chez les C.-s.	d'activité ont diminué de <b>12 % à 44 %</b> , mais des effets secondaires, comme une <b>augmentation significative</b> des insectes, ont été observés, et plusieurs résultats restent <b>non concluants</b> . Cette méthode nécessite davantage de recherches pour en comprendre pleinement l'efficacité et les impacts secondaires.
<b>Variation du diamètre du rotor des turbines</b>	Diminution ou augmentation de la taille des pâles	Chauves-souris et oiseaux	<a href="#">Martin, 2015</a> Faible (n° 40)	Analyse globale par taxon	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier avec rivière	* Résultats <b>non concluants</b> chez les C.-s. entre des rotors de 93 et 96 m de diamètres. * Taux de mortalité réduits de <b>54% chez</b> les oiseaux pour un diamètre de rotor de 93 m (plus petits).	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
		Oiseaux	<a href="#">Anderson et al., 2005</a> Moyen (n° 41)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage montagneux et désertique	* Taux de mortalité réduits de <b>60%</b> chez les oiseaux toutes espèces combinées et <b>76%</b> chez les rapaces, mais différences non significatives (non concluantes).	
<b>Peinture des turbines</b>	Peinture noire appliquée à la base des turbines	Oiseaux	<a href="#">Stokke et al., 2020</a> Moyen (n° 41)	Lagop. saules	<i>Norvège</i> Paysage ouvert	* Taux de mortalité réduit de <b>48,2%</b> pour les turbines dont la base a été peinte en noir.	La peinture des turbines, notamment l'application de peinture noire sur une pale ou à la base des turbines, montre des résultats prometteurs pour réduire la mortalité des oiseaux, avec des réductions allant de <b>48,2 % à 100 %</b> . En revanche, des essais sur les insectes montrent une attraction non négligeable. Par ailleurs, les essais utilisant des peintures
	Peinture noire appliquée sur une pale		<a href="#">May et al., 2020</a> Moyen (n° 41)	Analyse globale + Pygargue q. blanche	<i>Norvège</i> Paysage ouvert	* Taux de mortalité global réduit de <b>71,9%</b> pour les turbines dont une pale a été peinte en noir. * Taux de mortalité réduit de <b>100%</b> chez le Pygargue q. blanche.	
	Peinture réfléchissante aux ultraviolets appliquée sur les pâles		<a href="#">Young et al., 2003</a> Faible (n° 41)	Analyse globale + par groupes d'oiseaux (rapaces, passereaux, corvidés...)	<i>Etats-Unis</i> Paysage de prairie, bocage, maquis et rivières	* Résultats non concluants sur les taux de mortalité toutes espèces combinées et par groupes d'oiseaux.	
	Peinture sur pâles: pâles avec différentes rayures et des pâles unicolores de différentes couleurs, évaluées contre plusieurs arrière-		<a href="#">Hodos, 2003</a> Fort (n° 42)	Crécerelle Am.	<i>Etats-Unis</i> En captivité	* Les pâles avec des rayures fines présentent une visibilité <b>4 fois</b> supérieure à celle des pâles sans motifs. * Les pâles peintes en noir présente une meilleure visibilité	

	plans naturels et à diverses vitesses de rotation					contre divers arrière-plans, sont plus efficaces que les pâles de couleurs rouge, verte ou bleue et leur efficacité varie moins en fonction de la couleur de l'arrière-plan.	réfléchissantes aux UV ou des variations de motifs et couleurs sur les pales présentent des résultats non concluants, suggérant que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'impact de ces méthodes et les meilleures configurations à appliquer, tant sur les oiseaux que sur les insectes.
	Peinture de différentes couleurs sur le mât d'une turbine	Insectes	<a href="#">Long et al., 2011</a> . Moyen (n° 42)	Analyse globale	<i>Royaume-Unis</i> Paysage forestier et de prairie	* Attraction des insectes la plus élevée pour les couleurs jaune, blanc et gris clair. * Attraction des insectes la moins élevée pour la couleur lilas rouge.	
<b>Surface texturée des turbines</b>	Remplacement des surfaces lisses actuelles des turbines par des surfaces texturées	Chauves-souris	<a href="#">Bienz, 2016</a> . Fort (n° 43)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> En captivité	Taux de passage réduit de <b>58%</b> avec les surfaces texturées finement par rapport aux surfaces lisses, <b>non concluant</b> avec les surfaces texturées grossièrement.	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
			<a href="#">Huzzen, 2019</a> Moyen (n° 43)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage agricole et forestier	Résultats <b>non concluants</b> pour le taux d'activité.	
<b>Renouvellement des parcs éoliens ("Repowering")</b>	Remplacement de turbines à une pale par des turbines à trois pales	Chauves-souris	<a href="#">Ferri et al., 2016</a> . Faible (n° 44)	Analyse de l'assemblage des populations de C.-s.	<i>Italie</i> Paysage montagneux avec pâtures	Modification dans la composition en termes d'espèces chez les C.-s. : réduction de la fréquence relative du Murin à oreilles échancrées ( <i>Myotis emarginatus</i> ) et augmentation pour la Pipist. commune	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
	Remplacement de turbines à axe vertical par un nombre moins important de turbines à trois pales	Oiseaux	<a href="#">Smallwood &amp; Karas, 2009</a> . Fort (n° 44)	Analyse globale	<i>Etats-Unis</i> Paysage montagneux avec pâtures	* Résultats <b>non concluants</b> entre les éoliennes remplacées et les nouvelles éoliennes. * Taux de mortalité réduits de <b>54%</b> chez les oiseaux, toutes espèces combinées, et de <b>66%</b> chez les rapaces.	
<b>Elimination de facteurs écologiques attractifs</b>	Labour superficiel autour des turbines pour éliminer la végétation naturelle.	Oiseaux et insectes	<a href="#">Pescador et al., 2019</a> Fort (n° 44)	Faucon crécer.	<i>Espagne</i> Paysage agricole	* Taux de mortalité réduit de <b>75%, 82,8% et 100%</b> chez les faucons crécerelle selon le parc éolien testé. * Abondance relative réduite chez les insectes de <b>72,6 %</b> pour les orthoptères, <b>56,3 %</b> pour les lépidoptères, et <b>68,0 %</b> pour les coléoptères.	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus
	Utilisation d'un rodenticide anticoagulant, le chlorophacinone, pour réduire la population d'écureuils	Oiseaux	<a href="#">Smallwood &amp; Thelander, 2005</a>	Rapaces, corvidés, passereaux	<i>Etats-Unis</i> Paysage	Changements comportementaux observés chez les rapaces, corvidés et passereaux dans les parcelles équipées de turbines et présentant un labour:	



	terrestres et de gaufres dans les zones autour des éoliennes.		Fort (n° 45)		montagneux avec pâtures	* plus de temps en vol dans ces parcelles; * plus souvent perchés dans ces parcelles.	d'études pour confirmation.
	Suppression régulière de la végétation au sol au-dessus de 10 cm		<i>Shewring &amp; Vafidis, 2017</i> . Fort (n° 45)	Engoulement Eur.	<i>Pays de Galle</i> Paysage forestier	Résultats <b>non concluants</b> entre les éoliennes avec et sans suppression de la végétation sur le taux d'activité.	
<b>Balisage lumineux nocturne de sécurité pour la navigation aérienne</b>	Effet de lumières clignotantes rouges de la Federal Aviation Administration (FAA) équipant les éoliennes	Chauve-souris et oiseaux	<i>Martin, 2015</i> . Faible (n° 46)	Analyse globale par taxon	<i>Etats-Unis</i> Paysage forestier avec rivière	Résultats <b>non concluants</b> entre les turbines avec ou sans balisage lumineux sur le taux de mortalité.	Les résultats prometteurs restent trop insuffisants dans le cadre de cette revue pour évaluer l'efficacité réelle de cette mesure, nécessitant plus d'études pour confirmation.
	Effet de lumières fixes ou clignotantes, de différentes couleurs	Oiseaux	<i>d'Entremont, 2015</i> <i>Moyen</i> (n° 46)	Oiseaux migrants nocturnes	<i>Canada</i> <i>Paysage montagneux</i>	* Augmentation de l'effet attractif sur les migrants nocturnes avec les lumières de couleur bleue ou verte. * Vol en altitude plus élevée en présence de lumière rouge ou blanche comparée à l'absence de lumière. * Vol en altitude plus basse en l'absence de lumière comparée à un éclairage clignotant.	

## Élaboration des Recommandations

Les recommandations présentées sont le résultat d'une démarche en deux temps visant à améliorer l'efficacité des mesures d'atténuation des impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité. D'une part, une revue rapide a été effectuée pour synthétiser les connaissances scientifiques et techniques actuelles, mettant en évidence les pratiques existantes, les avancées et les lacunes en matière de recherche. D'autre part, un atelier collaboratif a réuni des experts issus de la recherche, de l'industrie éolienne, des organismes gouvernementaux, des financeurs et des bureaux d'études. Cet atelier a permis d'échanger sur les résultats intermédiaires de la revue et de recueillir des perspectives variées grâce à un questionnaire. Cette approche combinée assure que les recommandations sont à la fois fondées sur des preuves scientifiques solides et enrichies par les expériences pratiques des acteurs du terrain.

## Recommandations pour les développeurs et opérateurs de projets

Section	Recommandation	Actions spécifiques
<b>Intégration de technologies d'atténuation et innovations</b>	Utilisation de stratégies combinées	- Combiner le bridage avec d'autres mesures pour maximiser la réduction de la mortalité des chauves-souris et des oiseaux
	Adoption de technologies innovantes	- Adopter des technologies et systèmes spécifiques tels que le bridage, l'effarouchement, les systèmes de détection par intelligence artificielle.
	Peinture et textures spécifiques	- Tester l'application des peintures spécifiques sur les turbines pour améliorer leur visibilité et réduire les collisions d'oiseaux. - Tester l'utilisation des textures spécifiques sur les tours pour réduire les risques pour les chauves-souris.
	Systèmes intégrés de gestion environnementale	- Mettre en place des systèmes permettant d'ajuster en temps réel les opérations des turbines selon les conditions environnementales.
<b>Planification et conception écologique</b>	Planification et design écologique	- Planifier et analyser les impacts dès le début pour choisir des sites minimisant les perturbations écologiques. - Développer des designs innovants pour les turbines réduisant leur visibilité et leur impact sonore.
	Utilisation de modèles de prédiction	- Utiliser des modèles de risque de collision pour informer la conception des parcs éoliens.
<b>Gestion environnementale et suivi</b>	Gestion des facteurs écologiques	- Mettre en place des mesures adaptées aux spécificités locales en tenant compte des effets potentiels sur les écosystèmes environnants. - Privilégier des solutions intégrées et durables pour préserver l'intégrité des écosystèmes locaux.
	Surveillance et évaluation	- Mettre en place des programmes de suivi environnemental post-installation pour évaluer et ajuster les stratégies d'atténuation. - Homogénéiser les protocoles de suivi pour assurer la comparabilité des données.
<b>Collaboration et partage des données</b>	Partage des données et collaboration	- Promouvoir le partage des données de recherche et des retours d'expérience. - Participer au développement d'une base de données standardisée pour la centralisation de rapports et de données afin de faciliter les analyses globales. - Publier les données de suivi d'impact et d'efficacité des mesures avec résumés et mots-clés en anglais pour plus de visibilité. - Collaborer avec les chercheurs et les organismes gouvernementaux pour améliorer les pratiques.
<b>Engagement communautaire</b>	Engagement communautaire	- Engager les communautés locales dès les phases initiales des projets. - Assurer la transparence des informations et la participation active des communautés à la planification et au suivi des impacts environnementaux.

## Recommandations pour la communauté scientifique

Section	Recommandations	Actions spécifiques
<b>Recherche et Développement de Technologies d'Atténuation</b>	Optimisation des dispositifs de dissuasion acoustique chez les chauves-souris	- Affiner les technologies de dissuasion acoustique par davantage de recherches, notamment évaluer les effets négatifs de leur utilisation à long terme.
	Développement de méthodes multimodales et utilisation de radars	- Tester l'efficacité des radars comme moyens de dissuasion. - Combiner les signaux acoustiques avec d'autres méthodes pour une dissuasion plus efficace.
	Innovation dans l'utilisation de l'éclairage UV	- Améliorer les systèmes d'éclairage UV par des études supplémentaires. - Analyser les impacts écologiques possibles, comme l'attraction des insectes.
	Amélioration de la visibilité des turbines par la peinture	- Évaluer l'efficacité des peintures (couleurs, motifs, zone de la turbine).
	Texturation spécifique des tours d'éoliennes	- Affiner les textures des tours par des recherches.
<b>Études sur les Impacts Écologiques et la Biodiversité</b>	Études sur les insectes	- Évaluer les impacts directs et indirects sur les insectes des éoliennes et des mesures d'atténuation. - Développer des mesures d'atténuation à destination des insectes.
	Impact du repowering (renouvellement des parcs éoliens)	- Évaluer les impacts à long terme du renouvellement des parcs éoliens sur la faune.
	Réhabilitation écologique des sites éoliens	- Développer des pratiques optimales pour la réhabilitation des sites après démantèlement. - Évaluer l'efficacité des mesures de restauration sur la biodiversité.
<b>Modélisation, Prédiction et Outils d'Aide à la Décision</b>	Développement de modèles de prédiction des risques	- Créer et améliorer des modèles de risque de collision pour guider les décisions.
	Outils d'aide à la planification	- Concevoir des outils pour planifier les sites en limitant l'impact sur la biodiversité. - Travailler avec les décideurs pour intégrer les modèles dans la planification.
<b>Standardisation des Méthodologies et Partage des Données</b>	Développement de protocoles standardisés	- Uniformiser les protocoles de suivi pour comparer les données.
	Promotion du partage et de l'accessibilité des données	- Favoriser le partage des données entre scientifiques. - Employer des bases de données standardisées pour faciliter les analyses globales.
<b>Collaboration Interdisciplinaire et Internationale</b>	Renforcement de la collaboration entre disciplines	- Encourager des projets de recherche interdisciplinaires.
	Partenariats internationaux	- Collaborer avec des chercheurs de régions peu étudiées. - Mutualiser les connaissances pour combler les lacunes régionales.
	Engagement avec les opérateurs et les décideurs	- Travailler avec les opérateurs pour appliquer les recommandations scientifiques. - Intégrer la science dans les politiques via comités et groupes de travail.
<b>Innovations Méthodologiques et Technologiques</b>	Développement de nouvelles méthodologies de recherche	- Innover dans les méthodes de suivi des impacts (drones, IA, capteurs avancés).
	Intégration de nouvelles technologies	- Tester des technologies émergentes pour limiter les impacts des éoliennes.
<b>Sensibilisation et Formation</b>	Diffusion des connaissances	- Organiser des événements pour partager les avancées et bonnes pratiques.
	Formation des nouveaux chercheurs	- Recruter des jeunes chercheurs pour travailler sur la thématique des énergies renouvelables. - Offrir des programmes éducatifs interdisciplinaires pour former des experts polyvalents.

## Recommandations pour les agences gouvernementales

Section	Recommandation	Actions spécifiques
<b>Renforcement du cadre réglementaire et de la gouvernance</b>	Réglementation claire et coordination	- Clarifier les réglementations liées à l'éolien terrestre. - Améliorer la coordination entre les différents niveaux de gouvernement et les agences de régulation.
<b>Soutien financier à la recherche et au développement</b>	Financement de la recherche	- Utiliser des subventions et des incitations fiscales pour stimuler la recherche et le développement de technologies d'atténuation. - Financer des recherches en France et dans des régions sous-représentées (Asie du Sud-Est, Afrique subsaharienne, Amérique du Sud).
<b>Standardisation des méthodologies et partage des données</b>	Standardisation et partage des données	- Soutenir le développement de protocoles standardisés pour la collecte et le rapport des données. - Faciliter la création de plateformes de partage de données.
<b>Participation publique et engagement communautaire</b>	Engagement communautaire	- Établir des cadres réglementaires favorisant l'implication des communautés locales dès les phases initiales des projets.
<b>Soutien à la collaboration entre acteurs</b>	Soutien à la collaboration	- Encourager les partenariats entre les acteurs du secteur éolien, les chercheurs et les communautés locales.
<b>Surveillance environnementale et évaluation continue</b>	Surveillance et évaluation	- Imposer la mise en place de programmes de suivi environnemental post-installation pour évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation.

### Intégrer l'énergie éolienne et la préservation de la biodiversité : vers des solutions concrètes et collaboratives

Ce rapport est une contribution significative à l'élaboration et l'utilisation de solutions pour minimiser les effets de l'éolien terrestre sur la faune volante. Les recommandations ci-dessus visent à concilier le développement nécessaire de l'énergie éolienne avec la préservation indispensable de la biodiversité, en offrant des orientations concrètes et réalisables. La mise en œuvre de ces propositions nécessite une collaboration étroite entre tous les acteurs concernés. Elle implique également un engagement continu dans la recherche, l'innovation technologique et la participation active des communautés locales. En adoptant une approche intégrée et en s'appuyant sur les meilleures pratiques identifiées, il est possible de minimiser les impacts environnementaux tout en répondant aux défis énergétiques actuels. Nous encourageons vivement les parties prenantes à considérer ces recommandations et à les intégrer dans leurs pratiques et politiques.

## INTRODUCTION

L'urgence climatique actuelle exige une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre pour limiter les impacts du changement climatique. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), les températures mondiales pourraient en effet augmenter de 1,5°C dès 2030, de 2°C en 2050, et atteindre une élévation probable de 3°C d'ici 2100 (IPCC 2023). Les effets de ce changement climatique sont graves, touchant à la fois la biodiversité, les écosystèmes, et le bien-être humain (Ipbes, 2019). Les principales sources de ces émissions sont liées aux activités humaines, notamment par la production d'électricité à partir des énergies fossiles, qui représentent 42 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (*International Energy Agency*, 2022). La transition énergétique, en réduisant l'utilisation des énergies fossiles et en développant les énergies renouvelables (ENR), est donc cruciale pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, objectif fixé par de nombreux pays dans le cadre de l'Accord de Paris (UNFCCC 2015). Pour réduire la consommation d'énergie fossile au-delà du secteur de l'électricité, il est également nécessaire d'électrifier davantage les usages. Cela rend encore plus nécessaire le développement des énergies renouvelables au-delà des niveaux actuels, afin de satisfaire la demande croissante en électricité décarbonée.

En parallèle, tous les acteurs économiques, conformément à la cible 15 du cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal, doivent réduire les impacts négatifs sur la biodiversité, y compris les impacts des solutions pour atténuer le changement climatique (cible 8 du cadre mondial). La production énergétique, comme les autres activités humaines, doit ainsi transiter vers des actions plus durables, tout en préservant la biodiversité (Décision 15/4, U.N. Doc. CBD/COP/DEC/15/4 (2022), Stephen, 2023).

L'énergie éolienne joue un rôle clé dans une transition énergétique durable. A l'échelle mondiale, elle a connu une croissance rapide ces dernières décennies, devenant une composante majeure des stratégies énergétiques de nombreux pays (REN21, 2021). En France, la capacité totale de production des installations éoliennes à générer de l'électricité a été multipliée par trois en 10 ans, pour atteindre 22,2 GW en 2023 (Direction générale de l'énergie et du climat, 2023). La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit d'augmenter la capacité installée de l'énergie éolienne terrestre à entre 33,2 et 34,7 GW d'ici 2028, soulignant l'importance de l'éolien dans la stratégie énergétique nationale (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2022). L'éolien terrestre offre non seulement une alternative aux énergies fossiles, mais contribue également à réduire la dépendance énergétique des pays et à diversifier les sources d'énergie. En revanche, le développement rapide et soutenu de ces énergies dites "renouvelables" doit passer par une évaluation sérieuse de ses impacts sur la biodiversité, ce qui lui permettra de respecter la cible 8 du cadre mondial qui précise qu'il est indispensable d'accroître la résilience par des mesures d'atténuation, tout en réduisant au minimum les effets négatifs et en favorisant les effets positifs de l'action climatique sur la biodiversité.

Malgré ses avantages, l'énergie éolienne pose en effet des défis environnementaux, notamment en ce qui concerne ses impacts sur la biodiversité. Les parcs éoliens peuvent avoir des effets négatifs sur les habitats naturels et les espèces (Perrow, 2017). Parmi les impacts les plus préoccupants figurent ainsi les collisions des oiseaux et des chauves-souris avec les pales et les mats des éoliennes, entraînant des mortalités (Smallwood, 2013). Les études ont montré que les collisions peuvent être fréquentes dans certaines zones, et que cette fréquence varie fortement en fonction de la densité des populations d'oiseaux et de chauves-souris, des conditions environnementales locales, du comportement de vol des espèces ainsi que des types d'éoliennes et de parcs (Marques *et al.*, 2014, Thaxter *et al.*, 2017). En plus des collisions, les chauves-souris sont aussi victimes de barotraumatismes causés par les variations rapides de pression autour des pales en mouvement, entraînant des lésions internes graves souvent mortelles (Baerwald *et al.*, 2008). L'installation et l'exploitation des éoliennes peuvent également perturber les habitats naturels. La construction des infrastructures éoliennes nécessite souvent le défrichage de terres, ce qui entraîne la destruction ou la dégradation des habitats naturels. Ces activités peuvent fragmenter les habitats, réduisant ainsi la disponibilité des zones de reproduction, de nourrissage et de repos pour diverses espèces (Rodríguez *et al.*, 2013). Le bruit généré par les éoliennes, mais aussi leur imposante structure dans le paysage génère aussi un évitement à plus ou moins longue distance pour de nombreuses espèces (Marques

*et al.*, 2021). De plus, les éoliennes peuvent créer des perturbations microclimatiques locales, comme l'assèchement des sols, affectant les communautés végétales et animales locales (Kaffine, 2019, Wu & Archer, 2021).

Les impacts des éoliennes varient considérablement en fonction des espèces. Les oiseaux de grande taille, tels que les rapaces et les chauves-souris, sont particulièrement vulnérables aux collisions en raison de leurs comportements de vol, de leur longévité et de leur taux de reproduction bas (Madders & Whitfield, 2006, Thaxter *et al.*, 2017). Certaines espèces, comme le vautour fauve en Espagne, montrent des taux de collision particulièrement élevés en raison de leur méthode de vol dans certaines régions (de Lucas *et al.*, 2008). La géographie des sites éoliens joue également un rôle crucial dans la détermination de l'étendue des impacts. Les sites situés sur les routes migratoires des oiseaux (Masden *et al.*, 2009) ou à proximité des habitats naturels critiques pour les chauves-souris (Christine *et al.*, 2023) peuvent entraîner des taux de collision élevés (Desholm & Kahlert, 2005). De plus, les caractéristiques locales, telles que les conditions de vent et la topographie, peuvent influencer le comportement des espèces et leur interaction avec les éoliennes (Cryan & Barclay, 2009). Les insectes, bien que largement moins étudiés, sont également affectés par ces installations, avec des répercussions potentielles sur les réseaux trophiques et les processus écosystémiques dont ils font partie (Weschler, 2023). Ces interactions soulignent la nécessité de comprendre et de minimiser les impacts négatifs de l'éolien terrestre sur la biodiversité volante. Une synthèse de ces impacts a été publiée par la FRB en 2024 ([lien vers la synthèse lorsqu'elle sera en ligne](#))

Les parcs éoliens, en tant qu'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), sont soumis à des obligations environnementales spécifiques. Un cadre de planification et des réglementations visant à minimiser les impacts environnementaux des projets éoliens en France ont pour objectif de garantir une coexistence harmonieuse entre le développement des énergies renouvelables et la protection de la biodiversité. L'un des principaux outils de ce cadre est l'évaluation environnementale stratégique (EES), qui est exigée pour les plans et programmes ayant des incidences notables sur l'environnement (Ademe, 2024, Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, 2023). Cette évaluation permet d'intégrer les préoccupations environnementales dès le début de la planification des projets éoliens, en identifiant les impacts potentiels et en proposant des mesures d'atténuation. Des études d'impact environnemental (EIE) sont également obligatoires pour chaque projet, afin d'évaluer plus spécifiquement les effets sur les habitats naturels et les espèces (Sénat, 2009). En outre, les projets éoliens doivent respecter plusieurs codes législatifs, tels que le code de l'énergie, le code de l'urbanisme et le code de l'environnement. Ces codes imposent des procédures strictes pour l'autorisation des projets, incluant des consultations publiques et des enquêtes environnementales approfondies. Le code de l'environnement exige également des mesures spécifiques pour protéger les espèces et les habitats sensibles (Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, 2024).

La séquence "Éviter, réduire, compenser" (ERC) constitue une approche fondamentale dans la gestion des impacts environnementaux des projets de développement, y compris ceux relatifs à l'éolien terrestre (Bennett, 2016). Dans un premier temps, la planification spatiale joue un rôle prépondérant, permettant de situer les parcs éoliens loin des zones sensibles pour la biodiversité, telles que les sites de nidification ou les corridors migratoires (Thaxter *et al.*, 2017). Cette étape initiale dans la hiérarchie d'atténuation consiste à éviter les impacts négatifs en sélectionnant soigneusement les sites d'installation des éoliennes. En évitant ces zones, les développeurs peuvent réduire considérablement les risques de collisions et de perturbations des écosystèmes (Perrow, 2017). Cependant, en France, la planification spatiale spécifique pour le développement de l'éolien terrestre n'a jamais été véritablement mise en œuvre. Ce n'est que récemment que l'intégration de ces considérations dans les projets futurs a commencé à être sérieusement envisagée. Lorsque les impacts ne peuvent pas être entièrement évités, des mesures de réduction sont mises en place. L'ajustement du fonctionnement des turbines, notamment par la modulation de leur vitesse ou leur arrêt temporaire durant les périodes de haute activité faunique, s'est également avéré efficace (Adams *et al.*, 2021, Smallwood & Bell, 2020). Parmi ces mesures de réduction des impacts, on trouve également l'optimisation du positionnement des turbines pour minimiser les collisions, l'ajustement des périodes de fonctionnement des éoliennes pour éviter les moments de forte

activité des espèces sensibles, et l'utilisation de technologies de détection et de dissuasion des oiseaux et des chauves-souris. Par exemple, des dispositifs acoustiques peuvent être utilisés pour éloigner les chauves-souris des zones dangereuses (Weaver *et al.*, 2018), et des systèmes de détection par radar peuvent arrêter temporairement les turbines lorsque des oiseaux sont détectés à proximité (Tomé *et al.*, 2017). Lorsque des impacts négatifs persistent malgré les mesures d'évitement et de réduction, des actions de compensation sont possibles. Cela peut inclure la restauration d'habitats dégradés ailleurs, la création de nouveaux habitats, ou le financement de programmes de conservation pour les espèces affectées. Ces mesures tendent à compenser les pertes en biodiversité en améliorant les conditions des habitats et des populations ailleurs (Perrow, 2017).

Plusieurs guides et recommandations traitent des différents aspects de la planification, conception et réalisation de projets éoliens. Ces documents clarifient le cadre réglementaire ou offrent des directives techniques détaillées. Ils assistent notamment les porteurs de projets dans l'application de la séquence ERC et dans l'intégration des considérations environnementales (Dreal Hauts-de-France, 2017, UICN Comité français, 2023). Néanmoins, le besoin d'une évaluation rigoureuse de l'efficacité de ces différentes mesures a été identifié.

## OBJECTIF PRINCIPAL DE LA REVUE

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB) a initié une revue de la littérature scientifique et technique portant sur l'efficacité des mesures destinées à réduire l'impact des parcs éoliens terrestres sur la faune volante. Ce projet s'inscrit dans un programme global financé par le fonds de dotation Mirova Research Center, visant à promouvoir des pratiques durables et responsables dans le secteur des énergies renouvelable. Son objectif est d'identifier l'efficacité des mesures de réduction des impacts, telles que documentées par la recherche scientifique, afin d'accompagner les parties prenantes (agences gouvernementales, régulateurs, développeurs et opérateurs de projets) dans l'amélioration de leurs pratiques. Le projet entend fournir des recommandations opérationnelles basées sur des bases scientifiques solides pour optimiser le développement et l'exploitation des parcs éoliens tout en minimisant leurs impacts environnementaux.

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

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

La Fondation pour la recherche sur la biodiversité, en partenariat avec Mirova Research Center, a entrepris de piloter une synthèse des connaissances (ci-après dénommé « Revue rapide ») autour des interactions entre le développement éolien et la biodiversité. Le conseil scientifique du programme a orienté la revue vers un état de la littérature académique et technique sur la question de l'efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité volante : oiseaux, chauve-souris et insectes. La revue rapide, forme optimisée de la revue systématique, a pour ambition de fournir des réponses pertinentes dans un temps plus réduit : meilleures

pratiques, succès, échecs et lacunes de connaissances. Cette vue d'ensemble est de surcroît essentielle pour orienter les politiques et les pratiques futures, ainsi que pour optimiser le choix des projets où canaliser les investissements financiers vers des pratiques vertueuses au regard de la biodiversité. Ainsi, la question principale de la Revue est la suivante : « **Quelle est l'efficacité des solutions existantes pour atténuer les impacts des parcs éoliens terrestres sur les vertébrés et invertébrés volants ?** » (Cf. Figure 1). Les composantes de la question suivent une structure "PICO" (Tableau 1).

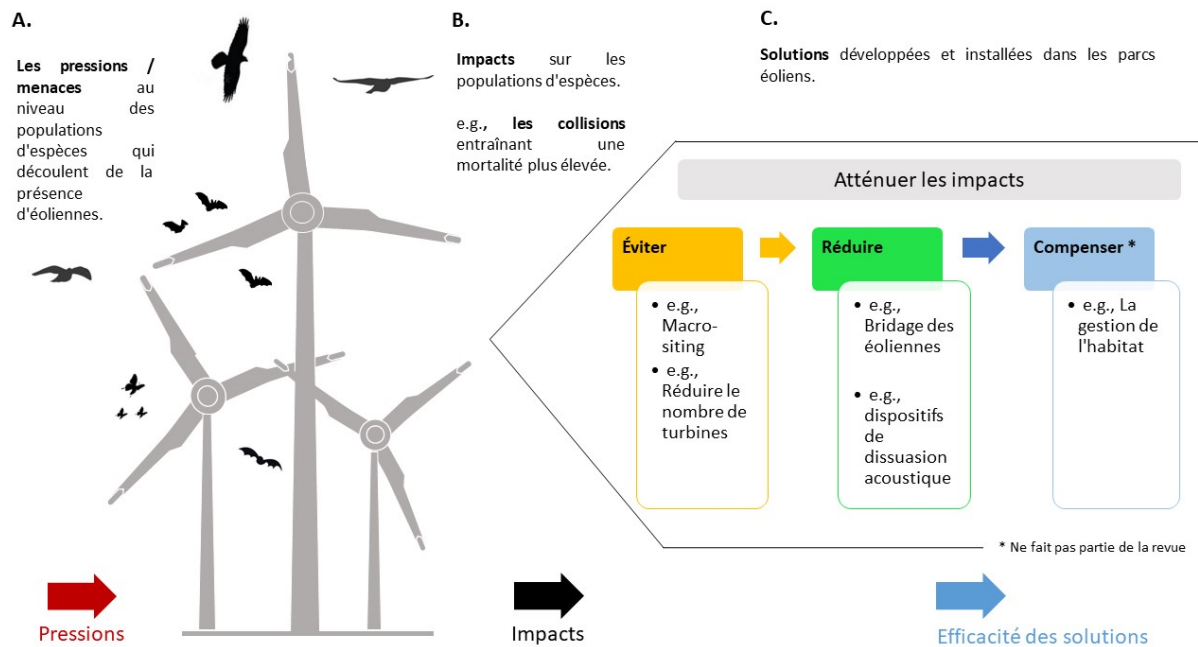


Figure 1. D'après Langridge et al. (2023), un schéma illustrant la théorie conceptuelle de la question de la revue. A : les pressions exercées sur la population des espèces, entraînant B : des impacts tels que des collisions. C : les solutions mises en œuvre pour réduire les impacts de la présence des éoliennes dans le paysage.

Tableau 1. Composantes de la question de la Revue rapide

Composantes PICO	Définitions	
Population	Tous les vertébrés volants, c'est-à-dire les oiseaux et les chauves-souris, et les invertébrés volants, c'est-à-dire les insectes.	
Intervention	Toutes les solutions d'atténuation mises en œuvre sur une seule turbine, plusieurs turbines et/ou à l'échelle d'un parc éolien, conformément à la séquence « ERC »	
	Évitement	Incluant uniquement les solutions "rétrospectives" après construction. Par exemple, une comparaison des sites de parcs éoliens à proximité d'habitats semi-naturels ou naturels comparés à des non-habitats.
	Réduction	Incluant des solutions par de nouvelles technologies/dispositifs intégrés dans les parcs éoliens existants pour réduire les impacts. Par exemple, réduction de la vitesse des éoliennes, dispositifs de dissuasion acoustique, etc.



	Compensation	Incluant des solutions impliquant la gestion d'habitat ailleurs en raison de la perte d'habitat due à la construction de turbines.
	<i>Offset</i>	Les mesures prises par une entreprise de construction pour équilibrer les impacts négatifs globaux d'un projet de développement.
Comparateur	<b>Comparaisons spatiales</b> (par exemple, sites où des solutions sont mises en œuvre pour atténuer les impacts vs. sites sans solutions mises en œuvre) ou <b>temporelles</b> (par exemple, avant la mise en œuvre de la solution vs. après la mise en œuvre). Celles-ci peuvent se traduire par des études dites « Avant-Après », « Contrôle-Intervention », « Avant-Après-Contrôle-Intervention ».	
Effets	Tous les impacts sur la taille et la densité de la population des espèces; par exemple, collisions/mortalité, mesurés par des comportements d'évitement, l'activité/l'abondance, <i>etc.</i>	

### Note aux lecteurs :

Pour une compréhension approfondie des méthodologies employées dans ce rapport, nous vous invitons à consulter les annexes (Annexe II). La section Méthodes y est détaillée, décrivant la stratégie de recherche bibliographique, les critères de sélection des documents retenus, ainsi que l'analyse critique des études, incluant l'évaluation de leur validité. Elle présente également les approches utilisées pour la synthèse narrative, la synthèse quantitative et la méta-analyse. Ces informations offrent un aperçu complet des démarches suivies pour garantir la rigueur scientifique et la robustesse des conclusions présentées.

## RESULTATS DESCRIPTIFS DES DOCUMENTS RETENUS

### Recherche et sélection

#### *Processus de sélection des références bibliographiques*

Les recherches effectuées dans diverses bases de données de publications en ligne ont renvoyé 1250 références pour Web of Science, 855 pour Base et 350 pour Google Scholar. En outre, des recherches complémentaires sur des sites spécialisés ont permis de récupérer 17 références de sources scientifiques et de littérature grise.

Sur les 2455 références initialement trouvées, 1602 références uniques ont été conservées après l'élimination des doublons (Figure 2). L'examen des titres a permis de retenir 569 citations, dont nous avons pu obtenir 473 résumés. Un tri basé sur les résumés a ensuite été effectué, permettant de conserver 232 références. En incluant les 96 références non triées sur résumé, notre tri sur texte intégral a finalement porté sur un total de 328 références. Seules 9 références (2,7 %) n'ont pas pu être récupérées en texte entier. Après l'examen des textes complets, 81 articles pertinents ont été sélectionnés, comprenant 60 articles de recherche primaire, 18 revues et trois méta-analyses. Les textes complets ont été principalement exclus en raison d'interventions (54 %), de comparateurs (25,1 %), de populations (9,6 %) ou de mesures (6,3 %) jugés non pertinentes.

#### *Sources et type des références sélectionnées*

Près des trois quarts des articles retenus ont été trouvés grâce aux recherches principales dans les bases de données de publications en ligne, avec une prédominance des références provenant de la base de données Web of Science (31 articles, 51,6 %) (Figure 3). Parmi celles-ci, l'intégralité sont des articles scientifiques, ce qui indique que cette source est particulièrement riche en publications académiques évaluées par des pairs. Web of Science semble être la principale source pour les études sur l'efficacité des

mesures d'atténuation de l'impact de l'éolien terrestre sur la biodiversité. La base de données BASE fournit environ 13 références bibliographiques (21,7 %), dont une majorité sont des rapports techniques (8), suivis de quatre mémoires de master et un mémoire de thèse. Il est important de noter que de nombreuses références issues de BASE ont été supprimées en raison de doublons avec celles trouvées dans Web of Science. Cela suggère que BASE est une source importante pour les documents non publiés et les littératures grises, offrant des perspectives complémentaires aux articles scientifiques. Google Scholar a fourni trois références (5 %), toutes étant des rapports techniques. À l'instar de BASE, de nombreuses références provenant de Google Scholar ont été supprimées en raison de doublons avec celles trouvées dans Web of Science ou BASE. Ces résultats indiquent que, bien que Google Scholar soit capable de trouver une quantité non négligeable de littérature, il apporte une valeur ajoutée relativement faible par rapport à l'utilisation de Web of Science et BASE. Cependant, il reste une source utile pour accéder à des rapports techniques qui peuvent ne pas être indexés dans d'autres bases de données académiques. La recherche additionnelle, qui inclut des sources diverses, compte 12 références bibliographiques (20 %). Parmi celles-ci, les rapports techniques dominent (8), suivis des articles scientifiques (3) et un poster. Cette catégorie montre la diversité des types de documents récupérés *via* des méthodes de recherche complémentaires.

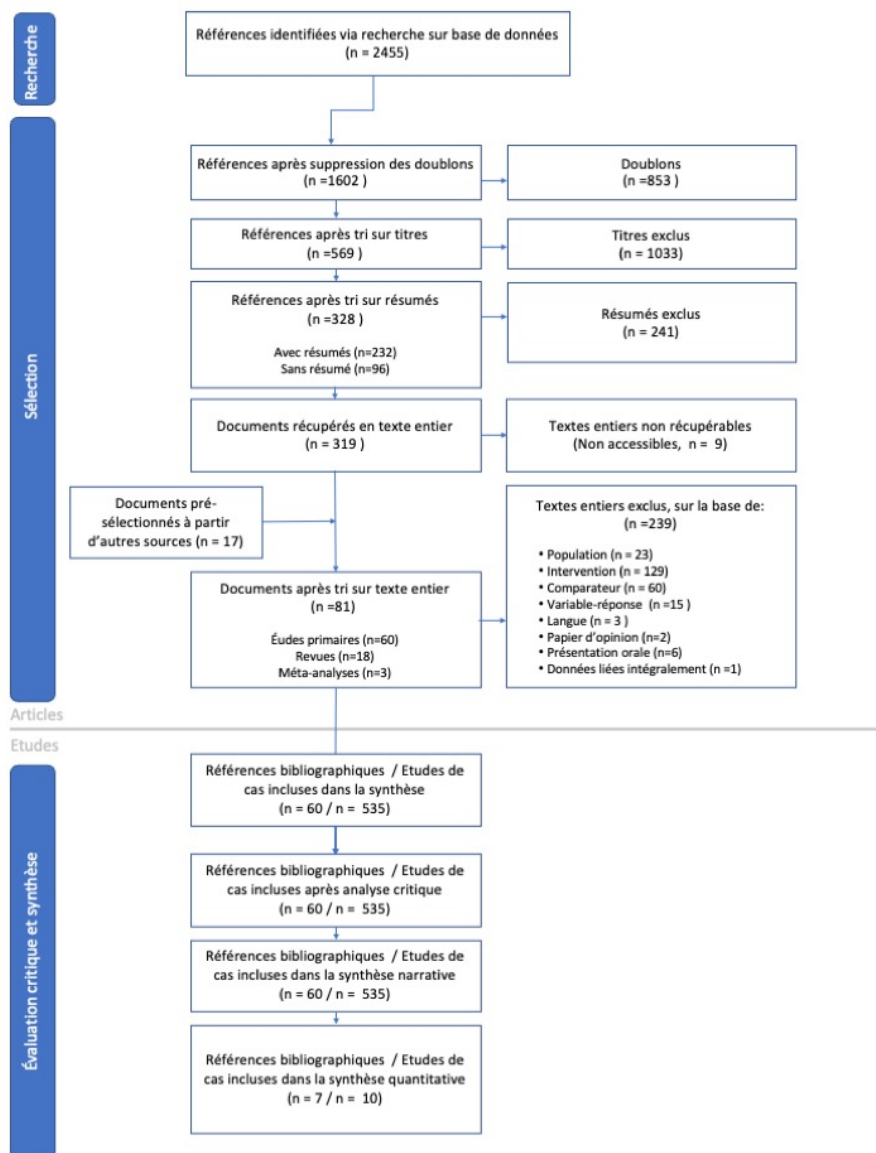


Figure 2. Diagramme de flux ROSES rapportant le processus de sélection des articles, études et observations inclus dans la carte systématique

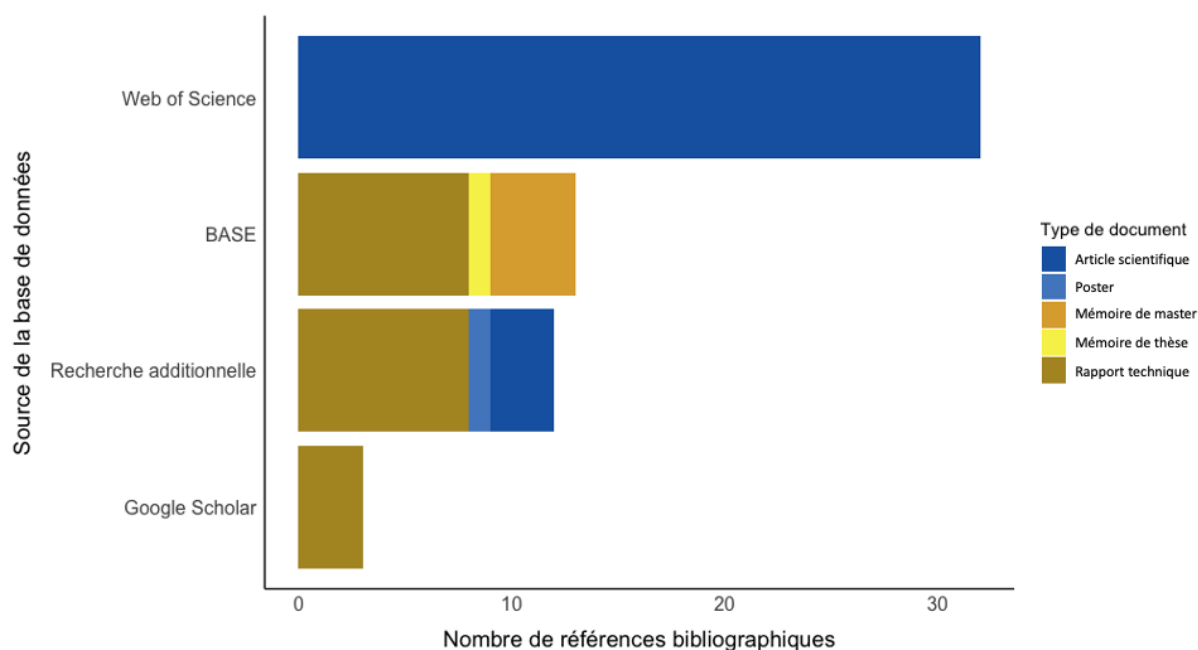


Figure 3. Nombre de références bibliographiques sélectionnées en fonction de sa source et du type de document. NB. La recherche complémentaire comptait sept sites spécialisés.

## Caractéristiques clés

### *Validité des études*

Les statistiques montrent que les références bibliographiques avec un risque de biais global moyen constituent la majorité des études, atteignant 44,2 % (Figure 4). Les documents évalués avec un risque de biais global faible à très faible suivent, avec un pourcentage de 39,4 %. Les études présentant un risque de biais global élevé constituent également une part non négligeable, soit 16,3 %. Il est à noter qu'aucune étude n'a été évaluée comme ayant un risque de biais global très élevé. Les études avec un risque de biais faible à très faible sont principalement constituées d'articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, totalisant 16 documents, contre 8 articles scientifiques avec un risque de biais moyen à élevé. En revanche, les études présentant un risque de biais global élevé sont surtout des documents non revus par les pairs, tels que des rapports techniques, des mémoires de master et des posters, totalisant 8 documents, contre 3 avec risque de biais moyen à faible. Les articles scientifiques avec un risque de biais moyen constituent malgré tout environ 30 % du corpus total.

Il convient de souligner une difficulté récurrente à évaluer certains critères précis pour déterminer le niveau de risque de biais dû à un manque d'informations détaillées partagées dans les documents (par exemple, le devenir des carcasses trouvées lors d'une estimation de la mortalité ou la connaissance par les expérimentateurs du type de traitement assigné aux sujets, etc.) amenant à une élévation du risque de biais global. Aussi, certains critères relevant de la méthodologie n'étaient pas suffisamment rigoureux dans nombre de protocoles : dans le cas d'une évaluation de la mortalité, une zone de recherche de cadavres trop restreinte, un intervalle entre chaque session de recherche trop long, etc. Plusieurs autres points sont également à améliorer par les auteurs, tels qu'une présentation des résultats de façon désagrégée, une mise à disposition des données brutes et une indication systématique des financements et des conflits d'intérêts.

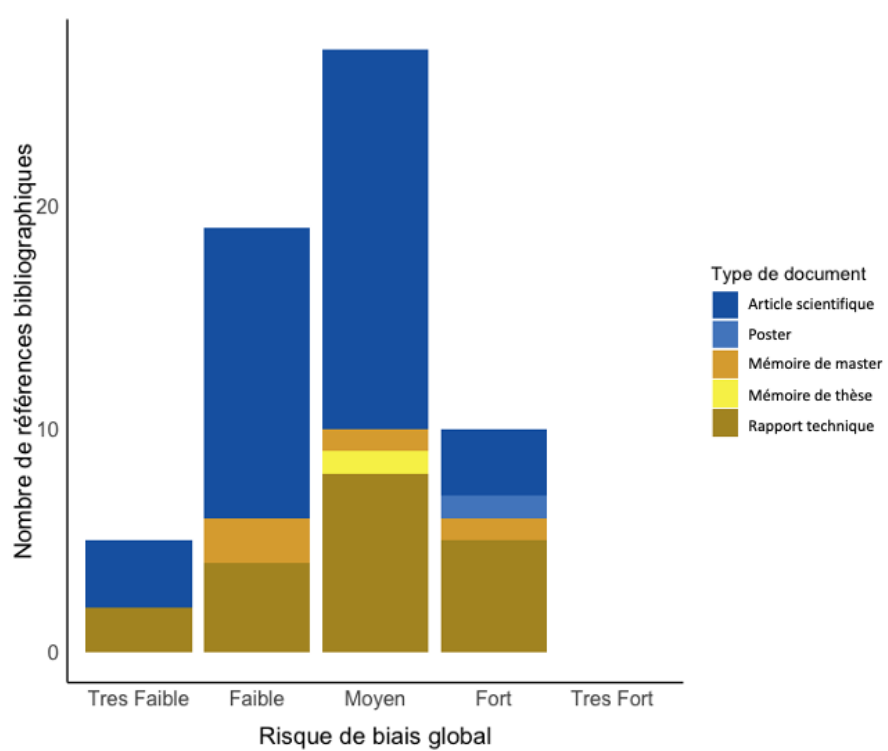


Figure 4. Nombre de références bibliographiques sélectionnées en fonction du risque de biais global et du type de document.

#### *Evolution chronologique*

Les premières publications retenues par notre recherche et sélection bibliographique datent de 2003 révélant un intérêt relativement récent et, modéré pour l'étude de l'efficacité des mesures d'atténuation des impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité (Figure 5). En effet, le nombre de références recensées oscille entre 1 et 2 de 2003 à 2008. De 2009 à 2018, on observe une légère augmentation du nombre de publications, avec des pics notables à 4 publications. À partir de 2019, une augmentation plus marquée et régulière du nombre de publications est observée, avec un pic significatif en 2022 où 9 publications sont recensées. Cette tendance indique une intensification des efforts de recherche pour évaluer et améliorer l'efficacité des mesures d'atténuation face aux impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité. L'énergie éolienne s'est développée rapidement ces dernières années, et son impact sur la biodiversité n'a été pris en compte que tardivement. Les mesures d'atténuation de cet impact ont été instaurées plus tard encore, ce qui explique pourquoi les recherches sur ce sujet sont encore peu nombreuses et récentes.

Il est à noter que notre recherche bibliographique a été réalisée fin septembre 2023, rendant la revue incomplète pour cette année particulière.

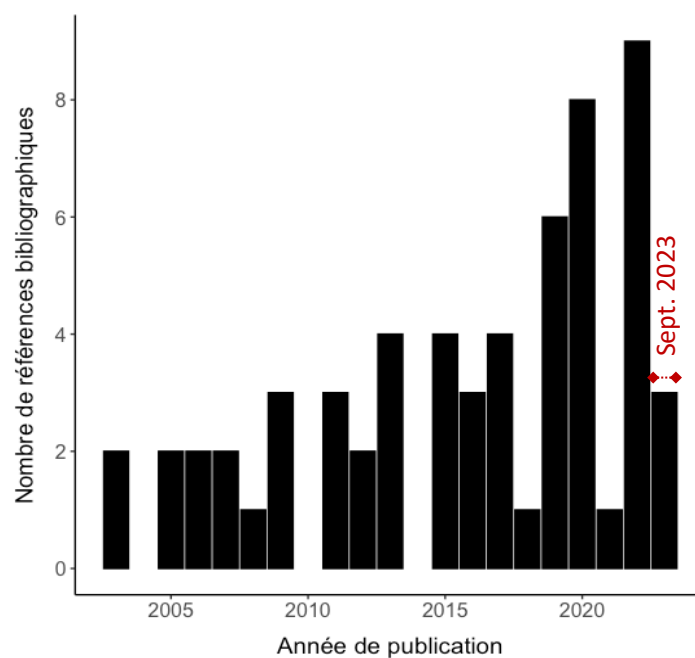
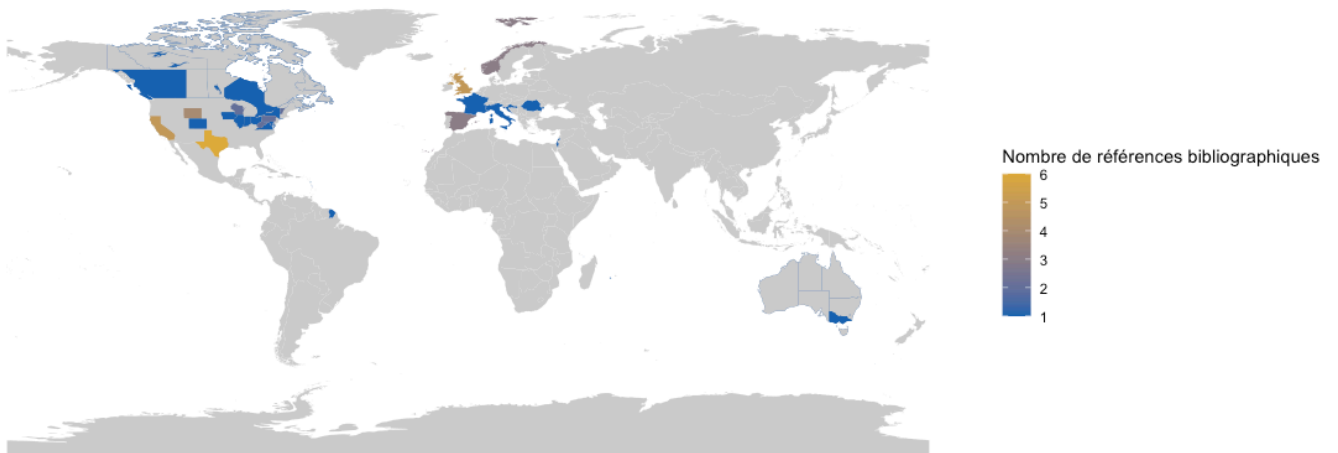


Figure 5. Nombre de références bibliographiques sélectionnées par année de publication. La recherche a été conduite fin septembre 2023

### *Distribution géographique*

La géographie des études présente une concentration en Amérique du Nord (environ 70 %), et dans une moindre mesure en Europe (plus de 25 %), avec une sous-représentation notable d'autres régions aux milieux écologiquement riches en termes de biodiversité (Figure 6). Aux États-Unis (38), plusieurs États affichent entre une et six références, notamment la Californie, le Texas et le Massachusetts. Le Canada compte également quelques références (3), avec une répartition plus diffuse. En Europe, plusieurs pays appartenant quasi-exclusivement à l'Europe occidentale sont représentés (France, Royaume-Uni, Espagne, Italie, Norvège, Croatie). Cependant, la plupart des pays n'est représentée que par un document, mis à part le Royaume-Unis (6), l'Espagne (3) et la Norvège (3). Dans les autres régions du monde, notamment en Afrique, en Asie, en Océanie et en Amérique du Sud, les données sont soit absentes soit très limitées (1 document). Les climats des régions étudiées varient considérablement, allant du méditerranéen et tempéré océanique en Europe et en Californie, au subtropical humide et semi-aride au Texas, en passant par le continental humide en Europe de l'Est, au Canada et au Massachusetts, et au climat tempéré en Australie. En examinant la représentativité des différents climats, au-delà de la simple géographie des régions ou pays étudiés, on constate également une grande hétérogénéité dans le nombre de références bibliographiques par type de climat.



*Figure 6. Distribution géographique des références bibliographiques sélectionnées*

### *Taxa étudiés*

Il apparaît une répartition inégale des recherches entre les différents taxons (Figure 7). Les chauves-souris sont représentées par 43 références bibliographiques couvrant 256 études de cas, représentant 60,6 % des références bibliographiques et 63,2 % des études de cas. Les oiseaux, bien que n'ayant que 21 références bibliographiques (25,4 %), couvrent 261 études de cas (64,5 %). Cette disparité s'explique par la diversité plus grande des espèces d'oiseaux étudiées dans certains articles, qui est généralement bien plus large que celle des chauves-souris, souvent limitée à quatre espèces. Cette différence dans le nombre d'espèces analysées peut être attribuée à la plus grande variété d'espèces d'oiseaux existantes par rapport aux chauves-souris. On notera également un focus particulier sur les rapaces (11 références pour 80 études de cas). Les insectes sont nettement sous-représentés avec seulement 4 références bibliographiques (5,6 %) couvrant 18 études de cas (4,4 %), soit une moyenne de 4,5 unités par référence.

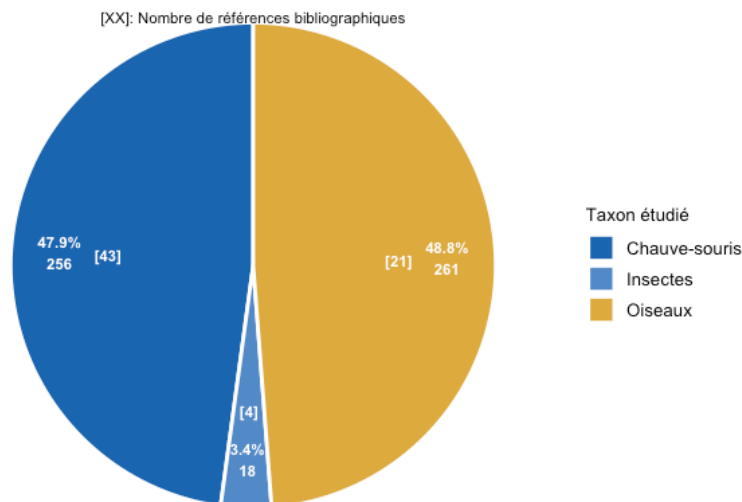


Figure 7. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques (entre crochets) selon le taxon étudié

#### Types de mesure d'atténuation étudiées

A nouveau, les données révèlent une répartition variée des études de cas et des références bibliographiques selon les types de mesures et les taxons affectés (Figure 8). Tout d'abord, il est important de noter que certaines mesures, bien que représentées par un grand nombre d'études de cas, ne concernent en réalité qu'un petit nombre de références bibliographiques. Cette disparité peut s'expliquer par la multiplicité des d'études de cas au sein d'une même référence, qui peut inclure diverses données fournies par différentes espèces, ainsi que plusieurs variations d'intervention pour les comparaisons contrôle-intervention. Par exemple, une seule étude peut explorer l'efficacité de différentes couleurs ou textures pour la dissuasion visuelle, tester plusieurs modalités d'effarouchement acoustique par ultrason, ou évaluer divers seuils de vitesse de démarrage des éoliennes (*cut-in-speed*<sup>1</sup>) dans des contextes différents. Ainsi, une seule référence bibliographique peut contenir une multitude d'études de cas enrichissant significativement la base de connaissances sans augmenter proportionnellement le nombre total de publications.

Pour les oiseaux, les mesures les plus étudiées en termes de nombre de références bibliographiques sont le bridage ciblé, avec 6 références couvrant 12 études de cas, et la peinture de la turbine, avec 4 références couvrant 93 études de cas. Cette dernière catégorie inclut des documents analysant l'application de peinture, soit en utilisant différentes couleurs, soit en appliquant la peinture à différents endroits de la turbine. Les mesures telles que la répulsion potentielle par la lumière UV, la taille de la turbine, et l'élimination des facteurs d'attraction (éclairage, contrôle des rongeurs, débroussaillage, labour du sol) comptent chacune entre deux et trois références. D'autres mesures, telles que l'effarouchement acoustique, le renouvellement des éoliennes (*repowering*<sup>2</sup>), la sélection de l'emplacement

<sup>1</sup> **Cut-in-speed** (ou vitesse/seuil de démarrage) désigne la vitesse minimale du vent nécessaire pour que les pales d'une éolienne commencent à tourner et à produire de l'électricité. En dessous de cette vitesse, l'éolienne ne génère pas d'énergie. Cette vitesse est déterminée par les caractéristiques techniques de l'éolienne, incluant la conception des pales et les spécifications du générateur. La cut-in-speed est un paramètre crucial pour l'optimisation de la production d'énergie éolienne et pour la réduction des impacts environnementaux, car elle influence les périodes pendant lesquelles l'éolienne est active et potentiellement perturbante pour la faune locale, notamment les oiseaux et les chauves-souris.

<sup>2</sup> **Repowering** (ou renouvellement des éoliennes) désigne le processus de remplacement d'anciennes éoliennes par des modèles plus modernes et plus efficaces. Cette opération peut inclure le remplacement des turbines complètes, des composants individuels comme les pales ou les générateurs, ou même l'augmentation de la capacité installée par l'ajout de nouvelles éoliennes sur le même site. Les nouvelles éoliennes utilisées dans le cadre du repowering sont généralement caractérisées par une plus grande taille et un nombre réduit par rapport aux anciennes installations. Les éoliennes modernes

du parc éolien (*macro-siting*), la disposition des éoliennes au sein des parcs (*micro-siting*), et l'utilisation de modèles prédictifs du taux de mortalité avant la construction du parc, sont moins documentées, chaque mesure n'ayant qu'une seule référence mais couvrant de 4 à 44 études de cas.

Pour les chauves-souris, l'effarouchement acoustique par ultrason et la limitation par augmentation de la vitesse de démarrage dominent les mesures étudiées, avec chacune 14 références couvrant respectivement 76 et 29 études de cas. Le bridage ciblé et le bridage par orientation des pales (*feathering*<sup>3</sup>) comptent 5 et 4 références pour 13 et 7 études de cas, tandis que la répulsion potentielle par radar et la modification de la texture de la turbine comptent 3 références couvrant 24 et 25 études de cas respectivement. Les mesures de répulsion potentielle par la lumière UV, la combinaison de la limitation par augmentation de la vitesse de démarrage et de l'effarouchement acoustique par ultrason, ainsi que le renouvellement des éoliennes, sont moins fréquentes, chacune avec 2 références pour 10 à 14 études de cas. D'autres mesures, telles que la combinaison de l'effarouchement par radar et de l'effarouchement acoustique par ultrason, la modification de la taille de la turbine, l'élimination de la lumière comme facteur d'attraction et le *micro-siting* (choix de l'emplacement précis des éoliennes), sont rarement documentées, chaque mesure ayant 1 référence pour un nombre d'études de cas variant de 1 à 40.

Les mesures d'atténuation des impacts sur les insectes ont été très peu étudiées. Les analyses réalisées le sont presque toujours en parallèle avec celles menées sur les chauves-souris ou les oiseaux. Chaque mesure n'est représentée que par une seule référence bibliographique. La peinture de la turbine est la mesure la plus étudiée, avec 10 études de cas. La répulsion potentielle par radar compte 3 études de cas, tout comme l'élimination des facteurs d'attraction (dans ce contexte, le labour du sol). Enfin, l'effarouchement par lumière UV est documenté par 2 études de cas.

---

bénéficie également d'améliorations technologiques telles que des systèmes de contrôle avancés, une meilleure résistance aux conditions météorologiques extrêmes, et des mécanismes de réduction du bruit. Le repowering vise à améliorer la performance énergétique, la fiabilité et la sécurité des parcs éoliens, tout en réduisant les impacts environnementaux et les coûts de maintenance. Il permet également de maximiser l'utilisation des infrastructures existantes, telles que les connexions au réseau électrique, tout en tirant parti des avancées technologiques pour augmenter la production d'électricité renouvelable.

<sup>3</sup> **Feathering** (ou mise en drapeau) désigne une technique utilisée dans les éoliennes où les pales sont orientées parallèlement au vent pour minimiser la résistance et l'effort sur la structure. Lorsque les pales sont en position de feathering, elles présentent leur bord de fuite au vent, réduisant ainsi la surface exposée et, par conséquent, la rotation de l'éolienne. Cette technique est souvent utilisée pour réduire la production d'énergie lorsque les conditions de vent sont trop fortes ou pour arrêter l'éolienne à des fins de maintenance. Elle permet également de diminuer les risques pour la faune, notamment les oiseaux et les chauves-souris, en réduisant le mouvement des pales dans certaines conditions spécifiques.



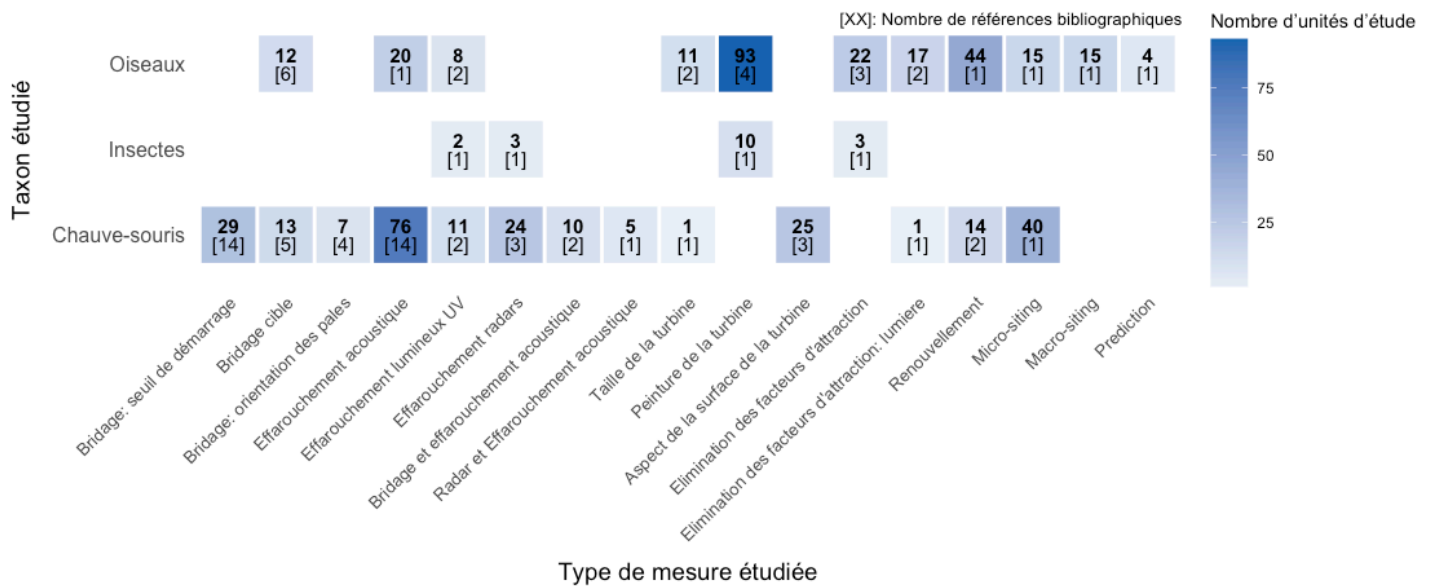


Figure 8. Carte thermique du nombre d'études de cas par taxon étudié et par type de mesures d'atténuation étudiée. Le nombre de références bibliographiques correspondant est présenté entre crochets. Le total des références bibliographiques dans cette figure est supérieur au nombre réel de références sélectionnées, ceci est dû au fait qu'une même référence peut inclure des études sur plusieurs taxons et/ou différents types de mesures d'atténuation.

#### Localisation de l'intervention : *in situ* vs *ex situ*

Une nette prédominance des études *in situ*, sur parc éolien, par rapport aux études *ex situ*, en milieu naturel hors parc éolien ou en captivité, est observée (Figure 9). Les recherches effectuées directement dans les parcs éoliens (*in situ*) sont majoritaires, représentant 72,1 % des références bibliographiques (44 références) et 68 % des études de cas (364 unités). En revanche, les études *ex situ*, bien que représentant une part moindre des recherches, restent non négligeables, avec 27,9 % des références bibliographiques (17 références) et 32 % des études de cas (171 unités).

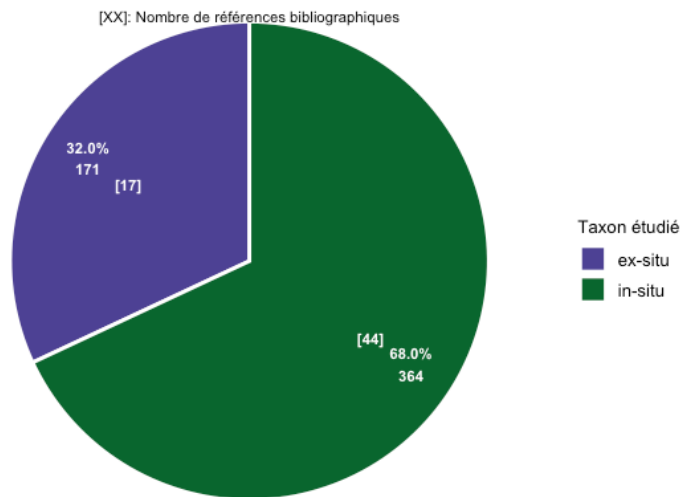


Figure 9. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques sélectionnées (entre crochets) par taxon étudié et par type de localisation de l'intervention, i.e. *in situ* vs *ex situ*

*Focus des études in situ sur le type de résultats étudiés par taxon et par type de mesures d'atténuation*

Les études *ex situ* se limitent à analyser différentes métriques d'activité comportementale des espèces affectées pour déterminer l'effet des interventions de protection mises en place. Concernant les études *in situ* sur les chauves-souris et les oiseaux, elles se concentrent principalement sur deux catégories de résultats : l'activité et la mortalité (Figure 10). Les mesures d'activité comprennent des métriques diverses et détaillées. Pour les chauves-souris, ces mesures incluent le nombre de passages audio ou vidéo, le nombre de "buzz de chasse", celui des comportements d'abreuvement, la proportion de temps passé dans la zone focale, etc. Pour les oiseaux, elles englobent entre autres l'altitude de vol, la distance minimale à la turbine, les changements de vitesse en vol ou le nombre de détections sur une période donnée. La mortalité est quantifiée par le nombre de carcasses retrouvées au pied des éoliennes, souvent rapporté sous forme de taux saisonniers ou annuels. Les résultats exprimés en termes de mortalité prédominent largement, représentant 68,4 % des unités d'étude pour 34 documents, comparativement à 30,8 % des études de cas portant sur l'activité, réparties sur 10 documents. Le bridage, dans toutes ses variantes, est presque exclusivement examiné sous l'angle de la mortalité, à l'exception d'une unique référence bibliographique. Pour les chauves-souris, un tiers des études portant sur l'effarouchement acoustique se concentrent sur l'activité, avec 3 références bibliographiques couvrant 10 unités d'étude, contre 6 références dédiées à la mortalité, couvrant 40 études de cas. Une seule étude aborde la structure des assemblages d'espèces, dans le cadre d'une recherche sur le renouvellement des éoliennes chez les chauves-souris.

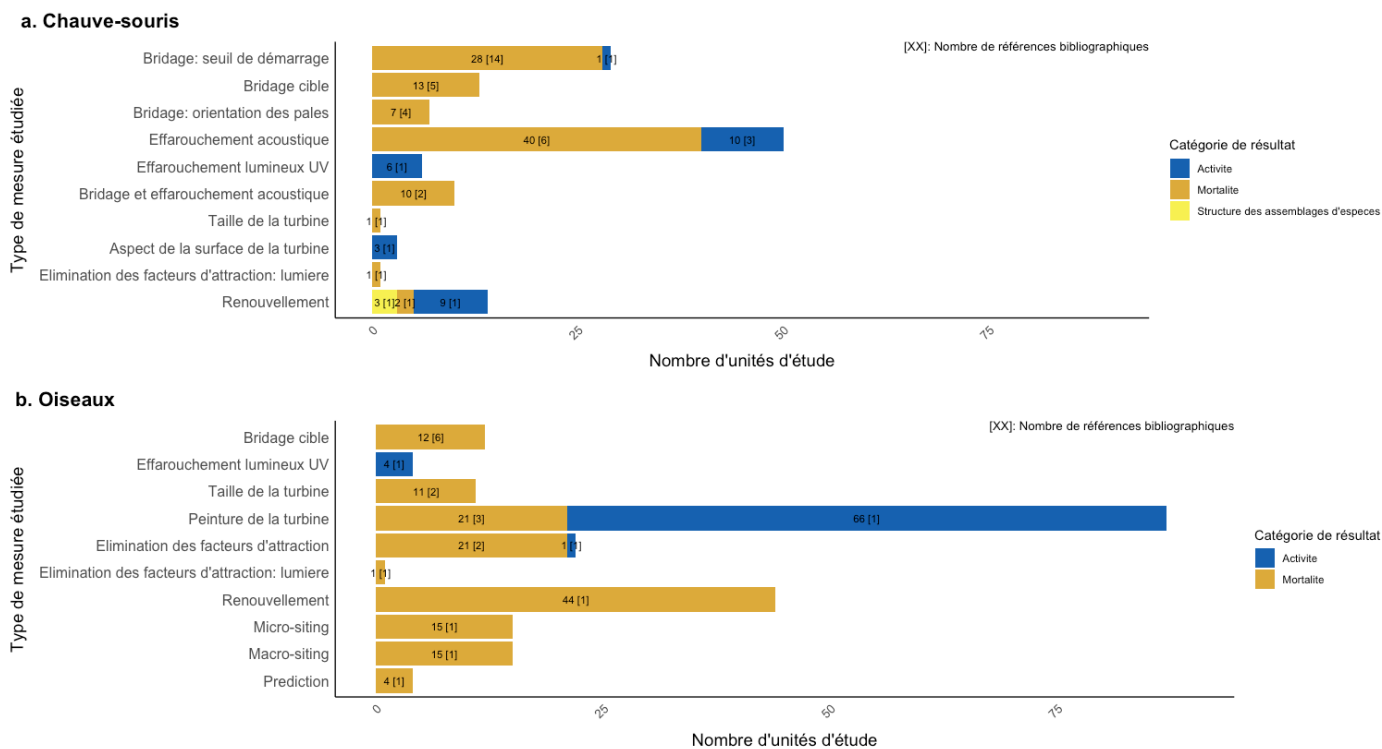


Figure 10. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques sélectionnées (entre crochets) par type de mesures d'atténuation et par catégorie de résultats, uniquement pour les études in situ et chez (a) les chauve-souris et (b) les oiseaux. Le total des références bibliographiques dans cette figure est supérieur au nombre réel de références sélectionnées, ceci est dû au fait qu'une même référence peut inclure des études sur plusieurs taxons et/ou différents types de mesures d'atténuation.

### Intégrabilité des études dans une méta-analyse

Les études de cas offrant des données statistiques permettant une intégration des résultats dans une méta-analyse, malgré leur prédominance, ne sont présentes qu'à hauteur d'environ 60 % dans notre corpus bibliographique (Figure 11). Ces unités incluent des résultats avec des valeurs de moyenne et d'écart-type explicitement rapportées, ainsi que des statistiques alternatives telles que l'intervalle de confiance à 95 %, la médiane, les quartiles et l'erreur standard.

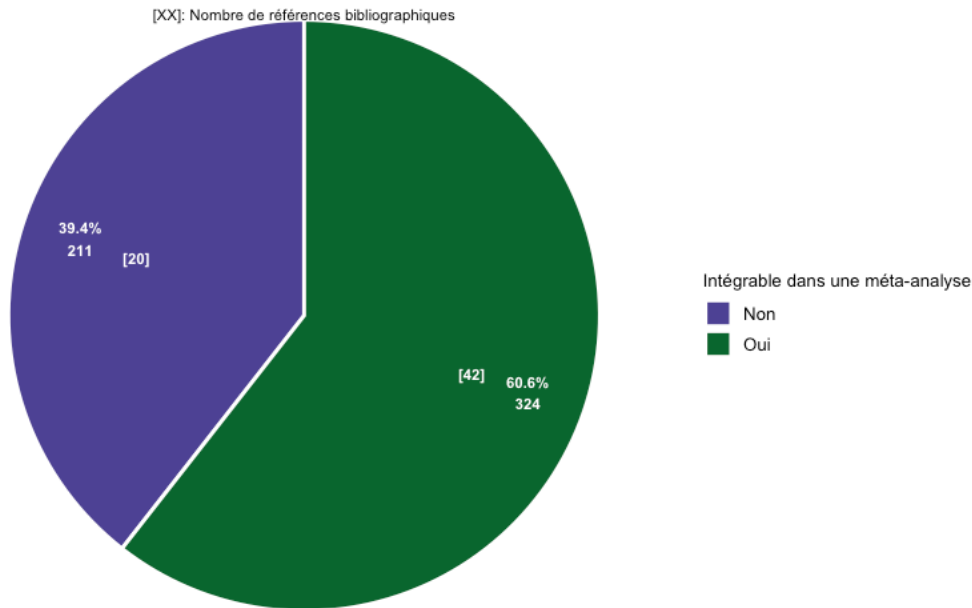


Figure 11. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques sélectionnées (entre crochets) selon leur adéquation à une intégration dans une méta-analyse.

*Focus des études in situ sur le type de résultats étudiés par taxon et par type de mesures d'atténuation, avec intégrabilité dans une méta-analyse*

Pour qu'une étude soit intégrable dans une méta-analyse, elle doit non seulement renseigner des paramètres spécifiques mais aussi être suffisamment homogène en termes de méthodologie et de type de données collectées avec d'autres études. Cela inclut, mais n'est pas limité à, le type de résultats étudiés (ici, la mortalité ou l'activité des espèces concernées), la localisation de l'intervention (*ex situ* ou *in situ*), ainsi que le type de mesures d'atténuation de l'impact envisagées (comme le bridage, l'effarouchement acoustique, la modification de la taille de la turbine, etc.).

L'examen des études sur les mesures d'atténuation des effets de l'éolien terrestre chez les chauves-souris et les oiseaux en n'intégrant que les variables citées précédemment révèle une contrainte manifeste : le nombre d'études de cas et de références bibliographiques exploitables pour une méta-analyse sur une mesure d'atténuation particulière reste faible (Figure 12). Le cas de l'effarouchement acoustique par ultrason destiné aux chauve-souris illustre bien la situation : bien que 76 études de cas soient contenues dans 14 références bibliographiques, seules 18 études de cas pour la mortalité et 5 pour l'activité peuvent être finalement utilisées pour une méta-analyse. Ces chiffres indiquent une forte disparité entre le nombre d'études disponibles et celles qui sont réellement exploitables pour une analyse statistique rigoureuse. Dans le cadre de la présente analyse, seul le bridage par augmentation de la vitesse minimale de fonctionnement des turbines reste analysable pour les chauve-souris, en se concentrant sur les résultats liés à la mortalité induite. Cela est basé sur 18 études de cas provenant de 11 références bibliographiques.

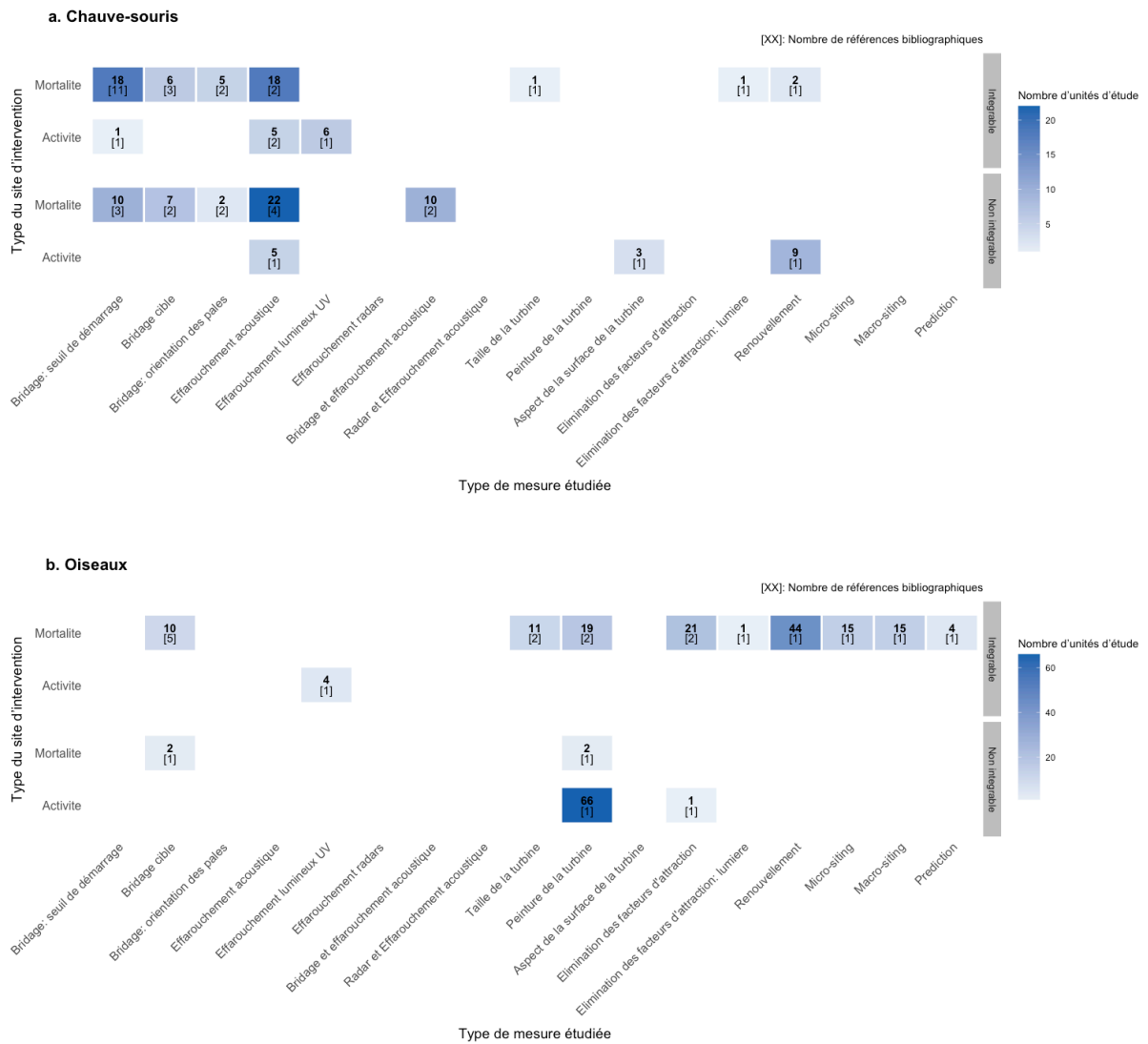


Figure 12. Nombre d'études de cas et de références bibliographiques sélectionnées (entre crochets) qui sont intégrables ou non dans une méta-analyse, par type de mesures d'atténuation et par catégorie de résultats, uniquement pour les études in situ et chez (a) les chauve-souris et (b) les oiseaux.

## SYNTHESE NARRATIVE

### Planification avant l'implantation des parcs éoliens

#### *Prediction de la mortalité avant implantation d'un parc éolien*

Au cours de notre recherche bibliographique, un seul article s'est réellement consacré à l'évitement des impacts, par le choix éclairé. Cette démarche est particulièrement pertinente car elle éclaire les outils et

modèles utilisés pour anticiper les impacts environnementaux avant la construction des parcs éoliens, ce qui est a priori obligatoire, mais très rarement réalisé. La prédiction peut ainsi permettre d'évaluer les sites potentiels pour identifier ceux présentant le moindre risque pour les oiseaux, aidant ainsi à choisir les emplacements appropriés. Elle optimise la conception et la disposition des éoliennes pour minimiser les collisions, en déterminant le nombre et la configuration optimaux. Utilisé dans les études d'impact environnemental (EIE), elle informe les décideurs sur les mesures d'atténuation nécessaires pour obtenir les permis de construire.

- Smales *et al.*, 2013 (risque de biais global *faible*) ont développé un modèle de risque de collision pour évaluer les impacts potentiels des turbines éoliennes sur les oiseaux. L'article présente l'application du modèle à deux espèces d'aigles, Pygargue blagre (*Ichthyophaga leucogaster*) et l'Aigle à queue en coin de Tasmanie (*Aquila audax fleayi*), ainsi que ses performances par rapport à l'expérience empirique des collisions de ces espèces. L'étude, menée de 1999 à 2009, implique un total de 62 turbines réparties sur deux parcs éoliens (Bluff Point et Studland Bay), situés dans un paysage côtier du nord-ouest de la Tasmanie. Cette étude intègre des données détaillées sur la taille et la vitesse de vol des oiseaux, les dimensions et la vitesse de rotation des pales des turbines. Le modèle a prédit avec succès le nombre de collisions entre les turbines et les populations locales ou migratrices d'oiseaux. Les résultats ont indiqué, par exemple, que pour les Pygargues blagre sur le parc éolien de Bluff Point, le modèle prévoyait un taux de collision annuel moyen de 1.5 collision pour un taux d'évitement de 95%, ce qui correspondait exactement au nombre moyen de mortalités documentées par an. Globalement, les estimations du modèle correspondaient de près aux nombres moyens de mortalités documentées par an pour les deux espèces sur les deux sites, indiquant une bonne efficacité du modèle.

**Les résultats de cette étude démontrent que l'utilisation d'outils de prédiction peut être efficace pour anticiper et réduire les impacts des parcs éoliens sur les populations aviaires. L'intégration de tels outils dans les études d'impact environnemental constitue donc une approche éclairée et indispensable pour minimiser les risques écologiques des parcs éoliens. Cependant, des études empiriques supplémentaires sont nécessaires pour consolider ces résultats et affiner les modèles, notamment en les testant sur une plus grande diversité d'espèces et de contextes environnementaux.**

#### *Localisation : macro-siting et micro-siting*

Bien que la sélection des sites pour les parcs éoliens ("*macro-siting*") et l'agencement des turbines au sein de ces installations ("*micro-siting*") constituent des stratégies cruciales pour minimiser les impacts négatifs sur la biodiversité, notre revue de la littérature n'a révélé que deux études abordant ce sujet. De plus, dans chacun de ces documents, l'analyse de ces aspects était traitée de manière secondaire :

- Millon *et al.*, 2015 (risque de biais global *faible*) ont examiné l'activité des chauves-souris dans des paysages agricoles intensifs avec éoliennes en Champagne-Ardenne, France, de mai à septembre 2013. L'étude a évalué l'effet des turbines et des pratiques agricoles alternatives, telles que les jachères et les haies, sur trois groupes de chauves-souris : *Pipistrellus sp.*, *Eptesicus-Nyctalus sp.*, et *Plecotus-Myotis sp.* Les relevés ont été effectués par enregistrements d'ultrasons sur des points fixes, analysant l'activité des chauves-souris en relation avec le type de site et la saison. L'activité des chauves-souris était généralement plus faible dans les cultures avec éoliennes par rapport à celles sans éoliennes, et ce, pour tous les groupes et toutes les saisons observées. Cependant, les trois groupes de chauves-souris ont réagi différemment aux aménagements paysagers : pendant la période de reproduction, le groupe *Plecotus-Myotis* a bénéficié positivement des jachères, tandis que les groupes *Pipistrellus* et *Eptesicus-Nyctalus* ont montré une réponse favorable aux haies. Le groupe *Eptesicus-Nyctalus* a également réagi positivement aux bandes herbeuses. En outre, des réponses saisonnières aux aménagements paysagers ont été détectées : des variations

significatives ont été observées pour les haies et les buissons, avec des réactions opposées des chauves-souris selon la saison.

- Smallwood & Thelander, 2005 (risque de biais global *fort*) ont analysé notamment, de mars 1998 à septembre 2001, l'effet de diverses dispositions du terrain, telles que les canyons et les amas de roches. Les chercheurs ont observé le comportement des oiseaux autour de 1 536 turbines d'un parc situé en Californie, Etats-Unis, enregistrant les mouvements et les interactions avec les structures. Les turbines situées dans des canyons ou près d'amas de roches connaissaient des taux de mortalité plus élevés parmi les rapaces, respectivement de 1,5 à 3 fois plus élevés et de 2,79 à 12 fois plus élevés. Ces zones semblaient attirer plus d'oiseaux, probablement en raison de leur topographie qui peut être utilisée par les rapaces pour la chasse ou comme lieux de repos.

Ces deux études soulignent l'importance cruciale du micro et macro-siting dans la conception des parcs éoliens, démontrant que la disposition géographique des turbines peut considérablement influencer les taux de mortalité des oiseaux comme des chauve-souris, et que des choix stratégiques en matière de localisation pourraient contribuer à minimiser ces impacts environnementaux. Cependant, il est important de noter que le faible nombre d'études abordant ici le micro et le macro-siting est très certainement dû à notre focalisation sur les articles précisant explicitement le domaine de l'éolien, alors que des travaux plus généralistes pourraient également fournir des informations pertinentes.

## Bridage des turbines

### *Augmentation des vitesses de seuil de démarrage des turbines et orientation des pales*

La gestion des vitesses de seuil de démarrage<sup>4</sup> des éoliennes, (EN: "*cut-in-speed*"), ainsi que l'ajustement de l'orientation des pales<sup>5</sup> (EN : "*feathering*"), sont des stratégies clés pour minimiser la mortalité des chauves-souris dans les parcs éoliens. Plusieurs études ont exploré l'efficacité de ces méthodes en ajustant la vitesse à laquelle les éoliennes commencent à produire de l'électricité. Par vents forts, les chauves-souris ne volent pas, tandis que les éoliennes produisent peu d'énergie lorsque les vents sont faibles. Par conséquent, en arrêtant les éoliennes lorsque les vents sont faibles, c'est-à-dire lorsque l'activité des chauves-souris est élevée, on peut réduire le risque de collision tout en limitant la perte de production d'énergie. De plus, plus la vitesse de seuil de démarrage des éoliennes est élevée, plus le nombre de collisions tend à diminuer. Ces recherches montrent que des ajustements modestes des vitesses de seuil de démarrage peuvent réduire considérablement la mortalité des chauves-souris, sans affecter de manière significative la production énergétique. L'analyse des différentes configurations de bridage et des impacts saisonniers permet de mieux comprendre comment optimiser ces stratégies pour une protection accrue de la faune tout en maintenant la viabilité économique des parcs éoliens.

- Brown & Hamilton, 2006 -(risque de biais global *moyen*) ont conduit des expériences de bridage par modification des vitesses de seuil de démarrage sur 20 éoliennes d'un parc du sud-ouest de l'Alberta, Etats-Unis, en septembre 2005. Ils ont constaté une réduction significative de 32 % des

---

<sup>4</sup> La vitesse du vent à partir de laquelle le générateur est connecté au réseau et produit de l'électricité. Pour certaines turbines, leurs pales tourneront à plein régime ou à régimes partiels en dessous de la vitesse de démarrage lorsqu'aucune électricité n'est produite.

<sup>5</sup> Ajuster l'angle de la pale du rotor pour qu'il soit parallèle au vent, ou tourner l'ensemble de l'unité hors du vent, afin de ralentir ou d'arrêter la rotation des pales. En fonctionnement normal, les pales des turbines sont toujours orientées perpendiculairement au vent.

mortalités de chauves-souris lorsque les éoliennes étaient arrêtées à des vitesses de vent inférieures à 7 m/s, comparée à celles arrêtées à des vitesses inférieures à 4 m/s.

- L'étude menée par Arnett *et al.*, 2011 (risque de biais global *faible*) s'est déroulée de juillet à octobre 2008 et 2009, et a impliqué 12 éoliennes d'un parc de Pennsylvanie, Etats-Unis. Trois traitements ont été défini pour les éoliennes : 1) pleinement opérationnelles ; 2) vitesse de coupure à 5,0 m/s, et 3) vitesse de coupure à 6,5 m/s. Les résultats ont révélé une réduction significative de la mortalité des chauves-souris lorsque les turbines étaient bridées, sans différence notable entre les deux vitesses de bridage. Cette réduction s'élevait respectivement à 82 % en 2008 et 72 % en 2009, toutes vitesses confondues.
- Les suivis de mortalité de chauves-souris réalisés par Stantec Consulting Ltd, 2012 (risque de biais global *moyen*) ont porté sur 42 turbines, réparties en trois groupes : 1) un groupe témoin sans mesures de bridage ; 2) un groupe bridé avec une vitesse de démarrage de 4,5 m/s ; et 3) un groupe bridé avec une vitesse de démarrage de 5,5 m/s. Cette étude s'est déroulée en Ontario, Canada, de juillet à décembre 2011. La mortalité dans le groupe non bridé était environ deux fois plus élevée que celle observée dans les groupes bridés à 5,5 m/s et 4,5 m/s. Bien que les taux de mortalité estimés pour les deux groupes bridés soient relativement faibles, les éoliennes démarrant à 4,5 m/s présentaient un taux de mortalité légèrement supérieur à celles démarrant à 5,5 m/s. Cependant, en raison du faible nombre de mortalités observées, une analyse statistique des résultats n'était pas réalisable.
- Măntoiu *et al.*, 2020 (risque de biais global *moyen*) ont mené des tests de 2013 à 2016 sur 6 éoliennes en Dobroudja du Nord, Roumanie. Les mesures de bridage ont consisté à augmenter les vitesses de seuil de démarrage des turbines de 4 m/s à 6,5 m/s pendant les périodes de risque élevé de collision, identifiées de la mi-juillet à la fin septembre. La mise en œuvre des mesures de bridage a entraîné une réduction significative de la mortalité des chauves-souris de 78 %.
- Les travaux de Bennett *et al.*, 2022 (risque de biais global *faible*) ont évalué l'efficacité d'une augmentation de la vitesse de seuil de démarrage de 3,0 m/s à 4,5 m/s sur 11 éoliennes d'un parc situé dans le sud-ouest de Victoria, Australie. L'étude a été menée de janvier à avril 2018 (pré-bridage) et de janvier à avril 2019 (pendant le bridage). Les résultats ont montré une réduction significative de la mortalité des chauves-souris de 54 % pendant la période de bridage. L'activité des chauves-souris, mesurée acoustiquement, n'a pas diminué pendant la période de bridage, suggérant que la réduction des mortalités était due à l'augmentation de la vitesse de seuil de démarrage et non à une diminution de l'activité des chauves-souris.
- L'étude menée par Good *et al.*, 2022 (risque de biais global *faible*) a impliqué la surveillance de 114 turbines dans l'Indiana, Etats-Unis, et couvrait la période d'avril à octobre 2021. Les vitesses de seuil de démarrage des turbines étaient fixées à 5,0 m/s pendant la période automnale et à 3,5 m/s pendant la période printanière. Les stratégies opérationnelles mises en place ont dépassé l'objectif de réduction des taux de mortalité des chauves-souris de 50 %, par rapport aux estimations de mortalité des turbines en fonctionnement normal (vitesse de 3,0 m/s).
- Les travaux de Baerwald *et al.*, 2009 (risque de biais global *moyen*) ont évalué l'efficacité de deux méthodes de bridages sur un parc éolien de juillet à septembre 2006 et 2007 en Alberta, Canada. Quinze éoliennes ont vu leur vitesse de seuil de démarrage augmentée de 4 m/s à 5,5 m/s. Six autres éoliennes ont été configurées pour modifier l'angle des pales ("*feathering*") et réduire la vitesse du générateur. En 2007, les résultats ont montré que les turbines expérimentales avec une vitesse de seuil de démarrage augmentée à 5,5 m/s ont réduit significativement les mortalités de chauves-souris de 57,5 %. De même, les turbines configurées pour modifier l'angle des pales ont montré une réduction significative des mortalités de 60,0 %. Bien que les réductions de mortalité des espèces migratrices telles que Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*) et Chauve-souris



argentée (*Lasionycteris noctivagans*) aient varié entre 50 % et 70 %, elles n'étaient pas statistiquement significatives individuellement.

- Young *et al.*, 2011 (risque de biais global *faible*) ont testé une stratégie d'orientation des pâles sur 24 éoliennes en Virginie-Occidentale, Etats-Unis, de juillet à octobre 2010. La technique consistait à ajuster les pales des éoliennes de manière à ce qu'elles ne tournent qu'à une vitesse minimale (moins de 1 rotation par minute) lorsque la vitesse du vent était inférieure à la vitesse de démarrage normale des turbines de 4 m/s. Les turbines étaient divisées en trois groupes de traitement : 1) restriction de la rotation des turbines pendant la première moitié de la nuit ; 2) restriction de la rotation des turbines pendant la deuxième moitié de la nuit ; 3) groupe de contrôle sans changement des opérations normales des turbines. Les résultats ont montré que restreindre la rotation des turbines pendant la première moitié de la nuit a entraîné une réduction significative de 47 % de la mortalité des chauves-souris, tandis que la restriction durant la seconde moitié de la nuit n'a conduit qu'à une réduction non-significative de 23 %.
- En 2012, Young *et al.*, 2013 (risque de biais global *moyen*) ont de nouveau testé la modification de l'orientation des pales de 14 éoliennes de manière à réduire la vitesse du rotor à moins de 2 rotations par minute lorsque les vitesses du vent étaient cette fois inférieures à 5,0 m/s. Cette stratégie a été mise en place dans le Maryland, Etats-Unis, et conçue pour être en vigueur pendant les périodes critiques de migration des chauves-souris, notamment de juillet à octobre 2012. Les ajustements opérationnels ont démontré une efficacité significative avec une mortalité réduite de 62 % chez les chauve-souris.

**Les ajustements des vitesses de seuil de démarrage et l'orientation des pales se révèlent efficaces, réduisant la mortalité des chauves-souris de plus de 50 % dans la plupart des cas, avec un impact limité sur la production énergétique. Cependant, davantage de recherches sont nécessaires pour confirmer leur efficacité dans divers contextes, affiner les configurations saisonnières et mieux comprendre leurs effets à long terme sur les populations de chauves-souris.**

### *Ajustements des stratégies de bridage*

Les stratégies de bridage des éoliennes évoluent constamment, intégrant des ajustements plus fins pour répondre aux variations saisonnières et comportementales des chauves-souris. Nous avons relevé quatre études ayant testé diverses combinaisons de vitesses de seuil de démarrage et de paramètres environnementaux, comme la température et le moment de la nuit, pour évaluer leur impact sur la mortalité des chauves-souris. Nous avons également identifié une étude qui utilise les périodes de migration pour déterminer quand procéder à l'arrêt complet des turbines. Ces recherches fournissent des informations précieuses sur la façon dont des modifications spécifiques des stratégies de bridage peuvent améliorer l'efficacité de la réduction des mortalités. Elles permettent également de mesurer les compromis entre la protection de la faune et la perte potentielle de production d'énergie, offrant ainsi une base solide pour l'élaboration de politiques de gestion optimisées.

- Hein *et al.*, 2013 (risque de biais global *moyen*) ont conduit une étude en Virginie-Occidentale, États-Unis, de mars à novembre 2012. Elle a impliqué 12 turbines, réparties selon trois traitements pour évaluer la mortalité des chauves-souris : 1) fonctionnement habituel avec une vitesse de seuil de démarrage de 3,0 m/s ; 2) augmentation de la vitesse à 5,0 m/s du coucher au lever du soleil ; 3) augmentation de la vitesse à 5,0 m/s pour les quatre premières heures après le coucher du soleil. Les analyses ont révélé que le traitement "5 m/s toute la nuit" a permis une réduction significative des mortalités par rapport aux turbines en fonctionnement normal, avec une réduction estimée à 47 %. Le modèle le plus parcimonieux a montré une réduction de 72,2 % des mortalités de chauves-souris pour le traitement "5 m/s toute la nuit" lorsque la proportion de la nuit avec des vitesses de vent entre 3 et 5 m/s était de 50 %. Le traitement "5 m/s pendant les

quatre premières heures après le coucher du soleil" n'a pas montré de réduction significative des mortalités.

- Martin *et al.*, 2017 (risque de biais global *faible*) ont réalisée des tests de bridage entre le printemps 2012 et l'automne 2013 sur 16 éoliennes d'un parc situé dans le Vermont, Etats-Unis. Ils consistaient à augmenter le seuil de la vitesse de démarrage des turbines de 4,0 m/s à 6,0 m/s lorsque la température était supérieure à 9,5 °C. Ils ont montré une réduction significative des mortalités de chauves-souris de 62 %. À la fin du printemps et au début de l'automne, lorsque les températures nocturnes descendaient en dessous de 9,5°C, l'intégration de la température dans le bridage a réduit les pertes d'énergie de 18 %. Les pertes d'énergie étaient inférieures à 3 % pour la saison d'étude et environ 1 % pour l'année entière.
- L'étude menée par Schirmacher *et al.*, 2018 (risque de biais global *très faible*) s'est déroulée entre juillet et septembre 2015, en Virginie-Occidentale, Etats-Unis. Trois stratégies de minimisation opérationnelle ont été évaluées sur 15 turbines: 1) le traitement A augmentait la vitesse de coupure à 5,0 m/s avec des pales complètement en drapeau jusqu'à ce que la vitesse du vent atteigne 5,0 m/s, basée sur une moyenne glissante de 10 minutes mesurée à une tour météorologique ; 2) le traitement B suivait la même configuration que le Traitement A mais avec une moyenne glissante de 20 minutes ; 3) le traitement C augmentait la vitesse de coupure à 5,0 m/s avec des pales en drapeau, basée sur une moyenne glissante de 20 minutes mesurée par des anémomètres individuels montés sur les turbines. Comparativement au traitement A, le traitement B a montré une réduction des mortalités de chauves-souris, bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative. En revanche, le traitement C a montré une augmentation significative des mortalités par rapport au traitement B de 81,4%. Les analyses ont révélé que la stratégie utilisant une moyenne glissante de 20 minutes pour initier le démarrage des turbines a réduit le nombre de transitions opérationnelles (arrêts et démarrages), contribuant ainsi à une réduction des mortalités.
- Les récentes recherches de Rnjak *et al.*, 2023 (risque de biais global *faible*) ont été conduites sur 12 éoliennes d'un parc situé en Croatie, avec une surveillance post-intervention en 2016 et 2017 et un suivi après la mise en œuvre des mesures d'atténuation en 2019 et 2020. Les mesures de bridage ont été définies en fonction de seuils de vitesse de vent variant de 5,0 à 6,5 m/s. Ceux-ci ont été déterminés comme la vitesse du vent tolérable au-dessus de laquelle moins de 1,0 % de l'activité totale des chauves-souris avait été préalablement enregistrée. Les résultats ont montré une réduction significative de 78 % de la mortalité des chauves-souris après la mise en œuvre des mesures de bridage.
- Smallwood & Bell, 2020 (risque de biais global *moyen*) ont réalisé des expériences sur les effets de l'arrêt complet des turbines durant les périodes de migration sur la mortalité des chauves-souris et des oiseaux. Cette stratégie a été testée en Californie, Etats-Unis, entre 2012 et 2014, incluant 31 éoliennes. Les résultats ont montré que l'arrêt des éoliennes pendant la migration des chauves-souris a significativement réduit la mortalité des chauves-souris de 100 %. En revanche, la mortalité des oiseaux n'a pas été significativement affectée par l'arrêt des éoliennes.

**Les stratégies de bridage, comme l'ajustement des vitesses de seuil de démarrage et l'arrêt ciblé des éoliennes, réduisent significativement la mortalité des chauves-souris, atteignant parfois une efficacité de 100 %. L'intégration de paramètres tels que la température, les périodes de migration et les moments de la nuit optimisent ces résultats tout en limitant les pertes énergétiques. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour adapter ces stratégies aux spécificités locales et évaluer leurs impacts à long terme sur la biodiversité et la rentabilité des parcs éoliens.**

### *Arrêt réactif des éoliennes*

L'arrêt réactif des éoliennes représente une approche prometteuse pour réduire la mortalité de la faune volante, notamment des oiseaux de grande taille et des chauves-souris. Bien que peu étudiée, comme en témoignent deux études menées à court et long terme, cette stratégie montre des résultats encourageants. Elle repose sur la détection en temps réel des espèces à risque et l'arrêt ciblé des turbines concernées. Les études menées dans ce domaine montrent que cette méthode peut réduire significativement les mortalités, avec un impact minimal sur la production d'énergie.

- De Lucas *et al.*, 2012 (risque de biais global *moyen*) se sont penchés spécifiquement sur la mortalité des vautours fauves (*Gyps fulvus*) dans 13 parcs éoliens situés dans la province de Cadix, Espagne. L'étude a porté sur un total de 296 turbines, dont 244 ont été soumises à des arrêts réactifs en cas de présence de vautours, et 52 n'ont pas bénéficié de ces mesures. Lorsqu'une situation dangereuse était détectée concernant un oiseau de taille moyenne à grande, un observateur présent tous les jours de l'année, de l'aube au crépuscule contactait immédiatement le centre de contrôle du parc éolien pour stopper immédiatement les turbines concernées. Avec la mise en place des arrêts sélectifs en 2008-2009, la mortalité a été réduite de 50 %. Les arrêts réactifs ont été concentrés sur environ 10 % des éoliennes, jugées les plus dangereuses, durant la période critique de septembre à décembre (période migratoire où de nombreux oiseaux traversent la région du détroit de Gibraltar). L'impact sur la production d'énergie a été minimal, avec une réduction de seulement 0,07 % par an.
- Dans la continuité de De Lucas *et al.*, 2012, Ferrer *et al.*, 2022 (risque de biais global *moyen*) ont étendu l'étude à la mortalité d'oiseaux et de chauve-souris dans 20 parcs éoliens de la région de Cadix, en Espagne, sur une période de 15 ans, de 2006 à 2020. L'étude a porté sur un total de 269 éoliennes en utilisant le même protocole de mise à l'arrêt sélective des éoliennes mis en œuvre à partir de 2008. Après l'implémentation du protocole, la mortalité des grands planeurs (principalement rapaces et cigognes) a diminué de 61,7 %, et plus particulièrement celle des vautours fauves de 92,8 %, ceci avec un impact négligeable sur la production d'énergie (moins de 0,51 %). Aucune différence n'a été trouvée chez les passereaux et les chauve-souris.

L'arrêt réactif des éoliennes, basé sur la détection en temps réel des espèces à risque, paraît prometteur pour réduire la mortalité de la faune volante, notamment les grands oiseaux. Les études montrent des réductions significatives de mortalité, jusqu'à 92,8 % pour les vautours fauves, avec un impact énergétique négligeable (moins de 0,51 % de perte). Cependant, cette approche reste peu étudiée, nécessitant davantage de recherches pour évaluer son efficacité sur d'autres espèces, notamment les chauves-souris, et pour tester sa faisabilité dans des contextes différents.

### *Intégration d'innovations et de technologies avancées*

Les avancées technologiques offrent de nouvelles perspectives pour la protection de la faune dans les parcs éoliens. Des systèmes intelligents de réduction de la mortalité, tels que les dispositifs acoustiques et les algorithmes de détection en temps réel, permettent d'améliorer l'efficacité des mesures de protection. Les études intégrant ces technologies montrent des réductions significatives des mortalités de chauves-souris et d'oiseaux tout en optimisant les périodes de fonctionnement des éoliennes. Quatre études ont exploré divers systèmes automatisés :

- Les travaux de Hayes *et al.*, 2019 (risque de biais global *moyen*) ont évalué un système de bridage intelligent appelé "*Turbine Integrated Mortality Reduction*" (Réduction de la Mortalité Intégrée aux Turbine, TIMR). Le système permettait d'analyser l'activité des chauves-souris et les données de vitesse du vent, et de prendre des décisions en temps réel sur l'arrêt des éoliennes en fonction de ces données. L'étude, réalisée en 2015 dans le Wisconsin, Etats-Unis, a impliqué 20 éoliennes,

réparties en 10 turbines de contrôle et 10 turbines de traitement. L'approche TIMR a permis de réduire significativement la mortalité pour les éoliennes de traitement, avec des réductions spécifiques pour chaque espèce observée : données globales (-84,5 %), Chauve-souris rousse (*Lasiurus borealis*, -82,5 %), Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*, -81,4 %), Chauve-souris argentée (*Lasionycteris noctivagans*, -90,9 %), Sérotine brune (*Eptesicus fuscus*, -74,2 %) et Petite chauve-souris brune (*Myotis lucifugus*, -91,4 %). L'approche a réduit la production d'énergie et les revenus estimés du parc éolien de  $\leq 3,2$  % pour les éoliennes de traitement et a réduit le temps d'arrêt estimé de 48 % par rapport aux éoliennes opérées sous une règle de bridage standard utilisé en Amérique du Nord et basé sur la vitesse de seuil de démarrage.

- Rabie *et al.*, 2022 (risque de biais global *faible*) ont mené une étude comparative pour évaluer l'efficacité et les coûts associés à deux stratégies de réduction de la mortalité des chauves-souris dans un parc éolien du Wisconsin, Etats-Unis, entre juillet et septembre 2015. La méthodologie de l'étude a impliqué 30 turbines, réparties en trois groupes de traitement : 1) un groupe de contrôle avec une vitesse de coupure de 3,5 m/s sans bridage des pales ; 2) un groupe avec une vitesse de coupure de 4,5 m/s utilisant uniquement la vitesse du vent (WOC) ; et 3) un groupe utilisant le système de réduction de mortalité intégrée aux turbines (TIMR), qui intègre des données acoustiques en temps réel pour détecter la présence de chauves-souris et ajuster les opérations des turbines en conséquence. Le système TIMR activait le bridage des turbines lorsque des appels de chauves-souris étaient détectés à des vitesses de vent inférieures à 8,0 m/s. La stratégie TIMR a réduit significativement les mortalités de chauves-souris de 75 % par rapport aux turbines de contrôle, tandis que la stratégie WOC a réduit significativement les mortalités de 47 %. Pendant la période de l'étude, les turbines TIMR ont été bridées durant 39,4 % des heures nocturnes en raison de l'activité des chauves-souris, comparativement à 31,0 % pour les turbines WOC. De plus, les pertes de revenus pour les turbines TIMR étaient environ 280 % plus élevées que celles des turbines utilisant la stratégie WOC.
- Rodriguez *et al.*, 2023 (risque de biais global *fort*) ont évalué l'efficacité du système EchoSense®, une technologie de bridage intelligent, utilisant des capteurs acoustiques pour détecter la présence de chauves-souris en temps réel et ajuster la vitesse de démarrage des éoliennes en conséquence. Les tests ont été effectués dans l'Iowa, Etats-Unis, en 2020 et 2021, et a porté sur 69 éoliennes, dont 5 équipées du système EchoSense®. Les chercheurs ont comparé trois types de bridage : 1) fonctionnement normal avec une vitesse de démarrage de 3,0 m/s ; 2) augmentation de la vitesse de démarrage à 6,9 m/s en 2020 et à 5,0 m/s en 2021 ; 3) bridage intelligent avec EchoSense®. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative dans les taux de mortalité des chauves-souris entre les traitements en 2020 et 2021. Cependant, le système EchoSense® a permis de réduire en moyenne de 41 % la perte d'énergie par éolienne en 2020 par rapport au bridage à 6,9 m/s et de 56 % en 2021 par rapport au bridage à 5,0 m/s. En termes de production d'énergie, l'utilisation d'EchoSense® a permis de générer 5 490 MWh supplémentaires en 2020 et 1 684 MWh en 2021.
- McClure *et al.*, 2021 (risque de biais global *moyen*) ont étudié l'efficacité du système automatisé de mise à l'arrêt des éoliennes IdentiFlight dans le Wyoming Etats-Unis. L'étude portait sur une période de surveillance de 4 ans avant et 1 an après l'installation du système, de 2014 à 2019. Elle a impliqué 110 éoliennes au site traité et 66 éoliennes au site de contrôle, surveillant spécifiquement l'Aigle royal (*Aquila chrysaetos*) et le Pygargue à tête blanche (*Haliaeetus leucocephalus*). Le système IdentiFlight utilise des caméras et des algorithmes pour détecter les oiseaux en vol, les classer et ordonner la mise à l'arrêt des éoliennes si nécessaire. Les résultats montrent une diminution de 63 % des mortalités d'aigles au site traité après la mise en œuvre du

système, tandis que les mortalités ont augmenté de 113 % au site de contrôle. Globalement, il y a eu une réduction de 82 % du taux de mortalité au site traité par rapport au site de contrôle.

- Dans une réponse critique à l'article de McClure *et al.*, 2021, mentionné ci-dessus, Huso et Dalthorp, 2023 (risque de biais global *très faible*) ont identifié quatre erreurs majeures : (1) l'ignorance de la variation annuelle des mortalités, (2) une inférence causale non fondée due à un manque de réplication, (3) une surestimation de l'effet du traitement en supposant une répétition exacte des différences observées entre les sites de contrôle et de traitement, et (4) l'incohérence des données utilisées. Les résultats corrigés montrent une réduction non significative de 50 % (intervalle de confiance de -159 % à 89 %) du taux de mortalité des aigles après l'implémentation d'Identiflight, contrairement à la réduction de 82 % rapportée initialement. Les auteurs soulignent que la variation annuelle des mortalités et l'absence de réplication adéquate rendent l'estimation initiale peu fiable.

Les technologies intelligentes, comme les systèmes de détection acoustique en temps réel et les algorithmes automatisés, constituent des solutions innovantes pour réduire la mortalité de la faune dans les parcs éoliens. Les études montrent des réductions significatives de mortalité, notamment jusqu'à 84,5 % pour les chauves-souris et 63 % pour les aigles, tout en optimisant la production énergétique. Cependant, les résultats varient en fonction des systèmes utilisés, et certaines critiques soulignent des biais méthodologiques. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour standardiser ces approches, évaluer leur coût-efficacité et valider leurs performances à grande échelle.

## Effarouchement et techniques associées

### *Effarouchement acoustique par ultrason*

Les quatorze études suivantes présentent une analyse détaillée et méthodologique des recherches sur les dispositifs de dissuasion ultrasonique visant à réduire les collisions de chauves-souris avec les éoliennes. De l'évaluation en laboratoire des comportements des espèces aux tests sur le terrain avec diverses configurations de dispositifs et combinaisons de mesures, ces travaux scientifiques offrent un aperçu des efforts déployés afin de réduire les collisions de chauves-souris avec les éoliennes.

- L'étude expérimentale de Spanjer, 2006 (risque de biais global *moyen*) a été réalisée dans un laboratoire du Maryland, États-Unis. Cette étude s'est concentrée spécifiquement sur la réponse de la Sérotine brune, *Eptesicus fuscus*, aux émissions ultrasoniques produites par un dispositif prototype. La méthodologie de l'étude comprenait des essais en conditions contrôlées dans une chambre de vol anéchoïque<sup>6</sup>. Six chauves-souris adultes capturées ont été utilisées. Trois chauves-souris ont été testées dans des essais sans alimentation et trois dans des essais avec alimentation. Les essais sans alimentation consistaient en la libération de chauves-souris dans la chambre, avec le dispositif émettant ou non des sons, et l'observation de leur comportement d'atterrissage. Les essais avec alimentation consistaient à suspendre un ver de farine attaché près du dispositif et à observer si les chauves-souris tentaient de capturer la proie en présence ou en absence de sons émis. Dans les essais sans alimentation, les chauves-souris atterrissaient significativement moins souvent dans le quadrant contenant le dispositif lorsqu'il émettait du son (1,7 % des essais) par rapport aux essais silencieux (22,4 %). Lors des essais avec alimentation, aucune chauve-souris n'a capturé un ver de farine lorsque le dispositif émettait du son, alors que des captures ont eu lieu dans environ 36 % des essais silencieux. De plus, les chauves-souris ont traversé le quadrant

---

<sup>6</sup> Un lieu **anéchoïque** ne provoque pas d'écho, les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques.

contenant le dispositif beaucoup moins fréquemment lorsque celui-ci émettait du son, à la fois dans les essais avec et sans alimentation.

- Szewczak & Arnett, 2006 (risque de biais global *moyen*) ont réalisé des tests préliminaires durant la saison de nourrissage estivale, de juillet à septembre 2006, autour de sept étangs en Californie et en Oregon, Etats-Unis. Les sites étaient sélectionnés en fonction de leur potentiel d'activité élevée de chauves-souris. La méthode de collecte de données a consisté en l'utilisation de caméscopes pour quantifier visuellement les passages des animaux. Les résultats ont montré que, lors de l'activation du régime ultrasonique, l'activité des chauves-souris était réduite de moitié.
- Szewczak et Arnett, 2007 (risque de biais global *fort*) ont continué leurs tests d'août et septembre 2007 sur six étangs en Arizona, Californie et Oregon, Etats-Unis. Les résultats ont montré une réduction significative de l'activité des chauves-souris avec un taux d'activité horaire avec ultrasons entre 2,5 et 10,4 % du taux sans ultrasons, soit une réduction de 90 à près de 100 % de l'activité.
- L'expérimentation conduite par Horn *et al.*, 2008 (risque de biais global *moyen*) s'est déroulée dans un parc éolien New Yorkais, Etats-Unis, en août 2007 et a impliqué deux éoliennes de traitement équipées de dispositifs de dissuasion et deux éoliennes de contrôle sans dispositif. Les observations ont été réalisées à l'aide de caméras infrarouges thermiques pour capturer l'activité des chauves-souris autour des éoliennes. Lors de la première période de test, le nombre moyen de chauves-souris observées par nuit était significativement inférieur dans les zones d'éoliennes équipées de dispositifs de dissuasion (13,1 chauves-souris) par rapport aux zones d'éoliennes de contrôle (24,4 chauves-souris). Cependant, lors de la seconde période de test, aucune différence significative n'a été détectée entre les éoliennes équipées (9,5 chauves-souris) et les éoliennes de contrôle (9,6 chauves-souris), indiquant une variabilité dans l'efficacité des dispositifs.
- Arnett *et al.*, 2013 (risque de biais global *très faible*) ont conduit une étude sur deux ans, de 2009 à 2010, dans un parc éolien en Pennsylvanie, Etats-Unis. La configuration de test impliquait 10 éoliennes équipées de dispositifs de dissuasion et 15 éoliennes témoins. Les résultats de 2009 ont montré que les éoliennes équipées de dispositifs ont tué 21 % à 51 % moins de chauves-souris que les éoliennes témoins. En 2010, après avoir pris en compte une différence inhérente de 9 % entre les groupes de traitement et de contrôle, la mortalité a varié de 2 % de plus à 64 % de moins pour les turbines équipées par rapport aux turbines témoins. Spécifiquement, en 2009, deux fois plus de Chauves-souris cendrées (*Lasiurus cinereus*) et près de deux fois plus de Chauves-souris argentées (*Lasionycteris noctivagans*) ont été tuées par turbine témoin comparé aux turbines équipées. En 2010, la mortalité des chauves-souris cendrées était près de deux fois plus élevée et celle des chauves-souris argentées près de quatre fois plus élevée pour les turbines témoins que pour les turbines équipées.
- Les expérimentations de Lindsey, 2017 (risque de biais global *faible*) se sont déroulées au Texas, Etats-Unis, et a couvert les années 2015 et 2016. L'étude s'est concentrée principalement sur les espèces de chauves-souris migratrices : Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*), Chauve-souris rousse (*Lasiurus borealis*) et Chauve-souris argentée (*Lasionycteris noctivagans*). La méthodologie comprenait l'installation de caméras vidéo et de détecteurs acoustiques sur 3 turbines pour enregistrer l'activité des chauves-souris. Les tests ont été effectués à trois distances différentes (10 m, 20 m, 30 m) à partir du point focal de l'éolienne et de l'étang, avec des signaux d'ultrasons continus ou pulsés. En 2015, l'activité des chauves-souris variait significativement en fonction de la distance du dispositif de dissuasion aux étangs, avec une réduction notable de l'activité à 10 mètres par rapport à 30 mètres. À 10 mètres, la réduction de l'activité des chauves-souris était respectivement de 80 % et 75 % pour les étangs et les turbines. Cependant, aucune différence significative n'a été observée près des turbines. De plus, il n'y avait pas de différence significative

dans les réponses des chauves-souris en fonction du type de signal utilisé. En 2016, les résultats ont montré une réduction significative de l'activité des chauves-souris pendant les essais de dissuasion par rapport aux contrôles, avec des réductions moyennes de 91 %, 84 %, et 72 % respectivement pour le printemps, l'été et l'automne.

- L'étude de Romano et al., 2019 (risque de biais global *très faible*) a été conduite dans un parc éolien situé dans l'Illinois, Etats-Unis. Elle s'est déroulée de 2014 à 2016 et a impliqué l'utilisation de 16 turbines en 2014 et 2015, et de 12 turbines en 2016. Les espèces détaillées incluaient la Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*), Chauve-souris rousse (*Lasiurus borealis*) et Chauve-souris argentée (*Lasiorycteris noctivagans*). Les configurations des dispositifs variaient selon les années : en 2014, des émetteurs étaient montés sur les nacelles et les tours des éoliennes avec une émission continue ; en 2015, les émetteurs étaient uniquement sur les tours, à différentes hauteurs (26 m et 50 m) ; et en 2016, un système à émission pulsée a été introduit avec des émetteurs à la fois sur les nacelles et les tours. Les résultats ont montré une réduction significative des mortalités des chauves-souris. En 2014, la réduction de la mortalité pour toutes les espèces combinées était de 29,18%, avec des réductions spécifiques de 9,82% à 38,66%. En 2015, les réductions étaient de 32,50% pour toutes les espèces, avec des réductions spécifiques de -2,48% à 56,93% pour la Chauve-souris argentée. En 2016, la réduction globale était de 1,71%. Seule la réduction observée pour la Chauve-souris argentée, atteignant 72,90%, a été significative. Ces résultats indiquent une efficacité variable du système de dissuasion selon les espèces et les configurations de dispositifs.
- Kinzie et al., 2019 (risque de biais global *faible*) ont conduit une étude approfondie comprenant plusieurs phases, dont des tests en salle de vol, des tests au sol et des études de terrain sur les turbines. Les tests en salle de vol ont utilisé une salle spéciale pour évaluer la réponse comportementale des chauves-souris à différents signaux ultrasoniques continus et pulsés, avec des chauves-souris capturées à l'état sauvage, incluant des espèces comme la Chauve-souris rousse (*Lasiurus borealis*), la Chauve-souris vespérale (*Nycticeius humeralis*) et le Molosse du Brésil (*Tadarida brasiliensis*). Les tests au sol ont été réalisés au Shawnee National Forest pour observer les réponses comportementales des chauves-souris dans un environnement naturel, avec des dispositifs ultrasoniques placés à différentes distances des points d'eau émettant des signaux continus et pulsés. Pour les études de terrain sur les turbines, douze turbines d'un parc en Californie, Etats-Unis, ont été équipées de systèmes de dissuasion ultrasoniques, certains émettant des signaux continus et d'autres des signaux pulsés. Les résultats ont montré une réduction significative de l'activité des chauves-souris lors de l'utilisation des dispositifs de dissuasion ultrasoniques. Les tests en salle de vol ont révélé que les signaux ultrasoniques influençaient les comportements de recherche de nourriture des chauves-souris, réduisant leur activité de manière significative, avec des effets similaires pour les signaux pulsés et continus. Lors des tests au sol au Shawnee National Forest ont montré une réduction de 93,75 % de l'activité des chauves-souris dans la zone de 0-10 m avec des signaux continus. Les études de terrain sur les turbines ont démontré que les systèmes de dissuasion ultrasoniques ont réduit les mortalités de chauves-souris de 38 % avant l'installation de séparateurs air-eau<sup>7</sup> pour les espèces autres que la

---

<sup>7</sup> Les **séparateurs air-eau**, également connus sous le nom de séparateurs de condensation ou déshumidificateurs, sont des dispositifs conçus pour éliminer l'humidité de l'air comprimé. Dans le contexte des systèmes de dissuasion acoustique ultrasonique utilisés autour des éoliennes, ces séparateurs jouent un rôle crucial pour maintenir l'efficacité des dispositifs ultrasoniques. Lorsqu'un dispositif de dissuasion émet des ultrasons, il peut générer de la chaleur et provoquer la condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant. Cette condensation peut s'accumuler sur les transducteurs ou autres composants du système, réduisant ainsi leur efficacité en perturbant la propagation des ondes ultrasonores. Les séparateurs air-eau sont installés pour prévenir ce problème en retirant l'excès d'humidité de l'air avant qu'il n'atteigne les composants sensibles du dispositif de dissuasion. Leur utilisation permet de garantir que les émissions ultrasoniques restent constantes et efficaces, même dans des conditions climatiques variées où l'humidité peut fluctuer. En somme, les séparateurs air-eau contribuent à la fiabilité et à la performance optimale des dispositifs de dissuasion acoustique dans les parcs éoliens.

Chauve-souris rousse. Après l'installation, la réduction de mortalité était de 54 %, bien que cette réduction ne soit pas statistiquement significative. La mortalité des chauves-souris Chauve-souris rousse n'a pas été réduite de manière significative.

- Weaver et al., 2020 (risque de biais global *faible*) ont mené leur étude dans un parc éolien du Texas, Etats-Unis, de juillet à octobre pendant les années 2017 et 2018. Au total, 16 turbines ont été équipées de dispositifs émettant des ultrasons. Les résultats indiquent une réduction significative de 50 % de la mortalité pour l'ensemble des espèces, avec des diminutions notables pour la Chauve-souris cendrée (*Lasirius cinereus*; 78,4 %) et le Molosse du Brésil (*Tadarida brasiliensis*; 54,5 %). Cependant, aucun effet significatif n'a été observée pour *Lasirius intermedius* (nom vernaculaire français non disponible)
- Gilmour et al., 2020 (risque de biais global *moyen*) ont effectué une étude comparative des méthodes de dissuasion acoustique et radar pour réduire les impacts des activités humaines sur les chauves-souris. L'étude s'est déroulée de juin à septembre 2015 sur 14 sites ripariens en Angleterre et au Pays de Galles. Les traitements ont alterné entre radar seul, ultrasons seuls, combinaison radar et ultrasons, et un contrôle sans dispositif. Les haut-parleurs ultrasoniques étaient efficaces pour réduire l'activité des chauves-souris, avec une diminution globale de l'activité d'environ 80 % lorsque les ultrasons étaient utilisés seuls ou en combinaison avec le radar. En revanche, l'utilisation du radar seul n'a eu aucun effet significatif sur l'activité des chauves-souris. Les espèces Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*) et Pipistrelle pygmée (*Pipistrellus pygmaeus*) ont montré une réduction de l'activité de 40 à 80 % et de 30 à 60 % respectivement sous traitement ultrasonique, tandis que les espèces Myotis n'ont pas montré de réponse significative.
- Schirmacher et al., 2020 (risque de biais global *très faible*) ont conduit une étude comparative sur 16 turbines en Ohio, Etats-Unis, en 2017. Un accent particulier a été mis sur la Chauve-souris rousse (*Lasiurus borealis*), la Chauve-souris cendrée (*Lasiurus cinereus*) et la Chauve-souris argentée (*Lasionycteris noctivagans*). Quatre traitements ont été confrontés : 1) contrôle (dissuasion éteinte, vitesse de démarrage à 3,5 m/s) ; 2) dissuasion seule (dissuasion allumée, vitesse de démarrage à 3,5 m/s) ; 3) réduction de vitesse (dissuasion éteinte, vitesse de démarrage à 5 m/s) ; et 4) combinaison dissuasion et réduction de vitesse (dissuasion allumée, vitesse de démarrage à 5 m/s). Les résultats ont montré que la réduction de la mortalité due à la dissuasion seule n'était pas significative pour les espèces individuelles. Pour la Chauve-souris rousse, la mortalité était de 1,3 à 4,2 fois plus élevée lorsque les dispositifs de dissuasion étaient allumés. La réduction de la mortalité pour toutes les espèces combinées due à la réduction de vitesse était estimée entre 0 % et 38 %, mais cette réduction était annulée lorsque les dispositifs étaient combinés à la réduction de vitesse. Pour les Chauves-souris argentées, la combinaison des dispositifs et de la réduction de vitesse a réduit la mortalité de 11 % à 99 % par rapport au contrôle.
- L'étude de Cooper et al., 2021 (risque de biais global *fort*) a été menée dans un parc éolien de Californie, Etats-Unis, entre mars et octobre 2020. Elle impliquait 44 turbines et visait à tester un nouveau système de dissuasion acoustique ultrasonique, le système StrikeFree. Le système utilisait des transmetteurs ultrasoniques disposés le long des pales pour couvrir entièrement la zone balayée par le rotor. Les résultats préliminaires ont indiqué une réduction des collisions, mais les défis techniques, notamment la défaillance des alimentations électriques, ont limité la capacité à obtenir des données statistiquement significatives. L'efficacité réelle du système StrikeFree™ restait à être validée par des tests supplémentaires.
- Les travaux de Good et al., 2022 (risque de biais global *faible*) ont été réalisés sur deux parcs éoliens situés dans le nord-est de l'Illinois, Etats-Unis, durant la période d'août à octobre 2018. La méthodologie incluait l'installation de dispositifs de dissuasion acoustique et la régulation des



vitesse de coupure des éoliennes pour comparer les taux de mortalité des chauves-souris sous différentes conditions : contrôle (3,0 m/s), régulation seule (5,0 m/s), et régulation combinée avec dissuasion acoustique. L'ajout de dispositifs de dissuasion acoustique aux stratégies de bridage a significativement réduit la mortalité des chauves-souris. Pour la réduction combinée (bridage et dissuasion), la mortalité de la Chauve-souris argentée a été réduite de 71,6%, celle de la Chauve-souris cendrée de 71,4% et celle de la Sérotine brune de 58,1%. La réduction de la mortalité avec bridage seul pour la Chauve-souris argentée était de 14,8% et celle de la Chauve-souris cendrée de 65,4%, tandis que l'effet sur la Sérotine brune était plus limité avec une réduction de 38,8%.

- Werber et al., 2023 (risque de biais global *moyen*) ont mené une étude pour tester l'efficacité d'un dispositif de dissuasion monté sur drone, combinant des signaux visuels et auditifs. L'étude a été réalisée dans la vallée de Hula (hors parc éolien), dans le nord d'Israël, en juillet 2020. Sa méthodologie comprenait l'utilisation combinée de RADAR, LIDAR et de détecteurs acoustiques pour surveiller l'activité des chauves-souris à différentes altitudes. Le dispositif de dissuasion, monté sur un drone modifié, émettait des signaux lumineux blanc et ultrasonores pulsés. Les résultats de l'étude ont montré une réduction significative de l'activité des chauves-souris lors de l'activation du dispositif de dissuasion. L'analyse du RADAR a révélé une diminution de l'activité de 40 % en dessous et une augmentation de 50 % au-dessus de l'altitude de vol du dispositif par rapport aux conditions de contrôle post-vol. Le LIDAR a enregistré une réduction de l'activité de 32 % par rapport aux périodes précédant et suivant l'activation du dispositif.

**Les dispositifs de dissuasion ultrasonique offrent une approche innovante pour réduire les collisions de chauves-souris avec les éoliennes. Les études montrent des réductions significatives de l'activité et de la mortalité des chauves-souris, atteignant parfois jusqu'à 91 %, selon les espèces et les configurations des dispositifs. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour standardiser les protocoles, évaluer les impacts à long terme sur différentes espèces et tester ces dispositifs dans des environnements variés afin d'en optimiser l'efficacité et l'intégration opérationnelle.**

#### *Effarouchements acoustiques chez les oiseaux*

- Thady *et al.*, 2022 (risque de biais global *faible*) décrivent une étude menée dans un laboratoire en Virginie, États-Unis, où des Diamant mandarin (*Taeniopygia guttata*) ont été utilisés pour évaluer les effets des signaux acoustiques sur la réduction des risques de collision des oiseaux avec des structures solides. Dans un corridor de vol extérieur, les oiseaux étaient exposés à un obstacle et à quatre types de signaux acoustiques différents, testant deux plages de fréquences (4–6 kHz et 6–8 kHz) et deux modèles de modulation temporelle (à large bande et à oscillation de fréquence). Par rapport aux vols de contrôle, tous les traitements sonores ont incité les oiseaux à maintenir une plus grande distance par rapport aux obstacles et à ajuster leurs trajectoires de vol avant d'approcher trop près des obstacles. Aucune différence statistique n'a été observée entre les différents traitements sonores, mais des tendances consistantes suggèrent que le signal oscillant modulé en fréquence de 4–6 kHz a provoqué les comportements d'évitement les plus forts.

#### *Effarouchement radar*

Une approche innovante pour réduire les collisions consiste à utiliser des radars non seulement pour détecter les animaux mais également pour créer un effet aversif, les dissuadant de s'approcher des éoliennes. Les champs électromagnétiques (CEM) des radars peuvent perturber la capacité des oiseaux à utiliser le CEM terrestre pour s'orienter, les incitant à éviter les zones où ces champs sont présents. De même, les chauves-souris, dont certains éléments de leur système sensoriel peuvent être sensibles aux interférences électromagnétiques, peuvent également détecter les CEM et ajuster leur trajectoire pour éviter ces zones. Trois études, exclusivement *ex situ*, mais néanmoins menées en conditions naturelles, ont exploré cette application des radars :

- Nicholls et Racey, 2007 (risque de biais global *faible*) ont conduit une première étude sur l'effet aversif des champs électromagnétiques émis par les installations radar sur l'activité des chauves-souris en Grande-Bretagne. L'expérience a été réalisée dans 10 stations radar comprenant quatre radars civils de contrôle du trafic aérien (ATC), trois radars militaires ATC et trois radars météorologiques. Les enregistrements ont été effectués de juin à septembre 2006. Des détecteurs de chauves-souris automatiques et des enregistrements de transects ont été utilisés pour mesurer l'activité des chauves-souris à trois distances différentes des stations radar : en proximité immédiate avec une force de champ électromagnétique (EMF) élevée, un point intermédiaire avec une force de champ EMF modérée, et un site de contrôle sans exposition à l'EMF. L'activité totale des chauves-souris était significativement plus élevée dans les sites de contrôle comparés aux sites exposés à un champ électromagnétique élevé.
- Dans une seconde étude, menée de juin à septembre 2007 dans le nord-est de l'Écosse, Nicholls et Racey, 2009 (risque de biais global *moyen*), ont comparé l'activité des chauves-souris dans 20 sites de nourrissage avec un petit radar portable allumé et sans signal radar. Ils ont également mesuré l'abondance des insectes volants de juillet à septembre 2008 en utilisant des pièges lumineux-suction miniatures, avec et sans exposition au radar. L'activité des chauves-souris et l'effort de nourrissage par unité de temps ont été significativement réduits pendant les essais expérimentaux où l'antenne radar était en service, bien que le radar n'ait pas affecté significativement l'abondance des insectes capturés.
- Gilmour et al., 2020 (risque de biais global *moyen*) ont testé l'efficacité des dispositifs de dissuasion acoustique et par radar dans 14 sites ripoles au Royaume-Uni. L'étude s'est déroulée entre juin et septembre 2015 et a impliqué des mesures de l'activité des chauves-souris par vidéo infrarouge et détection acoustique. Les dispositifs testés comprenaient un radar et des haut-parleurs ultrasoniques, utilisés seuls ou en combinaison. Les résultats ont montré que l'utilisation du radar seul n'avait aucun effet significatif sur l'activité des chauves-souris contrairement aux traitements par ultrasons de cette même étude que nous avons vue plus haut. De plus, l'ajout du radar aux ultrasons n'a montré aucun bénéfice significatif supplémentaire.

L'utilisation des radars pour créer un effet aversif et réduire les collisions avec les éoliennes est une méthode exploratoire intéressante. Les études *ex situ* montrent une réduction significative de l'activité des chauves-souris dans les zones exposées aux champs électromagnétiques, suggérant un potentiel pour dissuader ces animaux de s'approcher des éoliennes. Cependant, les résultats varient selon les contextes, et certaines expériences n'ont pas démontré d'effet significatif. Des recherches supplémentaires, notamment *in situ* et à grande échelle, sont nécessaires pour confirmer l'efficacité de cette approche et évaluer ses impacts sur d'autres espèces et environnements.

### *Effarouchement lumineux UV*

L'utilisation de la lumière ultraviolette (UV) pour prévenir les collisions est une option encourageante. Les oiseaux possèdent des photorécepteurs sensibles à la lumière UV, et certaines chauves-souris peuvent également percevoir cette lumière, ce qui pourrait les aider à détecter les obstacles visuels. Trois études se sont intéressées à cette stratégie :

- L'étude de May et al., 2017 (risque de biais global *faible*) a exploré l'efficacité de l'éclairage ultraviolet (UV) et violet pour dissuader les oiseaux d'approcher les éoliennes, réalisée à Smøla, en Norvège, durant le printemps de 2014 (mars à mai). Elle a été réalisée *ex situ* sur un mât de 2,5m équipé de deux types de lumières LED UV, émettant des longueurs d'onde de 400 nm (violet) et 365 nm (ultraviolet). L'activité aviaire a été surveillée en continu de l'aube au crépuscule à l'aide d'un radar aviaire, permettant de suivre les modifications des comportements de vol en réponse

à ces lumières. Les résultats ont révélé que l'activité des oiseaux, mesurée en abondance de vols, était réduite de 27 % avec la lumière ultraviolette et de 12 % avec la lumière violette par rapport aux nuits de contrôle. De plus, il y a eu un déplacement vertical des trajectoires de vol, augmentant l'altitude moyenne de vol de 7 mètres lorsque la lumière violette était activée. Ces effets ont été observés en dessous de 40 mètres au-dessus du niveau de la mer tout au long de la saison étudiée.

- Les recherches menées par Gorresen et al., 2015 (risque de biais global *moyen*) se sont penchées sur l'efficacité de l'éclairage ultraviolet (UV) pour réduire l'activité des Chauves-souris cendrées hawaïennes (*Lasiurus cinereus semotus*) près des éoliennes, en vue de diminuer les collisions. L'étude a eu lieu sur l'île d'Hawaï, de septembre à octobre 2014. Elle impliquait des observations dans une plantation de macadamia bordée de pins, où des Chauves-souris cendrées hawaïennes étaient fréquemment actives. Les méthodes utilisées comprenaient l'illumination de zones avec une lumière UV tamisée, observant les réactions des chauves-souris et des insectes à cette modification. Les chauves-souris étaient surveillées acoustiquement et visuellement, et les insectes étaient capturés dans des pièges pour évaluer les effets de l'éclairage UV sur leur biomasse. Les résultats indiquent une réduction significative de l'activité des chauves-souris près des arbres illuminés par la lumière UV, malgré une augmentation des insectes (en moyenne, x6). L'activité écholocalisée des chauves-souris a notamment diminué de 44%. En outre, la durée des détections vidéo des chauves-souris a augmenté de 40% lors des nuits traitées.
- Cryan et al., 2022 (risque de biais global *moyen*) ont conduit une étude expérimentale sur deux éoliennes au National Wind Technology Center, National Renewable Energy Laboratory dans le Colorado, États-Unis, de août 2018 à octobre 2019. Des systèmes d'éclairage UV ont été installés sur les turbines, émettant une lumière UV faible et intermittente. La faune a été observée à l'aide de caméras à imagerie thermique. L'illumination UV n'a pas significativement modifié l'activité nocturne des chauves-souris, des insectes ou des oiseaux autour des turbines. Les observations précises incluent que les émissions UV n'ont pas provoqué de changements notables dans les comportements des chauves-souris ni augmenté les risques de collision.

Les résultats montrent une efficacité prometteuse de l'éclairage UV pour réduire les risques de collision, notamment en diminuant l'activité des oiseaux et des chauves-souris autour des obstacles. Cependant, l'efficacité varie selon les espèces et les contextes, suggérant que des études complémentaires sont nécessaires pour optimiser son utilisation.

## Modification de la conception des turbines

### *Variation de la taille de la turbine*

Deux études de notre corpus ont évalué l'effet de la taille des turbines sur la mortalité aviaire en se concentrant spécifiquement sur le diamètre des rotors :

- Dans le cadre de sa thèse, Martin, 2015 (risque de biais global *faible*) a évalué l'impact de l'augmentation de la vitesse seuil de démarrage des turbines sur la mortalité des chauves-souris et des oiseaux, tout en examinant également l'effet du diamètre du rotor (93 m vs 96 m). L'étude a été menée au parc éolien de Sheffield, situé dans le comté de Caledonia, Vermont, États-Unis, et a impliqué 4 turbines avec un rotor de 96 m et 12 turbines avec un rotor de 93 m. La période d'étude s'est étalée de juin à septembre, pour les années 2012 et 2013, avec des relevés quotidiens des carcasses autour des turbines. Les résultats indiquent une mortalité moyenne de 5,25 chauves-souris par turbine pour les turbines avec un diamètre de rotor de 96 m contre 3,17 pour celles avec un diamètre de 93 m, mais la différence n'était pas significative. La mortalité moyenne des oiseaux était plus élevée pour les turbines avec un diamètre de rotor de 96 m (4,50 oiseaux) par rapport à celles de 93 m (2,08 oiseaux), avec une différence significative.

- Les travaux d'Anderson et al., 2005 (risque de biais global *moyen*) ont évalué l'impact du diamètre des rotors de turbines sur la mortalité des oiseaux dans la région de San Geronimo Pass, en Californie, États-Unis. La méthodologie a inclus 423 turbines, classées en trois types: grandes turbines tubulaires avec un diamètre de rotor supérieur à 26 m, petites turbines tubulaires avec un diamètre inférieur à 26 m, et petites turbines en treillis. Les résultats ont montré que les grandes turbines tubulaires avaient un taux de mortalité aviaire plus élevé (0,087 par recherche) comparé aux petites turbines tubulaires (0,035), bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative. Les rapaces ont présenté un indice de risque plus élevé pour les grandes turbines (0,800) comparé aux petites turbines (0,196), mais ces résultats n'étaient pas significatifs statistiquement. De manière générale, les taux de mortalité des oiseaux étaient légèrement plus élevés près des grandes turbines dans toutes les catégories d'oiseaux, sauf les corvidés, pour lesquels aucune mortalité n'a été observée aux grandes turbines.

Les résultats des études montrent que l'augmentation du diamètre des rotors peut être associée à une augmentation de la mortalité aviaire, notamment chez les oiseaux et les chauves-souris. Cependant, ces variations ne sont pas toujours statistiquement significatives, et l'effet précis de la taille des rotors sur les risques de collision reste incertain, nécessitant davantage d'investigations pour clarifier cette relation.

### *Peinture et texture de la turbine*

Cinq études explorent l'efficacité de modifications visuelles des turbines, telles que la couleur des pâles ou l'utilisation de peintures spéciales, pour diminuer les collisions et l'attraction des animaux vers ces structures. Une seule concerne les insectes, quatre concernent les oiseaux.

- L'étude conduite par Stokke et al., 2020 (risque de biais global *moyen*) au parc éolien de Smøla en Norvège, doté de 68 turbines, utilise une approche BACI pour évaluer si une peinture noire appliquée à la base des turbines pouvait diminuer les collisions avec les Lagopèdes des saules (*Lagopus lagopus*). Dix turbines ont été peintes et des turbines adjacentes ont servi de témoins. Sur la période 2006-2017, 474 carcasses ont été récupérées, dont 194 étaient des lagopèdes des saules. Les résultats montrent qu'après la peinture, il y a eu une réduction de 48,2% du nombre annuel de carcasses par recherche autour des turbines peintes comparées aux témoins. La distance moyenne où les carcasses de lagopèdes ont été trouvées par rapport à la base des turbines a augmenté significativement de 15,0 m à 34,6 m, démontrant ainsi une amélioration de l'efficacité des turbines peintes pour prévenir les collisions.
- May et al., 2020 (risque de biais global *moyen*) ont également réalisé une étude au parc éolien de Smøla, couvrant une période d'intervention de 2006 à 2016, pour évaluer l'efficacité de la peinture d'une pale de turbine en noir afin de réduire les collisions d'oiseaux. Quatre turbines ont été peintes en noir et quatre ont servi de témoins, utilisant l'approche BACI. Les résultats ont montré une réduction significative de 71,9% du taux annuel de mortalité des oiseaux après la peinture, avec un impact notable sur les rapaces, notamment l'aigle à queue blanche, pour lequel aucun cadavre n'a été trouvé post-intervention. La probabilité d'enregistrer des carcasses de rapaces après la peinture était extrêmement faible (<0,001), indiquant une efficacité élevée de cette mesure.
- Les recherches effectuées par Young et al., 2003 (risque de biais global *faible*) ont examiné les effets de la peinture réfléchissante aux UV sur les pales de turbines éoliennes dans le Wyoming, États-Unis. L'étude, réalisée de juillet 1999 à décembre 2000, portait sur 105 turbines, dont certaines pales étaient peintes pour réfléchir les UV afin de réduire les collisions d'oiseaux. Les pales de 69 turbines ont été traitées avec une peinture réfléchissante aux UV, tandis que 33 autres ont utilisé une peinture conventionnelle. La fréquence d'observation des rapaces était nettement

plus élevée dans la zone équipée de turbines avec peinture UV (0,778) (détections par enquête de 40 minutes) comparée à la zone sans traitement UV (0,215). Des augmentations significatives de l'utilisation de cette zone par les hirondelles et les grives ont également été notées. Cependant, l'utilisation des passereaux entre les deux zones n'a montré aucune différence significative, principalement due à la présence plus marquée de l'alouette hausse-col dans la zone sans UV. Les taux de mortalité entre les turbines traitées avec UV et celles non traitées ne différaient pas de manière significative, même si la mortalité globale des passereaux était deux fois supérieure près des turbines UV, en grande partie à cause d'un nombre plus élevé de l'alouette hausse-col retrouvée morte. Les taux de mortalité des rapaces étaient très similaires entre les turbines avec UV et sans UV, avec respectivement 0,0029 et 0,0031.

- Hodos, 2003 (risque de biais global *fort*) a réalisé une recherche plus expérimentale et théorique à l'Université du Maryland, Etats-Unis. En utilisant des méthodes de physiologie optique, psychophysique animale et électrophysiologie rétinienne, l'étude a examiné les réponses visuelles des faucons d'Amérique face à divers motifs sur les pâles de turbine. Les configurations testées incluaient des pâles avec différentes rayures et des pâles unicolores, évaluées contre plusieurs arrière-plans naturels et à diverses vitesses de rotation. Les données montrent que les pâles avec des rayures fines améliorent la visibilité à des vitesses rétinienne<sup>8</sup> inférieures, avec une visibilité environ quatre fois supérieure à celle des pâles sans motifs à une vitesse de 130 degrés de l'angle visuel par seconde. Cependant, à des vitesses plus élevées, telles que 240 degrés par seconde, la visibilité des rayures fines diminue sensiblement, les rendant presque indiscernables des pâles sans motif. Par ailleurs, les pâles peintes en noir ont démontré la plus grande visibilité contre divers arrière-plans, se montrant plus efficaces que les pâles de couleurs rouge, verte, ou bleue, dont l'efficacité variait selon la couleur de l'arrière-plan. Par exemple, dans un environnement avec un ciel bleu profond et des feuillages jaune-brun, les pâles noires restaient nettement plus visibles que les autres couleurs testées.
- Long et al., 2011 (risque de biais global *moyen*) ont examiné l'attraction des insectes vers les turbines éoliennes en fonction de leur couleur à Oadby, Royaume-Uni. L'expérimentation s'est déroulée près d'une turbine de 13 mètres avec trois pales, située dans un parc public. Dix couleurs ont été utilisées, dont les couleurs de turbine courantes telles que le blanc pur et le gris clair, ainsi que le gris écureuil, le bleu ciel, le rouge trafic, le lilas rouge, le jaune trafic, le brun pâle, le vert opale et le noir jet. La méthodologie comprenait l'observation de l'attraction des insectes sur ces couleurs durant une période de trois ans, de juin à octobre, avec des relevés effectués à midi et une heure après le coucher du soleil. Les résultats indiquent une différence significative d'attraction entre les couleurs, avec une attraction particulièrement élevée pour les cartes jaunes (en moyenne, 6 insectes par sessions de 10 minutes) et les couleurs de turbine blanc et gris clair (respectivement, en moyenne, 4,5 et 3 insectes par session de 10 min). À l'opposé, la couleur lilas rouge a attiré significativement moins d'insectes, avec une moyenne d'environ 1,25 insecte par période d'observation, ce qui en fait la couleur la moins attractive parmi celles testées. Les réflectances spectrale UV et IR ont également affecté l'attraction des insectes, les couleurs ayant des pics de réflectance plus élevés attirant davantage d'insectes. Les observations ont totalisé 2012 occurrences d'insectes au cours de 59 sessions, avec des pics en juillet et des activités moindres en octobre.

**L'utilisation de peintures noires ou de motifs spécifiques sur les éoliennes apparaît comme une mesure très prometteuse pour réduire les collisions avec les oiseaux, notamment les espèces sensibles comme les rapaces et les lagopèdes. Cependant, les couleurs doivent être soigneusement choisies pour minimiser l'attraction des insectes et éviter des conséquences écologiques indirectes. Ces résultats**

---

<sup>8</sup> La **vitesse rétinienne** fait référence à la vitesse à laquelle l'image d'une pale en mouvement traverse la rétine de l'œil. Cette vitesse détermine la rapidité avec laquelle l'image se déplace sur la rétine, influençant la capacité du système visuel à suivre et à identifier clairement l'objet en mouvement

appellent à une étude plus approfondie des caractéristiques optimales à utiliser ainsi qu'à une mise en œuvre ciblée de ces solutions, en tenant compte des spécificités locales de la faune et des arrière-plans naturels, pour maximiser l'efficacité de ces interventions tout en limitant leur impact sur d'autres espèces.

Concernant l'efficacité d'une surface texturée sur l'attraction des chauve-souris comparée aux surfaces lisses constituant actuellement les éoliennes, deux études s'y sont penchées, une en captivité et une sur parc éolien :

- Bienz, 2016 (risque de biais global *fort*) a testé si des surfaces texturées pourraient réduire la mortalité des chauves-souris aux turbines éoliennes. Les essais comportementaux ont impliqué des chauves-souris capturées localement au Texas, Etats-Unis, y compris des espèces souvent victimes de collisions avec des éoliennes, et ont été réalisés dans une installation de vol. Les essais de texture ont été particulièrement révélateurs : des surfaces lisses, imitant des tours d'éoliennes, ont significativement été plus approchées et touchées par rapport aux surfaces texturées finement (respectivement, en moyenne 12 passages contre 5). Les surfaces texturées de façon plus grossières ne présentaient pas de différence significative avec les surfaces lisses. Ces observations soulignent que les chauves-souris pourraient percevoir par erreur les surfaces lisses des éoliennes comme des étendues d'eau. Néanmoins, il est à noter que les surfaces testées étaient installées horizontalement et non verticalement.
- Huzzen, 2019 (risque de biais global *moyen*) a mené une étude approfondie au Wolf Ridge Wind, LLC dans le nord-central du Texas, Etats-Unis, impliquant deux paires de turbines. L'objectif était d'examiner si l'application d'une texture sur les tours de turbine pouvait modifier l'activité et le comportement des chauves-souris à proximité des turbines. La peinture texturée appliquée a été développée suite aux observations faites dans Bienz (2016). Utilisant une combinaison de technologies de vision nocturne, de caméras thermiques et d'enregistrements acoustiques, l'étude a comparé l'activité des chauves-souris autour de tours avec et sans revêtement texturé du 20 mai au 22 septembre 2017. Les turbines texturées n'ont montré aucune réduction notable de l'activité globale des chauves-souris. Les analyses acoustiques ont, quant à elle, permis d'identifier les espèces spécifiques et de détecter des variations dans les comportements d'écholocation, avec une préférence accentuée pour les surfaces texturées chez la chauve-souris cendrée, mais uniquement pour une des deux paires de turbines. Les résultats non cohérents proviennent probablement d'une différence dans l'application de la texture entre les deux éoliennes relevées dans le document.

**Les études sur l'efficacité des surfaces texturées pour réduire l'attraction des chauves-souris autour des éoliennes offrent des résultats mitigés, mais elles ouvrent des perspectives intéressantes pour limiter leur impact sur la faune volante. Des recherches supplémentaires sont indispensables pour affiner les textures, leurs caractéristiques, tester leur efficacité dans des conditions réelles et mieux comprendre leur impact sur différentes espèces.**

#### *Renouvellement d'un parc éolien (« Repowering »)*

Deux études se sont intéressées aux conséquences d'un remplacement d'anciennes turbines par de nouvelles turbines aux caractéristiques plus modernes.

- Les travaux de Ferri et al., 2016 (risque de biais global *faible*) se sont concentrés sur les effets du renouvellement des parcs éoliens sur les assemblages<sup>9</sup> de chauves-souris en Italie centrale, de 2005 à 2010. Ce renouvellement impliquait le remplacement de turbines à une seule pale par des turbines à trois pales. La méthodologie employée reposait sur l'utilisation de détecteurs ultrasoniques pour enregistrer l'activité des chauves-souris avant et après ce renouvellement. Les résultats ont indiqué une modification de la structure de l'assemblage des chauves-souris, avec des changements notables dans la fréquence des occurrences de certaines espèces, ainsi que sur d'autres métriques univariées de l'assemblage. Des espèces telles que le Murin à oreilles échancrées (*Myotis emarginatus*) et la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*) ont vu leur fréquence relative respectivement diminuer et augmenter, indiquant des variations dans l'utilisation de l'espace par ces espèces en réponse aux changements dans les caractéristiques des turbines.
- L'étude de Smallwood et Karas, 2009 (risque de biais global *fort*) a examiné les impacts de la modernisation du parc éolien dans l'Altamont Pass Wind Resource Area en Californie, États-Unis, où 126 turbines à axe vertical ont été remplacées par 31 turbines modernes à trois pales. Cette recherche couvre les périodes de 1998 à 2003 et de 2005 à 2007. Les analyses ont révélé que globalement les taux de mortalité causés par les nouvelles éoliennes installées n'étaient pas inférieurs à ceux des turbines remplacées. Cependant, ils étaient respectivement inférieurs de 54 % et 66 % pour les rapaces et tous les oiseaux par rapport aux anciennes turbines encore en fonctionnement entre 2005 et 2007. Les nouvelles turbines pouvant générer près de trois fois plus d'énergie par mégawatt de capacité nominale, le renouvellement complet des turbines pourrait réduire les taux de mortalité, tout en faisant croître considérablement la production annuelle d'énergie éolienne.

Le renouvellement des parcs éoliens, en remplaçant les anciennes turbines par des modèles modernes, montre un potentiel pour réduire les impacts sur la biodiversité tout en augmentant la production énergétique. Les nouvelles turbines, plus performantes, peuvent produire plus d'énergie, justifiant le renouvellement complet des parcs. Cependant, pour maximiser les bénéfices écologiques, le renouvellement nécessite des évaluations préalables des impacts, une surveillance post-intervention et une intégration avec d'autres mesures de conservation.

## Gestion des facteurs d'attraction

### *Exemples d'élimination de facteurs écologiques attractifs*

Trois études distinctes ont évalué la gestion des facteurs écologiques **pouvant attirer les animaux** :

- L'étude de Pescador et al., 2019 (risque de biais global *fort*) a examiné l'efficacité d'une méthode d'atténuation centrée sur le Faucon crécerellette (*Falco naumanni*) dans trois parcs éoliens en Espagne. La méthode consistait en une analyse des mortalités d'oiseaux enregistrées sur une période de dix ans (2005-2014), suivie de la mise en œuvre de la mesure. Celle-ci impliquait le labour superficiel du sol autour de la base de 41 éoliennes (avec 58 éoliennes témoins sans labour), afin de rendre les zones moins attractives pour les crécerellettes en réduisant la végétation et l'abondance des proies potentielles. Cette mesure a été surveillée pendant deux ans avant et après sa mise en œuvre. La mesure d'atténuation a entraîné une diminution significative des collisions, avec une réduction de 75%, 82,8% et 100% selon le parc éolien testé. En parallèle, il a été constaté une réduction significative des insectes en termes d'abondance relative réduite : de 72,6 % pour

---

<sup>9</sup> En écologie, le terme "**assemblage**" désigne un groupe d'espèces qui coexistent dans un espace et un temps donnés, formant une communauté avec des interactions dynamiques entre ses membres. En général, un assemblage se caractérise par la diversité des espèces qui le composent, leurs abondances relatives, ainsi que leurs rôles écologiques au sein de l'écosystème.

les orthoptères, 56,3 % pour les lépidoptères, et 68,0 % pour les coléoptères. On notera que cette méthode de labour a également un impact considérable sur la biodiversité, comme en témoigne la baisse des populations d'insectes évalué lors de l'expérience. Il serait donc prudent de ne pas l'adopter en priorité ou dans des contextes où la mortalité des faucons reste faible.

- Smallwood et Thelander, 2005 (risque de biais global *fort*) ont démontré que la gestion des rongeurs influence significativement la distribution des systèmes de terriers de différents rongeurs autour des turbines éoliennes. Le contrôle des rongeurs consistait à utiliser un rodenticide anticoagulant, le chlorophacinone, pour réduire la population notamment d'écureuils terrestres et de gaufres dans les zones autour des éoliennes. Leur recherche, axée sur la zone de ressources éoliennes d'Altamont Pass en Californie, Etats-Unis, et impliquant 1536 turbines, souligne plusieurs changements de comportements notables des rapaces, des corvidés et des passereaux dans les parcelles soumises à un contrôle intermittent ou intense des rongeurs. De façon inattendue, ces oiseaux pouvaient passer significativement plus de temps en vol dans ces parcelles que ce qui était attendu par hasard. De plus, certaines parcelles étaient privilégiées pour le vol. Il a également été observé que ces oiseaux se perchaient plus souvent, et plus de vols que prévu étaient enregistrés à moins de 50 mètres des éoliennes. Il est important de souligner que l'utilisation du chlorophacinone pose plusieurs risques écologiques (Erickson et Urban 2004). Ce produit chimique peut entraîner un empoisonnement secondaire chez les prédateurs qui consomment des rongeurs intoxiqués, affectant ainsi divers carnivores, dont potentiellement les rapaces. Le chlorophacinone, étant non sélectif, peut également nuire à des espèces non ciblées, et peut persister dans l'environnement, entraînant des effets à long terme sur la biodiversité.
- Les travaux de Shewring et Vafidis, 2017 (risque de biais global *fort*) ont évalué l'efficacité de la suppression régulière de la végétation au sol au-dessus de 10 cm à l'aide de débroussailluses industrielles, autour des emplacements de 17 éoliennes sur les 76 présentes sur un parc situé au sud du Pays de Galles, Royaume-Uni. L'activité territoriale des mâles Engoulevent d'Europe (*Caprimulgus europaeus*) a été surveillée à l'aide de relevés de présence-absence, effectués deux fois en juin et juillet. Une activité de parade territoriale des mâles a été observée dans 41 % des zones traitées et 23 % des zones non traitées, sans nids confirmés. Aucune différence significative entre les niveaux d'activité territoriale des deux types de zones n'a été constatée. La suppression de la végétation autour des zones d'éoliennes présente plusieurs risques écologiques notables (Dale et Polasky 2007). En premier lieu, cette technique entraîne une perte d'habitat pour de nombreuses espèces, y compris les insectes, les petits mammifères et d'autres animaux qui dépendent de la végétation pour se nourrir, se cacher ou nicher, ce qui réduit la biodiversité locale et perturbe les chaînes alimentaires. De plus, l'enlèvement de la couverture végétale expose le sol à un risque accru d'érosion, particulièrement dans les terrains en pente, ce qui peut entraîner une dégradation de la qualité des sols et affecter négativement les cours d'eau voisins par un ruissellement accru et des dépôts de sédiments. Cette pratique peut également modifier l'écosystème en changeant la composition des espèces végétales, certaines plantes plus résistantes aux perturbations pouvant dominer au détriment d'espèces plus sensibles, modifiant ainsi la dynamique naturelle de l'écosystème. Enfin, le bruit et l'activité humaine associés à cette suppression régulière de la végétation peuvent perturber les espèces animales locales, causant du stress et potentiellement une diminution des populations d'oiseaux, comme cela a été observé dans des études sur les effets des éoliennes sur la faune locale

**L'élimination de facteurs écologiques attractifs montre des résultats mitigés en termes d'efficacité pour réduire les impacts des éoliennes sur la faune. Bien qu'elle puisse diminuer les collisions dans certains cas, elle s'accompagne souvent de conséquences écologiques négatives importantes, comme la réduction de la biodiversité et la perturbation des écosystèmes. Ces impacts limitent son intérêt, et son utilisation devrait être envisagée avec précaution et uniquement dans des contextes où les bénéfices écologiques surpassent les effets négatifs.**



## *Balisage lumineux nocturne de sécurité pour la navigation aérienne*

L'examen de l'effet du balisage lumineux pour la sécurité aérienne sur la faune volante nocturne est abordé dans deux études de notre corpus :

- Une autre analyse présente dans la thèse de Martin, 2015, citée plus haut (risque de biais global *faible*) a évalué l'effet de feux clignotants rouge de la Federal Aviation Administration (FAA) équipant les éoliennes. Les huit turbines éteintes ont montré une mortalité moyenne de 4,50 chauves-souris par turbine, tandis que les huit turbines avec feux FAA allumés avaient une mortalité moyenne de 2,88. Chez les oiseaux, les turbines éteintes ont entraîné une mortalité moyenne de 3,38, contre une mortalité de 2 pour les turbines allumées. Les différences observées n'étaient néanmoins pas statistiquement significatives.
- d'Entremont, 2015 (risque de biais global *moyen*) a mené une recherche spécifique sur l'effet de différents éclairages artificiels sur le comportement des oiseaux migrateurs nocturnes dans le nord-est de la Colombie-Britannique, Canada, de 2008 à 2012. L'approche méthodologique incluait l'utilisation de radars marins adaptés pour surveiller les altitudes et les trajets de vol en présence de lumières fixes ou flash et de couleurs diverses sur des éoliennes. Les résultats de l'étude indiquent une interaction significative entre la nature de l'éclairage et la couleur de la lumière. Les lumières à courtes longueurs d'onde, bleues ou vertes, présentaient un effet attractif accru sur les migrateurs nocturnes. En général, les oiseaux volaient à une altitude plus basse en l'absence de lumière comparé à un éclairage flash. Les altitudes de vol étaient plus élevées en présence de lumières rouges et blanches comparées à l'absence de lumière.

**Bien que pouvant potentiellement diminuer la mortalité des oiseaux nocturnes et chauve-souris, le balisage lumineux utilisé pour la sécurité aérienne a également des impacts négatifs sur la biodiversité qu'il convient de bien évaluer avant de l'utiliser. Comme dégagé par d'Entremont (2015) ci-dessus, les animaux peuvent subir des perturbations de leurs comportements migratoires et de navigation. Ces effets peuvent entraîner un épuisement accru et une diminution de leur survie.**

## SYNTHESE QUANTITATIVE : PRINCIPAUX RESULTATS

### **Note aux lecteurs :**

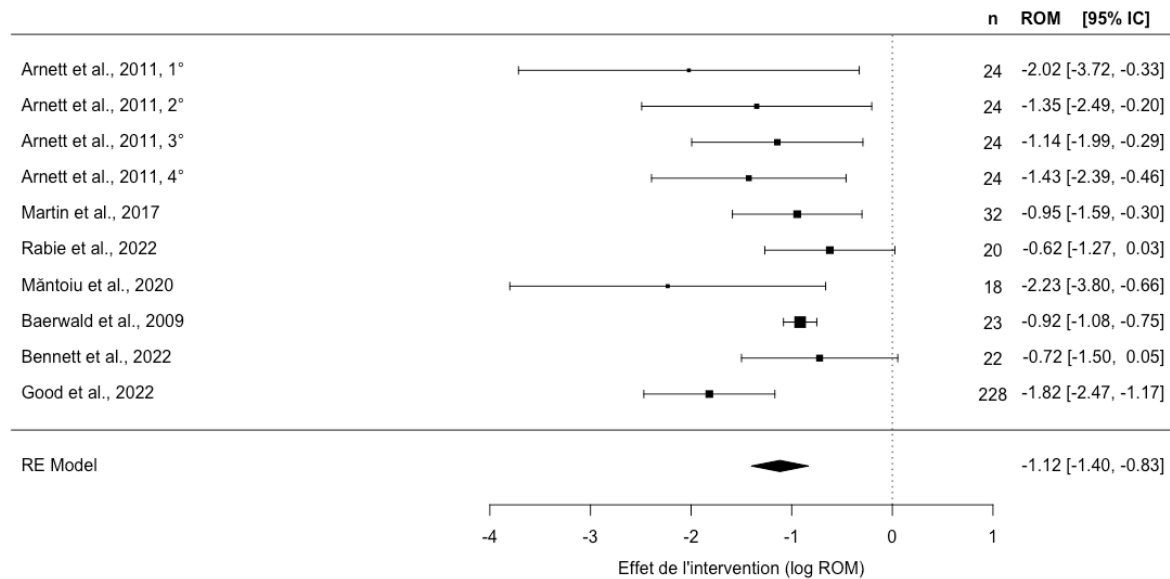
Pour les lecteurs souhaitant approfondir les détails méthodologiques et les analyses statistiques de cette étude, une présentation complète est disponible en annexe (Annexe VI). Ces sections fournissent des informations détaillées sur les protocoles suivis, les modèles testés, les données utilisées et les résultats spécifiques, offrant ainsi une vision plus exhaustive des éléments abordés. Nous vous invitons à consulter ces annexes pour une compréhension technique plus approfondie.

Pour évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation visant à réduire les impacts de l'éolien terrestre sur la faune volante, nous avons réalisé un modèle linéaire à effets mixtes ciblée sur une intervention spécifique : l'augmentation du seuil de démarrage des turbines en fonction de la vitesse du vent. La méta-analyse s'est également concentrée plus spécifiquement sur la mortalité des chauves-souris, toutes espèces confondues. Ces focalisations ont été faites en raison de la disponibilité des données par rapport aux autres mesures envisagées.

Les résultats montrent que cette intervention réduit la mortalité des chauves-souris de manière significative (Figure 13), avec une diminution moyenne de près de 67 %. Ce chiffre indique un potentiel réel pour cette mesure en tant qu'outil efficace pour minimiser les impacts écologiques des éoliennes. Cependant, certaines limites ont été identifiées, notamment l'hétérogénéité des contextes étudiés (diversité des climats, paysages, et méthodologies employées) ainsi que le faible nombre de données

disponibles pour certaines catégories. Ces contraintes affectent la robustesse statistique des conclusions et limitent la généralisation de ces résultats à d'autres contextes géographiques ou écologiques.

Nous avons également exploré l'influence de différents facteurs, tels que le climat ou les variations des seuils de démarrage, à travers des modèles statistiques complémentaires. Bien que ces analyses n'aient pas révélé d'effets significatifs, elles soulignent la complexité des interactions entre les caractéristiques environnementales et l'efficacité de cette mesure. Ces résultats montrent qu'il est essentiel d'adopter une approche nuancée et de considérer les spécificités locales lors de l'implantation de telles interventions.



*Figure 13. Résumé du modèle linéaire sur le lien entre la vitesse de seuil de démarrage et le taux de mortalité chez les chauves-souris. Cette figure montre l'effet global d'une augmentation de la vitesse de seuil de démarrage sur la mortalité c.à.d. si les turbines sont activées à des vitesses de vent plus élevées, moins de chauves-souris seront victimes. Chaque carré noir représente la moyenne de l'effet observé dans une étude, tandis que les lignes horizontales autour des carrés indiquent l'incertitude associée (intervalle de confiance à 95 %). Si une ligne horizontale (intervalle de confiance) ne croise pas la ligne zéro, cela signifie que l'effet est considéré comme statistiquement significatif ( $p < 0,05$ ). De la même manière, si une ligne traverse zéro, l'effet n'est pas statistiquement significatif. Une position à gauche de la ligne zéro confirme que l'augmentation de la vitesse de seuil de démarrage est associée à une réduction du risque de mortalité par rapport à la vitesse standard. Enfin, la forme en losange en bas résume l'ensemble des résultats, avec une moyenne globale indiquant un effet protecteur.*

En conclusion, l'augmentation du seuil de démarrage des turbines en fonction de la vitesse du vent apparaît comme une mesure efficace pour réduire les impacts des éoliennes terrestres sur la mortalité des chauves-souris. Néanmoins, des recherches complémentaires sont nécessaires. Elles devraient inclure une collecte de données plus équilibrée et représentative des divers contextes environnementaux, ainsi que des protocoles plus standardisés pour améliorer la comparabilité des résultats. Il serait intéressant de coproduire de nouvelles études primaires et/ou des revues systématiques adaptées à des contextes spécifiques. Cela permettra de renforcer la validité des conclusions et d'affiner les recommandations pour une mise en œuvre optimale de cette mesure à l'échelle mondiale. Il est essentiel de poursuivre les efforts pour approfondir notre compréhension et adapter les politiques d'atténuation aux particularités locales et spécifiques des espèces.

## DISCUSSION ET PERSPECTIVES : IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE ET LA PRISE DE DECISION

La présente synthèse visait à établir un état de la littérature scientifique et technique sur la question de l'efficacité des solutions et bonnes pratiques mises en place pour limiter l'impact de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité, en particulier la faune volante (oiseaux, chauve-souris et insectes volants). La revue rapide qui a été menée a permis de dégager 60 documents de recherche primaire contenant un total de 535 études de cas.

Dans un premier temps, l'analyse temporelle a révélé une augmentation progressive du nombre de publications, particulièrement notable après 2016. Cette tendance est probablement liée à une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux associés à l'énergie renouvelable et à l'amélioration des méthodologies de recherche. Cette évolution chronologique est essentielle pour comprendre l'émergence et l'évolution des stratégies d'atténuation dans le temps.

En outre, les études étaient majoritairement centrées en Amérique du Nord et en Europe, reflétant certainement non seulement la présence d'infrastructures éoliennes plus développées mais également un financement plus robuste pour la recherche environnementale, ainsi qu'un potentiel biais de langue. Par exemple, la Chine, qui développe considérablement son secteur éolien, pourrait être sous-représentée dans cette analyse, car nous passons probablement à côté de sa littérature scientifique publiée en chinois. Cette concentration géographique peut introduire un biais régional dans les données, ce qui limite la portée générale des conclusions tirées. Des régions climatiquement et écologiquement diverses comme le Sud-Est asiatique, l'Afrique subsaharienne, et l'Amérique du Sud sont largement sous-représentées dans les études publiées. Cette lacune dans la recherche pourrait entraver l'efficacité des mesures d'atténuation dans ces régions non incluses, où les impacts écologiques pourraient différer substantiellement en raison de variations dans les conditions environnementales et les écosystèmes locaux. Il est donc impératif d'encourager et de financer des recherches dans ces zones pour garantir que les politiques et les mesures d'atténuation soient adaptées et efficaces globalement. Peu d'études incluses dans notre corpus abordent spécifiquement le contexte français. Pour les mêmes raisons vues ci-dessus, nous ne pouvons fournir d'évaluation catégorique pour la France quant à l'efficacité des mesures d'atténuation identifiées dans notre corpus bibliographique. Il est donc important de développer des recherches ciblées sur les mesures d'atténuation dans le cadre français, pour combler ce manque de données et produire des recommandations pleinement adaptées aux spécificités locales.

Notre analyse - ciblée sur la faune volante - a également mis en lumière que les recherches étaient principalement centrées chez les oiseaux et les chauves-souris, avec très peu d'études se concentrant sur les insectes. Cette focalisation sur les oiseaux et les chauves-souris peut s'expliquer par la visibilité directe des impacts, notamment à travers la mortalité causée par les collisions avec les turbines. De plus, ces espèces sont souvent protégées par des réglementations spécifiques dans les pays étudiés, telles que la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC), contrairement aux insectes qui bénéficient de moins de protections. Les oiseaux et les chauves-souris sont aussi considérés comme des espèces emblématiques et, particulièrement pour les rapaces et les chauves-souris, leur longévité fait que leurs populations sont très sensibles aux augmentations de mortalité, ce qui accentue l'importance de limiter ces pertes. Cependant, cette approche réduit potentiellement notre compréhension des impacts systémiques plus larges des parcs éoliens sur les écosystèmes et, par extension, notre capacité à gérer ces impacts. La sous-représentation des insectes est ainsi préoccupante, étant donné leur rôle crucial dans de nombreux processus écologiques, notamment la pollinisation, la décomposition de la matière organique et la régulation des populations d'autres espèces par des interactions prédateur-proie. De plus, négliger la faune invertébrée pourrait intensifier indirectement les risques de mortalité pour les chauves-souris et les oiseaux. En effet, les turbines éoliennes attirent potentiellement les insectes, créant ainsi des points de convergence pour leurs prédateurs aériens.

Les études *in situ* et *ex situ* sont essentielles dans l'évaluation et la mise en œuvre de mesures d'atténuation efficaces. Les études *ex situ* étaient menées dans des environnements contrôlés ou simulés,

tels que des laboratoires ou des installations semi-naturelles, ou dans des environnements naturels avec des caractéristiques choisies, mais n'incluant pas d'éoliennes. Ces études permettent de comprendre les mécanismes sous-jacents à certains comportements ou certaines réponses écologiques en minimisant les interférences et les variables incontrôlables qui sont souvent présentes sur les parcs éoliens. Elles sont déterminantes pour expérimenter différents scénarios d'atténuation, évaluer les réponses physiologiques des espèces aux perturbations, et développer de nouvelles technologies avant leur déploiement sur le terrain. Parallèlement, les études *in situ* impliquaient des recherches réalisées directement sur le terrain, dans les environnements naturels où les éoliennes étaient installées. Ces études permettent d'observer les effets réels des éoliennes sur la biodiversité locale, en fournissant des données directes sur des aspects tels que la mortalité des oiseaux et des chauves-souris, les changements dans les comportements des animaux, et les interactions écologiques altérées. Elles sont indispensables pour tester l'efficacité des mesures d'atténuation dans des conditions réelles et pour adapter ces mesures aux spécificités de chaque site. L'intégration des résultats des études *in situ* et *ex situ* enrichit considérablement la base de connaissances, permettant une compréhension plus complète et une approche plus holistique de la conservation dans le contexte de l'énergie éolienne. Il est recommandé de continuer à combiner ces deux types d'approches pour surmonter les limitations spécifiques à chacune et pour bénéficier de leurs avantages complémentaires.

Sous un angle plus spécifique, l'analyse du corpus bibliographique a indiqué une forte focalisation des recherches *in situ* sur l'évaluation de la mortalité, probablement en raison de l'urgence écologique et de la facilité relative de quantification de cette métrique. Toutefois, il reste une lacune importante concernant l'évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation sur d'autres types d'effets potentiels. Il serait donc judicieux d'encourager davantage de recherches explorant des aspects comportementaux et démographiques, comme la reproduction, la migration, et la survie des jeunes. Une telle approche permettrait d'obtenir une vision plus globale et nuancée de l'efficacité des stratégies d'atténuation et ainsi d'améliorer leur mise en œuvre pour une conservation optimale.

L'examen des mesures d'atténuation a montré une prédominance de certaines stratégies telles que l'effarouchement acoustique, la gestion temporelle de l'opération des turbines, et la modification visuelle des turbines pour améliorer leur détectabilité par la faune volante. Malgré leur prévalence, l'efficacité de ces mesures variait et nécessitait souvent une contextualisation régionale ou spécifique à chaque espèce. Par exemple, l'effarouchement acoustique pouvait être très efficace pour certaines espèces de chauves-souris mais nettement moins pour d'autres. De plus, des mesures innovantes, telles que l'utilisation de la peinture ultraviolette sur les pales des turbines ou l'intégration de technologies de radar pour détecter et éviter les oiseaux, bien que prometteuses, sont encore insuffisamment documentées dans la littérature scientifique. Cette observation suggère que la recherche future devrait non seulement évaluer l'efficacité de ces nouvelles technologies mais également continuer d'explorer des combinaisons de mesures pour améliorer globalement les stratégies d'atténuation.

Sur la base de ces constatations, nous formulons des recommandations spécifiques par type de mesure d'atténuation :

- **Optimisation des dispositifs de dissuasion acoustique chez les chiroptères** : Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour peaufiner les technologies de dissuasion acoustique et vérifier leur efficacité à grande échelle. Intégrer ces technologies directement dans la conception des turbines pourrait maximiser la protection de la faune tout en minimisant les perturbations des opérations des turbines. Les études recommandent également d'optimiser les signaux sonores en termes de fréquence et d'amplitude pour qu'ils soient spécifiquement adaptés aux comportements des différentes espèces, notamment les espèces européennes.
- **Stratégies combinées** : L'utilisation combinée de dispositifs de dissuasion acoustique et de stratégies de bridage) est recommandée pour maximiser la réduction de la mortalité des chauves-souris. Les stratégies combinées devraient également inclure des mesures de gestion proactive, telles que l'intégration de ces dispositifs dans la planification des installations éoliennes, en tenant compte des différences entre les espèces et des conditions environnementales locales.
- **Méthodes multimodales et radars** : Intégrer les signaux acoustiques dans des dispositifs de dissuasion multimodaux est une approche prometteuse. Des recherches sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des radars et des champs électromagnétiques en tant que méthodes de

dissuasion. Il est toutefois recommandé de ne pas utiliser les radars seuls en raison de leur efficacité limitée. Les études suggèrent de continuer les recherches pour déterminer comment les espèces perçoivent et réagissent aux champs électromagnétiques.

- **Utilisation de l'éclairage UV** : L'optimisation de l'éclairage UV pour réduire les collisions d'oiseaux et de chauves-souris avec les éoliennes est fortement recommandée. Des études supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la conception et l'efficacité des systèmes d'éclairage UV, tout en prenant en compte les impacts écologiques plus larges, comme l'attraction des insectes, qui pourrait modifier les chaînes alimentaires locales.
- **Peinture des turbines** : Plusieurs études recommandent l'utilisation de peintures spécifiques sur les turbines pour améliorer la visibilité et réduire les collisions d'oiseaux. Des tests en conditions réelles et des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer l'efficacité des motifs de peinture, comme les rayures fines et les couleurs moins attractives pour les insectes, dans diverses conditions environnementales.
- **Textures spécifiques** : L'utilisation de textures spécifiques sur les tours d'éoliennes pour réduire les risques de collision pour les chauves-souris est encouragée. Des recherches supplémentaires doivent être menées pour affiner les types de textures et évaluer leur efficacité sur différentes espèces de chauves-souris dans divers environnements éoliens.
- **Gestion des facteurs écologiques** : La gestion des facteurs écologiques autour des parcs éoliens constitue une approche intéressante pour minimiser l'impact des turbines sur la biodiversité. Néanmoins, il est recommandé de mettre en place des mesures adaptées aux spécificités locales, tout en tenant compte des effets potentiels sur les écosystèmes environnants. Ainsi, comme vu plus haut, la modification des habitats proches des turbines peut réduire l'attraction des proies pour les rapaces, mais il est essentiel de veiller à ce que ces interventions n'entraînent pas de perturbations plus larges, telles que la perte d'habitats pour d'autres espèces ou des déséquilibres écologiques. L'objectif est de privilégier des solutions intégrées et durables qui réduisent les risques de collision tout en préservant l'intégrité des écosystèmes locaux
- **Modèles de prédiction** : L'utilisation de modèles de risque de collision pour informer les décisions réglementaires et la conception des parcs éoliens est recommandée. Ces modèles permettent une évaluation comparative des risques de collision pour différentes configurations de parcs éoliens et pour différents types de turbines.
- **Repowering et impacts à long terme** : La poursuite des recherches pour évaluer les effets à long terme des renouvellements de parcs éoliens sur la faune locale est essentielle. Une approche préventive est préconisée dans les zones où des chauves-souris ou des oiseaux d'importance élevée pour la conservation sont présentes. Il est important d'évaluer les effets du renouvellement des parcs éoliens (EN : « repowering ») pour élaborer des stratégies de gestion et de conservation efficaces.

Bien que nos analyses du corpus bibliographique aient montré une quasi-absence d'études traitant des mesures d'évitement et de compensation de la séquence ERC, plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer cette situation. Une des raisons pourrait être l'insuffisance de précision ou d'adaptation des mots-clés utilisés dans les recherches bibliographiques pour identifier les études pertinentes. Les termes spécifiques liés à l'évitement et à la compensation peuvent varier entre les disciplines et les auteurs, ce qui peut conduire à des résultats de recherche incomplets ou non pertinents. Aussi, énormément d'études sur l'évitement et la compensation ne sont pas spécifiquement centrées sur le domaine de l'éolien terrestre (A.Besnard, communication personnelle). Certaines recherches peuvent être plus générales ou appliquées à d'autres types d'infrastructures, et ne sont donc pas directement visibles lorsque l'on se concentre exclusivement sur l'éolien terrestre. De surcroît, les critères de sélection des articles pour la revue ont pu conduire à l'exclusion de certains travaux. Par exemple, des études qui utilisent des modèles prédictifs pour identifier les zones à risque sont parfois réalisées et publiées, mais comme elles ne comportent ni évaluation avant-après, ni intervention, ni possibilité de mesurer leur efficacité, elles ne peuvent pas être retenues. Le stade de développement de la recherche dans le domaine particulier de l'éolien terrestre pourrait également être une explication. La recherche sur les mesures d'atténuation des impacts des parcs éoliens sur la faune, bien qu'en croissance, reste relativement nouvelle. Par conséquent, il se peut que moins d'études aient été menées sur des aspects spécifiques tels

que l'évitement et la compensation, par rapport à des stratégies plus couramment étudiées comme les dispositifs de dissuasion acoustique ou les modifications physiques des turbines. De plus, les études sur l'évitement et la compensation sont souvent complexes et coûteuses à réaliser. Elles nécessitent des suivis à long terme et des données détaillées sur les comportements de la faune, ainsi que des analyses approfondies des écosystèmes impactés et des mesures compensatoires mises en œuvre. Ces exigences peuvent limiter le nombre de recherches menées dans ce domaine, en particulier dans les contextes où les ressources pour la recherche sont limitées. Il est également possible que certaines études existent mais ne soient pas facilement accessibles ou publiées dans des revues largement consultées. Les travaux non publiés, les rapports internes des entreprises et les études de cas non divulgués peuvent contenir des informations pertinentes, mais ne sont pas toujours intégrés dans les bases de données de recherche courantes. Pour combler ces lacunes, il est essentiel d'adopter une approche de recherche plus inclusive, de promouvoir les financements dans ces domaines spécifiques et de favoriser la publication et la diffusion des résultats de recherche.

Pour finir, nos difficultés à pouvoir mener une méta-analyse complète et minutieuse sur toutes les données récoltées mettent en lumière la nécessité d'une standardisation des méthodologies de collecte et de rapport des données. Les méta-analyses dépendent de la capacité à comparer et à synthétiser les résultats de multiples études comparatives appliquant des protocoles expérimentaux semblables, ce qui nécessite une uniformité dans la façon dont les données sont rapportées et analysées. Pour maximiser l'utilité des études individuelles et faciliter leur intégration dans des méta-analyses plus larges, il est ainsi essentiel de développer des protocoles standards. Il s'agit d'élaborer et d'adopter des protocoles de recherche standardisés pour les études sur les impacts des éoliennes, couvrant les aspects méthodologiques tels que la taille de l'échantillon, les méthodes de collecte de données, et les critères d'évaluation de l'impact. Ces protocoles devraient être élaborés en collaboration avec des experts du domaine pour garantir leur pertinence et leur applicabilité. Ensuite, il est important d'encourager l'utilisation de formats de rapport uniformes qui spécifient les informations à inclure dans les publications scientifiques et les rapports techniques, telles que les détails méthodologiques, les résultats statistiques, incluant les paramètres statistiques fondamentaux tels que la moyenne et l'écart-type, et les conclusions. Cela faciliterait grandement la comparaison et l'intégration des résultats de différentes études. De plus, il est crucial de promouvoir le partage des données de recherche au sein de la communauté scientifique, en utilisant des répertoires de données accessibles et en encourageant les chercheurs à rendre leurs données disponibles après publication. Le partage de données permettrait des réanalyses et des méta-analyses plus robustes, améliorant ainsi la fiabilité des conclusions tirées.

La présente synthèse révèle une conscientisation croissante et une évolution méthodologique dans les études sur l'impact des infrastructures de production d'énergie éolienne sur la biodiversité, principalement chez les oiseaux et les chauves-souris. Cependant, elle souligne également des lacunes importantes, telles que la sous-représentation géographique et taxonomique, notamment en ce qui concerne les insectes et les régions moins étudiées. Il est essentiel de promouvoir des recherches équilibrées et inclusives, de développer des protocoles standardisés pour la collecte et le rapport des données, et d'adopter une approche plus holistique qui intègre les impacts écologiques larges des éoliennes. Ces efforts contribueront à une compréhension plus complète et à l'efficacité des mesures d'atténuation, essentielles pour harmoniser le développement des énergies renouvelables avec la conservation de la biodiversité.

## REGARD D'EXPERTS

Dans un effort collaboratif pour évaluer et améliorer l'efficacité des mesures destinées à atténuer les impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité, une réunion d'experts a été organisée pour discuter des résultats intermédiaires de la présente synthèse de connaissances. Cette réunion a servi de plateforme pour une interaction directe entre les institutions de recherche, les opérateurs et développeurs éoliens, les organismes gouvernementaux et régulateurs, les organismes de financements, et les bureaux d'études, permettant à ces diverses parties prenantes de contribuer à un dialogue enrichissant et constructif. Le questionnaire distribué à la suite de cette réunion avait pour objectif de recueillir des retours détaillés sur le rapport intermédiaire et la réunion. Réunion et questionnaire visaient à comprendre les perspectives et

expériences des participants concernant les pratiques d'atténuation actuelles et leur efficacité, ainsi que les obstacles à leur application efficace. Cette démarche participative est essentielle pour valider et enrichir la revue des connaissances, assurant que le rapport final soit à la fois complet et représentatif des réalités du terrain.

## Connaissances existantes et pratiques en place

Les interventions ont souligné l'importance de comprendre les interactions complexes entre les infrastructures éoliennes et les écosystèmes locaux. Les discussions ont révélé une connaissance approfondie des impacts directs tels que la mortalité des oiseaux et des chauves-souris, ainsi que des effets indirects comme la perturbation des habitats naturels et des comportements animaux. Les participants ont partagé des détails sur diverses approches adoptées par leurs organisations, incluant :

- **Planification et Design Écologique** : L'importance de la planification préalable et de l'analyse d'impact est cruciale pour sélectionner des sites moins susceptibles de nuire à la biodiversité. Ces analyses évaluent les impacts potentiels sur la faune, la flore et les écosystèmes, orientant ainsi le choix des sites pour minimiser les perturbations écologiques. Les emplacements sont choisis pour éviter les zones de haute valeur biologique et le design des installations est spécifiquement adapté pour réduire l'empreinte écologique, incluant des mesures d'atténuation telles que la création de zones tampons et la restauration d'habitats.
- **Suivi Environnemental Post-Installation** : Des programmes de suivi sont mis en place pour évaluer l'impact des parcs éoliens sur la faune locale et ajuster les stratégies d'atténuation en conséquence. Ces programmes facilitent l'identification des problèmes en temps réel et permettent de réagir de manière proactive pour minimiser les impacts négatifs.
- **Adoption de Technologies Innovantes** : L'adoption de technologies et systèmes spécifiques tels que le bridage, l'effarouchement, les systèmes de détection par intelligence artificielle, et la peinture des pales, est largement reconnue et fréquemment mentionnée. Cette tendance illustre une adoption croissante de solutions techniques avancées pour minimiser l'impact des éoliennes sur l'environnement.
- **Aménagements Physiques et Écologiques** : Les aménagements tels que la création de zones tampons, la restauration d'habitats naturels, et l'installation de structures de nidification sont reconnus comme des mesures importantes. Ces interventions fournissent des habitats alternatifs et contribuent à la réduction des risques pour la faune, soulignant leur rôle crucial dans la conservation de la biodiversité autour des installations éoliennes.

## Défis et contraintes

Lors de la réunion et à travers les réponses au questionnaire, plusieurs défis et contraintes clés ont été identifiés concernant la mise en œuvre des mesures d'atténuation. Ces défis sont multidimensionnels, englobant des aspects économiques, techniques, réglementaires et sociaux.

- **Contraintes Économiques et Financières** : Les discussions ont souligné que les contraintes économiques représentent un obstacle majeur à la mise en œuvre efficace des mesures d'atténuation. Le coût initial élevé de l'installation de technologies avancées, telles que les systèmes de détection des chauves-souris ou les modifications structurelles des turbines pour réduire leur impact visuel et sonore, peut dissuader les investissements. De plus, les participants ont exprimé des préoccupations quant à la viabilité financière des opérations de suivi à long terme, qui sont cruciales pour évaluer l'efficacité des mesures environnementales mises en place.

- **Contraintes Techniques et Scientifiques** : Sur le plan technique, les participants ont discuté des limites des technologies actuelles et de la nécessité de poursuivre la recherche et le développement pour améliorer l'efficacité des solutions d'atténuation. Un défi particulier est la précision des systèmes de détection d'espèces, qui doivent être capables de fonctionner dans diverses conditions environnementales tout en minimisant les fausses alarmes qui pourraient entraîner des arrêts inutiles des turbines. Les réponses au questionnaire ont également révélé une préoccupation quant à l'homogénéisation des protocoles de suivi, essentielle pour assurer la comparabilité et la reproductibilité des données collectées à travers différents sites.
- **Contraintes Réglementaires et Administratives** : Les contraintes réglementaires et administratives ont été fréquemment mentionnées comme des barrières significatives. Les processus d'approbation des projets peuvent être longs et complexes, souvent exacerbés par des exigences réglementaires fluctuantes ou mal définies. Les participants ont exprimé le besoin d'une plus grande clarté dans les politiques environnementales et d'une meilleure coordination entre les différents niveaux de gouvernement et les agences de régulation pour simplifier les procédures et réduire les délais.
- **Défis de Concertation et Acceptation Locale** : Un autre défi important soulevé concerne la concertation et l'acceptation des projets par les communautés locales. Les impacts perçus des parcs éoliens, tels que le bruit et l'impact visuel, peuvent susciter des oppositions locales, ce qui rend cruciale l'engagement des communautés dans les phases initiales des projets. Les réponses ont indiqué que la réussite de cette démarche dépend fortement de la transparence des informations partagées et de la participation active des communautés à la planification et au suivi des impacts environnementaux.

Ces défis et contraintes soulignent la complexité de la mise en œuvre des mesures d'atténuation des impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité. Ils mettent en évidence la nécessité d'une approche intégrée qui combine innovation technologique, soutien financier, réglementations claires et coopération avec les communautés locales. Surmonter ces défis est essentiel pour progresser vers une intégration réussie de l'énergie éolienne dans le réseau énergétique tout en préservant la biodiversité.

## Identification des besoins opérationnels et scientifiques

### *Identification des lacunes dans les connaissances et des besoins opérationnels*

Lors de l'atelier, il est devenu évident que, malgré les progrès significatifs dans la compréhension des interactions entre les infrastructures éoliennes terrestres et la biodiversité, il subsiste des lacunes notables dans les connaissances scientifiques et opérationnelles. Ces lacunes limitent la capacité des acteurs du secteur à mettre en œuvre des stratégies d'atténuation efficaces et adaptées aux défis spécifiques posés par chaque site. Les discussions ont révélé plusieurs domaines nécessitant une attention accrue :

- **Impacts et mesures chez les insectes** : Bien que beaucoup d'attention soit accordée aux impacts sur les oiseaux et les chauves-souris, les effets sur d'autres groupes faunistiques, comme les insectes, sont moins bien documentés. Cette lacune est principalement due à la faible protection réglementaire de ce groupe par rapport aux chauves-souris, ce qui résulte en moins de recherches et de données disponibles. De même, la découverte de cadavres de chauves-souris facilite la reconnaissance et l'étude de leurs impacts, tandis que les effets sur les insectes, étant moins protégés et moins visibles, ne bénéficient pas d'une documentation ni d'une réglementation aussi rigoureuse. Des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer l'impact cumulatif des parcs éoliens sur ces espèces.
- **Efficacité des mesures d'atténuation** : La nécessité d'une recherche approfondie sur l'efficacité à long terme des mesures d'atténuation actuellement utilisées dans les parcs éoliens est un thème



central abordé. Les participants ont souligné l'importance d'évaluer les technologies de réduction des collisions, telles que le bridage des turbines pour réduire leur vitesse lors de périodes critiques pour la faune, ainsi que des techniques de gestion de l'habitat, comme la restauration des zones naturelles pour compenser les perturbations causées par les installations éoliennes. L'efficacité de ces mesures nécessite une évaluation rigoureuse pour confirmer leur utilité réelle en termes de conservation de la biodiversité. Il a été reconnu que bien que certaines mesures soient bien documentées et appliquées, comme le bridage, il reste un besoin critique d'homogénéisation des protocoles de suivi pour garantir la reproductibilité et la fiabilité des données collectées à travers différents sites

- **Interactions écologiques complexes** : Les participants ont exprimé une préoccupation concernant le manque de compréhension des interactions écologiques complexes et des effets en cascade des parcs éoliens sur les écosystèmes locaux. Il a été souligné que les impacts des éoliennes ne se limitent pas uniquement à des effets directs sur la faune, mais englobent également des modifications plus larges dans les écosystèmes, qui sont souvent moins visibles et difficiles à quantifier avec les méthodologies actuelles. Ces interactions complexes peuvent inclure des modifications des chaînes alimentaires, des changements dans les habitats, et des effets secondaires sur d'autres espèces non directement affectées par les turbines elles-mêmes. Il est crucial d'élargir les recherches pour comprendre ces interactions en profondeur, en intégrant des études longitudinales qui examinent les effets à long terme et en cascade sur la biodiversité. Cela requiert des collaborations interdisciplinaires pour élaborer des méthodes de recherche qui peuvent capturer la dynamique complexe et souvent interconnectée des écosystèmes affectés par le développement éolien.

#### *Importance de l'accessibilité et de la mutualisation des données*

L'une des problématiques majeures mise en lumière lors de la réunion, et corroborée par les réponses au questionnaire, concerne les limitations liées à la disponibilité et à l'accessibilité des données pertinentes. Cette contrainte entrave la capacité des chercheurs, des décideurs et des praticiens à évaluer pleinement les impacts de l'éolien terrestre sur la biodiversité ainsi que l'efficacité des mesures d'atténuation mises en œuvre. En particulier, il a été souligné que, dans le cadre de notre revue rapide, aucune étude de suivi française n'a pu être trouvée et intégrée, ce qui reflète un manque criant de documentation facilement et rapidement accessible. Cette lacune dans les données disponibles a été identifiée comme un obstacle alarmant non seulement pour la revue en cours mais également pour la formulation de politiques informées et l'implémentation de pratiques de gestion efficaces.

- **Manque de données à long terme** : La majorité des études sur l'impact des éoliennes sur la faune se concentrent sur des observations à court terme, laissant un vide en ce qui concerne les effets à long terme sur les populations d'espèces et sur les écosystèmes. La disponibilité limitée de séries temporelles longues et continues est un obstacle majeur à la compréhension des dynamiques écologiques sur le long terme, ce qui est essentiel pour formuler des stratégies d'atténuation efficaces et durables.
- **Qualité et uniformité des données** : Les participants ont également signalé des problèmes de qualité et d'uniformité des données collectées. Les méthodologies varient considérablement d'un projet à l'autre, rendant difficile la comparaison et la synthèse des résultats de recherche. Ce manque d'homogénéité affecte l'évaluation de la biodiversité et des impacts environnementaux, et par conséquent, la mise en œuvre de mesures d'atténuation basées sur des preuves.
- **Accès aux données et partage** : L'accès restreint aux données environnementales et aux retours d'expérience constitue une autre limitation critique. Souvent, les données recueillies par les développeurs de projets éoliens ne sont pas partagées publiquement en raison de contraintes de confidentialité ou de restrictions commerciales. De plus, il existe une réticence à partager des

informations qui pourraient être perçues comme négatives ou susceptibles d'affecter l'opinion publique ou la viabilité des projets. Néanmoins, de nombreuses données restent disponibles, et parfois même accessibles en ligne, mais sont souvent dispersées sur divers sites Internet, chacun ayant son propre système de gestion et interface utilisateur. Cette fragmentation rend la collecte de données extrêmement chronophage et inefficace. La centralisation des données ou la création d'un portail unique permettant un accès transversal aux différentes bases serait une avancée majeure.

- **Barrières linguistiques et intégration dans la recherche internationale** : Un autre défi concernant l'accessibilité des données réside dans le fait que de nombreux documents et rapports techniques sont rédigés exclusivement en français, sans mots-clés ou résumés en anglais. Cette pratique limite la visibilité et l'accessibilité de ces informations à une audience internationale, y compris les chercheurs non francophones et les laboratoires étrangers qui pourraient contribuer ou bénéficier de ces données. L'absence de mots-clés en anglais dans la documentation française crée une barrière significative non seulement pour le partage d'informations, mais aussi pour l'intégration de ces données dans des méta-analyses ou des revues systématiques globales.
- **Besoin de retours d'expérience consolidés** : Enfin, il existe un besoin critique de systèmes de retour d'expérience plus structurés et consolidés qui permettraient aux divers acteurs impliqués dans l'éolien terrestre de partager des leçons apprises et des meilleures pratiques. L'absence de tels mécanismes empêche les parties prenantes de bénéficier des expériences d'autres projets, ce qui pourrait potentiellement conduire à des erreurs répétées ou à des inefficacités dans la mise en œuvre des mesures d'atténuation.

Pour répondre à ces besoins, il a été proposé de développer des initiatives sectorielles visant à standardiser les protocoles de collecte de données et à établir des plateformes de partage de données. Ces initiatives devraient être soutenues par des politiques garantissant la protection des données sensibles tout en favorisant la transparence et la collaboration.

## Recommandations pour la recherche et le développement

La réunion d'experts et les réponses au questionnaire ont clairement indiqué la nécessité d'approfondir la recherche et de développer des technologies innovantes. Ces efforts de recherche et développement doivent être ciblés pour répondre aux lacunes identifiées, tout en exploitant les avancées technologiques actuelles :

- **Études longitudinales sur les impacts cumulatifs** : Il est crucial de lancer des études longitudinales pour examiner les effets cumulatifs à long terme des parcs éoliens sur la biodiversité locale. Ces études devraient utiliser des méthodologies standardisées pour permettre la comparaison des données à travers différents écosystèmes et régions géographiques.
- **Recherche sur les technologies de minimisation des impacts** : Le développement de nouvelles technologies, telles que des systèmes de détection et d'évitement plus précis pour la faune, notamment des dispositifs utilisant l'intelligence artificielle pour anticiper et réagir en temps réel aux mouvements des oiseaux et des chauves-souris.
- **Évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation** : Des projets de recherche dédiés à l'évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation existantes sont nécessaires. Ces études devraient inclure des évaluations avant et après l'installation des éoliennes pour quantifier l'efficacité des différentes approches d'atténuation utilisées.
- **Innovations en conception de turbines** : Encourager le développement et le déploiement de designs de turbines innovants qui réduisent leur visibilité et leur impact sonore, deux facteurs clés

dans la mortalité aviaire et chiroptère. Cela pourrait inclure des formes ou des couleurs de pales optimisées, des matériaux qui minimisent les perturbations.

- **Systèmes intégrés de gestion environnementale** : Développer des systèmes intégrés de gestion environnementale qui compilent en temps réel des données écologiques, météorologiques, et opérationnelles pour ajuster automatiquement les opérations des turbines en fonction des conditions environnementales.
- **Pratiques de réhabilitation écologique** : Recherche sur les meilleures pratiques pour la réhabilitation écologique des sites éoliens après leur décommissionnement. Cela inclut le rétablissement des habitats naturels et la gestion à long terme de la restauration écologique.
- **Promotion de la collaboration** : Il est essentiel de promouvoir la collaboration entre les universités, les centres de recherche, les développeurs éoliens et les organismes gouvernementaux. Le financement de ces recherches par des partenariats public-privé pourrait accélérer le développement et l'adoption de meilleures pratiques et technologies.
- **Utilisation de subventions et d'incitations fiscales** : Encourager l'utilisation de subventions et d'incitations fiscales pour les entreprises qui investissent dans la recherche et le développement de technologies d'atténuation de l'impact environnemental.

## Bilan de l'étape collaborative

Les participants ont exprimé une préoccupation majeure quant à l'insuffisance des études de suivi françaises, aucune n'ayant pu être intégrée dans la revue en raison des défis liés à la disponibilité et l'accessibilité des données. Ce manque de données a rendu difficile l'évaluation complète de l'efficacité des mesures d'atténuation, soulignant ainsi l'importance cruciale de cette revue pour identifier ces lacunes informatives.

La conclusion des discussions a mis en évidence la nécessité d'améliorer les stratégies d'atténuation par une meilleure compréhension des interactions complexes entre les infrastructures éoliennes et les écosystèmes locaux. Ces discussions ont également identifié plusieurs défis multidimensionnels, notamment des contraintes économiques et techniques qui entravent la mise en œuvre efficace des mesures, ainsi que des obstacles réglementaires et sociaux, soulignant la nécessité d'une approche intégrée qui inclut l'innovation technologique, le soutien financier, des réglementations claires, et une coopération étroite avec les communautés locales.

## PROPOSITIONS POUR L'AVENIR : RESUME CONCLUSIF DES RECOMMANDATIONS DE LA REVUE ET DE L'ETAPE COLLABORATIVE

L'intégration de l'énergie éolienne dans notre mix énergétique est essentielle pour répondre aux défis climatiques actuels, mais elle doit être réalisée de façon à garantir la préservation de la biodiversité. À travers cette revue, plusieurs recommandations clés émergent pour améliorer l'efficacité des mesures d'atténuation des impacts environnementaux des parcs éoliens terrestres.

### *Planification et Développement*

Il est essentiel de planifier et d'analyser les impacts dès le début pour choisir des sites éoliens qui minimisent les perturbations écologiques. Le développement de designs innovants pour les turbines, réduisant leur visibilité et leur impact sonore, doit être encouragé. Utiliser des modèles de prédiction peut informer efficacement les décisions réglementaires et la conception des parcs éoliens, tandis que des pratiques de gestion des facteurs écologiques autour des installations peuvent réduire les risques pour la

faune. Mettre en place des systèmes intégrés de gestion environnementale permettrait d'ajuster en temps réel les opérations des turbines selon les conditions environnementales.

### ***Recherche et Développement***

L'adoption de technologies innovantes comme le bridage et les systèmes de détection par IA est essentielle pour minimiser les impacts environnementaux. Poursuivre la recherche et le développement pour améliorer l'efficacité des solutions actuelles et évaluer de nouvelles technologies de minimisation des impacts environnementaux est primordial. Des dispositifs de dissuasion acoustique optimisés, des signaux acoustiques intégrés dans des dispositifs multimodaux, et l'optimisation de l'éclairage UV peuvent tous contribuer à réduire les collisions d'oiseaux et de chauves-souris. Tester l'efficacité des peintures spécifiques sur les turbines et explorer l'utilisation de textures spécifiques sur les tours sont des pistes prometteuses. Il est également recommandé, si le contexte français s'avère pertinent, d'encourager les décideurs à adopter des mesures d'atténuation non encore autorisées en France, telles que la dissuasion acoustique par ultrason chez les chauves-souris, afin de maximiser la protection de la faune. Aussi, il est nécessaire d'étudier les impacts des éoliennes sur les insectes, de lancer des études longitudinales pour examiner les effets cumulatifs à long terme sur la biodiversité, et de rechercher les meilleures pratiques pour la réhabilitation écologique des sites après leur décommissionnement. Une meilleure compréhension des interactions écologiques complexes et des effets en cascade des parcs éoliens, ainsi que l'évaluation des effets à long terme des renouvellements de parcs éoliens, sont aussi indispensables.

### ***Surveillance et Évaluation***

La mise en place de programmes de suivi environnemental post-installation est essentielle pour évaluer et ajuster les stratégies d'atténuation. Une évaluation rigoureuse de l'efficacité à long terme des mesures existantes doit être poursuivie, en homogénéisant les protocoles de suivi pour assurer la comparabilité des données collectées. Le développement de protocoles standards pour la collecte et le rapport des données de recherche est également crucial.

### ***Collaboration et Partage des Données***

Il est vital de promouvoir la collaboration entre universités, centres de recherche, développeurs éoliens et organismes gouvernementaux. Améliorer l'accessibilité et la mutualisation des données permettra une évaluation plus précise des impacts et de l'efficacité des mesures d'atténuation. Encourager le partage des données de recherche au sein de la communauté scientifique et adopter une approche inclusive et holistique pour intégrer les impacts écologiques larges des éoliennes sont des étapes essentielles pour renforcer notre base de connaissances.

### ***Réglementation et Financement***

Pour simplifier les procédures et encourager les investissements, il est nécessaire de clarifier les réglementations et d'améliorer la coordination entre les niveaux de gouvernement. Utiliser des subventions et des incitations fiscales peut stimuler la recherche et le développement de technologies d'atténuation. Il est également impératif de financer des recherches dans des régions sous-représentées comme le Sud-Est asiatique, l'Afrique subsaharienne et l'Amérique du Sud, et de surmonter les contraintes économiques et financières en rendant viables les opérations de suivi à long terme et les technologies avancées.

En suivant ces recommandations, il est possible de concilier le développement de l'énergie éolienne avec la conservation de la biodiversité, garantissant ainsi une transition énergétique durable et respectueuse de l'environnement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES

- Adams, E. M., Gulka, J., & Williams, K. A. (2021). A review of the effectiveness of operational curtailment for reducing bat fatalities at terrestrial wind farms in North America. *PLoS One*, 16(11), e0256382.
- ADEME. (2024). L'Évaluation Environnementale Stratégique : une nouvelle obligation du PCAET. [<https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/237-84>] Consulté le 12/06/2024
- Barbier, S., Chevalier, R., Loussot, P., Bergès, L., & Gosselin, F. (2009). Improving biodiversity indicators of sustainable forest management: Tree genus abundance rather than tree genus richness and dominance for understory vegetation in French lowland oak hornbeam forests. *Forest ecology and management*, 258, S176-S186.
- Baerwald, E.F., D'Amours, G.H., Klug, B.J., & Barclay, R.M.R. (2008). Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology*, 18(16), R695-R696
- Bennet, E.M. (2016). Avoiding harm or doing good? Revising how we think about mitigation hierarchy implementation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(5), 258-265.
- Christine Reusch, Ana Ailin Paul, Marcus Fritze, Stephanie Kramer-Schadt, Christian C. Voigt. (2023) Wind energy production in forests conflicts with tree-roosting bats. *Current Biology*, 33(4), 737-743.
- Collaboration for Environmental Evidence (C.E.E.). (2023). Guidelines and standards for 'Rapid Reviews'. [<https://environmentalevidence.org/information-for-authors/>]
- Cryan, P. M., & Barclay, R. M. (2009). Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. *Journal of mammalogy*, 90(6), 1330-1340.
- Dale, V. H., & Polasky, S. (2007). "Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services." *Ecological Economics*, 64(2), 286-296.
- De Lucas, M., Janss, G. F., Whitfield, D. P., & Ferrer, M. (2008). Collision fatality of raptors in wind farms does not depend on raptor abundance. *Journal of applied ecology*, 45(6), 1695-1703.
- Desholm, M., & Kahlert, J. (2005). Nocturnal migration activity over offshore wind farms: implications for post-construction monitoring programs. *The Condor*, 107(4), 811-816.
- Direction générale de l'énergie et du climat (2023). Données et études statistiques. Pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports [<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/526>] Consulté le 12/06/2024
- DREAL Hauts-de-France. (2017). Guide régional Hauts-de-France : Prise en compte des enjeux chiroptérologiques et avifaunistiques dans les projets éoliens. [<https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?Guide-regional-Hauts-de-France-Prise-en-compte-des-enjeux-chiropterologiques-et-avifaunistiques-dans-les-projets-eoliens>]
- Erickson, W., & Urban, D. (2004). Potential risks of nine rodenticides to birds and nontarget mammals: a comparative approach (p. 225). Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances.
- Frank, M.H. (2015). Effects of noise from wind turbines on wildlife communication signals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1802), 20142841.
- Haddaway, N. R., Bethel, A., Dicks, L. V., Koricheva, J., Macura, B., Petrokofsky, G., ... & Stewart, G. B. (2020). Eight problems with literature reviews and how to fix them. *Nature Ecology & Evolution*, 4(12), 1582-1589.
- IEA (2022). World Energy Outlook 2022, IEA, Paris [<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>] Consulté le 12/06/2024
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Kaffine, D. T. (2019). Microclimate effects of wind farms on local crop yields. *Journal of Environmental Economics and Management*, 96, 159-173.
- Koricheva, J., Gurevitch, J., & Mengersen, K. (Eds.). (2013). *Handbook of meta-analysis in ecology and evolution*. Princeton University Press.

- Langridge, J., Dupuis, L., Hette-Tronquart, N., Jactel, H., & Besnard, A. (2023) How effective are existing solutions to mitigate impacts of onshore wind farms on flying vertebrates and invertebrates? A Rapid Review: a Rapid Review. *PROCEED*.
- Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M. J. R., Fonseca, C., Mascarenhas, M., & Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, 179, 40–52.
- Marques, A. T., Batalha, H., & Bernardino, J. (2021). Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Birds*, 2(4), 460–475.
- Masden, E. A., Haydon, D. T., Fox, A. D., Furness, R. W., Bullman, R., & Desholm, M. (2009). Barriers to movement: impacts of wind farms on migrating birds. *ICES Journal of marine Science*, 66(4), 746-753.
- Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. (2023). *L'évaluation environnementale*. [<https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-environnementale>] Consulté le 12/06/2024
- Ministère de la Transition Écologique. (2024). Éolien terrestre. [<https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-terrestre>] Consulté le 12/06/2024
- UNFCCC (2015). Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2022). Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028. Gouvernement français . [<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Synthe%CC%80se%20de%20la%20PPE.pdf>]
- Perrow, M. (Ed.). (2017). *Wildlife and Wind Farms-Conflicts and Solutions: Onshore: Potential Effects* (Vol. 1). Pelagic Publishing Ltd.
- Pick, J. L., Nakagawa, S., & Noble, D. W. (2019). Reproducible, flexible and high-throughput data extraction from primary literature: The metaDigitise r package. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(3), 426-431.
- R Core Team (2023). *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- REN21 (2021). *Renewables 2021 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-03-8.
- Rodríguez, I., Palomino, D., Jiménez, J., Martín, V., Carazo, P., & Ferreras, P. (2013). Impact of an onshore wind farm on breeding raptor populations. *Bird Study*, 60(2), 236-244.
- Sénat. (2009.). Les études d'impact environnemental (EIE) et l'évaluation environnementale stratégique (EES). [[https://www.senat.fr/lc/lc197/lc197\\_mono.html](https://www.senat.fr/lc/lc197/lc197_mono.html)] Consulté le 12/06/2024
- Smallwood, K.S. (2013). Comparing bird and bat fatality-rate estimates among North American wind-energy projects. *Wildlife Society Bulletin*, 37(1), 19-33
- Smallwood, K. S., & Bell, D. A. (2020). Effects of wind turbine curtailment on bird and bat fatalities. *The Journal of Wildlife Management*, 84(4), 685-696.
- Stephens, T. (2023). The Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework. *International Legal Materials* 62, 868–887.
- Stewart, G. (2010). Meta-analysis in applied ecology. *Biology letters*, 6(1), 78-81.
- Thaxter, C. B., Buchanan, G. M., Carr, J., Butchart, S. H., Newbold, T., Green, R. E., ... & Pearce-Higgins, J. W. (2017). Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1862), 20170829.
- Thaxter, C.B., Gaston, K.J., Evans, K.L., Fuller, R.A., & Ratcliffe, N. (2017). Site selection criteria for reducing environmental impacts associated with large-scale wind energy deployment. *Journal of Applied Ecology*, 54(3), 775-783.
- Tomé, R., Canário, F., Leitão, A. H., Pires, N., & Repas, M. (2017). Radar assisted shutdown on demand ensures zero soaring bird mortality at a wind farm located in a migratory flyway. In *Wind Energy and Wildlife Interactions: Presentations from the CWW2015 Conference* (pp. 119-133). Springer International Publishing.
- UICN Comité français (2023). Améliorer la prise en compte de la biodiversité dans la planification et la conception des projets éoliens et photovoltaïques : retours d'expériences et identification de bonnes pratiques en France métropolitaine.

- Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of statistical software*, 36(3), 1-48.
- Weaver, S. P., Hein, C. D., & Schirmacher, M. R. (2018). Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines. *Renewable Energy*, 123, 249-254.
- Weschler, M. (2023). Wind Energy and Insects: Reviewing the State of Knowledge and Identifying Potential Interactions. University of Wyoming
- Wu, S., & Archer, C. L. (2021). Near-ground effects of wind turbines: Observations and physical mechanisms. *Monthly Weather Review*, 149(3), 879-898.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SELECTIONNEES POUR LA REVUE

★ *Références dont les données ont été employées lors de la méta-analyse*

- Anderson, R., Tom, J., Neumann, N., Erickson, W. P., Strickland, M. D., Bourassa, M., & Sernka, K. J. (2005). Avian monitoring and risk assessment at the San Geronio Wind Resource Area (No. NREL/SR-500-38054). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- ★ Arnett, E. B., Huso, M. M., Schirmacher, M. R., & Hayes, J. P. (2011). Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(4), 209-214.
- Arnett, E. B., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Huso, M. M., & Szewczak, J. M. (2013). Evaluating the effectiveness of an ultrasonic acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines. *PLoS one*, 8(6), e65794.
- ★ Baerwald, E. F., Edworthy, J., Holder, M., & Barclay, R. M. (2009). A large-scale mitigation experiment to reduce bat fatalities at wind energy facilities. *The Journal of Wildlife Management*, 73(7), 1077-1081.
- ★ Bennett, E. M., Florent, S. N., Venosta, M., Gibson, M., Jackson, A., & Stark, E. (2022). Curtailment as a successful method for reducing bat mortality at a southern Australian wind farm. *Austral Ecology*, 47(6), 1329-1339.
- Bennett, V. J., & Hale, A. M. (2018). Texturizing wind turbine towers to reduce bat mortality (No. DOE-TCU-0007033). Texas Christian Univ., Fort Worth, TX (United States).
- Bienz, C. (2016). Surface texture discrimination by bats: implications for reducing bat mortality at wind turbines (Master's thesis, Texas Christian University).
- Brown, W. K., & Hamilton, B. L. (2006). Monitoring of bird and bat collisions with wind turbines at the Summerview Wind Power Project, Alberta. Terrestrial & Aquatic Environmental Managers Ltd.
- Cooper, D., Green, T., Miller, M., & Rickards, E. (2020). Bat Impact Minimization Technology: An Improved Bat Deterrent for the Full Swept Rotor Area of Any Wind Turbine (No. DE-EE0007034; CEC-500-2020-008). Frontier Wind LLC, Rocklin, CA (United States).
- Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Straw, B. R., Thao, S., & DeGeorge, E. (2021). Influencing activity of bats by dimly lighting wind turbine surfaces with ultraviolet light. *Animals*, 12(1), 9.
- d'Entremont, M. V. (2015). Movement patterns of nocturnal avian migrants at a wind energy project in northeast British Columbia (Doctoral dissertation, University of Northern British Columbia).
- De Lucas, M., Ferrer, M., Bechard, M. J., & Muñoz, A. R. (2012). Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures. *Biological Conservation*, 147(1), 184-189.
- Ferrer, M., Alloing, A., Baumbush, R., & Morandini, V. (2022). Significant decline of Griffon Vulture collision mortality in wind farms during 13-year of a selective turbine stopping protocol. *Global Ecology and Conservation*, 38, e02203.
- Ferri, V., Battisti, C., & Soccini, C. (2016). Bats in a mediterranean mountainous landscape: does wind farm repowering induce changes at assemblage and species level?. *Environmental management*, 57(6), 1240-1246.

- Gilmour, L. R., Holderied, M. W., Pickering, S. P., & Jones, G. (2020). Comparing acoustic and radar deterrence methods as mitigation measures to reduce human-bat impacts and conservation conflicts. *PLoS One*, 15(2), e0228668.
- \*Good, R. E., Iskali, G., Lombardi, J., McDonald, T., Dubridge, K., Azeka, M., & Tredennick, A. (2022). Curtailment and acoustic deterrents reduce bat mortality at wind farms. *The Journal of Wildlife Management*, 86(6), e22244.
- Good, R. E., Nasman, K., & Ciecka, A. (2022). Bat Evaluation Monitoring Studies at the Fowler Ridge Wind Farm, Benton County, Indiana. Draft Report: April 1 – October 15, 2021. Prepared for Fowler Ridge Wind Farm, Benton County, Indiana. Prepared by Western EcoSystems Technology, Inc. (WEST), Bloomington, Indiana. January 27, 2022.
- Gorresen, P. M., Cryan, P. M., Dalton, D. C., Wolf, S., Johnson, J. A., Todd, C. M., & Bonaccorso, F. J. (2015). Dim ultraviolet light as a means of deterring activity by the Hawaiian hoary bat *Lasiurus cinereus semotus*. *Endangered Species Research*, 28(3), 249-257.
- Hayes, M. A., Hooton, L. A., Gilland, K. L., Grandgent, C., Smith, R. L., Lindsay, S. R., ... & Goodrich-Mahoney, J. (2019). A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecological Applications*, 29(4), e01881.
- Hein, C. D., Prichard, A., Mabee, T., & Schirmacher, M. R. (2013). Effectiveness of an operational mitigation experiment to reduce bat fatalities at the Pinnacle Wind Farm, Mineral County, West Virginia, 2012. An annual report submitted to Edison Mission Energy and the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA.
- Hodos, W. (2003). Minimization of Motion Smear: Reducing Avian Collision with Wind Turbines; Period of Performance: July 12, 1999--August 31, 2002 (No. NREL/SR-500-33249). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Horn, J. W., Arnett, E. B., Jensen, M., & Kunz, T. H. (2008). Testing the effectiveness of an experimental acoustic bat deterrent at the Maple Ridge wind farm. *Report Prepared for: The Bats and Wind Energy Cooperative and Bat Conservation International, Austin, TX*.
- Huso, M., & Dalthorp, D. (2023). Reanalysis indicates little evidence of reduction in eagle mortality rate by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 60(10), 2282-2288.
- Huzzen, B. (2019). Does a textured coating alter bat activity and behavior in proximity to wind turbine towers? (Master's thesis, Texas Christian University).
- Kinzie, K., Hale, A., Bennett, V., Romano, B., Skalski, J., Coppinger, K., & Miller, M. F. (2018). Ultrasonic Bat Deterrent Technology (No. DOE-GE-07035). General Electric Co., Schenectady, NY (United States).
- Lindsey, C. T. (2017). Assessing changes in bat activity in response to an acoustic deterrent—implications for decreasing bat fatalities at wind facilities (Master's thesis, Texas Christian University).
- Long, C. V., Flint, J. A., & Lepper, P. A. (2011). Insect attraction to wind turbines: does colour play a role?. *European Journal of Wildlife Research*, 57, 323-331.
- \*Măntoiu, D. Ş., Kravchenko, K., Lehnert, L. S., Vlaschenko, A., Moldovan, O. T., Mirea, I. C., ... & Voigt, C. C. (2020). Wildlife and infrastructure: impact of wind turbines on bats in the Black Sea coast region. *European journal of wildlife research*, 66(3), 1-13.
- Martin, C. (2015). Effectiveness of operational mitigation in reducing bat mortality and an assessment of bat and bird fatalities at the Sheffield Wind Facility, Vermont. Master of Sciences, Texas Tech University.
- \*Martin, C. M., Arnett, E. B., Stevens, R. D., & Wallace, M. C. (2017). Reducing bat fatalities at wind facilities while improving the economic efficiency of operational mitigation. *Journal of Mammalogy*, 98(2), 378-385
- May, R., Åström, J., Hamre, Ø., & Dahl, E. L. (2017). Do birds in flight respond to (ultra) violet lighting?. *Avian Research*, 8, 1-10.
- May, R., Nygård, T., Falkdalen, U., Åström, J., Hamre, Ø., & Stokke, B. G. (2020). Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecology and evolution*, 10(16), 8927-8935.
- McClure, C. J., Rolek, B. W., Dunn, L., McCabe, J. D., Martinson, L., & Katzner, T. (2021). Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 58(3), 446-452.



- McClure, C. J., Rolek, B. W., Dunn, L., McCabe, J. D., Martinson, L., & Katzner, T. E. (2022). Confirmation that eagle fatalities can be reduced by automated curtailment of wind turbines. *Ecological Solutions and Evidence*, 3(3), e12173.
- Millon, L., Julien, J. F., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2015). Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures. *Ecological Engineering*, 75, 250-257.
- Nicholls, B., & Racey, P. A. (2007). Bats avoid radar installations: could electromagnetic fields deter bats from colliding with wind turbines?. *PloS one*, 2(3), e297.
- Nicholls, B., & Racey, P. A. (2009). The aversive effect of electromagnetic radiation on foraging bats—a possible means of discouraging bats from approaching wind turbines. *PLoS One*, 4(7), e6246.
- Pescador, M., Ramírez, J. I. G., & Peris, S. J. (2019). Effectiveness of a mitigation measure for the lesser kestrel (*Falco naumanni*) in wind farms in Spain. *Journal of environmental management*, 231, 919-925.
- \*Rabie, P. A., Welch-Acosta, B., Nasman, K., Schumacher, S., Schueller, S., & Gruver, J. (2022). Efficacy and cost of acoustic-informed and wind speed-only turbine curtailment to reduce bat fatalities at a wind energy facility in Wisconsin. *Plos one*, 17(4), e0266500.
- Rnjak, D., Janeš, M., Križan, J., & Antonić, O. (2023). Reducing bat mortality at wind farms using site-specific mitigation measures: a case study in the Mediterranean region, Croatia. *Mammalia*, 87(3), 259-270.
- Rodriguez, R., Vallejo, G., Saywers, D., Quillen, J., & Denman, K. (2023) Balancing bat conservation and wind energy production with EchoSense®.
- Romano, W. B., Skalski, J. R., Townsend, R. L., Kinzie, K. W., Coppinger, K. D., & Miller, M. F. (2019). Evaluation of an acoustic deterrent to reduce bat mortalities at an Illinois wind farm. *Wildlife Society Bulletin*, 43(4), 608-618.
- Schirmacher, M. R. (2020). Evaluating the effectiveness of an ultrasonic acoustic deterrent in reducing bat fatalities at wind energy facilities (No. DOE-BCI-0007036). Bat Conservation International, Austin, TX (United States).
- Schirmacher, M. R., Prichard, A., Mabee, T., & Hein, C. D. (2018). Evaluating a novel approach to optimize operational minimization to reduce bat fatalities at the Pinnacle Wind Farm, Mineral County, West Virginia, 2015. An annual report submitted to NRG Energy and the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International, Austin, TX.
- Shewring, M. P., & Vafidis, J. O. (2017). The effectiveness of deterrent measures to minimize disturbance impacts to breeding European nightjar at an upland wind farm site in South Wales, UK. *Conservation Evidence*, 14, 58-60.
- Smales, I., Muir, S., Meredith, C., & Baird, R. (2013). A description of the Biosis model to assess risk of bird collisions with wind turbines. *Wildlife Society Bulletin*, 37(1), 59-65.
- Smallwood, K. S., & Bell, D. A. (2020). Effects of wind turbine curtailment on bird and bat fatalities. *The Journal of Wildlife Management*, 84(4), 685-696.
- Smallwood, K. S., & Karas, B. (2009). Avian and bat fatality rates at old-generation and repowered wind turbines in California. *The Journal of Wildlife Management*, 73(7), 1062-1071.
- Smallwood, K. S., & Thelander, C. G. (2005). Bird Mortality at the Altamont Pass Wind Resource Area: March 1998--September 2001 (No. NREL/SR-500-36973). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Spanjer, G. R. (2006). Responses of the big brown bat, *Eptesicus fuscus*, to a proposed acoustic deterrent device in a lab setting. A report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative and the Maryland Department of Natural Resources. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA.
- Stantec Consulting Ltd. (2012). Wolfe Island Wind Plant Post-Construction Follow-Up Plan - Bird and Bat Resources Monitoring Report No. 6, July - December 2011. Prepared for TransAlta Corporation's wholly owned subsidiary, Canadian Renewable Energy Corporation. File No. 160960494. July 2012.
- Stokke, B. G., Nygård, T., Falkdalen, U., Pedersen, H. C., & May, R. (2020). Effect of tower base painting on willow ptarmigan collision rates with wind turbines. *Ecology and evolution*, 10(12), 5670-5679.
- Szewczak, J. M., & Arnett, E. (2006). Preliminary field test results of an acoustic deterrent with the potential to reduce bat mortality from wind turbines. Austin (Tx): Bat Conservation International.
- Szewczak, J. M., & Arnett, E. B. (2007). Field test results of a potential acoustic deterrent to reduce bat mortality from wind turbines. Unpublished report. Bat Conservation International, Austin, Texas, USA.

- Thady, R. G., Emerson, L. C., & Swaddle, J. P.** (2022). Evaluating acoustic signals to reduce avian collision risk. *PeerJ*, *10*, e13313.
- Weaver, S. P., Hein, C. D., Simpson, T. R., Evans, J. W., & Castro-Arellano, I.** (2020). Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines. *Global Ecology and Conservation*, *24*, e01099.
- Werber, Y., Hareli, G., Yinon, O., Sapir, N., & Yovel, Y.** (2023). Drone-mounted audio-visual deterrence of bats: implications for reducing aerial wildlife mortality by wind turbines. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, *9*(3), 404-419.
- Criterion Power Partners, L. L. C., Young, D., Nations, C., Lout, M., & Bay, K.** (2012). 2012 Post-Construction Monitoring Study Criterion Wind Project Garrett County, Maryland.
- Erickson, W. P., Strickland, M. D., Good, R. E., & Sernka, K. J.** (2003). Comparison of Avian Responses to UV-Light-Reflective Paint on Wind Turbines: Subcontract Report, July 1999--December 2000 (No. NREL/SR-500-32840). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Young Jr, D. P., Nomani, S., Tidhar, W. L., & Bay, K.** (2011). Nedpower Mount storm wind energy facility post-construction avian and bat monitoring. Western EcoSystems Technology Inc, Cheyenne, Wyoming, USA.

## ANNEXE I : LISTE DES NOMS D'ESPECES ABREGES UTILISES DANS LE TABLEAU RECAPITULATIF DE LA SYNTHESE NARRATIVE

Catégorie	Abréviation	Nom vernaculaire	Nom scientifique
Chauves-souris	C.-s. argentée	Chauve-souris argentée	<i>Lasionycteris noctivagans</i>
	C.-s. cendrées hawaïennes	Chauves-souris cendrées hawaïennes	<i>Lasiurus cinereus semotus</i>
	C.-s. cendrée	Chauve-souris cendrée	<i>Lasiurus cinereus</i>
	C.-s. jaune N.	Northern yellow bat	<i>Lasiurus intermedius</i>
	C.-s. rousse	Chauve-souris rousse	<i>Lasiurus borealis</i>
	Molosse Brésil	Molosse du Brésil	<i>Tadarida brasiliensis</i>
	Myo.	Myotis	<i>Myotis sp.</i>
	Noct.	Noctules	<i>Nyctalus sp.</i>
	Oreill.	Oreillards	<i>Plecotus sp.</i>
	Petite C.-s. brune	Petite chauve-souris brune	<i>Myotis lucifugus</i>
	Pipist.	Pipistrelles	<i>Pipistrellus sp.</i>
	Séro.	Sérotines	<i>Eptesicus sp.</i>
	Séro. brune	Sérotine brune	<i>Eptesicus fuscus</i>
Oiseaux	Aigle royal	Aigle royal	<i>Aquila chrysaetos</i>
	Aigle Tasmanie	Aigle à queue en coin de Tasmanie	<i>Aquila audax fleayi</i>
	Buse q. rousse	Buse à queue rousse	<i>Buteo jamaicensis</i>
	Chevêche terr.	Chevêche des terriers	<i>Athene cunicularia</i>
	Crécerelle Am.	Crécerelle d'Amérique	<i>Falco sparverius</i>
	Diam. mandarin	Diamant mandarin	<i>Taeniopygia guttata</i>
	Effraie cloch.	Effraie des clochers	<i>Tyto alba</i>
	Engoulevent Eur.	Engoulevent d'Europe	<i>Caprimulgus europaeus</i>
	Faucon crécer.	Faucon crécerellette	<i>Falco naumanni</i>
	Grand-duc Am.	Grand-duc d'Amérique	<i>Bubo virginianus</i>
	Lagop. saules	Lagopèdes des saules	<i>Lagopus lagopus</i>
	Pygargue blagre	Pygargue blagre	<i>Ichthyophaga leucogaster</i>
	Pygargue q. blanche	Pygargue à queue blanche	<i>Haliaeetus albicilla</i>
	Pygargue tête bl.	Pygargue à tête blanche	<i>Haliaeetus leucocephalus</i>
	Vaut. fauve	Vautour fauve	<i>Gyps fulvus</i>

## ANNEXE II : MÉTHODES

Cette Revue rapide a suivi les méthodes décrites dans le protocole, publié dans PROCEED (Langridge *et al.* 2023). Elle a été réalisée en stricte conformité avec les lignes directrices et normes pour les 'Revue Rapides' (« *Guidelines and standards for 'Rapid Reviews'* ») fournies par la "Collaboration for Environmental Evidence" (C.E.E. ; 2023).

### Recherche d'articles

#### *Mots-clés et équations de recherche*

Conformément à nos objectifs, nous avons combiné tous les termes relatifs à la faune volante, aux solutions d'atténuation, et aux résultats. L'équation de recherche finale a été construite dans la base de données bibliographique "Web of Science core collection" (WOSCC), comme suit :

TS=((insect\$ OR invertebrate\$ OR butterfly OR lepidoptera OR dragonfly OR odonata OR vertebrate\$ OR avifauna OR aves OR avian OR bird\$ OR bat\$ OR chiroptera OR passerine\$ OR raptor\$ OR vulture\$ OR owl\$ OR piciforme\$ OR columbiforme\$ OR passeriforme\$ OR falconiforme\$) AND ("wind energ\*" OR "wind farm\$" OR "wind power" OR "wind turbine\$" OR "wind technolog\*" OR "wind park\$" OR "wind power station\$" OR "wind power plant\$") AND (evaluat\* OR solution\$ OR mitigatg\* OR "risk assessment" OR option\$ OR measur\* OR priorit\* OR reduc\* OR avoid\* OR compensat\* OR minimize OR adapt\* OR interven\* OR action\$ OR manag\* OR protect\* OR manipul\* OR counteract\* OR removal OR engineer\* OR plan\* OR strateg\* OR offset\* OR deterren\* OR curtail\* OR "flight divert\*" OR "attract\* remov\*" OR "nest\* management" OR "m?cro-siting" OR deterr\*)) AND (impact\* OR effect\* OR collision\$ OR behaviour OR aversion OR repulsion OR disturb\* OR mortalit\* OR fatalit\* OR carcass\* OR "population size" OR "population density" OR abundance OR occurrence))

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

#### *Raccourcis et limitations*

Seuls les termes en anglais ont été inclus dans les requêtes de littérature. Cependant, les publications retenues étaient soit en anglais soit en français, en accord avec les compétences linguistiques de l'équipe. Aucune restriction de date ni de zone géographique n'a été appliquée aux recherches dans les bases de données. En ce qui concerne les sites web spécialisés, une recherche de documentation en anglais a été priorisée, avec l'ajout d'un seul site spécialisé en français.

#### *Sources de littérature*

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

Deux requêtes complémentaires ont été effectuées sur :

- Google Scholar (<https://scholar.google.com/>). Nous avons utilisé le programme logiciel "Publish or perish (version 6)" pour extraire les citations. En raison des restrictions du moteur de recherche concernant le nombre maximum de caractères, l'équation de

recherche a été simplifiée. De plus, nous avons priorisé la littérature académique, limitant ainsi chaque sous-recherche aux 100 premiers résultats, car il a été démontré qu'au-delà de 300 résultats, la pertinence des documents identifiés diminue rapidement (Haddaway et al., 2015).

- Bielefeld Academic Search Engine (BASE) (<https://www.base-search.net>). De même que pour Google Scholar, étant donné les limitations en termes de nombre maximum de caractères, l'équation de recherche a été simplifiée.

Sept sites spécialisés ont été consultés. Nous avons effectué une recherche manuelle de documentations techniques pertinentes sur les sept sites web suivants :

- The International Renewable Energy Agency (IRENA): <https://www.irena.org/>
- The Wind Technology Office: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-technologies-office>
- The U.S. Wind Turbine Database: <https://eerscmmap.usgs.gov/uswtodb/>
- The Bats and Wind Energy Cooperative (BWEC): <https://www.batsandwind.org>
- The 'Publication Library' of The Scotland Centre of Expertise Connecting Climate Change Research and Policy: <https://www.climateexchange.org.uk/research/publications-library/>
- Tethys: <https://tethys.pnnl.gov/>
- La Librairie "Energies renouvelables, réseaux et stockage", Agence de la Transition Ecologique (ADEME) <https://librairie.ademe.fr/2889-energies-renouvelables-reseaux-et-stockage>

### *Estimation de l'exhaustivité de la recherche*

Pour garantir la pertinence de la recherche, et un certain niveau d'exhaustivité, un processus itératif a été mené pour 'calibrer' l'équation de recherche par rapport à une liste prédéterminée de 15 articles de référence (ci-après dénommé « liste test »). Cette « liste test » était composée d'articles de journaux scientifiques pertinents, pré-identifiés par l'équipe. Nous avons testé différentes combinaisons de mots-clés et vérifié que les articles de référence étaient retrouvés. Si des articles de la « liste test » manquaient, des mots-clés étaient ajoutés pour améliorer sa sensibilité jusqu'à ce que tous les articles soient retrouvés.

### **Critères d'éligibilité des articles et de sélection des études**

Trois étapes de tri ont été réalisées : 1) un tri sur « titres », puis 2) un tri sur « résumés », enfin 3) un tri sur « textes intégraux ».

*NB.* : Lors du tri sur titres et résumés, en cas de doute sur la présence d'un critère d'inclusion (ou si l'information était absente), l'article en question était automatiquement passé à l'étape suivante de sélection. Les rapports techniques récupérés par recherche manuelle sur les sites web d'organisations ont été évalués uniquement sur la base du texte intégral. Pour assurer la cohérence et la reproductibilité des décisions, la conformité aux critères d'éligibilité a été comparée entre les trois évaluateurs à l'aide d'un test de Kappa de Fleiss au début de chaque étape de sélection (ANNEXE IV).

Ainsi, nous avons examiné la pertinence des articles collectés à l'aide d'un ensemble de critères d'inclusion et d'exclusion (**Tableau 2**) **Tableau 2. Liste des critères d'éligibilité utilisés pour la sélection sur titres, résumés et textes intégraux.**

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

Critères PICO		Description	Définition(s)
<b>Critères d'inclusion</b>	Populations éligibles	Tous les vertébrés et invertébrés volants (i.e toutes les espèces d'oiseaux et de chauves-souris, et d'insectes volants) affectés par les parcs éoliens terrestres	Espèces sauvages – i.e., espèces en liberté présentes en milieux naturels ( <i>in-situ</i> ) ou espèces sauvages utilisées en laboratoires ( <i>ex-situ</i> ). Toutes espèces non domestiquées
	Interventions éligibles	Solutions d'atténuation pour éviter, minimiser et compenser les impacts des parcs éoliens terrestres sur la biodiversité volante.	Solutions d'atténuation visant à minimiser les impacts négatifs des parcs éoliens sur la biodiversité volante.
	Comparateurs éligibles	Études qui réalisent des comparaisons spatiales ou temporelles	Schémas d'étude de type « Avant-Après », « Contrôle-Intervention », « Avant-Après-Contrôle-Intervention »
	Effets et mesures éligibles	Tous les mesures et résultats pertinents démontrant un effet d'une solution d'atténuation d'impacts.	Mesures sur la taille et la densité de la population concernée e.g. par la métrique de l'abondance. Mesures sur le taux de mortalité / de collisions ex. par le nombre de carcasses. Mesures de l'influence sur le comportement d'évitement, l'activité de vol e.g. par la hauteur de vol
<b>Critères d'exclusion</b>	Populations inéligibles	Toute la faune et la flore terrestres non volante	Les amphibiens, les reptiles, les mammifères hors chiroptères, les insectes terrestres et la flore ne seront pas inclus dans cette Revue rapide.
	Interventions inéligibles	Solutions non axées sur la réduction des effets négatifs	Toute intervention qui n'est pas destinée à minimiser les impacts des parcs éoliens sur les populations d'espèces, que ce soit par des actions mises en œuvre directement sur les parcs ou par des mesures prises en amont, en aval ou en parallèle de leur exploitation.
	Résultats inéligibles	Études qui n'étudient ni la mortalité, ni les	Tous résultats non pertinents qui ne permettraient pas

		collisions, ni le comportement, etc.	d'interpréter la réduction de la mortalité, des collisions ou de l'évitement des vols.
--	--	--------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------

## « Analyse critique » : évaluation de la validité des études

Nous avons effectué une analyse critique pour évaluer à la fois la validité interne (i.e., le risque de biais<sup>10</sup> lié à différents facteurs) et la validité externe (i.e., la pertinence et l'aspect généralisable - Haddaway et al., 2020). Une série de critères a été prédéfinie en se basant sur l'Outil d'évaluation critique (« Critical Appraisal Tool ») fournies par la CEE. Chaque étude a été classée pour chaque critère comme étant à « faible », « moyen » ou « fort » risque de biais. La pondération du classement pour chaque critère (« faible » = 1, « moyen » = 0.5, « fort » = 0) a permis de calculer un coefficient de risque de biais global permettant de classer une étude comme à « très faible », « faible », « moyen », « fort » ou « très fort » risque de biais global. Avant de procéder à l'analyse critique, des « phases pilotes » ont été réalisées pour vérifier que les critères étaient compris et interprétés de la même manière par les différents évaluateurs (AQ, JL et LD). Pour chaque article de recherche, nous avons évalué sa robustesse, notamment en termes de méthode de sélection du site, du nombre de répétitions de relevés de données, de prise en compte de la pseudo-réplication, de méthode d'échantillonnage et d'analyses, entre autres (cf. Annexe V pour plus de détails). Lorsqu'il y avait un manque important d'informations empêchant de porter un jugement objectif sur les critères donnés, nous l'avons automatiquement qualifié d'un risque de biais "élevé".

*NB.* En ce qui concerne les approches statistiques (cf. section « synthèse »), un article classé en risque de biais « élevé » n'a pas conduit à son exclusion.

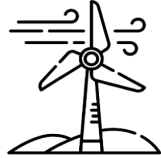
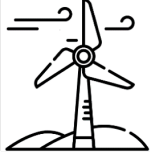


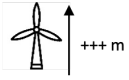



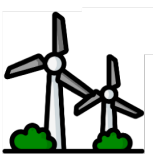

## Synthèses

### *Méthodes de synthèse narrative*

Toutes les métadonnées codées des études de cas retenues ont été incluses dans la synthèse narrative. Dans les cas où plus d'une étude de cas était extraite d'un même article, chacune a été enregistrée comme une entrée unique dans la base de données Excel avec ses métadonnées correspondantes. Conformément aux méthodes de cartographie (cf. James *et al.*, 2016), une étude de cas représentait un résultat unique associé à une intervention unique (c'est à dire une solution d'atténuation, [Tableau 3](#)) sur une population unique (c'est à dire une seule espèce ou groupe d'espèces). En croisant les variables clés des métadonnées (par exemple, groupes biologiques x solutions x résultats), des figures et des tableaux de synthèse ont été produits pour identifier les lacunes de connaissances (c'est-à-dire les sous-thèmes nécessitant des recherches primaires supplémentaires) et les clusters de connaissances (c'est-à-dire les sous-thèmes suffisamment couverts par les études existantes pour permettre une synthèse quantitative). Ainsi, la répartition et la fréquence des études sur les solutions d'atténuation ont été présentées, par exemple, par des cartes de chaleurs. Sur la base des résultats, des recommandations ont été formulées

<sup>10</sup> Un **risque de biais** se réfère à la possibilité que certaines caractéristiques d'une étude influencent les résultats de manière systématique, entraînant des conclusions qui ne reflètent pas précisément la réalité. Cela peut résulter de méthodes de collecte de données, de sélection de sites d'études, ou d'analyse qui ne sont pas complètement neutres ou rigoureuses. Le risque de biais peut ainsi compromettre la validité et la fiabilité des résultats d'une recherche.

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

Type d'étude de comparaison	Exemple illustré		Autres exemples d'étude comparatives
	Groupe intervention	Groupe contrôle	
Bridage: augmentation du seuil de démarrage (EN : cut-in speed)	Vitesse du vent +++ m/s : seuil plus élevé 	Vitesse du vent + m/s : seuil réduit 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bridage cible.</li> <li>• Bridage : orientation des pales.</li> <li>• Bridage et effarouchement acoustique simultanément</li> </ul>
Effarouchement acoustique			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effarouchement radar</li> <li>• Effarouchement lumière UV</li> <li>• Effarouchement radar</li> <li>• Effarouchement radar et acoustique simultanément</li> </ul>
Taille de la turbine			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renouvellement</li> </ul>
Peinture de la surface (y compris les pales)			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspect de la surface</li> </ul>
Micro-siting			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macro-siting</li> <li>• Elimination des facteurs d'attraction</li> </ul>

### Méthodes de synthèse quantitative

Toutes les données ont été extraites du texte, des tableaux et des graphiques des documents retenus. Nous avons utilisé le package R *metaDigitise* (Pick *et al.*, 2018) pour ces derniers. La méta-analyse a été réalisée avec le logiciel R (v4.3.1; R Core Team, 2023) en utilisant le package *metafor* (Viechtbauer, 2010). Ainsi, nous avons codé d'une part, le nombre de réplifications, c'est-à-dire la taille de l'échantillon ( $N > 1$ ), d'autre part, l'effet moyen, et enfin, un indicateur de dispersion de la mesure, qui a été transformé en écart-type. En ce qui concerne les groupes taxonomiques, les données moyennes sur l'ensemble de la communauté ont été extraites, par exemple "abondance totale des chauves-souris".

En ce qui concerne la classification des groupes d'espèces, les espèces ont été regroupées par groupe taxonomique (c'est-à-dire chauves-souris, oiseaux ou insectes).

Pour chaque étude individuelle, les coordonnées (latitude et longitude) ont été renseignées lorsqu'elles étaient disponibles. Dans le cas où ces données n'étaient pas disponibles, nous avons utilisé GoogleEarth pour extraire les coordonnées géographiques de la localisation basée sur les descriptions de site fournies par les auteurs lorsqu'elles étaient suffisamment précises.



## Traitement des données et analyses statistiques

Nous avons utilisé les tailles d'effet dites "log response ratio" :

$$\ln R = \ln\left(\frac{X_E}{X_C}\right) = \ln(X_E) - \ln(X_C) \quad (1)$$

Cette taille d'effet donne une estimation de la variation en pourcentage de la mortalité, de l'activité ou de l'abondance entre les sites où une mesure d'atténuation est présente (groupe expérimental -  $X_E$ ) et l'absence de mesure (groupe témoin -  $X_C$ ). Il présente l'avantage d'être directement interprétable en termes de magnitude (Barbier *et al.*, 2009). La variance de cette taille d'effet est calculée comme ci :

$$v = \frac{s_E^2}{n_E \bar{X}_E^2} + \frac{s_C^2}{n_C \bar{X}_C^2} \quad (2)$$

où  $S_E$  et  $S_C$  sont les écarts types et  $n_E$  et  $n_C$  les tailles des échantillons des groupes expérimental et témoin, respectivement.

Nous avons utilisé des modèles à effets aléatoires pour tenir compte de l'hétérogénéité résiduelle des tailles d'effet entre les études, car les données écologiques sont plus sujettes à des variations non contrôlées que les données dans d'autres domaines scientifiques tels que la médecine (Stewart, 2009 ; Koricheva *et al.*, 2013). Nous avons ajouté un effet aléatoire au niveau de la publication pour tenir compte du fait que deux comparaisons d'études individuelles issues du même article étaient potentiellement plus similaires que deux comparaisons d'études issues de deux publications différentes. Dans nos modèles, la variable réponse est la taille d'effet  $\ln R$ , qui représente la mesure d'effet calculée pour chaque étude. Les variables explicatives incluent : la variance associée à chaque taille d'effet, qui ajuste pour l'incertitude de chaque estimation de l'effet, et un effet aléatoire basé sur l'identifiant de la publication. Plusieurs modèles ont été testés et comparés pour déterminer l'efficacité de la mesure d'atténuation. Différents modérateurs ont été ajoutés pour explorer les sources potentielles d'hétérogénéité entre les études. Cela visait à comprendre pourquoi certaines études montrent des effets différents des autres. Par exemple, des facteurs tels que le climat, l'espèce, le type de paysage ou la taille des turbines pourraient influencer les résultats.

Pour comparer différents modèles et trouver celui qui fonctionne le mieux, nous avons utilisé des outils appelés AIC (FR: Critère d'Information d'Akaike) et BIC (FR: Critère d'Information Bayésien). Ces outils aident à évaluer chaque modèle en vérifiant à quel point ils prédisent bien les résultats et s'ils ne sont pas trop complexes.

Nous avons calculé les scores AIC et BIC de chaque modèle. Les modèles avec les scores les plus bas sont considérés comme les meilleurs, car cela signifie qu'ils sont à la fois précis, simples et, ainsi, les plus efficaces pour les données étudiées.

Avant de réaliser la méta-analyse et pour garantir la validité et la fiabilité de ses résultats, nous avons vérifié certaines hypothèses et conditions préalables :

- l'homogénéité des variances, avec le test Q de Cochran et  $I^2$  ;
- l'absence de biais de publication, avec un graphique en entonnoir et un test d'asymétrie de Egger ;
- la normalité de la distribution des tailles d'effet, avec le test de Shapiro-Wilk et en inspectant les histogrammes et Q-Q plot ;
- l'évaluation de la qualité des études.

## **ANNEXE III : DETAILS DES EQUATIONS DE RECHERCHE UTILISEES POUR LES REQUETES**

### **Equation de recherche complète, utilisée avec Web Of Science core collection (WOSCC) :**

- TS=((insect\$ OR invertebrate\$ OR butterfly OR lepidoptera OR dragonfly OR odonata OR vertebrate\$ OR avifauna OR aves OR avian OR bird\$ OR bat\$ OR chiroptera OR passerine\$ OR raptor\$ OR vulture\$ OR owl\$ OR piciforme\$ OR columbiforme\$ OR passeriforme\$ OR falconiforme\$) AND (("wind energ\*" OR "wind farm\$" OR "wind power" OR "wind turbine\$" OR "wind technolog\*" OR " wind park\$" OR "wind power station\$" OR "wind power plant\$") AND (evaluat\* OR solution\$ OR mitigatg\* OR "risk assessment" OR option\$ OR measur\* OR priorit\* OR reduc\* OR avoid\* OR compensat\* OR minimize OR adapt\* OR interven\* OR action\$ OR manag\* OR protect\* OR manipul\* OR counteract\* OR removal OR engineer\* OR plan\* OR strateg\* OR offset\* OR deterren\* OR curtail\* OR "flight divert\*" OR "attract\* remov\*" OR "nest\* management" OR "m?cro-siting" OR deterr\*)) AND (impact\* OR effect\* OR collision\$ OR behaviour OR aversion OR repulsion OR disturb\* OR mortalit\* OR fatalit\* OR carcass\* OR "population size" OR "population density" OR abundance OR occurrence))

### **Equation de recherche simplifiée dérivée de l'équation complète initiale, utilisée avec Bielefeld Academic Search Engine (BASE) :**

- (insect invertebrate butterfly lepidoptera dragonfly odonata vertebrate avifauna aves avian bird bat chiroptera passerine raptor vulture owl piciforme columbiforme passeriforme falconiforme) AND ("wind energy" "wind farm" "wind power" "wind turbine" "wind technology" "wind park" "wind power station" "wind power plant") AND (evaluation solution mitigate "risk assessment" option measure priority reduce avoid compensate minimize adapt intervention action management protect manipulate counteract removal engineering plan strategy offset deterrent curtail "flight diverted" "nest management" micro-siting macro-siting) AND (impact effect collision behaviour behavior aversion repulsion disturb mortality fatality carcass "population size" "population density" abundance occurrence)

### **Equations de recherche simplifiées et découpées, dérivées de l'équation complète initiale, utilisées avec Google Scholar :**

- (insect OR invertebrate OR butterfly OR dragonfly) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND (evaluation OR mitigation OR measure OR reduce OR avoidance) AND (impact OR effect OR behavio\$r OR mortality OR abundance)
- (insect OR invertebrate OR butterfly OR dragonfly) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND (management OR protection OR counteract OR removal OR plan) AND (impact OR effect OR behavio\$r OR mortality OR abundance)
- (insect OR invertebrate OR butterfly OR dragonfly) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND (strategy OR offset OR deterrent OR micro-siting OR macro-siting) AND (impact OR effect OR behavio\$r OR mortality OR abundance)
- (bird OR bat OR chiroptera OR passerine OR raptor) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND (evaluation OR mitigation OR measure OR reduce) AND (impact OR effect OR collision OR behavio\$r OR mortality OR abundance)

- (bird OR bat OR chiroptera OR passerine OR raptor) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND (avoidance OR management OR protection OR counteract) AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR abundance)
- (bird OR bat OR chiroptera OR passerine OR raptor) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND (removal OR plan OR strategy OR offset OR deterrent) AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR abundance)
- (bird OR bat OR chiroptera OR passerine OR raptor) AND ("wind energy" OR "wind farm" OR "wind power" OR "wind turbine") AND ("flight diverted" OR micro-siting OR macro-siting) AND (impact OR effect OR collision OR behavior OR mortality OR abundance)

## **ANNEXE IV : EVALUATION DE LA CONFORMITE AUX CRITERES D'ELIGIBILITE PAR LE TEST KAPPA DE FLEISS**

### **Test Kappa de Fleiss sur titres :**

- Le test a été effectué par trois évaluateurs sur une liste de 161 références bibliographiques, représentant 10% du nombre total de références extraites.
- **Résultats :**  $Kappa = 0.875$   
 $z = 19.2$   
 $p\text{-value} = 0$

La valeur de Kappa de 0.875 suggère un très haut niveau d'accord entre les évaluateurs, bien au-delà du seuil de 0.75 généralement considéré comme indiquant une excellente concordance. De plus, cet accord observé entre les évaluateurs est extrêmement significatif sur le plan statistique ( $p\text{-value} = 0$ ).

### **Test Kappa de Fleiss sur résumés :**

- Le test a été effectué par trois évaluateurs sur une liste de 59 références bibliographiques, représentant 10% du nombre total de références extraites.
- **Résultats :**  $Kappa = 0.723$   
 $z = 9.62$   
 $p\text{-value} = 0$

La valeur de Kappa de 0.723 indique un bon niveau d'accord entre les évaluateurs. Bien que cette valeur soit légèrement inférieure au seuil de 0.75, généralement considéré comme excellent, elle reste dans une plage qui suggère un accord substantiel. De nouveau, l'accord observé entre les évaluateurs est extrêmement significatif sur le plan statistique ( $p\text{-value} = 0$ ).

### **Test Kappa de Fleiss sur textes entier :**

- Le test a été effectué par trois évaluateurs sur une liste de 32 références bibliographiques, représentant 10% du nombre total de références extraites.
- **Résultats :**  $Kappa = 0.897$   
 $z = 8.79$   
 $p\text{-value} = 0$

Sur ce dernier test, la valeur de Kappa de 0.897 montre encore un très haut niveau d'accord entre les évaluateurs avec un accord observé entre les évaluateurs toujours extrêmement significatif ( $p\text{-value}=0$ ).

Les résultats des tests de Kappa de Fleiss révèlent une forte concordance entre les trois évaluateurs à chaque étape de la sélection des références bibliographiques. Que ce soit pour le tri sur les titres ( $Kappa = 0.875$ ), sur les résumés ( $Kappa = 0.723$ ) ou sur les textes entiers ( $Kappa = 0.897$ ), les valeurs de Kappa indiquent une cohérence significative et reproductible dans les décisions des évaluateurs. Cette cohérence garantit la fiabilité et la robustesse de l'évaluation des critères d'éligibilité tout au long du processus de sélection des références bibliographiques.

## **ANNEXE V : CRITERES D'EVALUATION DES RISQUES DE BIAIS**

### **Validité externe :**

- L'exposition/ intervention a-t-elle lieu in-situ (sur site équipé d'éoliennes) ?

### **Facteurs confondants :**

- Existe-t-il de potentiels facteurs confondants (voir feuille 2) pouvant influencer l'intervention et/ou le résultat ? Si oui, les auteurs les ont-ils identifiés, puis analysé/contrôlé, et les ont-ils pris en compte dans leur analyse ?

### **Sélection post-exposition :**

- La sélection des sujets ou des zones après l'intervention ou l'exposition était-elle aléatoire ou systématique, et pourrait-on supposer l'interchangeabilité entre les groupes avant et après ?
- Le groupe assigné aux sujets ou aux zones (type d'intervention/contrôle) était-il caché aux expérimentateurs ?
- Y avait-il un nombre différent de données manquantes entre les groupes exposés et les groupes témoins pendant l'étude ou l'analyse ?

### **Classement incorrect (uniquement pour les études observationnelles) :**

- Les groupes d'exposition/intervention et de comparaison sont-ils suffisamment bien définis ?

### **Performance (uniquement pour les études expérimentales) :**

- Y a-t-il eu des modifications des traitements d'intervention/exposition ou de contrôle d'intérêt qui pourraient avoir un impact sur l'efficacité de l'intervention ou l'impact de l'exposition ?
- Les tailles d'échantillon de ces traitements altérés étaient-ils déséquilibrés entre les groupes d'intervention ou d'exposition ou ces traitements altérés étaient-ils pris en compte de façon incorrecte, ce qui pourrait avoir influencé l'estimation de l'impact ou de l'efficacité ?
- Dans le cas d'une évaluation de la mortalité, un test de persistance (facteur de correction) a-t-il été réalisé ? Si oui, prend-il en compte : la taille des carcasses, les mesures pour chaque turbine séparément ? De même, un test de détection avec un contrôle pour les différences spécifiques au site a-t-il été réalisé ?
- La variation de l'efficacité entre les observateurs et au fil du temps (facteur de correction) a-t-elle été évaluée et utilisée ?

### **Détection :**

- La mesure des résultats pourrait-elle être influencée par la connaissance de l'exposition, de l'intervention, des sujets ou des zones, ou par le désir d'un certain résultat ?
- Les méthodes de mesure des données étaient-elles les mêmes dans tous les groupes ?
- La zone de recherche était-elle suffisante pour détecter la majorité des carcasses à toutes les vitesses de vent (>60 m)
- L'intervalle entre chaque session de recherche était-il suffisamment court (< 1 semaine)?
- Les carcasses ont-elles été ôtées à chaque visite ou un autre contrôle était-il appliqué (e.g. comptage des carcasses fraîches, etc.) afin d'éviter la prise en compte multiple d'une même carcasse ?

### **Communication des résultats :**

- Les résultats (ou l'estimation de l'effet) sont-ils désagrégés et présentés pour l'ensemble des variables étudiées ?
- Les données brutes sont-elles mises à disposition ?

**Evaluation des résultats :**

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

**Conflits d'intérêts :**

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

## ANNEXE VI : SYNTHÈSE QUANTITATIVE DÉTAILLÉE

### Limites de la synthèse quantitative et remarques préliminaires

L'objectif initial était de mener une méta-analyse sur diverses mesures d'atténuation de l'impact de l'éolien terrestre sur la faune volante. Cependant, plusieurs contraintes méthodologiques et de qualité des données ont limité cette entreprise à une seule mesure d'atténuation : le bridage par augmentation du seuil de démarrage des turbines en fonction de la vitesse du vent, ce qui constitue un 'clusters de connaissances' (c'est-à-dire un sous-thème suffisamment étudié pour permettre une synthèse statistique).

Le nombre d'articles et d'études souvent faible par mesure a été une contrainte majeure d'une telle analyse quantitative. Ces tailles d'échantillon auraient en effet limité ainsi la puissance statistique des analyses et la possibilité de détecter des effets significatifs.

L'hétérogénéité extrême des données a également posé un problème substantiel. Les études incluses utilisaient des méthodologies très différentes, comme des approches *in situ* et *ex situ*, et mesuraient divers aspects de la biodiversité à l'aide de protocoles différents. Parmi ces protocoles, on retrouvait les études avant-après (BA), les études de contrôle impact (CI) et les études avant-après avec contrôle (BACI), qui représentent des cadres méthodologiques très différents. Les conditions environnementales divergeaient également, avec des études conduites dans divers climats et paysages. De plus, certaines études portaient sur des mélanges d'espèces tandis que d'autres désagrégeaient leurs résultats par espèces, mais avec trop peu de données pour analyser les différences entre espèces. La variabilité des tailles et configuration des parcs éoliens et des turbines ajoutait une couche supplémentaire de complexité.

Il y avait également un déséquilibre marqué dans le nombre de données disponibles au sein de chaque groupe étudié, rendant difficile toute comparaison et généralisation des résultats.

Un autre obstacle majeur était le manque d'informations statistiques critiques. De nombreuses études ne fournissaient pas suffisamment de détails sur les paramètres statistiques ou les résultats nécessaires pour les intégrer correctement dans une méta-analyse, tels que les tailles d'effet, les erreurs standard et les intervalles de confiance.

Ces contraintes ont des conséquences statistiques importantes. L'hétérogénéité des méthodes et des conditions des études aurait rendu les résultats incohérents et peu fiables. Les différences méthodologiques et environnementales auraient pu introduire des biais significatifs dans les tailles d'effet estimés, faussant ainsi les conclusions. En raison de ces disparités, l'évaluation des effets des différentes mesures d'atténuation n'auraient pas été valides.

En outre, il est crucial de souligner que les méta-analyses doivent être conduites de la manière la plus rigoureuse possible, car elles représentent le plus haut niveau de preuve en science. Une méta-analyse rigoureuse intègre des données provenant de multiples études pour fournir une estimation plus précise et plus fiable des effets d'une intervention ou d'une exposition. Lorsque des méthodes ou des données de qualité inférieure sont utilisées, les conclusions tirées peuvent être erronées ou trompeuses, compromettant ainsi la confiance dans les résultats. Une méta-analyse mal conduite peut non seulement fausser les interprétations scientifiques, mais aussi influencer négativement les décisions politiques et pratiques basées sur ces conclusions.

Pour résumer, en raison de la petite taille des échantillons, de l'extrême hétérogénéité des données, du déséquilibre des informations disponibles et du manque de détails statistiques cruciaux, réaliser une méta-analyse exhaustive et statistiquement robuste sur toutes les mesures d'atténuation aurait conduit à des résultats peu fiables et scientifiquement incorrects. Par conséquent, il a été jugé plus prudent de se concentrer uniquement sur la mesure du bridage par augmentation du seuil de démarrage en fonction de la vitesse du vent, pour laquelle les données étaient relativement plus cohérentes et utilisables.

### Méta-analyse réalisée

Cela nous amène à discuter des détails spécifiques de la méta-analyse menée sur cette mesure unique. La méta-analyse a inclus un total de 10 études de cas provenant de 7 références bibliographiques différentes. Ceci est inférieur à la quantité de données qui était disponible initialement (Figure 12). Dans un souci de rigueur et d'harmonisation optimale, nous avons exclu les études de cas présentant des résultats par espèce, afin de ne conserver que les résultats globaux. Par ailleurs, les études aux protocoles trop spécifiques, telles que celles analysant les différences de mortalité en fonction de l'utilisation du bridage durant des périodes spécifiques de la nuit, ont également été écartées. Il est important de noter que le jeu de données final, quand bien même concentré sur une seule mesure d'atténuation et nettoyé, n'était pas équilibré entre les groupes des différentes variables que nous avons extraites, telles que la localisation géographique, le climat du site d'étude, le paysage du site d'étude, le design de l'étude (avant-après et contrôle-intervention), la taille de la turbine, la vitesse engendrant la coupure du groupe contrôle, la vitesse de seuil de démarrage après intervention, l'amplitude de la différence entre ces deux vitesses, ainsi que d'autres facteurs méthodologiques divergents non extraits pour évaluer la mortalité. Par exemple, pour le climat, les études de cas se répartissaient comme suit : climat humide subtropical (4 études de cas), climat humide continental (3 études de cas), climat continental sec (2 études de cas) et climat méditerranéen (1 étude de cas).

Comme nous l'avons vu ci-dessus, cette hétérogénéité dans les études peut affecter la puissance statistique et la robustesse des estimations. Les catégories avec un petit nombre d'études de cas auront une puissance statistique limitée, rendant les estimations moins fiables et plus sensibles aux variations aléatoires. La sous-représentation de certaines catégories pourrait introduire un biais de sélection. Les résultats pourraient ne pas être représentatifs de la population générale ou des conditions réelles. La capacité de généraliser les résultats à d'autres contextes ou populations peut être limitée par le déséquilibre des données.

Compte tenu de ces risques, additionnés à une taille d'échantillon très réduite, nous avons décidé de ne tester que quatre modèles : un modèle de base sans variable explicative, évaluant uniquement l'efficacité de l'augmentation du seuil de démarrage des turbines en fonctions de la vitesse du vent et trois modèles additionnels chacun intégrant une variable explicative distincte (la différence entre la vitesse au démarrage contrôle et la vitesse d'intervention, la vitesse d'intervention seule et le climat, à titre d'exemple et pour enrichir la discussion).

Des tests préliminaires (ANNEXE VII) ont été effectués afin de déterminer la faisabilité d'une méta-analyse sur notre jeu de données. Au regard des résultats, il a été conclu que la réalisation d'une méta-analyse était envisageable, tout en gardant à l'esprit les légers écarts aux hypothèses et le déséquilibre des données.

## Résultats

Le modèle sans modérateur (Modèle 1), qui examine uniquement la relation directe entre l'intervention et ses effets sans considérer d'autres facteurs, a montré un effet moyen significatif de l'intervention pour limiter les impacts sur la biodiversité par rapport au groupe contrôle (Tableau 4, Figure 14). L'estimation de l'effet moyen (log-ROM), qui mesure la différence entre les groupes en termes de ratio, était de -1.1022, avec une erreur standard (SE)<sup>11</sup> de 0.1633, un score z<sup>12</sup> de -6.7480, et une probabilité p<sup>13</sup> de moins de 0.0001, ce qui montre que cet effet est statistiquement très significatif. En termes de Ratio of Means (ROM), l'effet moyen de l'intervention était de 0.332. Cela correspond à une diminution significative moyenne de 66.8% de la mortalité dans le groupe intervention par rapport au groupe contrôle, c'est-à-dire lorsque le seuil de démarrage est placé à une vitesse de vent plus grande.

---

<sup>11</sup> **SE (Erreur Standard)** : L'erreur standard (SE) est une mesure qui indique à quel point l'estimation de l'effet moyen est susceptible de varier si l'étude était répétée plusieurs fois. Une SE plus petite signifie que l'estimation est plus précise.

<sup>12</sup> **z (Score z)** : Le score z est une mesure statistique qui montre combien de fois l'estimation de l'effet s'écarte de zéro (ou d'aucune différence), en termes d'écart-type. Un score z plus éloigné de zéro suggère que l'effet est plus prononcé

<sup>13</sup> **p (Valeur p)** : La valeur p indique la probabilité que l'effet observé soit dû au hasard. Une petite valeur p (par exemple,  $p < 0.0001$ ) signifie qu'il est très peu probable que l'effet soit dû au hasard, ce qui suggère que l'effet est statistiquement significatif.



L'inclusion des variables « Différence entre la vitesse du vent au démarrage du contrôle et la vitesse du vent au démarrage dans les situations d'intervention » (Modèle 2,  $p = 0,24$ ), « Vitesse d'intervention » (Modèle 3,  $p = 0,36$ ) et « Climat » (Modèle 4,  $p > 0,50$ ) n'a pas révélé d'effet significatif (Tableau 4).

Le modèle sans modérateur présentait l'AIC le plus bas (17.1024) et un BIC (17.4968) inférieur à celui des autres modèles (Tableau 5), suggérant un meilleur ajustement global par rapport à la complexité du modèle (cf. section Méthodes – Synthèses – Traitement des données et analyses statistiques).

Le modèle sans modérateur reste donc préféré pour sa simplicité et son meilleur ajustement global.

Il convient de noter que l'absence de significativité des variables liées à la vitesse de démarrage nous a surpris. Certaines études comparant plusieurs augmentations par rapport à une même vitesse de contrôle ont montré que les vitesses d'intervention les plus élevées étaient associées à une mortalité plus faible. Cependant, plusieurs facteurs limitent nos conclusions. Nous n'avons pas pu intégrer toutes les études disponibles en raison du manque d'informations détaillées sur les paramètres de base. De plus, notre échantillon est de petite taille et notre jeu de données est déséquilibré. Comme discuté précédemment dans la partie, ces éléments peuvent introduire des biais dans nos résultats. Pour les mêmes raisons, il nous est également difficile de conclure de manière définitive sur l'absence d'effet du climat observée dans nos analyses.

Les analyses ont montré que, malgré les limitations, les résultats obtenus fournissent des indications précieuses sur l'effet des vitesses de coupure sur la mortalité des chauves-souris, avec une efficacité qui se révèle très élevée. Des recherches futures avec des échantillons plus grands et des données plus équilibrées sont nécessaires pour confirmer ces résultats et approfondir notre compréhension des effets des variables explicatives.

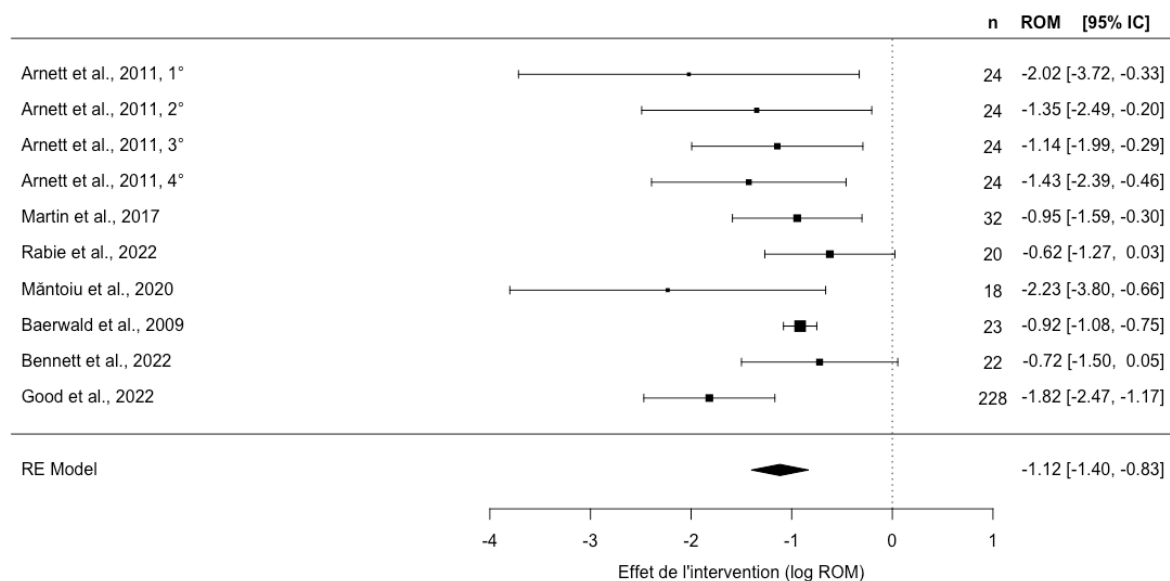


Figure 14. Résumé de la méta-analyse sur le taux de mortalité lié à l'augmentation de la vitesse de seuil de démarrage. Les carrés noirs indiquent les moyennes et les barres les intervalles de confiance à 95 % des tailles d'effet. Les intervalles de confiance non intersectés par la ligne zéro représentent des effets statistiquement significatifs ( $p < 0,05$ ) NB. Une moyenne à gauche de la ligne zéro indique qu'une vitesse de démarrage plus élevée réduit la mortalité par rapport à la vitesse de référence.

Tableau 4. Estimations des coefficients statistiques pour les différents modèles de méta-analyses

Modèle	Estimate	SE	zval	p.value	ci.95%.bas	ci.95%.haut	ROM moyen	ci.95%.bas ROM	ci.95%.haut ROM	% Diminution moyen
Modèle 1	-1.1022	0.1633	-6.7480	<.0001	-1.4223	-0.7821	0.332	0.241	0.457	66.8%
Modèle 2 (Intercept)	-0.5976	0.4417	-1.3531	0.1760	-1.4633	0.2681	0.550	0.231	1.307	45.0%
Diff_Cut.In.Speed	-0.2958	0.2524	-1.1722	0.2411	-0.7905	0.1988	-	-	-	-
Modèle 3 (Intercept)	-0.0097	1.2078	-0.0080	0.9936	-2.3769	2.3576	0.990	0.093	10.576	1.0%
Int_Cut.In.Speed	-0.2052	0.2242	-0.9152	0.3601	-0.6445	0.2342	-	-	-	-
Modèle 4 (Intercept)	-1.2516	0.4954	-2.5264	0.0115	-2.2225	-0.2806	0.286	0.108	0.755	71.4%
Climat.Humide continental	0.1241	0.6238	0.1989	0.8424	-1.0986	1.3467	1.132	0.333	3.846	-13.2%
Climat. Humide sub-tropical	-0.1065	0.8004	-0.1331	0.8941	-1.6752	1.4622	0.899	0.187	4.316	10.1%
Climat.Mediterranee n	0.5289	0.8512	0.6213	0.5344	-1.1395	2.1972	1.697	0.320	9.000	-69.7%

Tableau 5. Comparaison des critères d'ajustement et de l'hétérogénéité pour les différents modèles de méta-analyse

Critère	Modèle 1 (sans modérateur)	Modèle 2 (avec Diff_CutInSpeed)	Modèle 3 (avec Int_CutInSpeed)	Modèle 4 (avec Climat)
logLik	-6.5512	-5.6319	-5.8144	-4.8284
Deviance	13.1024	11.2637	11.6287	9.6569
AIC	17.1024	17.2637	17.6287	19.6569
BIC	17.4968	17.5020	17.8671	18.6157
AICc	19.1024	23.2637	23.6287	79.6569
Variance Components (sigma <sup>2</sup> )	0.0877	0.0549	0.0943	0.3222
Hétérogénéité résiduelle (QE)	Q (df = 9) = 13.8172, p = 0.1290	QE (df = 8) = 10.9684, p = 0.2035	QE (df = 8) = 13.0633, p = 0.1097	QE (df = 6) = 10.5201, p = 0.1044
Test des modérateurs (QM)	-	QM (df = 1) = 1.3740, p = 0.2411	QM (df = 1) = 0.8376, p = 0.3601	QM (df = 3) = 0.5354, p = 0.9110



## ANNEXE VII : TESTS PRELIMINAIRES DE FAISABILITE DE LA META-ANALYSE

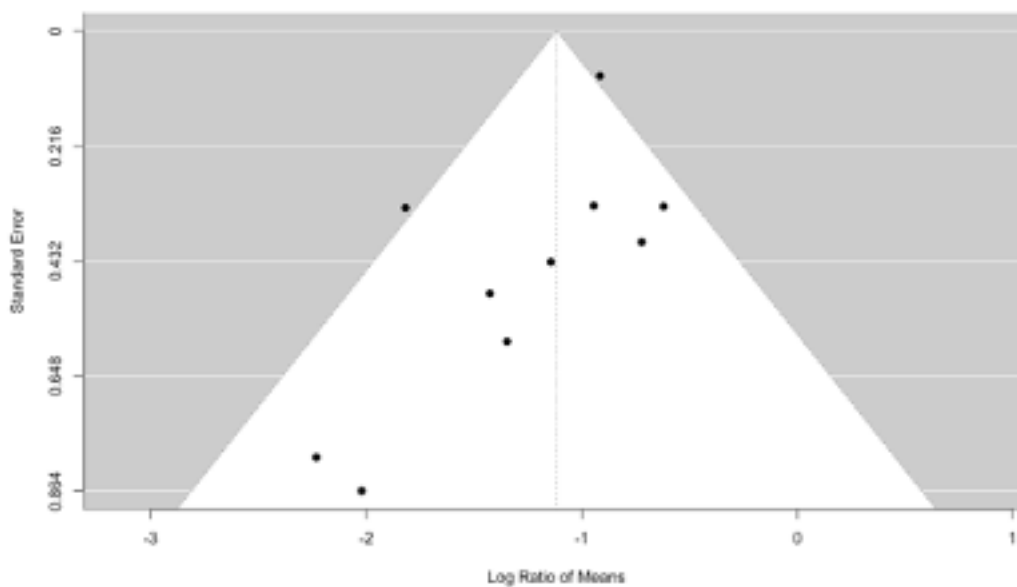
### Test d'homogénéité des variances :

- Test de Cochran Q :  $Q = 13.81718$  p-value = 0.1289789
- Indicateur  $I^2$  : 38.29543 %

Bien que la p-value du test Q ne soit pas significative, la statistique  $I^2$  indique une hétérogénéité modérée.

### Vérification du biais de publication :

- Diagramme en entonnoir :



- Test d'Enger :

Test d'asymétrie du diagramme en entonnoir :  $t = -1.9383$ ,  $df = 8$ ,  $p = 0.0886$

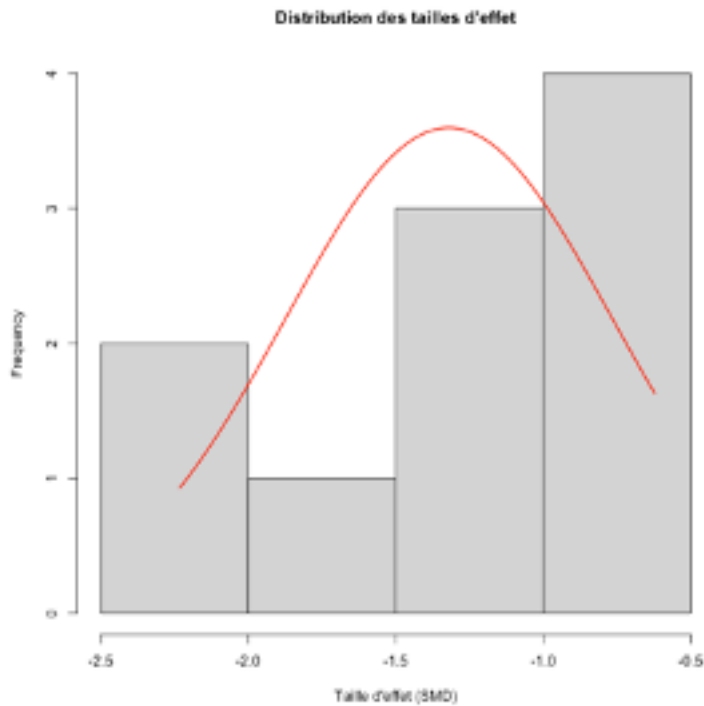
Estimation de la limite (quand l'erreur standard de l'ordonnée à l'origine (sei) tend vers 0) :  $b = -0.8181$  (CI : -1.0855, -0.5508)

L'estimateur de l'interception est négatif (-0.8181) et son intervalle de confiance (-1.0855 à -0.5508) ne contient pas zéro, ce qui pourrait suggérer une légère asymétrie. Cependant, cette asymétrie n'est pas statistiquement significative selon la p-value.

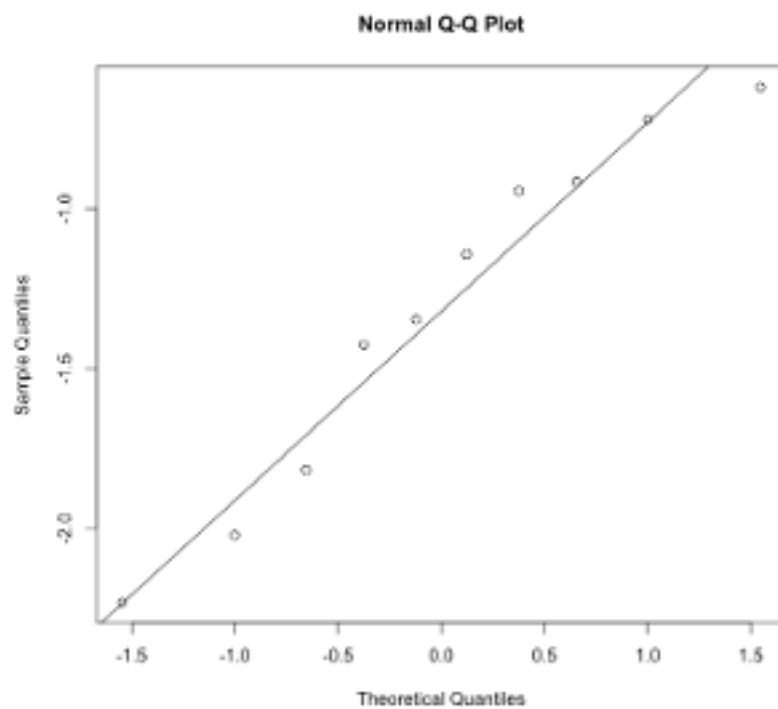
Un biais de publication négatif dans le contexte d'une méta-analyse signifie que les études avec des résultats négatifs ou des effets plus petits sont sous-représentées dans la littérature publiée.

### Vérification de la normalité des tailles d'effet :

- Histogramme de la distribution des tailles d'effet



- QQplot



- Test de Shapiro-Wilk :  $W = 0.9401021$   $p\text{-value} = 0.5541501$

L'histogramme indique quelques écarts par rapport à une distribution normale, notamment aux extrémités. Le Q-Q plot montre que les points s'écartent de la ligne de normalité, surtout aux extrémités. Cela suggère que les données peuvent avoir des écarts par rapport à une distribution normale, même si

ces écarts ne sont pas suffisamment importants pour être détectés par le test de Shapiro-Wilk avec une p-value de 0,55

Deux tests statistiques supplémentaires ont été réalisés pour vérification :

- Test de Kolmogorov-Smirnov :  $D = 0.15014$ , p-value = 0.9536
- Test d'Anderson-Darling :  $A = 0.26435$ , p-value = 0.6121

Les p-value non significatives de ces deux tests sont bien au-delà du seuil de 0.05, suggérant que les données sont suffisamment compatibles avec une distribution normale.

L'ensemble des tests statistiques (Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov et Anderson-Darling) indique qu'il n'y a pas de preuve significative de déviation par rapport à une distribution normale. Cependant, les visualisations (histogramme et Q-Q plot) montrent quelques écarts visuels, surtout aux extrémités.

En pratique, les tests statistiques suggèrent que les données peuvent être considérées comme normales pour la plupart des applications. Les écarts observés dans les visualisations peuvent être dus à la variabilité inhérente des données ou à la taille de l'échantillon. Pour la méta-analyse, nous pouvons continuer en supposant que les données suivent une distribution normale, mais en gardant à l'esprit les légères déviations observées visuellement.

**En résumé**, les tests préliminaires effectués afin de déterminer la faisabilité d'une méta-analyse sur notre jeu de données ont révélé une hétérogénéité modérée mais non significative parmi les études incluses (Test Q,  $p = 0.13$ ;  $I^2 = 38.3\%$ ). Le test d'egger a indiqué une légère asymétrie concernant les biais de publication avec un intercept négatif ( $b = -0.82$ ), toutefois, cette asymétrie n'était pas significative, bien que tendancielle ( $p = 0.09$ ). Le test de Shapiro-Wilk a confirmé la normalité des tailles d'effet ( $W = 0.94$ ,  $p = 0.55$ ). De plus, la majorité des références bibliographiques incluses présentaient un risque de biais global faible (8 sur 10), ce qui renforce la validité interne de la méta-analyse. Deux références bibliographiques ont été évaluées avec un risque de biais global moyen. Au regard de ces résultats, il a été conclu que la réalisation d'une méta-analyse était envisageable, tout en gardant à l'esprit les légers écarts aux hypothèses et le déséquilibre des données.