

## Projet Recherche Innovation 2025-2026

# Bridages chiroptérologiques : Optimiser production d'énergie éolienne et protection de la biodiversité



Photographie du parc éolien de la Croix de Chalais (@ JP Energie Environnement)

# **Bridages chiroptérologiques : Optimiser production d'énergie éolienne et protection de la biodiversité**

**Etat de l'art des pratiques relatives à la mesure  
d'arrêt des éoliennes pour limiter les risques de  
mortalité de chauves-souris**

**Directeur de recherche :  
Francis ISSELIN**

**Auteure :  
Manon LAMBERT**

**2025-2026**

# AVERTISSEMENT

---

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

# FORMATION PAR LA RECHERCHE, PROJET RECHERCHE INNOVATION EN GENIE DE L'AMENAGEMENT ET DE L'ENVIRONNEMENT

---

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet recherche innovation (PRI) situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

**Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.**

# SOMMAIRE

---

<b>Avertissement.....</b>	<b>2</b>
<b>Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement.....</b>	<b>3</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>4</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>8</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>9</b>
CONTEXTE D'ETUDE .....	9
OBJECTIF DU RAPPORT .....	12
METHODOLOGIE DE COLLECTE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES .....	12
<b>Activité et vulnérabilité des chiroptères face à l'éolien .....</b>	<b>13</b>
LES CHIROPTERES, DES ESPECES CLE DE VOUTE FORTEMENT MENACEES .....	13
LES CHIROPTERES, ESPECES A L'ACTIVITE ENCORE INCERTAINE .....	16
LES CHIROPTERES, ESPECES A LA SENSIBILITE MARQUEE AUX EOLIENNES .....	21
LES BESOINS EN MAITRISE D'IMPACTS .....	25
<b>L'évaluation des risques pour le dimensionnement des bridages éoliens .....</b>	<b>26</b>
SUIVIS D'ACTIVITE .....	26
SUIVIS DE MORTALITE.....	35
<b>Les bridages éoliens, clés d'un équilibre entre préservation des chiroptères et productivité des parcs.....</b>	<b>39</b>
ETAT DES LIEUX DES MESURES DE BRIDAGES ET DE LEUR DEVELOPPEMENT EN FRANCE .....	40
MISES EN DRAPEAU DES PALES .....	42
BRIDAGES STATIQUES.....	43
BRIDAGES PREDICTIFS.....	48
BRIDAGES DYNAMIQUES .....	52
BRIDAGES MIXTES .....	52
SYNTHESE ET PERSPECTIVES .....	55
POINTS DE CE RAPPORT A PRENDRE EN CONSIDERATION .....	57
<b>Conclusion .....</b>	<b>58</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>60</b>

# LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Chronologie comparée du développement éolien (histogramme), de la conscience de ses effets sur la biodiversité (dates en noir) et de sa prise en compte dans le cadre réglementaire avec des prescriptions techniques (dates en bleu) (Beucher, 2020).....	10
Figure 2 : Variations du temps de vol au-dessus de 25 mètres d'altitude par espèce de chauves-souris (Kerbiriou et al., 2013).....	14
Figure 3 : Variations de l'activité chiroptérologique en fonction de la vitesse de vent - Indice d'activité mesuré sur trois sites du Nord-Ouest de la France (Lury, Tremblay, Gacilly), en comparaison avec une « répartition de Poisson » (Kerbiriou et al., 2013).....	16
Figure 4 : Variations du nombre de contacts enregistrés (en pourcentage cumulatif) en fonction de la vitesse de vent pour plusieurs espèces de chiroptères (Behr et al., 2017).....	16
Figure 5 : Variations de l'activité chiroptérologique en fonction de la température (Kerbiriou et al., 2013).....	17
Figure 6 : Probabilité de présence de chauves-souris à partir de modèles linéaires mixtes généralisés et d'intervalles de confiance à 95 % en fonction de variables significatives liées au paysage (vert), aux éoliennes (gris), ainsi qu'aux conditions météorologiques et à la date (bleu), calculée sur une base de données d'activité chiroptérologique, récoltées sur 64 parcs éoliens français sur 2017-2020, issues d'enregistreurs Batmode (Barré et al., mars 2023).....	18
Figure 7 : Illustration du phénomène d'attraction/répulsion dans le cadre de la proximité des éoliennes avec des haies ( <sup>1</sup> Barré et al., 2021).....	21
Figure 8 : Synthèse des cas de mortalités de chauves-souris par éoliennes connus en Europe des années 1990 à février 2025 - Base de données centrale de l'Observatoire national de protection des oiseaux de l'Office national de l'environnement du Brandebourg, Allemagne (Dürr, 2025).....	23
Figure 9 : Principaux types de risques éoliens sur les chauves-souris selon leur activité (Beucher, 2020).....	25
Figure 10 : Comparaison de la qualité d'enregistrement des cinq appareils testés à l'aide des rapports signal sur bruit calculés sur un échantillon de 10 séquences d'appels de chauves-souris (Barluet de Beauchesne et al., 2025).....	27
Figure 11 : Comparaison de la performance de détection des cinq appareils testés à travers la proportion de faux positifs par rapport au nombre total de fichiers (Barluet de Beauchesne et al., 2025).....	27
Figure 12 : Comparaison de la performance de détection des cinq appareils testés à travers le nombre d'enregistrements, exprimés en contacts de cinq secondes ou en minutes positives (Barluet de Beauchesne et al., 2025).....	28
Figure 13 : Comparaison de la performance de détection des cinq appareils testés à travers le nombre d'enregistrements exprimés en minutes positives pour chaque espèce détectée (Barluet de Beauchesne et al., 2025).....	28

Figure 14 : Histogramme de l'évolution temporelle des principales sources de données du processus de mise en place de bridages en France ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	29
Figure 15 : Mode de régulation engagé selon le type de suivi acoustique utilisé dans le cadre des études d'impact d'un nouveau projet éolien ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	29
Figure 16 : Pourcentage de variance expliquée par chaque variable pour chaque guildes selon quatre grands types de variables pour les trois guildes de chiroptères (Barré et Kerbirou, 2021).....	30
Figure 17 : Schéma de la zone devant être couverte par les microphones omnidirectionnels lors du suivi d'activité à hauteur de nacelle (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018).....	32
Figure 18 : Capture d'écran d'une vidéo brute où sont visibles deux chiroptères (Goutorbe et al., 2017).....	33
Figure 19 : Capture d'écran d'une vidéo analysée par SafeWind Chiro où sont détectés deux chiroptères (Goutorbe et al., 2017).....	33
Figure 20 : Temps de détection en secondes en fonction de la vitesse de vent en mètres par seconde (Goutorbe et al., 2017).....	34
Figure 21 : Temps de détection en secondes en fonction de la température en degrés (Goutorbe et al., 2017).....	34
Figure 22 : Temps de détection en secondes en fonction de la plage horaire par périodes de une heure (Goutorbe et al., 2017).....	34
Figure 23 : Période sur laquelle doivent être effectués le suivi de mortalité et le suivi d'activité des chiroptères en fonction des enjeux (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018).....	36
Figure 24 : Schéma de la surface-échantillon à prospecter, avec une largeur de transects de 5 à 10 mètres (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018).....	36
Figure 25 : Répartition régionale des moyennes et écarts types de nombre de passages de suivi de la mortalité en France, toutes périodes confondues jusqu'en 2020 ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	37
Figure 26 : Proportions de parcs régulés, non régulés ou de statut inconnu en France à gauche, et proportions en excluant les parcs sans information à droite ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	40
Figure 27 : Années de première mise en place d'une mesure de bridage sur les parcs éoliens de France métropolitaine ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	40
Figure 28 : Proportions et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre de suivis d'impacts de parcs exploités, avec 559 dossiers de suivis d'impacts concernant 406 parcs éoliens, soit environ un tiers du parc éolien national ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	41
Figure 29 : Typologie des principales causes d'écarts constatés entre le paramétrage et la mise en œuvre effective des bridages ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	41
Figure 30 : Evolution du taux de mortalité avant et après mise en place d'un bridage, en fonction du seuil moyen de vitesse de vent ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	44
Figure 31 : Evolution de l'impact par mortalité avant et après mise en place d'un bridage, en fonction du seuil moyen de vitesse de vent ( <sup>2</sup> Albespy et al., 2023).....	44

Figure 32 : Paramètres de bridage statique sur un parc français de 4 éoliennes en 2024 (JP Energie Environnement, 2025).....	45
Figure 33 : Chevauchement entre l'activité des chauves-souris (pourcentage de passage total par les chauves-souris dans les catégories à 1 m/s ; ntotal = 9287 passages de chauves-souris) et la production d'énergie nette (kW) pour certaines éoliennes en fonction de la vitesse de vent (Adorf et al., 2015).....	46
Figure 34 : Effet (rapport logarithmique des moyennes transformé en pourcentage de diminution) de la réduction du nombre total de décès de chauves-souris par bridages sur seuil de vitesse de vent, étudié sur les données de 8 parcs aux Etats-Unis entre 2009 et 2020 (Frick et al., 2021).....	46
Figure 35 : Pourcentage de réduction des décès de chauves-souris (toutes espèces confondues) par bridages avec différents seuils de vitesse de vent en abscisses (Frick et al., 2021).....	47
Figure 36 : Exemples de variations d'activité chiroptérologique par dixième de nuit en haut, et exemples de vitesses de vent de démarrage optimisées par un algorithme de bridage pour chaque mois et chaque dixième de nuit ( <sup>2</sup> Ghanem et al., 2021).....	48
Figure 37 : Méthode d'évaluation de l'efficacité des deux types de bridages étudiés, avec le bridage statique représenté en noir et le bridage prédictif représenté en bleu (Barré et al., mars 2023).....	49
Figure 38 : Efficacité des deux types de bridages étudiés pour les trois guildes, respectivement LRE, MRE et SRE, avec le bridage statique (sur unique seuil de vitesse de vent en haut et sur seuils de vitesse de vent et de température en bas) représenté en noir et le bridage prédictif représenté en bleu (Barré et al., mars 2023).....	49
Figure 39 : Relation entre la proportion de chauves-souris protégées et la proportion de rotations de pales perdues pour quatre méthodes de bridage et quatre pas de temps différents (Barré, 2025).....	50

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Présentation des 36 espèces de chauves-souris présentes en France (Bollmann et al., 2014 ; Bas et al., 2017 ; Comité français de l'UICN, 2017 ; Barré et Kerbiriou, 2021 ; Barbaro et al., 2023 ; Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères, 2025).....	15
Tableau 2 : Mesures de facteurs environnementaux supposés influencer l'activité des chiroptères, opérées sur quatre pays et périodes de temps distincts (Amorim et al., 2012 ; Boonman et al., 2013 ; Kerbiriou et al., 2013 ; Adorf et al., 2015).....	19
Tableau 3 : Mesures de l'activité acoustique chiroptérologique moyenne, en minutes positives d'activité/nuit, opérées sur deux pays et périodes de temps distincts (Haquart, 2013 ; Bas et al., 2017).....	19
Tableau 4 : Activité chiroptérologique selon l'altitude, étudiée sur deux pays et périodes de temps distincts (Aschwanden et al., 2015 ; Biedermann et al., 2015).....	24
Tableau 5 : Efficacité de différents modèles de bridages statiques définis par l'OPRECH ( <sup>1</sup> Alberspy et al., 2023).....	43
Tableau 6 : Efficacité de différents modèles de bridages statiques (en comparaison avec des éoliennes non bridées), opérés sur six pays et huit périodes de temps distincts (Arnett et al., 2011 ; Hubert et Rico, 2016 ; Bennett et al., 2022 ; AntoniĆ et al., 2023 ; Frick et al., 2024 ; JP Energie Environnement, 2025).....	45
Tableau 7 : Efficacité de différents modèles de bridages mixtes ProBat (en comparaison avec des éoliennes non bridées), opérés sur un pays et une période de temps (Hubert et Rico, 2016).....	53
Tableau 8 : Efficacité de différents modèles de bridages mixtes Chirotech (en comparaison avec des éoliennes non bridées), opérés sur deux pays et trois périodes de temps distincts (Kerbiriou et al., 2013 ; Kerbiriou et al., 2014 ; Hubert et Rico, 2016).....	54
Tableau 9 : Tableau récapitulatif des différents types de bridages, de leurs paramètres, ainsi que de leurs échelles d'efficacité et de perte de production.....	55
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des différents types de bridages et de leurs principaux avantages et limites.....	56

## CONTEXTE D'ETUDE

« Le monde fait face à une crise de la biodiversité sans précédent » (Abell et al., 2014 ; Barnosky et al., 2015). Le changement climatique et l'importante perte de biodiversité observés à ce jour sont deux phénomènes interdépendants (Barlow et al., 2021), ce qui implique que ces deux crises ne peuvent être abordées et résolues séparément. Or, les objectifs et leviers d'actions mis en place contre celles-ci peuvent se montrer contradictoires.

Dans un objectif d'atténuation du changement climatique anthropique, les pays et nations du monde entier encouragent une stratégie mondiale de transition des énergies fossiles vers les énergies renouvelables. La prise de conscience croissante de l'enjeu climatique amène les politiques nationales et européennes à se montrer de plus en plus ambitieuses dans leurs aspirations de production et de consommation d'énergies renouvelables (l'on peut citer, entre autres, la Loi d'orientation sur l'énergie de 2005, le Grenelle de l'Environnement de 2008, la Loi de transition énergétique pour la croissance verte de 2015, le Plan climat de 2017, etc.). Pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 40% d'ici 2030 puis de 75% d'ici 2050, la production d'électricité par les énergies renouvelables devra être multipliée par deux à l'horizon 2030 (Beucher, 2020).

Cette transition énergétique, considérée comme l'un des principaux leviers pour réduire le émissions de gaz à effet de serre (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), n'est cependant pas sans conséquence sur l'environnement, et impacte elle aussi négativement la biodiversité (Gibson et al., 2017 ; Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2021), créant ainsi un dilemme entre production énergétique et protection de l'environnement.

Le déploiement rapide de l'énergie éolienne ces dernières décennies, au cœur de la politique nationale de lutte contre le changement climatique (Beucher, 2020), est un facteur clé de la transition vers un mix énergétique renouvelable. Au 1<sup>er</sup> janvier 2025, le parc éolien terrestre français représentait 23,5 GW, avec une production d'électricité de 43 TWh en 2024, soit de 9,6% de la consommation électrique française (France renouvelables, 2025).

Mais ce déploiement impacte significativement la faune volante, notamment les chiroptères, créant ce que l'on appelle un « green-green dilemma » (<sup>1</sup>Ghanem et al., 2021). Ces derniers présentent « des réponses très contrastées aux éoliennes », se retrouvant d'une part attirés par ces infrastructures et alors sous un risque important de collision, et subissant d'autre part des pertes d'habitats par évitement, réponses dont les mécanismes restent encore largement peu connus malgré l'évolution rapide des structures et des densités des éoliennes (Barré et al, novembre 2023).

Si l'énergie éolienne a vu le jour dans les années 80 aux Etats-Unis, dans les années 90 en Europe et finalement dans les années 2000 en France, ses impacts sur les chiroptères n'ont été perçus que très tardivement, et « restent globalement mal suivis et sous-encadrés à l'échelle nationale et internationale » (Beucher, 2020). En effet, la prise en compte des effets de l'éolien sur la biodiversité fut loin d'être immédiate : il faudra attendre le début des années 2000 pour que les premières mortalités de chauves-souris, par collision puis plus tard par barotraumatisme, soient constatées (Figure 1) et le milieu des années 2000 pour que l'on reconnaisse en France la nécessité d'intégrer ce taxon dans les études d'impact et les suivis (ADEME et Ministère de l'Ecologie et du Développement durable, 2004 ; André, 2009).

Les toutes premières mesures de régulation ne furent testées en France qu'en 2010, suivies à la fin des années 2010 par les premières mentions d'effets parallèles tel que la perte d'habitat autour des éoliennes (Barré et al., 2018). Il est tout de même important de souligner que la considération tardive des chauves-souris dans la production éolienne s'explique en partie par les difficultés rencontrées lors de l'étude de ces espèces, demandant un développement de l'écologie acoustique et des adaptations techniques pour le suivi de leur activité à hauteur de rotor notamment (Beucher, 2020). Encore aujourd'hui, face au manque global de données sur les chiroptères, l'estimation des effectifs de chaque espèce, la démographie et l'état de conservation des populations, tout comme l'impact de l'éolien sur ces dernières, sont encore mal connus (France Renouvelables, 2024 ; Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

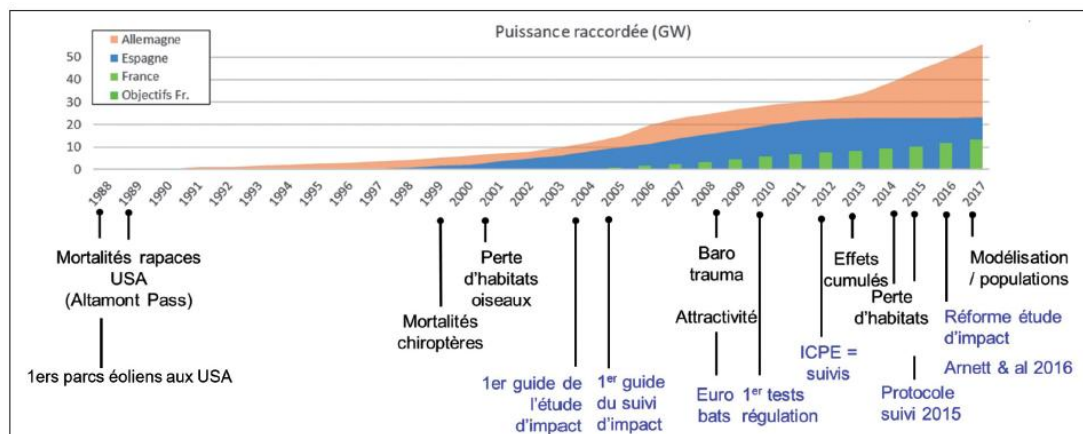


Figure 1 : Chronologie comparée du développement éolien (histogramme), de la conscience de ses effets sur la biodiversité (dates en noir) et de sa prise en compte dans le cadre réglementaire avec des prescriptions techniques (dates en bleu) (Beucher, 2020)

Désormais, la préoccupation sur les effets cumulatifs de l'énergie éolienne sur les chiroptères est partagée mondialement. Les infrastructures non régulées sont à l'origine de taux de mortalités de 5 à 11 individus/MW/an en Europe et Amérique du Nord. Ces taux impliquent le décès de centaines de milliers de chiroptères par pays sur seulement une année, comptant entre 600 000 et 900 000 mortalités/an en Amérique du Nord (Rugge et al., 2003 ; Hayes, 2013 ; Arnett et Baerwald, 2013), et 200 000 à 250 000 mortalités/an dans les pays européens à travers l'exemple de l'Allemagne (Adorf et al., 2015).

Cette préoccupation varie « selon les espèces, leur sensibilité et l'état de leur population » qui, comme mentionné plus tôt, sont généralement mal connus (Beucher, 2020). De plus, les impacts varient très fortement au sein d'une même région, parfois même au sein d'un même parc, d'une éolienne à l'autre : l'anticipation des conséquences de l'installation d'un parc reste donc un défi majeur (<sup>2</sup>Barré et al., 2021).

Le Muséum national d'Histoire naturelle a exposé la perte de 46% des populations de chauves-souris françaises sur la période 2006-2014, perte particulièrement marquée pour les pipistrelles et les noctules, deux des familles les plus sensibles à la mortalité liée aux éoliennes (Azam et al., 2015 ; Haquart et al., 2015), même s'il faut considérer que les liens de cause à effet sont difficilement vérifiable au vu du manque de synthèse objective des mortalités constatées et/ou estimées sur l'ensemble du pays. 43% des chauves-souris françaises auraient disparu en seulement 15 ans (France Renouvelables, 2024). Néanmoins, des signes de rétablissement sont observés depuis plus de 10 ans, avec des tendances démographiques récentes globalement positives, à la hausse ou stables pour quelques espèces comme le Molosse de Cestoni ou l'Oreillard gris (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

Certains modèles de projections statistiques des impacts de l'éolien sur les populations de chiroptères évoquent même la disparition de plusieurs espèces à moyen terme en l'absence de solutions de réduction de risques (Rydell et Wickman, 2015 ; Baerwald et al., 2017). La poursuite du développement de l'éolien terrestre sur l'ensemble de la planète se montre alors grandement préoccupante pour la viabilité des espèces les plus sensibles, tant que les risques qu'elles encourent ne sont pas réduits immédiatement et à large échelle par des mesures développées à cet effet.

Et lorsque ces mesures existent, leur efficacité reste variable, car elle « dépend de la rigueur technique des études d'impact et suivis d'impacts et notamment de la qualité des suivis d'activité en continu des chauves-souris à hauteur de nacelle, de la pression des suivis de mortalité, du bon dimensionnement et de la mise en œuvre fine et proportionnée des mesures de régulation » (Beucher, 2020).

Le bridage s'impose comme une mesure de réduction efficace pour réduire les mortalités, conséquentes et parfois significatives, des chiroptères, bien que cette efficacité puisse se montrer variable et jamais totale (Adams et al., 2021 ; Frick et al., 2021). En effet, l'arrêt des éoliennes lors des pics d'activité des chauves-souris permet de préserver les populations de celles-ci, et cette solution se montre aussi économiquement viable, car la production électrique reste faible au cours des périodes de forte activité chiroptérologique, allant de 0,5% à 2,5% de la production annuelle si les bridages sont correctement optimisés (Kerbiriou et al., 2014). Les bridages sont basés sur les périodes et les conditions météorologiques les plus critiques (c'est-à-dire les conditions favorables aux chauves-souris), ainsi que sur la sensibilité des espèces.

Les bridages sont ainsi au cœur de la démarche ERC (Eviter, Réduire, Compenser) suivie par les opérateurs éoliens tout au long du cycle de vie de leurs projets. En effet, ces derniers sont dans l'obligation d'évaluer et d'intégrer, à toutes les phases de développement d'un parc, les impacts générés par ce dernier sur la biodiversité. Des études d'impact sont réalisées avant toute implantation de parcs éoliens, et mènent à la proposition puis à l'application obligatoire (après obtention d'une autorisation environnementale) de mesures d'évitement, de réduction et de compensation.

Si l'évitement doit être privilégié, il semble qu'en pratique sa priorité stratégique est souvent ignorée : la directive ou accord PNUE/EUROBATS de 1994, ratifié par 37 pays dont la France depuis 1995, a publié en 2008 des directives européennes et internationales portant notamment sur la nécessité cruciale des mesures d'évitement dans les projets éoliens (Barré et al., novembre 2022). Cet accord recommande en particulier d'implanter toute éolienne à au moins 200 mètres en bout de pale des lisières ligneuses, afin de réduire les risques de mortalité de chauves-souris, l'augmentation du couvert arboré autour des éoliennes et la distance aux habitats ligneux étant parmi les principaux facteurs de risque de collision (Bach et al., 2010 ; Jones et al., 2013 ; Bas et al., 2019). En revanche, une étude de 2021 mis en évidence l'absence d'application de ces recommandations : à titre d'exemple, sur les 8066 éoliennes installées jusqu'en 2020 en France, 56% des infrastructures n'étaient pas conformes aux directives PNUE/EUROBATS, et 3% des installations se trouvaient même implantées en plines forêts (Barré et al., novembre 2022).

Face à des mesures d'évitement faibles ou limitées par des facteurs d'implantation selon les cas, les mesures de réduction se montrent par conséquent fondamentales pour limiter les impacts écologiques de l'énergie éolienne. Les bridages chiroptérologiques permettent une réduction de ces impacts tout au long de la phase opérationnelle des parcs, généralement sur une période d'une vingtaine d'années.

## **OBJECTIF DU RAPPORT**

Dans cette problématique de conciliation entre conservation de la biodiversité et production d'énergie, nous pouvons nous demander jusqu'à quelle mesure les bridages des éoliennes se montrent efficaces dans la réduction des mortalités de chiroptères.

Ce rapport se définit ainsi comme un état de l'art des pratiques relatives aux mesures d'arrêts des éoliennes de la filière française principalement, mais aussi à une échelle européenne et mondiale. L'objectif sera ici de présenter les différents types de bridages développés ou installés aujourd'hui (bridages statiques, bridages prédictifs, bridages dynamiques, bridages mixtes), d'éclairer leur efficacité et d'offrir une comparaison entre ces derniers.

Cette présentation inclura les critères d'arrêt et les perspectives d'évolution de ces systèmes, mais également les biais méthodologiques (suivis d'activité et de mortalité chiroptérologique, collecte de données, etc.) rencontrés lors de leur optimisation. Enfin, il sera pris en compte tout au long de cet écrit la volonté de recherche des producteurs d'un équilibre entre protection des espèces et impact économique.

## **METHODOLOGIE DE COLLECTE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES**

Cet état de l'art compile des publications et articles scientifiques, ainsi que des rapports et des sites internet de sociétés et associations reconnues, pour la grande majorité accessibles au public en ligne. La recherche bibliographique s'est étendue jusqu'à novembre 2025. Les bases de données et moteurs de recherche Google Scholar, ResearchGate et ScienceDirect ont été utilisés pour rechercher les documents précédemment cités. Les recherches comprenaient entre autres les mots clés suivants : « bridages », « éolien », « énergie éolienne », « turbines », « chiroptères », « activité », « mortalité », « impacts », « réduction » (recherchés aussi bien en français qu'en anglais). Plusieurs de ces termes furent combinés entre eux. Les recherches ne furent pas limitées dans le temps, les documents étant sélectionnés quelle que soit leur date de publication, bien que portant dans la mesure du possible sur des écrits récents, afin de réaliser un état de l'art le plus complet et à jour en fin 2025. La bibliographie fut enrichie par des échanges en face à face avec un chiroptérologue et des professionnels de la filière éolienne française, échanges qui menèrent à des recommandations et des partages de ressources scientifiques complémentaires (mise à disposition de documents ou partage de sites Internet). Une première lecture des documents (principalement l'introduction, la méthodologie et la conclusion) permit d'estimer leur pertinence pour la réalisation de cet écrit. Tous les documents non exclus furent par la suite étudiés dans leur intégralité puis analysés et synthétisés. Leur lecture apporta par ailleurs de nouvelles ressources supplémentaires, analysées et synthétisées à leur tour.

# ACTIVITE ET VULNERABILITE DES CHIROPTERES FACE A L'ÉOLIEN

---

## LES CHIROPTERES, DES ESPECES CLE DE VOUTE FORTEMENT MENACEES

A ce jour, en France métropolitaine, on dénombre 36 espèces de chauves-souris à l'écologie très différente (Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères, 2025).

Depuis les années 1950-1960, les populations de ces espèces ont fortement diminué, sous l'action des activités humaines. De nombreux plans et réglementations ont alors vu le jour pour limiter cet impact anthropique (Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères, 2025), et cela :

- à une échelle nationale, avec l'article L.411-1 du Code de l'Environnement depuis 1976, l'arrêté ministériel du 23 avril 2007 et son arrêté modificatif du 15 septembre 2012, et encore le Plan National d'Actions pour les Chiroptères de France établi par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire sur la période 2016-2025
- à une échelle européenne, avec la Directive européenne « Habitats-Faune-Flore » (CEE N°92/43)
- à une échelle internationale, avec la Convention de Bonn de 1979, la Convention de Berne de 1979, et encore l'Accord relatif à la conservation des populations de chauves-souris d'Europe plus connu sous le nom d'EUROBATS de 1991

Ces 36 espèces sont ainsi toutes strictement protégées dans les pays membres de la Directive Habitats de l'Union Européenne, qui sont sous l'obligation de mettre en place des mesures d'évitement des impacts éoliens sur ces populations (Barré et al., novembre 2022). En effet, les chiroptères sont fortement menacés, notamment par le développement éolien qui entraîne une mortalité directe de ceux-ci.

De nombreux facteurs contribuent également à la réduction de leurs populations, tels que la prédation par les chats domestiques, l'utilisation de produits chimiques, les collisions liées au trafic routier, l'urbanisation, la pollution lumineuse, la transformation de leurs habitats, la disparition ou modification de leurs gîtes et les dérangements causés lors des périodes de reproduction et d'hibernation (Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères, 2025 ; Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

« Si les collisions avec les éoliennes [...] représentent effectivement des causes de mortalité directe, le consensus scientifique s'accorde quoi qu'il en soit sur le fait que la destruction des habitats et la raréfaction des proies due aux pratiques agricoles intensives sont les principales menaces pour la survie des populations de chauves-souris » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Il n'est pas possible, au vu du manque de données collectées, d'estimer la mortalité, très largement sous-estimée par ailleurs, pour chacune des causes décrites précédemment.

L'effet réel de l'énergie éolienne sur les populations de chauves-souris ne peut être distingué des autres menaces : « il apparaît donc très difficile de quantifier le poids de l'éolien sans connaître celui des autres sources d'impacts » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

De plus, les menaces pesant sur les chauves-souris ont un impact conséquent sur les écosystèmes : insectivores, ces dernières participent à la lutte biologique contre les insectes nuisibles s'attaquant aux cultures humaines, agissant alors comme d'excellents insecticides naturels (Fondation pour la Nature et l'Homme, 2025). Leur régime alimentaire participe aussi à limiter la transmission de possibles maladies à l'Homme (en particulier en contribuant à la lutte contre la prolifération des moustiques). Les chauves-souris jouent un rôle écologique essentiel au bon fonctionnement des écosystèmes, et s'imposent comme indicatrices de bonne santé écologique des milieux (Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères, 2025).

L'ensemble des espèces de chauves-souris françaises utilisent l'écholocation comme outil de déplacement et de chasse : les individus émettent un signal acoustique (dénommé « appel » ou « impulsion » dans la littérature scientifique), signal qui se voit modifié par les obstacles rencontrés et renvoyé aux individus. Ces derniers peuvent alors déterminer la localisation de ces obstacles et leur nature, en comparant les sons réfléchis avec les signaux originaux (Denzinger et al., 2003). Les signaux acoustiques sont émis sous la forme d'ultrasons, c'est-à-dire de fréquences inaudibles par l'oreille humaine, supérieures ou égales à 20 kHz (Barataud, 2015). La détection acoustique par ultrasons et l'enregistrement de ces derniers est aujourd'hui au cœur de l'étude des chauves-souris, « permettant de suivre leur activité mais aussi de distinguer les différentes espèces présentes sur un site donné » (Barataud, 2015).

On peut répartir les espèces de chauves-souris dans trois groupes, ou guildes, selon leur comportement de vol (Barré et Kerbiriou, 2021), avec :

- les espèces volant haut en milieu ouvert, appelées « écholocatrices à longue portée » (connues sous l'appellation « LRE » pour « Long-Range Echolocators »)
- les espèces volant en lisière en milieu ouvert, appelées « écholocatrices à moyenne portée » (connues sous l'appellation « MRE » pour « Mid-Range Echolocators »)
- les espèces volant en milieu encombré, proche de la végétation, appelées « écholocatrices à courte portée » (connues sous l'appellation « SRE » pour « Short-Range Echolocators »)

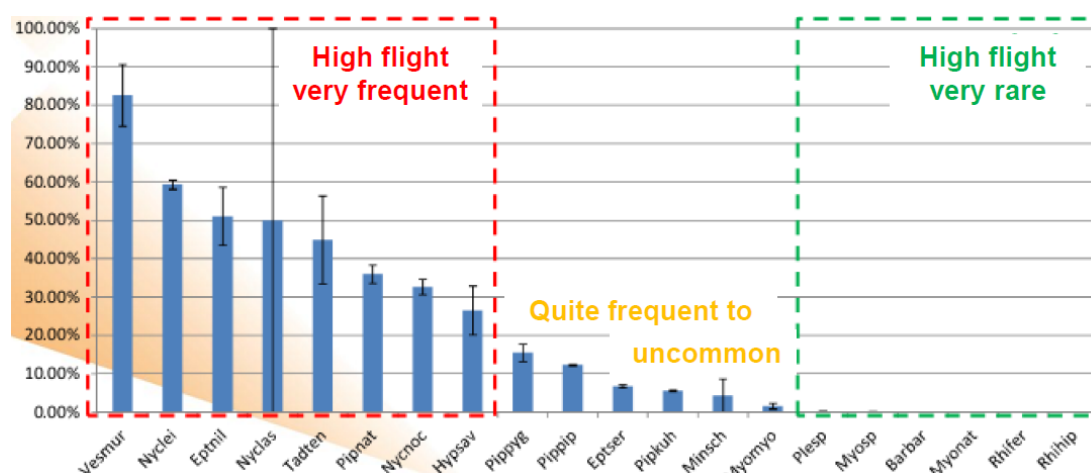


Figure 2 : Variations du temps de vol au-dessous de 25 mètres d'altitude par espèce de chauves-souris (Kerbiriou et al., 2013)

Le comportement de vol des espèces (Figure 2) est fortement corrélé à leur sensibilité aux éoliennes : les espèces de la guildes LRE sont les plus sensibles aux risques de collision (Barré et al., 2021), suivies par une part importante des espèces de la guildes MRE (Tableau 1), puisque les individus peuvent se retrouver à hauteur de pale. Les espèces de la guildes SRE, arboricoles et forestières, sont quant à elles peu sensibles à ces installations, volant presque exclusivement en-dessous des pales.

Tableau 1 : Présentation des 36 espèces de chauves-souris présentes en France (Bollmann et al., 2014 ; Bas et al., 2017 ; Comité français de l'UICN, 2017 ; Barré et Kerbiriou, 2021 ; Barbaro et al., 2023 ; Société Française pour l'Étude et la Protection des Mammifères, 2025)

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut sur la liste rouge de l'UICN	Comportement de vol	Indice de susceptibilité de collision aux éoliennes
Minioptère de Schreibers	<i>Miniopterus schreibersii</i>	VU	MRE	125
Molosse de Cestoni	<i>Tadarida teniotis</i>	NT	LRE	815
Rhinolophe euryale	<i>Rhinolophus euryale</i>	LC	SRE	NA
Grand rhinolophe	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	LC	SRE	19
Petit rhinolophe	<i>Rhinolophus hipposideros</i>	LC	SRE	8
Rhinolophe de Méhely	<i>Rhinolophus mehelyi</i>	CR	SRE	NA
Barbastelle d'Europe	<i>Barbastella barbastellus</i>	LC	SRE	19
Sérotine de Nilsson	<i>Eptesicus nilssonii</i>	DD	LRE	2500
Sérotine commune	<i>Eptesicus serotinus</i>	NT	LRE	287
Vespère de Savi	<i>Hypsugo savii</i>	LC	MRE	833
Murin d'Alcathoe	<i>Myotis alcathoe</i>	LC	SRE	NA
Murin de Bechstein	<i>Myotis bechsteinii</i>	NT	SRE	NA
Petit murin	<i>Myotis blythii</i>	NT	SRE	3
Murin de Brandt	<i>Myotis brandtii</i>	LC	SRE	NA
Murin de Capaccini	<i>Myotis capaccinii</i>	NT	SRE	NA
Murin cryptique	<i>Myotis crypticus</i>	NE	SRE	NA
Murin des marais	<i>Myotis dasycneme</i>	EN	SRE	NA
Murin de Daubenton	<i>Myotis daubentonii</i>	LC	SRE	NA
Murin d'Escalera	<i>Myotis escaleraei</i>	VU	SRE	NA
Murin à oreilles échancrées	<i>Myotis emarginatus</i>	LC	SRE	NA
Grand murin	<i>Myotis myotis</i>	LC	SRE	204
Murin à moustaches	<i>Myotis mystacinus</i>	LC	SRE	NA
Murin de Natterer	<i>Myotis nattereri</i>	LC	SRE	NA
Murin de Corse	<i>Myotis nustrale</i>	CR	SRE	NA
Murin du Maghreb	<i>Myotis punicus</i>	VU	SRE	NA
Grande noctule	<i>Nyctalus lasiopterus</i>	VU	LRE	12,755
Noctule de Leisler	<i>Nyctalus leisleri</i>	NT	LRE	5155
Noctule commune	<i>Nyctalus noctula</i>	VU	LRE	2783
Pipistrelle de Kuhl	<i>Pipistrellus kuhlii</i>	LC	MRE	411
Pipistrelle de Nathusius	<i>Pipistrellus nathusii</i>	NT	MRE	1991
Pipistrelle commune	<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	NT	MRE	273
Pipistrelle pygmée	<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	LC	MRE	532
Oreillard roux	<i>Plecotus auritus</i>	LC	SRE	14
Oreillard gris	<i>Plecotus austriacus</i>	LC	SRE	14
Oreillard montagnard	<i>Plecotus macrobullaris</i>	VU	SRE	14
Sérotine bicolore	<i>Vespertilio murinus</i>	DD	LRE	81,678

En **bleu clair** les espèces de la famille des Minioptéridés, en **bleu** des Molossidés, en **bleu foncé** des Rhinolophidés et en **violet** des Vespertilionidés.

Le statut « NE » est l'acronyme de « Non évaluée », « DD » de « Données insuffisantes », « LC » de « Préoccupation mineure », « NT » de « quasi-menacée », « VU » de « Vulnérable », « EN » de « En danger » et « CR » de « En danger critique ».

23% des espèces de chauves-souris européennes sont actuellement considérées par l’UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) comme en danger ou vulnérables (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

## LES CHIROPTERES, ESPECES A L’ACTIVITE ENCORE INCERTAINE

L’activité des chauves-souris à proximité des éoliennes dépend d’un nombre important de facteurs.

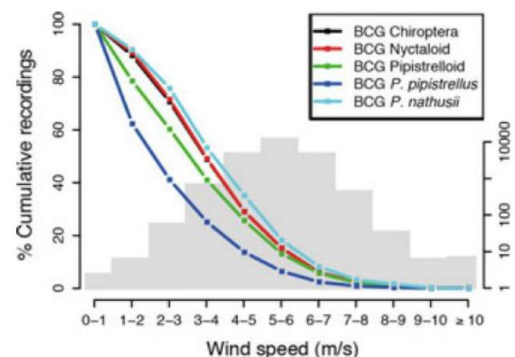
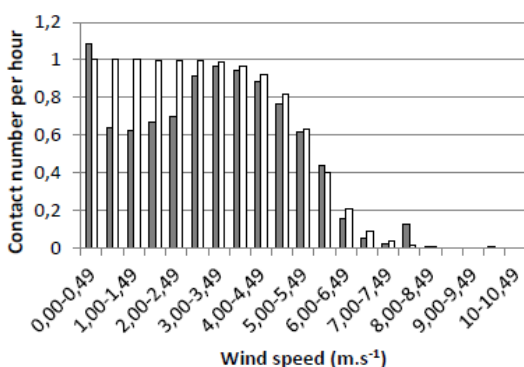
Si de multiples études ont été réalisées sur l’influence de différentes variables sur la présence et l’activité chiroptérologique, les résultats issus de celles-ci sont controversés. Ainsi, certains auteurs concluent à une corrélation positive entre la température et la présence des chauves-souris (Bonmort et al., 2022), tandis que d’autres ne considèrent pas ce paramètre comme facteur influant (Arnett, Horn et al., 2008). Une publication a par ailleurs démontré que la température ne semble pas affecter l’activité des chiroptères à une altitude à partir de 44 mètres au-dessus du sol (Arnett et al., 2015).

L’absence de consensus se retrouve lors de l’étude des vitesses de vent, dont l’influence apparaît tout aussi complexe à définir : certaines espèces de chauves-souris, telles que les noctules, sont peu influencées par cette variable (Bonmort et al., 2022). De plus, on observe une répartition différente des espèces et groupes d’espèces au cours de la nuit (Bonmort et al., 2022) : les espèces dites « crépusculaires » (pipistrelles, noctules et sérotines) sont remplacées petit à petit par des espèces dites « nocturnes » (barbastelles, murins et oreillards).

Ces trois variables (température, vitesse de vent et heure de la nuit), malgré l’absence de consensus scientifique à leur sujet, restent les variables les plus prises en compte et étudiées dans le contexte des bridages éoliens.

La majorité des publications sur les bridages éoliens (Bonmort et al., 2022) partent du principe que la température, la vitesse de vent et l’heure de la nuit influencent significativement l’activité chiroptérologique, avec :

- une influence négative de la vitesse de vent, se traduisant par un nombre de contacts de chiroptères plus faible lorsque la vitesse de vent augmente (Figures 3 et 4)



Figures 3 et 4 : A gauche, les variations de l’activité chiroptérologique en fonction de la vitesse de vent - Indice d’activité mesuré sur trois sites du Nord-Ouest de la France (Lury, Tremblay, Gacilly), en comparaison avec une « répartition de Poisson » (Kerbiriou et al., 2013).

A droite, les variations du nombre de contacts enregistrés (en pourcentage cumulatif) en fonction de la vitesse de vent pour plusieurs espèces de chiroptères (Behr et al., 2017).

- une influence positive de la température, se traduisant par un nombre de contacts de chiroptères plus important lorsque la température augmente (Figure 5)

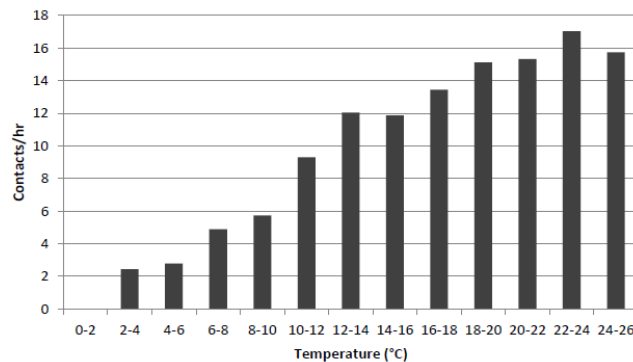


Figure 5 : Variations de l'activité chiroptérologique en fonction de la température (Kerbiriou et al., 2013)

- une influence négative de l'heure de la nuit, se traduisant par un nombre de contacts de chiroptères plus faible lorsque l'heure avance au cours de la nuit

D'un autre côté, plusieurs études affirment que les caractéristiques du paysage, les conditions météorologiques, la saisonnalité et le fonctionnement des éoliennes (Figure 6) influencent la présence et déterminent l'activité de toutes les espèces de chiroptères au niveau des nacelles (Barré et al., mars 2023) :

- concernant la composition et l'hétérogénéité du paysage, l'activité de la guildes LRE augmente avec l'indice de diversité de Shannon des parcelles d'habitats, l'activité de la guildes MRE augmente elle avec la densité croissante de richesse des parcelles d'habitats et le couvert forestier (Bas et al., 2019), et enfin la présence de la guildes SRE est positivement influencée par la densité de haies et de lisières

- concernant les conditions météorologiques, l'activité des guildes LRE et MRE est favorisée par l'augmentation des températures, alors que l'activité de toutes les guildes est supprimée par l'augmentation de la vitesse du vent et de la pluie cumulée. Il apparaît intéressant de mentionner que les guildes LRE et MRE présentent « une certaine tolérance aux conditions météorologiques défavorables, avec une proportion non négligeable d'activité restante dans ces conditions », avec une faible activité entre 12% et 9% respectivement pour une vitesse de vent de 8 m/s, et de 7% et 2% respectivement pour une température sous les 10°C (Barré et al., mars 2023).

- concernant la saisonnalité, l'activité des guildes LRE et MRE augmente entre janvier et août, et diminue de septembre à décembre, avec un pic d'activité en août qui se traduit en pic de mortalité sur les parcs éoliens au cours de cette période (Arnett, Brown et al., 2008 ; Bulling et al., 2015). Le cycle biologique des chauves-souris explique ces observations (Salaun L., 2025, Comm. Pers. ; Société Française pour l'Etude et la Protection des Mammifères, 2025) : en hiver, les chiroptères sont en hibernation (absence d'activité), avant de se réveiller au printemps lorsque les températures remontent (faible activité), de mettre bas et d'élever les petits en été (moyenne à forte activité) et de migrer et se reproduire en automne, soit le swarming ou essaimage (moyenne à forte activité). Néanmoins, une activité hivernale peut être observée (novembre à mars), avec des individus pouvant quitter ponctuellement le gîte sur des déplacements très courts (Choi et al., 2019). Cette activité dépend fortement de l'espèce, du type de gîte et des conditions climatiques locales : les hivers doux peuvent favoriser une activité tardive (novembre) et/ou précoce (février/mars).

- concernant le fonctionnement et les dimensions des éoliennes, la présence et l'activité de toutes les guildes sont réduites considérablement lorsque la vitesse moyenne de rotation des pales augmente, tandis que la hauteur de la nacelle et la taille du rotor n'exercent aucune influence

L'ensemble de ces facteurs est donc à prendre en compte dans l'étude de la variation d'activité chiroptérologique à hauteur de nacelle (Figure 6).

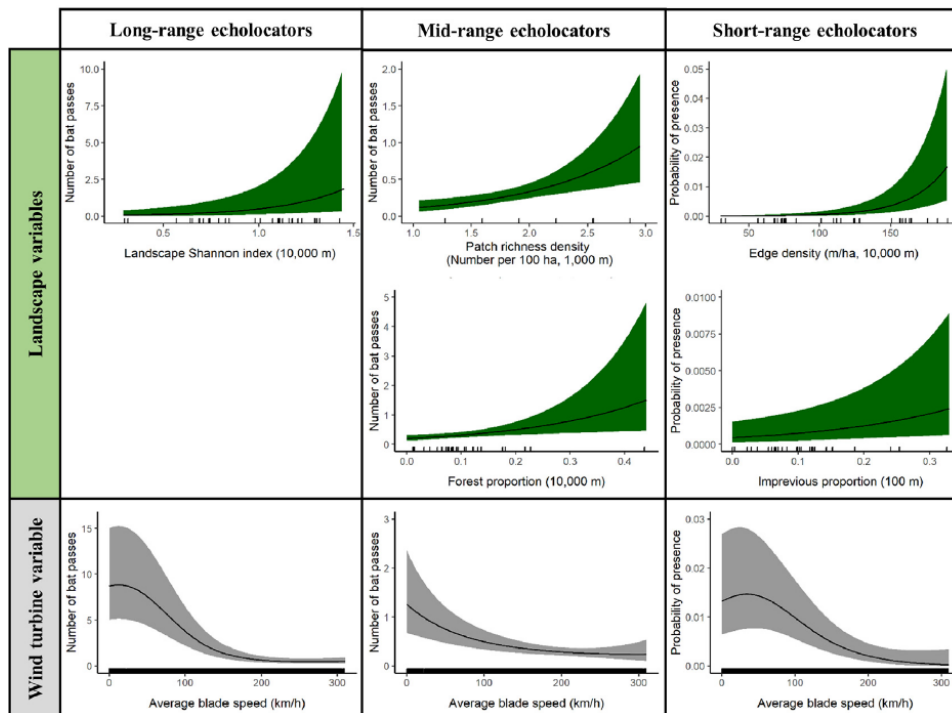
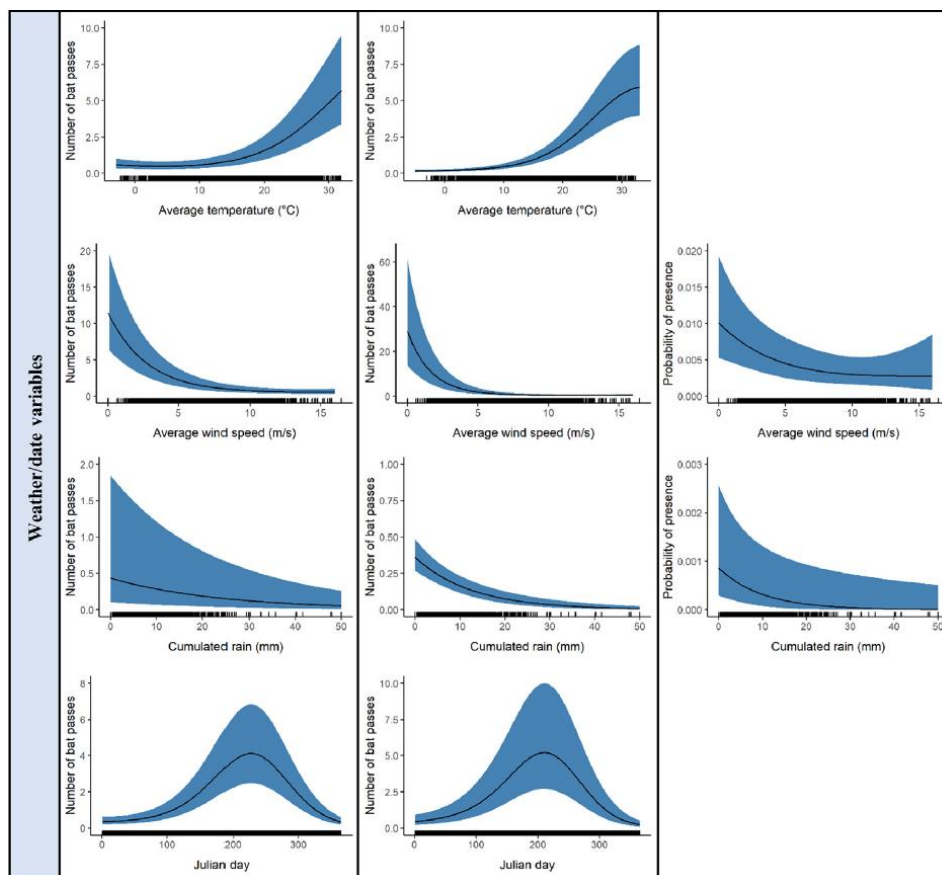


Figure 6 : Probabilité de présence de chauves-souris à partir de modèles linéaires mixtes généralisés et d'intervalles de confiance à 95 % en fonction de variables significatives liées au paysage (vert), aux éoliennes (gris), ainsi qu'aux conditions météorologiques et à la date (bleu), calculée sur une base de données d'activité chiroptérologique, récoltées sur 64 parcs éoliens français sur 2017-2020, issues d'enregistreurs Batmode (Barré et al., mars 2023)



On peut conclure de toutes ces observations que « l'ensemble des facteurs qui régissent l'activité des chiroptères ne sont pas indépendants les uns des autres mais bien souvent concomitants pour permettre des conditions optimales de vol et de chasse pour les chauves-souris » (Bonmort et al., 2022).

De nombreux chercheurs ont tenté de modéliser les comportements des chiroptères et leurs pics d'activité, dans l'optique de mieux concevoir le danger de mortalité sur les parcs éoliens. Le Tableau 2 regroupe quatre études, réalisées sur différentes régions et différentes périodes, illustrant le spectre de résultats obtenus lors des travaux de recherche sur les facteurs influençant l'activité chiroptérologique (simple illustration à titre d'exemple, loin de refléter complètement les diverses études sur le sujet).

Cette dernière est également illustrée dans le Tableau 3, qui compare la mesure de l'activité moyenne d'une vingtaine d'espèces entre deux études, également sur des sites et des périodes différentes.

Tableau 2 : Mesures de facteurs environnementaux supposés influencer l'activité des chiroptères, opérées sur quatre pays et périodes de temps distincts (Amorim et al., 2012 ; Boonman et al., 2013 ; Kerbiriou et al., 2013 ; Adorf et al., 2015)

Saisonnalité	Période de la nuit	Température	Vitesse de vent	Altitude	Références
Avril à septembre (très dépendante du site)	Pic d'activité 2 à 4 heures après le coucher du Soleil, second pic avant le lever du Soleil sur quelques sites	Supérieure à 8-15°C	Inférieure à 3-7 m/s	Temps de vol au-dessus de 25 mètres de hauteur propre à chaque espèce (Figure 2)	<i>Kerbiriou et al., 2013</i> France, 39 sites, 2006-2012
Août à octobre	NA	Supérieure à 13°C	Inférieure à 5 m/s	NA	<i>Amorim et al., 2012</i> Portugal, 1 site, 2007
NA	NA	NA	Majorité de l'activité entre 3-6 m/s	NA	<i>Adorf et al., 2015</i> Allemagne, 3 sites, 2011-2012
NA	Pic d'activité 1h30 après le coucher du Soleil jusqu'au milieu de la nuit, second pic entre 7-9h après le coucher du Soleil jusqu'à 1h avant le lever du Soleil	Entre 18-26°C	Inférieure à 5 m/s, principalement entre 1-3 m/s	NA	<i>Boonman et al., 2013</i> Pays-Bas, 5 sites, 2012-2013

Tableau 3 : Mesures de l'activité acoustique chiroptérologique moyenne, en minutes positives d'activité/nuit, opérées sur deux pays et périodes de temps distincts (Haquart, 2013 ; Bas et al., 2017)

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Activité moyenne (Haquart, 2013)	Activité moyenne au sol (Bas et al., 2017)	Activité moyenne en hauteur (Bas et al., 2017)
Minioptère de Schreibers	<i>Miniopterus schreibersii</i>	1,44	0,11	0,02
Molosse de Cestoni	<i>Tadarida teniotis</i>	0,18	0,02	0,01

Rhinolophe euryale	<i>Rhinolophus euryale</i>	NA	NA	NA
Grand rhinolophe	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	0,52	0,04	0
Petit rhinolophe	<i>Rhinolophus hipposideros</i>	0,66	0	0
Rhinolophe de Méhely	<i>Rhinolophus mehelyi</i>	NA	NA	NA
Barbastelle d'Europe	<i>Barbastella barbastellus</i>	3,21	0,35	0
Sérotine de Nilsson	<i>Eptesicus nilssonii</i>	0,02	0	0
Sérotine commune	<i>Eptesicus serotinus</i>	3,34	1,28	0,36
Vespère de Savi	<i>Hypsugo savii</i>	1,78	0,2	0,01
Murin d'Alcathoe	<i>Myotis alcathoe</i>	NA	NA	NA
Murin de Bechstein	<i>Myotis bechsteinii</i>	NA	NA	NA
Petit murin	<i>Myotis blythii</i>	19,59	2,32	0,02
Murin de Brandt	<i>Myotis brandtii</i>	NA	NA	NA
Murin de Capaccini	<i>Myotis capaccinii</i>	NA	NA	NA
Murin cryptique	<i>Myotis crypticus</i>	NA	NA	NA
Murin des marais	<i>Myotis dasycneme</i>	NA	NA	NA
Murin de Daubenton	<i>Myotis daubentonii</i>	NA	NA	NA
Murin d'Escalera	<i>Myotis escaleraei</i>	NA	NA	NA
Murin à oreilles échanquées	<i>Myotis emarginatus</i>	NA	NA	NA
Grand murin	<i>Myotis myotis</i>	0,49	0,11	0,01
Murin à moustaches	<i>Myotis mystacinus</i>	NA	NA	NA
Murin de Natterer	<i>Myotis nattereri</i>	NA	NA	NA
Murin de Corse	<i>Myotis nustrale</i>	NA	NA	NA
Murin du Maghreb	<i>Myotis punicus</i>	NA	NA	NA
Grande noctule	<i>Nyctalus lasiopterus</i>	0,08	0	0,02
Noctule de Leisler	<i>Nyctalus leisleri</i>	0,87	0,6	0,7
Noctule commune	<i>Nyctalus noctula</i>	1,15	0,07	0,14
Pipistrelle de Kuhl	<i>Pipistrellus kuhlii</i>	9,55	3,48	1,97
Pipistrelle de Nathusius	<i>Pipistrellus nathusii</i>	3,15	1,36	0,89
Pipistrelle commune	<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	79,85	27,08	5,86
Pipistrelle pygmée	<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	5,93	2,61	0,33
Oreillard roux	<i>Plecotus auritus</i>	1,52	0,8	0,01
Oreillard gris	<i>Plecotus austriacus</i>	1,52	0,8	0,01
Oreillard montagnard	<i>Plecotus macrobullaris</i>	1,52	0,8	0,01
Sérotine bicolore	<i>Vespertilio murinus</i>	0,01	0	0,01

En **bleu clair** les espèces de la famille des Minoptéridés, en **bleu** des Molossidés, en **bleu foncé** des Rhinolophidés et en **violet** des Vespertilionidés.

L'activité moyenne mesurée par Haquart, 2013 est issue de 1717 sites d'étude localisés en France, et les activités moyennes mesurées par Bas et al., 2017 sont issues de 23 sites d'étude localisés en France et en Belgique sur la période 2011-2016.

On observe ainsi une large gamme d'activité avec des variations spécifiques aux espèces et dépendantes du lieu d'étude (Tableaux 2 et 3), variations nécessitant d'être prise en compte lors des mesures d'évitement et de réduction tels que les bridages éoliens. Il est indispensable d'étudier l'activité chiroptérologique sur chaque site d'implantation, afin de définir des bridages à la fois efficace en termes de protection des chauves-souris et en termes de production d'énergie. Cette activité dépend aussi bien du paysage du site (présence d'habitats favorables utilisés par les chauves-souris comme les haies, les forêts et plans d'eau) que des espèces présentes sur celui-ci (<sup>1</sup>Ghanem et al., 2021).

# LES CHIROPTERES, ESPECES A LA SENSIBILITE MARQUEE AUX EOLIENNES

Toutes les espèces de chauves-souris sont ainsi vulnérables aux éoliennes, bien que l'impact de ces installations sur les populations reste difficile à estimer, « en raison du manque de données empiriques sur la taille des populations et des données démographiques sur les chauves-souris » (Baerwald et al., 2017 ; Flanders et al., 2020 ; Frick et Friedenberg, 2021). Comme défini plus tôt, cette vulnérabilité est spécifique à chaque espèce (Arnett et al., 2007 ; Arnett, Brown et al., 2008) : leur activité étant différente, leur sensibilité aux éoliennes et les risques encourus sont eux aussi par conséquence propres à chaque espèce.

On observe une pluralité d'impacts, dont les plus notables sont la répulsion et les pertes d'habitats, ainsi que la mortalité par collision ou barotraumatisme. La sensibilité des chauves-souris aux éoliennes se traduit donc sous plusieurs aspects, dont la définition et compréhension sont fondamentales pour minimiser autant que possible les impacts sur les chiroptères.

## Impacts indirects

Les éoliennes, comme toute infrastructure de production d'énergie, impactent inévitablement les habitats sur lesquels elles sont installées, entraînant alors des pertes fonctionnelles (Barré et al, novembre 2023). Dans leur cas précis, elles impactent l'aérosphère environnante à travers des perturbations importantes du flux d'air lorsqu'elles tournent, se traduisant par des turbulences accrues et une vitesse de vent réduite, et cela sur plusieurs kilomètres (Bastankhah et al., 2020). Ces perturbations induisent des modifications et réponses comportementales antagonistes chez les taxons volants, soient les oiseaux et chauves-souris (Bergot et al., 2015 ; Gibson et al., 2017).

La modification de l'utilisation de l'habitat par ces taxons génère deux types de comportements distincts, et encore peu étudiés :

- une attraction, qui peut alors augmenter le risque de mortalité (Barclay et Cryan, 2009) et menacer les populations (Baerwald et al., 2017)
- un évitement, ou une répulsion, qui peut alors inclure la perturbation des voies de déplacement et/ou de migration, des pertes d'habitats d'alimentation et/ou de gîtes à une échelle paysagère (Carranza et al., 2014)

Ces comportements étant opposés, leur effet net se montre peu évident à définir (Figure 7).

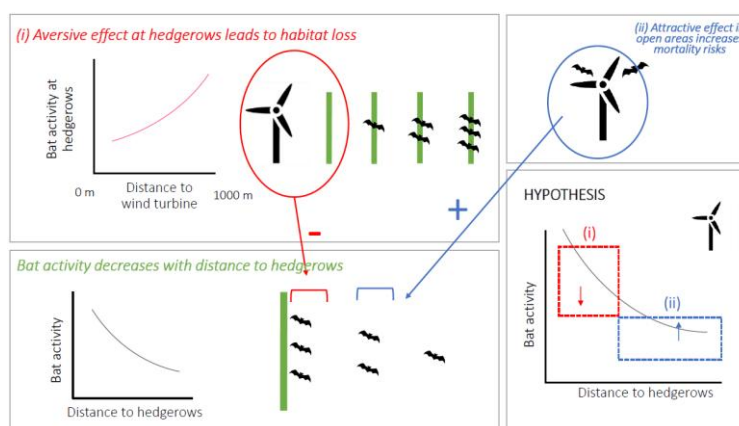


Figure 7 : Illustration du phénomène d'attraction/répulsion dans le cadre de la proximité des éoliennes avec des haies (<sup>1</sup>Barré et al., 2021)

Selon une autre étude, la baisse d'activité des chiroptères n'est notée que pour les éoliennes à proximité immédiate des haies (pour une distance inférieure à 43 mètres). Entre 43 et 100 mètres, certaines guildes auraient une activité multipliée par 3 ou 4, mais aucune modification ne serait observée pour des éoliennes situées à une distance supérieure à 100 mètres d'une haie (Barré et al., juin 2022).

Les impacts liés à la perte d'attractivité des habitats à proximité des éoliennes sont souvent perçus comme faibles ou diffus. Cependant, l'ensemble de ces impacts, trop souvent sous-estimés, peuvent « compromettre la viabilité des populations à large échelle », les chauves-souris étant des espèces à cycle de vie long et caractérisées par de faibles taux d'accroissements (<sup>2</sup>Barré et al., 2021). Même s'ils sont aujourd'hui documentés et reconnus, ces impacts sont peu quantifiés, particulièrement dans le cas de l'évaluation des effets cumulés à une plus grande échelle (régionale notamment). La difficulté d'accès aux données brutes et à leurs métadonnées (tel que l'effort d'échantillonnage) en est une des causes (<sup>2</sup>Barré et al., 2021).

Toutefois, ces pertes d'habitats peuvent être minimisées, notamment à travers une installation des éoliennes à distance des habitats importants pour la biodiversité aérienne, tels que les routes migratoires et les sites de reproduction, d'alimentation et d'hivernage (Bach et al., 2015), ce qui limite par la même occasion les risques de collision et donc de mortalité. Néanmoins, il est important de noter que dans la plupart des cas, les résultats de ces mesures d'évitement se montrent insatisfaisants : de nombreuses directives comme EUROBATS/UNEP sont ignorées dans la planification des parcs éoliens (Bach et al., 2015 ; Barré et al., novembre 2022), et les risques de mortalité sont considérés uniquement à l'échelle des turbines, sans tenir compte des autres phénomènes d'attraction/répulsion.

Il est ainsi nécessaire de chercher à mieux comprendre les mécanismes qui sous-tendent les réponses d'attraction et d'évitement de la biodiversité aérienne aux éoliennes (Barré et al, novembre 2023). De nombreuses théories concernant ces phénomènes sont mentionnées dans des publications scientifiques, mais ne sont pas encore vérifiées ou sont en cours d'analyse. Par exemple, l'attractivité des éoliennes est supposée être due à la recherche de gîtes dans les structures, à une simple exploration de celles-ci par curiosité, à une attirance « par des turbulences aérodynamiques mimant le sillage d'un point d'intérêt » ou même à leur nature de terrain de chasse en conséquence de l'attraction des insectes au niveau des mats (Lagrange et Rico, 2016). Une étude réalisée en 2016 en Mayenne, France, a mené ses chercheurs à émettre l'hypothèse que les phénomènes de condensation d'eau et de ruissellement dans et sur les éoliennes peuvent jouer un rôle important sur l'activité des chiroptères, en les attirant notamment à proximité des turbines et de l'extrémité des pales, pensant pouvoir s'y abreuver ou s'y abreuvant réellement (Goutorbe et al., 2017).

Le manque de consensus quant aux réponses des chauves-souris face aux éoliennes s'explique en partie par la nature hétérogène des études sur le sujet, aux contextes et plans d'échantillonnage différents, rendant par conséquent « le démêlage des mécanismes presque impossible » (Barré et al, novembre 2023). De plus, les facteurs liés au fonctionnement propre des éoliennes ou encore à leur taille sont largement négligés dans la recherche, et l'ensemble des paramètres ne sont pas étudiés simultanément. Les pertes de territoire de chasse et les perturbations des axes de vol sont méconnues et peu documentées, étant établies seulement « pour quelques espèces ou dans certaines circonstances » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

Des recherches plus poussées sur l'attraction et l'évitement des éoliennes par les chauves-souris sont cruciales au vu de leur impact significatif sur les chiroptères.

## Impacts directs

Les premiers relevés de mortalité, par collision et barotraumatisme, des chauves-souris sur les parcs éoliens ont été documentés depuis le début des années 1990 (<sup>1</sup>Barré et al., 2021). Des taux élevés de mortalité de chiroptères au sein de ces derniers ont été observés sur l'ensemble de la planète, en Europe (Bas et al., 2019 ; Kaiser et al., 2022, Barré et al., mars 2023), en Amérique du Nord (Hayes, 2013 ; Arnett et al., 2015 ; Bell et Smallwood, 2020), en Amérique du Sud (De Oliveira et al., 2020 ; Agudelo et al., 2021), en Afrique (Aronson, 2022), en Asie (Chou et al., 2017) et en Océanie (Cawthen et Hull, 2013 ; Bennett et al., 2022). Des centaines de milliers de chauves-souris meurent chaque année par collision avec les éoliennes rien qu'aux Etats-Unis et au Canada (Bas et al., 2019 ; Kaiser et al., 2022, Barré et al., mars 2023).

Une synthèse des mortalités constatées sous les éoliennes en Europe depuis les années 90 jusqu'en février 2025 (avec suivis protocolés) comptabilise 13 232 mortalités, dont 5004 en France depuis 20 ans (Dürr, 2025). Plus de 60% des espèces (17 sur les 28 concernées par de la mortalité) représentent moins de 5% de la mortalité comptabilisée, soit : la Barbastelle d'Europe, le Minoptère de Schreibers, le Molosse de Cestoni, les murins, les oreillard et les rhinolophes. Cependant, la mortalité éolienne touche grandement le Vespère de Savi, les pipistrelles, les sérotines et les noctules (Figure 8).

Espèce	A	BE	CH	CR	CZ	D	DK	ES	EST	FI	FR	GR	IT	LV	NL	N	PT	PL	RO	S	UK	Total
<i>Nyctalus noctula</i>	46	1			31	1298		1			281	16					2	17	76	14	11	1794
<i>N. lasiopterus</i>								21			10	1					9					41
<i>N. leisleri</i>			1	4	3	203		15			267	72	2				273	5	10			855
<i>Nyctalus spec.</i>						2		2			10						17					31
<i>Eptesicus serotinus</i>	1				11	73		2			79	1						3	1			173
<i>E. isabellinus</i>								117									3					120
<i>E. serotinus / isabellinus</i>								98									17					115
<i>E. nilssonii</i>	1				1	7			2	6				13		1		1	1	13		46
<i>Vespertilio murinus</i>	2	1		17	6	156					11	3		1				9	15	2		223
<i>Vespertilio spec.</i>								2				1										1
<i>Myotis myotis</i>						2		2			5											9
<i>M. blythii</i>								6			1											7
<i>M. dasycneme</i>						3																3
<i>M. daubentonii</i>						8					3						2					13
<i>M. bechsteini</i>											2											2
<i>M. nattereri</i>						2					3										1	6
<i>M. emarginatus</i>								1			4	1					1					7
<i>M. brandtii</i>						2																2
<i>M. mystacinus</i>						3					4	1										8
<i>Myotis spec.</i>						2					2											11
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	2	30	6	5	17	820		211			2133	21	1		16		323	5	6	1	46	3643
<i>P. nathusii</i>	13	6	6	17	7	1162	2				441	77	1	23	11			16	90	5	1	1878
<i>P. pygmaeus</i>	4			1	2	197					207	9		1			42	1	5	18	52	539
<i>P. pipistrellus / pygmaeus</i>	1		2			3		271			40	51					38	1	2			409
<i>P. kuhlii</i>				144				44			440	7					51		10			696
<i>Pipistrellus spec.</i>	8	2		102	9	106		25			471	25		2			128	2	48		12	940
<i>Hypugo savii</i>	1			137		1		50			59	35	12				56		2			353
<i>Barbastella barbastellus</i>						1		1			6											8
<i>Plecotus austriacus</i>	1					8					7											16
<i>P. auritus</i>						7					1										1	9
<i>Plecotus spec.</i>											2											2
<i>Tadarida teniotis</i>				7				36			3	4					39					89
<i>Miniopterus schreibersi</i>								2			8						4					14
<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>								1			1											2
<i>R. mehelyi</i>								1														1
<i>Rhinolophus spec.</i>	1	11		60	1	80		320	1		503	10	1				120	3	15	30	9	1165
<i>Chiroptera spec.</i>																						1
<b>Total</b>	<b>81</b>	<b>51</b>	<b>15</b>	<b>494</b>	<b>88</b>	<b>4146</b>	<b>2</b>	<b>1231</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>5004</b>	<b>335</b>	<b>17</b>	<b>40</b>	<b>29</b>	<b>1</b>	<b>1125</b>	<b>63</b>	<b>285</b>	<b>83</b>	<b>133</b>	<b>13232</b>

Figure 8 : Synthèse des cas de mortalités de chauves-souris par éoliennes connus en Europe des années 1990 à février 2025 - Base de données centrale de l'Observatoire national de protection des oiseaux de l'Office national de l'environnement du Brandebourg, Allemagne (Dürr, 2025)

Les risques de mortalité sont plurifactoriels, dépendant à la fois des « des groupes d'espèces, de leurs comportements de vols et du contexte environnant du parc éolien » (Beucher, 2020), sans parler des potentiels autres phénomènes pouvant influencer ces risques et générer des impacts particuliers (les opportunités alimentaires interspécifiques en hauteur, la proximité des éoliennes aux corridors de déplacement des espèces de lisières ou les activités migratoires sont aujourd'hui encore mal connues).

Les variations de structure des turbines, à travers l'augmentation de leur taille et la diminution de leur garde au sol, exposent notamment les chauves-souris volant près du sol à un risque de mortalité accru (Frick et al., 2024). L'augmentation du nombre d'éoliennes installées en France, de plus grande taille et avec une garde au sol plus basse, se présente donc comme une problématique importante à l'échelle du pays (<sup>1</sup>Barré et al., 2021). De nombreuses études (Tableau 4) alertent sur les effets de l'augmentation du diamètre des rotors et la diminution de la garde au sol sur le risque de collision, menaçant les chauves-souris à l'activité en faible altitude.

Tableau 4 : Activité chiroptérologique selon l'altitude, étudiée sur deux pays et périodes de temps distincts (Aschwanden et al., 2015 ; Biedermann et al., 2015)

Altitude	Activité (nombre de passages ou contacts enregistrés)	Références
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 mètres</li> <li>• 50 mètres</li> <li>• 100 mètres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 71,8%</li> <li>• 16,6%</li> <li>• 11,6%</li> </ul>	<i>Biedermann et al., 2015</i> Allemagne, 6 mâts de mesure, 2013-2013
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 mètres</li> <li>• 31 mètres</li> <li>• 119 mètres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 70%</li> <li>• 25%</li> <li>• 5%</li> </ul>	<i>Aschwanden et al., 2015</i> Suisse, 2014

« Les mêmes tendances sont observées sur l'ensemble du territoire national par les bureaux d'études, avec des activités majoritairement au niveau du sol (de l'ordre de 70 à 90% de l'activité au niveau du sol pour des mesures de l'activité entre 0 m et la hauteur du moyeu) » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Des études par trajectographie acoustique ont déterminé un « véritable seuil » à 29 mètres d'altitude (Bas et al., 2014), et l'ensemble des travaux de recherche sur le sujet s'accordent sur le fait que l'activité acoustique décroît avec l'altitude.

Toute modification apportée aux parcs éoliens va impacter les espèces différemment, selon leurs sensibilités propres. Or, comme il a été établi précédemment, des taux de mortalité, même faibles, ou des augmentations mineures des risques de mortalité peuvent fortement impacter la viabilité des populations de chauves-souris à grande échelle (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025) : en effet, « un petit nombre de décès [...] pourrait affecter la viabilité d'une petite population », par exemple pour la noctule commune et la grande noctule (<sup>1</sup>Barré et al., 2021). Toute pression environnementale ou anthropique peut entraîner « un déclin très rapide des populations qui ne pourront se rétablir que lentement » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

Cependant, il apparaît clairement que « la principale limite à la maîtrise des mortalités éoliennes des chiroptères est liée à la difficulté pour anticiper ces risques » (Beucher, 2020). En effet, outre une écologie des espèces encore mal définie et une sensibilité spécifique variable, l'hétérogénéité des conditions de risque de mortalité au niveau des éoliennes complique la réduction des impacts sur les chiroptères.

Ainsi, cette hétérogénéité se traduit aussi bien dans l'espace que dans le temps : la mortalité évolue sur un gradient altitudinal, et aussi bien d'une éolienne à une autre que d'un milieu à un autre, et elle varie de même entre les années, entre les saisons, d'une nuit à l'autre ou encore de quelques heures. L'activité à risque (c'est-à-dire à proximité des rotors) se reflète ainsi parfois par des pics très ponctuels et irréguliers (Beucher, 2020).

# LES BESOINS EN MAITRISE D'IMPACTS

Les impacts indirects et directs des éoliennes sur les chiroptères sont multiples, et varient selon l'activité des populations, entraînant pour chaque espèce des perturbations et des risques aux conséquences potentiellement désastreuses sur leur viabilité (Figure 9).

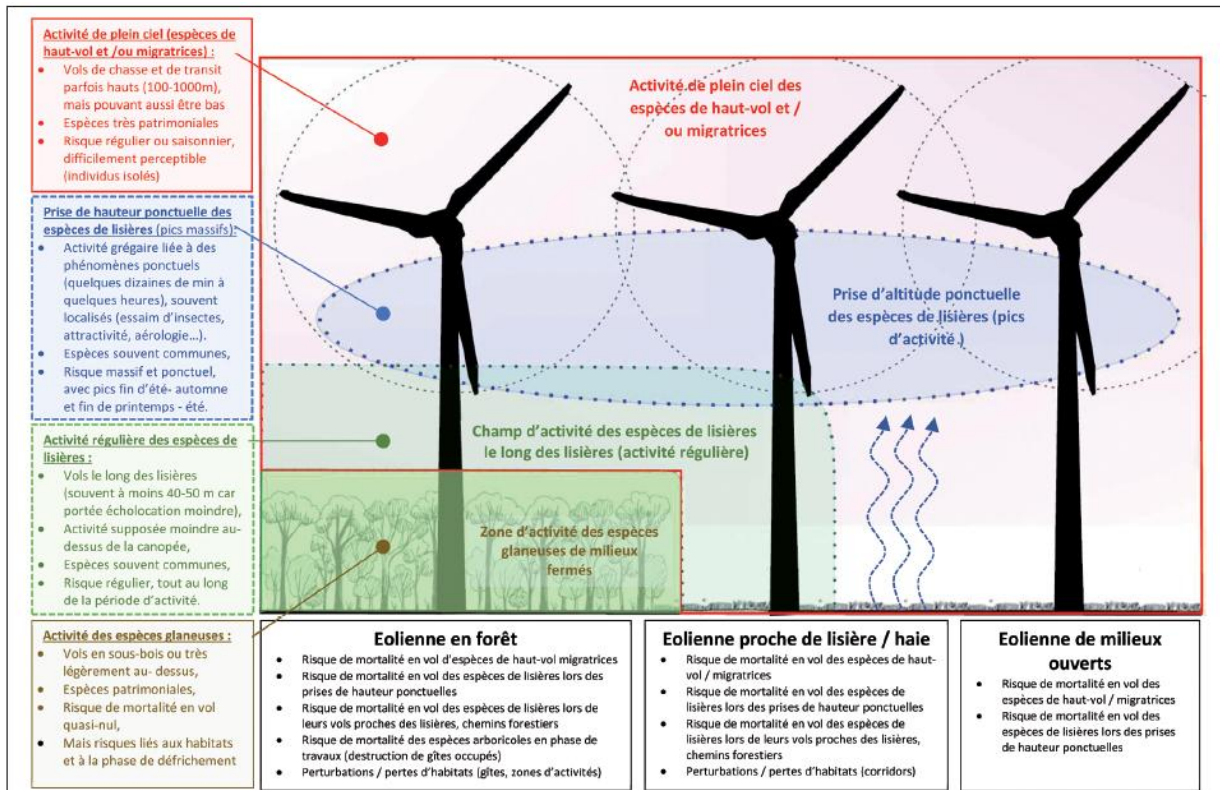


Figure 9 : Principaux types de risques éoliens sur les chauves-souris selon leur activité (Beucher, 2020)

« Il est indéniable que le développement de l'éolien terrestre a constitué une nouvelle source de mortalité et de pression sur les populations de chiroptères » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Idéalement, ces impacts peuvent être en partie évités et réduits par une planification minutieuse et efficace des parcs (localisation, nombre d'éoliennes, structure, éclairage des éoliennes), mais les mesures d'évitement et de réduction mises en place peuvent aussi s'avérer insuffisantes. Dans un objectif continu de protection des populations et d'atténuation de la mortalité, une mesure de réduction, en constante évolution, se présente : celle des bridages. Le suivi de l'activité et de la mortalité sont les éléments clés pour la programmation de bridages efficaces et leur optimisation. Connaître l'activité chiroptérologique sur le site d'implantation avant et après la construction, ainsi que la mortalité en phase d'exploitation, est capital, car leur suivi représente la principale donnée d'entrée pour la définition et l'amélioration des bridages, afin que ces derniers se montrent véritablement adaptés au milieu, au parc et à chaque éolienne étudiée.

# L'ÉVALUATION DES RISQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES BRIDAGES ÉOLIENS

---

En France, l'évaluation du risque de collision des chiroptères pour la définition des bridages est principalement basée sur les suivis d'activité à hauteur de nacelle et les suivis de mortalité aux pieds des éoliennes. Les premiers sont réalisés avant implantation des parcs au cours des études d'impact, et sont couplés aux seconds après la mise en exploitation des parcs. Ainsi, les suivis d'activité permettent « d'appréhender finement les conditions de fréquentation [d'un] site par les espèces et de mettre en évidence les conditions de risques de référence localement » (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018). Croisés avec les suivis de mortalité au sol (recherches de cadavres), ces derniers se présentent comme les « meilleur[s] outil[s] de compréhension et de maîtrise des risques pouvant permettre de valider l'efficacité des mesures de [bridage], ou de les optimiser si besoin » (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018).

## SUIVIS D'ACTIVITE

Le risque de mortalité des chiroptères sur les parcs éoliens est hétérogène, s'expliquant par un cumul de facteurs d'influence évoluant entre chaque site (espèces présentes, variables climatiques, topographie, végétation, attractivité, etc.). Dans de telles conditions, les suivis d'activité chiroptérologique en altitude, en continu et sans échantillonnage s'imposent pour définir les modalités de fréquentation des parcs et les conditions de risques pour les chauves-souris. Deux types de suivi peuvent alors être réalisés :

- un suivi pré-implantation, pendant l'étude d'impact, avec un suivi automatisé de l'activité ultrasonore à hauteur de nacelle (à l'aide d'un mât de mesure ou sur une éolienne dans le cas d'une extension ou d'un renouvellement d'un parc déjà existant, ou encore à l'aide d'enregistreurs ultrasons posés sur une perche télescopique sur un arbre de haut jet ou autre support)
- un suivi post-implantation, pendant le suivi environnemental, avec un suivi automatisé de l'activité ultrasonore à hauteur de nacelle

Leur objectif commun est la collecte de données sur le comportement des chauves-souris sur les sites d'implantation à hauteur de turbine, pour modéliser l'activité des chauves-souris en fonction du temps et des paramètres météorologiques récoltés lors des enregistrements (Kerbiou et al., 2013), étape indispensable pour assurer une maîtrise des impacts des parcs à travers des bridages pertinents et adaptés aux enjeux locaux.

### *Suivis d'activité pré-implantation*

Les suivis acoustiques visent à identifier les espèces présentes sur les potentiels sites d'implantation, et d'obtenir des informations sur leur activité (date, heure, vitesse de vent, température, etc.). Les enregistreurs et leurs microphones permettent de localiser précisément les chauves-souris dans l'espace autour et au-dessus des nacelles et autour des mats d'éoliennes, ainsi que de définir leurs trajectoires à proximité des pales (Lagrange et Rico, 2016). Ils sont également utilisés pour évaluer le taux de mortalité des parcs, ainsi qu'élaborer des mesures de bridage (Behr et al., 2017 ; Collins et al., 2019).

Les microphones à ultrasons doivent être capables de capter tous les cris de chauves souris, entre 0 et 250 kHz (Biotope Technologies, 2025), dans une large gamme de conditions sonores environnantes et climatiques. Ces dispositifs d'écoute renseignent sur la richesse spécifique des parcs, le comportement des chiroptères et permettent de corrélérer le comportement aux facteurs abiotiques du milieu (variables météorologiques et temporelles) présents au moment des enregistrements (Bonmort et al., 2022).

Peu de travaux de recherche comparent la performance des nombreux dispositifs de suivi acoustique commercialisés, sujet pourtant essentiel tant pour assurer une protection efficace des chauves-souris sur les parcs que pour réduire les impacts économiques pour les exploitants (coût des études et perte de productible). Une étude récente (Barluet de Beauchesne et al., 2025) s'est intéressée à ce sujet, et a montré des écarts significatifs de performance entre cinq modèles (Figures 10, 11, 12 et 13).

Ainsi, les capacités de détection et la qualité d'enregistrement ont été évaluées pour les dispositifs acoustiques suivant : le Batlogger (par Elekon), le GSM-batcorder (par ecoObs), le Batmode (par Bioacoustictechnology), le SM4BAT (par Wildlife Acoustics) et le SMART System (par Wildlife Acoustics). Ces derniers présentent des détecteurs, des microphones, des capteurs supplémentaires (de température, d'humidité, de pression, etc.) et des paramétrages différents. Tous les appareils, à l'exception du GSM-batcorder, ont été jugés de bonne qualité.

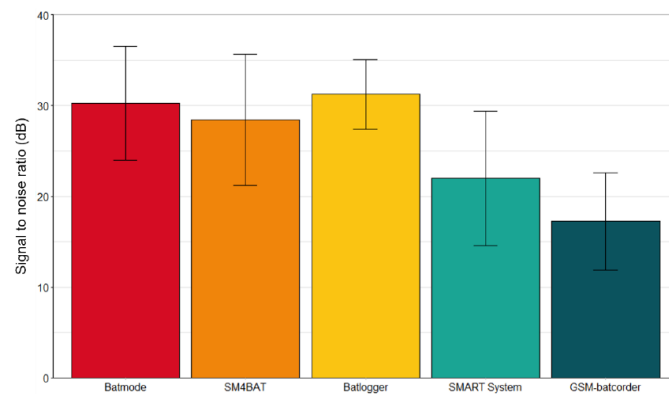


Figure 10 : Comparaison de la qualité d'enregistrement des cinq appareils testés à l'aide des rapports signal sur bruit calculés sur un échantillon de 10 séquences d'appels de chauves-souris (Barluet de Beauchesne et al., 2025). Les appareils ont été installés sur le mois de mars 2024 sur la façade d'un bâtiment en Hérault, France, et placés entre 8 et 8,5 mètres du sol.

Un rapport signal/bruit moyen supérieur à 20 dB correspond à une bonne qualité d'enregistrement, augmentant la détection et l'identification des espèces.

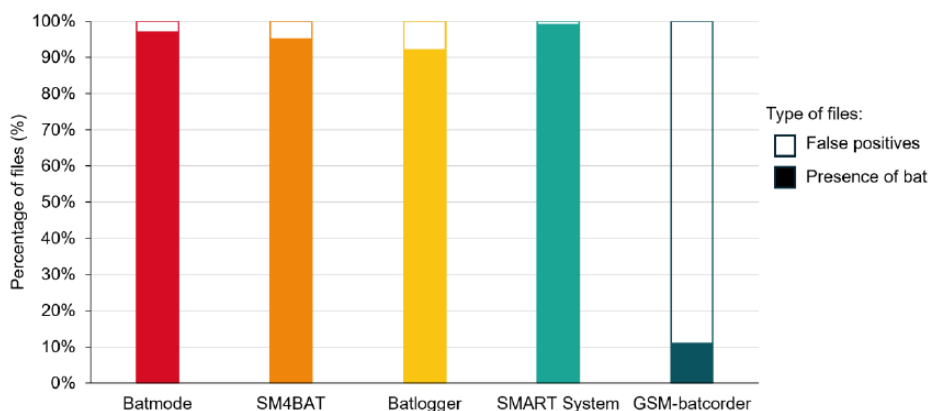


Figure 11 : Comparaison de la performance de détection des cinq appareils testés à travers la proportion de faux positifs par rapport au nombre total de fichiers (Barluet de Beauchesne et al., 2025)

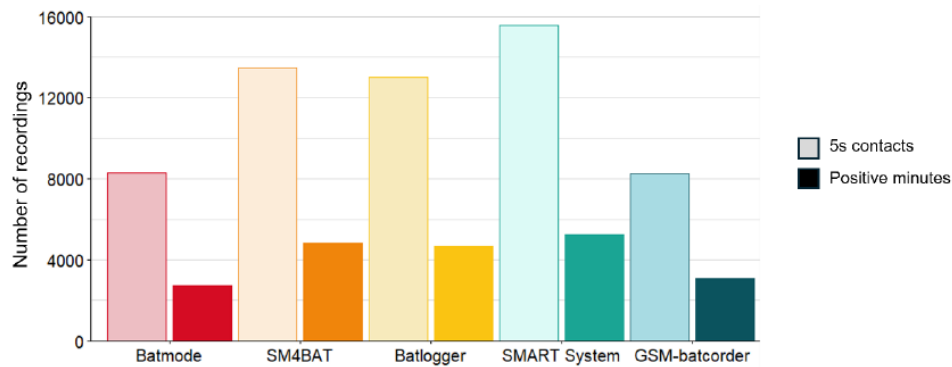


Figure 12 : Comparaison de la performance de détection des cinq appareils testés à travers le nombre d'enregistrements, exprimés en contacts de cinq secondes ou en minutes positives (Barluet de Beauchesne et al., 2025).

L'activité chiroptérologique est ainsi mesurée en termes de nombre de contacts de cinq secondes ou en nombre de minutes positives (minutes avec au moins un enregistrement de chauves-souris).

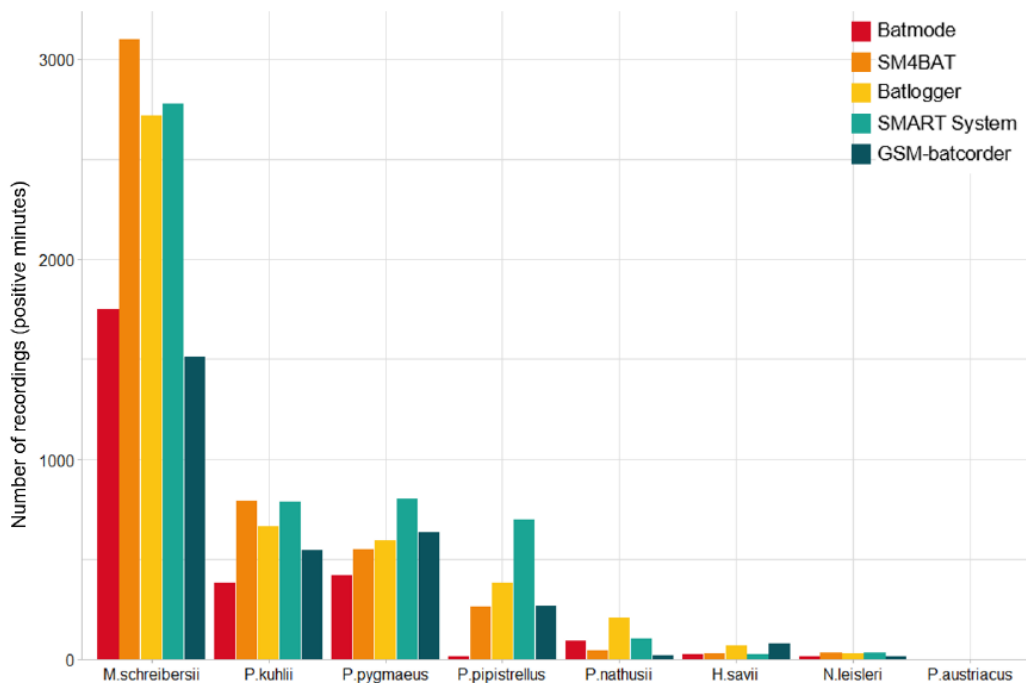


Figure 13 : Comparaison de la performance de détection des cinq appareils testés à travers le nombre d'enregistrements exprimés en minutes positives pour chaque espèce détectée (Barluet de Beauchesne et al., 2025)

Cette même étude a aussi comparé les modèles prédictifs d'activité chiroptérologique qui auraient pu être dérivés de chaque appareil testé, et a conclu que les disparités observées ne semblaient pas affecter les conclusions des modèles : « malgré les différences de performance des dispositifs testés, les modèles d'activité auraient été plus ou moins identiques, avec les mêmes implications pour les opérateurs, si ces résultats avaient été utilisés dans le contexte de la réduction préventive des éoliennes » (Barluet de Beauchesne et al., 2025).

En revanche, ces résultats ne peuvent être généralisés du fait des conditions de ce travail de recherche, réalisé uniquement sur un mois (mars), avec une surreprésentation de l'espèce *Miniopterus schreibersii* soit du Minioptère de Schreibers (60% des contacts enregistrés). D'autant plus, il est difficile de réaliser une telle étude comparative devant la diversité de sensibilité, de capacité de réglage des paramètres, ou encore de noms de paramètres et d'unités de mesure : il semble ainsi peu approprié de classer ces appareils en fonction de leurs performances.

Les suivis d'activité en hauteur au sein des études d'impact se sont fortement développés entre 2017 et 2018 (Figure 14). Cependant, en conséquence de ce développement tardif, seules 30% de ces études « bénéficie[nt] d'une analyse croisée entre suivi d'activité en hauteur et suivi de la mortalité pour décider et dimensionner une mesure de régulation » (Albespy et al., 2023).

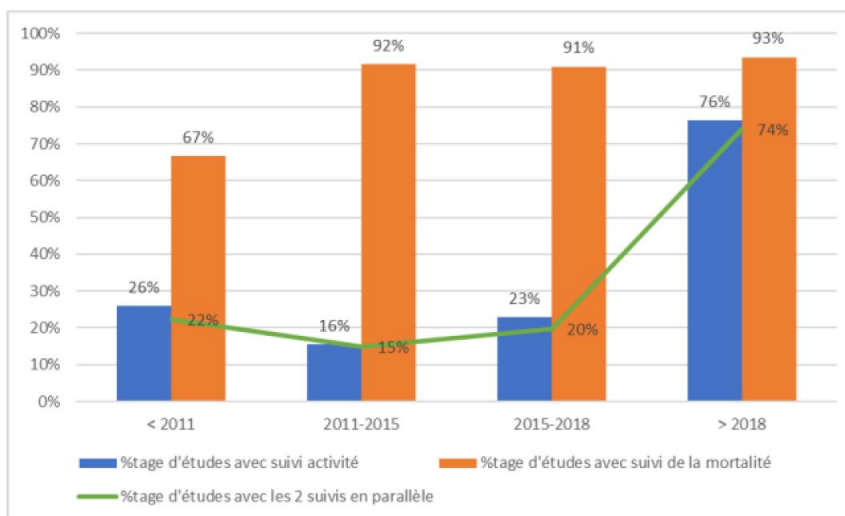


Figure 14 : Histogramme de l'évolution temporelle des principales sources de données du processus de mise en place de bridages en France (Albespy et al., 2023)

Or, c'est précisément à travers les suivis en continu et à hauteur de nacelle que des bridages proportionnés à l'activité des sites peuvent être définis. C'est alors qu'on constate que les études d'impact dépourvues de suivi en continu et de suivi en hauteur mènent à une absence de prescription de mesure de bridage sur les parcs (Figure 15).

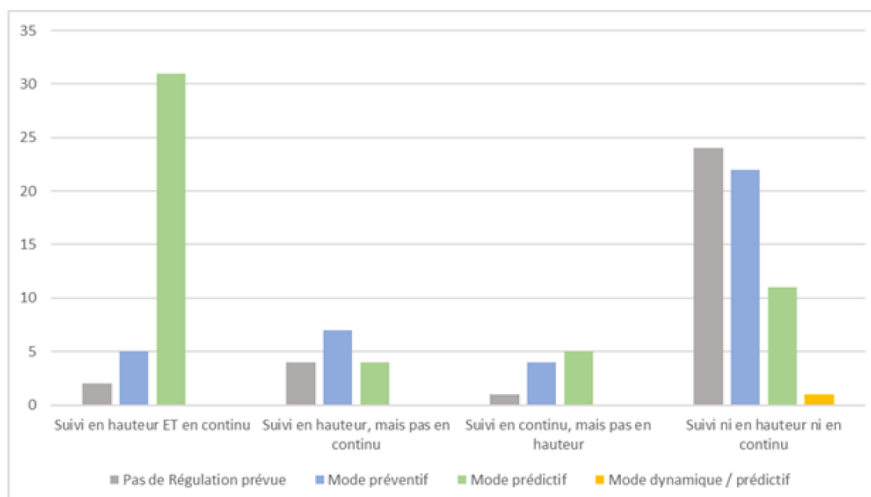


Figure 15 : Mode de régulation engagé selon le type de suivi acoustique utilisé dans le cadre des études d'impact d'un nouveau projet éolien (Albespy et al., 2023). Les bridages statiques sont référés ici sous le nom de « mode préventif » et les bridages mixtes sous le nom de « mode dynamique/prédictif ».

Lorsque de tels suivis sont opérés, on observe une période de suivi généralement conforme à celle exigée par le protocole de suivi environnemental en vigueur, voire plus longue que le minimum requis. Les résultats font l'objet d'analyses structurées : trois quarts des rapports d'études d'impact détaillent l'activité nocturne à travers une synthèse chronologique par nuit, plus de la moitié détaillent les comportements observés (distinction des guildes de chauves-souris, pics d'activité, cris sociaux ou buzz de chasse, etc.) et 73% de ces derniers considèrent la phénologie des espèces (Albespy et al., 2023).

Néanmoins, il ressort dans ces mêmes rapports que les unités d'estimation de l'intensité d'activité sont souvent floues, même si le terme « nombre de contacts » est progressivement utilisé ainsi que la notion de durée d'activité à risque (traduite en secondes cumulées d'activité à risque). Or, les résultats de suivis d'activité permettent de prédire une partie des mortalités (les pics étant associés à un risque de mortalité plus élevé), mais ces mêmes résultats sont sensibles à la métrique d'activité utilisée. Moins de la moitié des rapports emploient un référentiel d'activité, et près d'un quart de ceux-ci sont dépourvus d'analyse des conditions climatiques d'activité, et « ne peuvent donc pas définir objectivement les conditions à risque pour dimensionner [le bridage] » (Albespy et al., 2023).

La probabilité de détection des chauves-souris est fortement influencée par le type de matériel utilisé et son paramétrage (Figure 16) : en effet, la combinaison du type d'enregistreur acoustique et de la sensibilité de déclenchement explique beaucoup plus la variance en sein des résultats que tous les facteurs bien connus de l'activité chiroptérologique (Arnett, Horn et al., 2008 ; Bonaccorso et al., 2014 ; Behr et al., 2017 ; Bas et al., 2019). La sensibilité de déclenchement détermine le volume et la distance de détection des ultrasons, tandis que les fréquences d'enregistrement peuvent limiter la détection de certaines espèces ou groupes d'espèces et les exclure entièrement (Barré et Kerbiriou, 2021). De cette façon, des niveaux très différents d'activité peuvent être mesurés entre plusieurs sites selon les variations de combinaisons de modèle d'enregistreur/sensibilité de déclenchement, notamment en raison des différentes distances de détection générées par les spécificités et les paramètres du matériel employé (Adams et al., 2012 ; Darras et al., 2020).

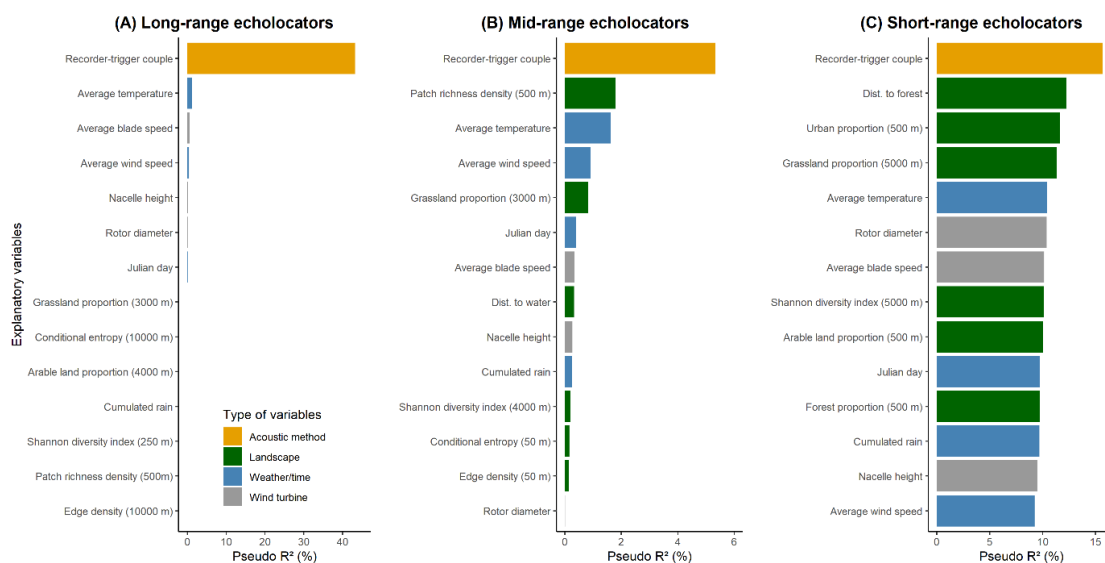


Figure 16 : Pourcentage de variance expliquée par chaque variable pour chaque guildes selon quatre grands types de variables pour les trois guildes de chiroptères (Barré et Kerbiriou, 2021).

Ces résultats sont issus d'une modélisation statistique mettant en compétition des variables de nature paysagères, météorologiques, temporelles, méthodologiques et de fonctionnement des éoliennes. Les données ont été récoltées par l'enregistreur Batmode sur 36 parcs éoliens français entre 2017 et 2020, avec un paramétrage de sensibilité du déclencheur unique.

On observe que quelques facteurs paysagers, et l'ensemble des facteurs climatiques, temporels et de fonctionnement des éoliennes impactent l'activité de toutes les guildes de chiroptères, soulignant l'importance de prendre en compte tous ces paramètres lors du paramétrage des bridages.

Certains auteurs ont cependant fait l'hypothèse que les différences entre ces combinaisons pourraient être le reflet de différences de conditions environnementales, et non d'un effet du matériel, mais les disparités d'activité entre modèles d'enregistreurs et sensibilités de

déclenchement restent encore aujourd'hui difficilement interprétables en raison des effets confondants des variables environnementales et techniques sur l'activité, ce qui « peut donc conduire à minimiser ou surestimer l'effet de certaines variables, notamment paysagères, hautement corrélées au matériel » (Barré et Kerbiriou, 2021).

L'intégration d'un jeu de données pour l'entraînement d'algorithmes de bridage, données aux variations de modèles et paramétrages d'enregistreurs tels que leur sensibilité, demande préalablement, si possible, d'agréger et corriger ces données méthodologiquement hétérogènes (Barré, 2025). L'analyse des facteurs d'exposition des chauves-souris au risque de collision doit impliquer l'utilisation systématique de données acoustiques aux méthodes d'enregistrement clairement définies, et l'agrégation des données pour analyse doit impliquer l'absence préalable de biais liés à ces méthodes, possiblement à travers le développement de coefficients correcteurs d'activité entre différentes combinaisons de type d'enregistreur/sensibilité de déclenchement (Barré et al., mars 2023).

L'harmonisation des méthodes d'enregistrement s'impose néanmoins comme la mesure la plus optimale pour éviter toute perte de données et faciliter toute analyse sur un vaste ensemble de parcs éoliens et toute comparaison entre sites : ainsi, l'homogénéisation des matériels d'enregistrement et de leur paramétrage de déclenchement limiterait les variations dans les résultats, rendant alors possible des études à grande échelle et la détection des effets d'autres variables sur l'activité chiroptérologique, telles que les variables paysagères par exemple (Barré et Kerbiriou, 2021). Autrement, la quantification de l'activité lors des suivis doit être contextualisée pour rendre possible toute comparaison avec des référentiels d'activité (matériel et paramétrages égaux) et entre sites d'implantation.

De plus, outre les potentiels biais de détection acoustique (atténuation rapide des ultrasons, directionnalité des appels, réglages de déclenchement, plage de détection, etc.), de nombreux parasitages peuvent venir entraver l'analyse des données (bruit des vibrations des éoliennes, sifflement du vent, turbulence derrière les pales, etc.). Par exemple, les éoliennes tournant à des vitesses de vent élevées peuvent générer des bruits parasites qui vont dégrader les séquences d'enregistrement et ainsi la qualité d'identification automatisée des espèces, ou à l'inverse générer des bruits parasites proches de certaines espèces et donc des faux positifs, « biaisant ainsi la relation entre l'activité et la vitesse de rotation des pales » (Barré et Kerbiriou, 2021).

Pour faire face à ce problème, il est possible de modéliser le risque d'erreur des données en lien avec les indices de confiance des logiciels, et de filtrer celles-ci sur différents seuils de tolérance pour limiter le taux de faux positifs : on peut alors obtenir plusieurs jeux de données, avec une faible quantité de données et peu d'erreur au risque d'une perte de vrais positifs, ou bien avec une grande quantité de données et plus d'erreurs. Dans ce cas, c'est la cohérence des résultats qui assurera la robustesse statistique des analyses, indépendamment du ratio quantité/qualité de données utilisé (Barré et Kerbiriou, 2021).

Plusieurs auteurs appellent alors à la mise en place de quelques recommandations (Albespy et al., 2023), dont les plus pertinentes sont :

- la généralisation des suivis d'activité en hauteur et en continu (sans échantillonnage) pour tout parc éolien, car même s'ils ne permettent que de percevoir partiellement l'activité chiroptérologique des sites, ils favorisent le dimensionnement de bridage proportionné à ces derniers
- le développement de référentiels d'activité selon le type de matériel acoustique utilisé et les conditions de mise en œuvre

- la présentation des biais et limites inhérentes aux méthodes de suivis acoustiques employées
- la présentation des résultats sous forme de synthèse chronologique d'activité par nuit, par espèces ou groupe d'espèces afin d'établir une activité de référence pour le site étudié
- l'analyse croisée détaillée systématique de l'effet des paramètres climatiques (vitesse de vent, température, précipitations) et temporels (périodes de l'année, heures de la nuit) sur l'activité de référence

### **Suivis d'activité post-implantation**

Les suivis d'activité post-implantation sont définis réglementairement dans le Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres révisé de 2018 : l'enregistrement de l'activité des chiroptères, à hauteur de nacelle, en continu et sans échantillonnage, doit être mis en œuvre avec au minimum un point d'écoute pour 8 éoliennes, en fonction de l'homogénéité du parc (relief, végétation, habitats, etc.). Il s'associera au suivi de mortalité les semaines 31 à 43 (Figure 23), période qui pourra se voir élargie si le parc n'a pas fait l'objet de suivi d'activité lors de son développement ou si son étude d'impact a identifié des risques sur certaines espèces à des périodes spécifiques.

Les dispositifs de suivi d'activité doivent représenter l'activité chiroptérologique des sites :

- sans échantillonnage temporel, c'est-à-dire chaque nuit, entre environ une heure avant le coucher du Soleil et une heure après le lever du Soleil
- sur l'ensemble de la période d'activité des espèces considérées (Figure 23)
- avec des dispositifs pouvant couvrir la diversité acoustique des espèces de chauves-souris
- avec des microphones omnidirectionnels orientés vers la base du rotor (Figure 17), zone supposée la plus à risque, recalibrés chaque année et avec une bonne qualité d'enregistrement (bon paramétrage pour limiter les parasites acoustiques)

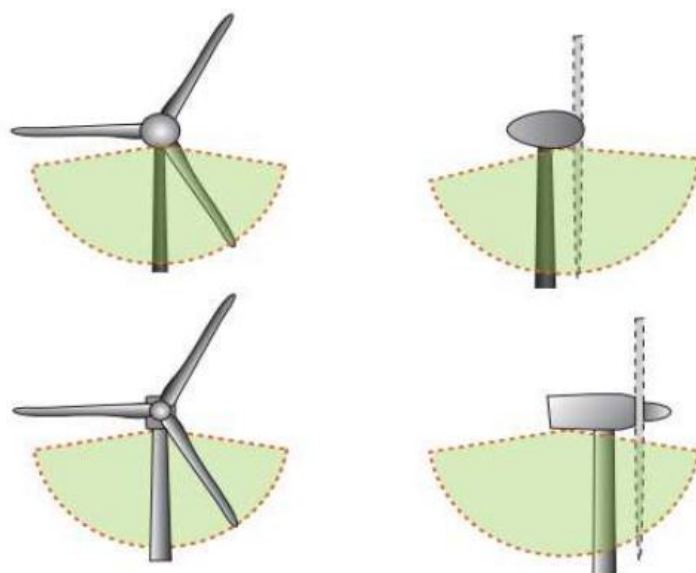


Figure 17 : Schéma de la zone devant être couverte par les microphones omnidirectionnels lors du suivi d'activité à hauteur de nacelle (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018)

Une autre méthode de détection pourrait être développée sur les parcs éoliens, en complément des suivis acoustiques, pour ajuster les bridages : la détection vidéo. Le dispositif de détection vidéo automatisée en temps réel SafeWind, développé par Biodiv-Wind SAS pour réduire le risque de collision entre les oiseaux diurnes et les éoliennes, s'est vu être étendu à la protection des chiroptères en 2015 (Goutorbe et al., 2017).

Des caméras infrarouges, couplées à un dispositif d'enregistrement et de détection, sont disposées sur le mât d'éoliennes bridées, dans l'objectif de « mieux comprendre et évaluer l'activité [des] espèces en utilisant des technologies plus précises que la détection acoustique », d'« évaluer l'efficacité des modèles prévisionnels d'activité » sur lesquels reposent les obligations de bridages, et si possible d'optimiser ces mêmes bridages (Goutorbe et al., 2017).

Une étude (Goutorbe et al., 2017) a mis en pratique SafeWind Chiro sur une éolienne d'un parc en Mayenne, France, sur le mois d'octobre 2016. Un ensemble de quatre caméras fut installé sur le mât de celle-ci, afin de couvrir l'intégralité de l'aire de rotation des pales et ses alentours immédiats sur 360°. Le dispositif permet alors l'obtention en continu de trois types de données :

- des vidéos brutes (Figure 18), enregistrées en continu, nécessaires pour vérifier la performance des caméras et la pertinence des données récoltées (faux positifs, faux négatifs, étalonnage du logiciel de détection)



Figure 18 : Capture d'écran d'une vidéo brute où sont visibles deux chiroptères (Goutorbe et al., 2017)

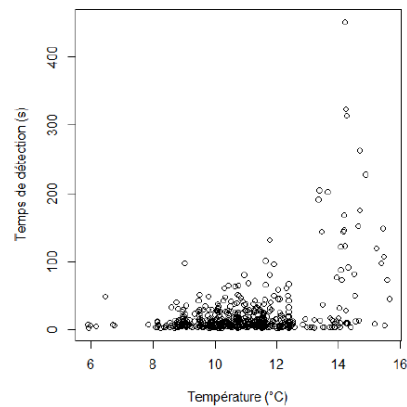
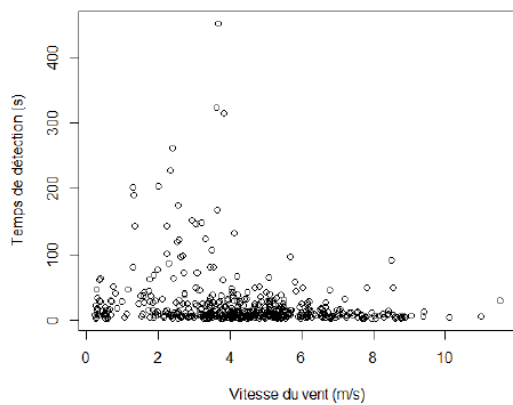
- des vidéos analysées par SafeWind Chiro (Figure 19), contenant exclusivement les enregistrements correspondant aux détections de chiroptères (les chiroptères détectés sur les vidéos sont entourés par des cercles de couleur)



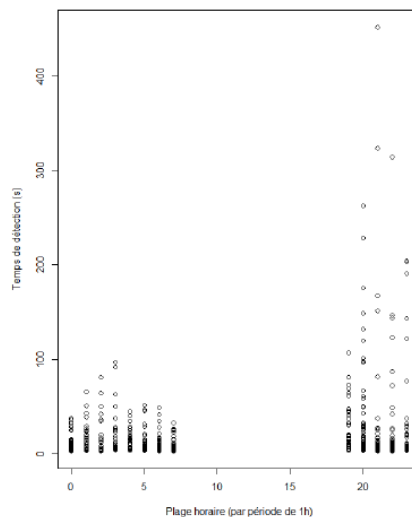
Figure 19 : Capture d'écran d'une vidéo analysée par SafeWind Chiro où sont détectés deux chiroptères (Goutorbe et al., 2017)

- des tableaux synthétiques, contenant la date, l'heure, le temps de détection et le nombre de détections par tranche de 10 minutes

Les résultats issus des détections par vidéo sont par la suite croisés avec les données environnementales (Figures 20, 21 et 22) ou techniques (fonctionnement des éoliennes) fournies par les exploitants, soit notamment la vitesse de vent à hauteur de nacelle, la température extérieure et la vitesse de rotation de l'éolienne.



Figures 20, 21 et 22 : En haut à gauche le temps de détection en secondes en fonction de la vitesse de vent en mètres par seconde, en haut à droite le temps de détection en secondes en fonction de la température en degrés, et en bas le temps de détection en secondes en fonction de la plage horaire par périodes de une heure (Goutorbe et al., 2017)



La performance de détection peut être évaluée et améliorée : lors d'un premier visionnage des vidéos analysées par le dispositif, 6% étaient des faux-positifs, puis ce chiffre est descendu à environ 1% après modification de l'algorithme, sans pour autant baisser la sensibilité du logiciel, « ce qui prouve que SafeWind peut [...] repérer très spécifiquement la présence de chiroptères à l'image » (Goutorbe et al., 2017).

SafeWind Chiro démontre que la technologie de détection vidéo peut être autant voire plus efficace que la technologie de détection acoustique, permettant d'une part d'évaluer avec précision le temps de présence de chiroptères dans les zones à risque de collision, et d'autre part le nombre d'individus soumis à ce risque. Lors de l'étude de Goutorbe et al. de 2017, le dispositif a pu mettre en avant que 23% de l'activité des chauves-souris à hauteur de nacelle n'était pas couverte par les bridages prédictifs, et que ces derniers imposaient « des arrêts plus de dix fois supérieurs à la présence réelle des chiroptères sans pour autant parvenir à couvrir l'intégralité du risque », et donc entraînaient des pertes de production non nécessaires (Goutorbe et al., 2017).

Ce jeu de données offre ainsi la possibilité de définir les meilleures pratiques de bridage à mettre en œuvre sur les parcs pour réduire sensiblement le risque de collision. Il convient cependant de noter que le jeu de données récolté, qui permet certes d'obtenir de nouvelles connaissances sur les facteurs déterminants de l'activité chiroptérologique à proximité des éoliennes, est très important et demande un effort de traitement considérable.

Enfin, l'utilisation de caméras « apporte des informations inédites et des clés sur la manière avec laquelle les chauves-souris sont impactées : à quelle heure, à quelle date et dans quelles conditions de vent mais aussi des informations sur le comportement des chauves-souris avant impact et les circonstances dans lesquelles elles se font prendre par les pales (collision directe ou barotraumatisme) » (Lagrange et Rico, 2016).

## SUIVIS DE MORTALITE

La perception de l'impact réel des parcs éoliens en exploitation et la compréhension de la mortalité des chiroptères sur ceux-ci sont cruciales pour leur protection. Les suivis de mortalité s'imposent alors comme une méthode permettant d'estimer le nombre de chauves-souris entrant en collision avec les éoliennes d'un parc basée sur la recherche de carcasses au sol (Behr et al., février 2023).

Les suivis de mortalité sont, tout comme les suivis d'activité post-implantation, définis réglementairement dans le Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres révisé de 2018 : « au moins une fois au cours des trois premières années de fonctionnement de l'installation puis une fois tous les dix ans, l'exploitant met en place un suivi environnemental permettant notamment d'estimer la mortalité de l'avifaune et des chiroptères due à la présence des aérogénérateurs » (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018).

Ce suivi a pour objectifs :

- l'estimation du niveau d'impact généré par le parc étudié sur les populations de chiroptères et de la nécessité d'appliquer/adapter une mesure de bridage, qui implique la détection et l'identification des cadavres de chauves-souris tués par les éoliennes et la caractérisation de la mortalité (périodes, espèces, éoliennes, facteurs environnementaux, etc.)
- le calcul des mortalités estimées générées par le parc étudié, standardisé à l'aide de formules de calcul internationales, afin de comparer ces mortalités entre années ou entre parcs
- la construction et l'alimentation en temps réel de la base de données nationale DEPOBIO, afin d'évaluer l'impact des parcs éoliens français sur les populations de chauves-souris

Sauf cas particulier, le suivi environnemental d'un parc doit commencer dans les 12 mois suivant la mise en service de celui-ci, et intervenir au plus tard dans les 24 mois suivant cette mise en service. S'il conclut à l'absence d'impact significatif sur les chiroptères, alors il devra être renouvelé dans les 10 ans, sinon des mesures de réduction devront être mises en place et un nouveau suivi réalisé l'année suivante afin de s'assurer de leur efficacité (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018).

Le suivi de mortalité est constitué au minimum de 20 prospections, ou passages sur site, de mi-mai à octobre (entre les semaines 20 et 43, Figure 23), période présentant un intérêt particulier pour les chiroptères (avec notamment la mise-bas entre mai et mi-juillet, et les transits automnaux entre mi-août et fin octobre). Des prospections supplémentaires peuvent être réalisées sur cette période ou sur d'autres périodes (période initiale étendue et/ou fréquence de passage augmentée) si elles sont recommandées par l'étude d'impact, prescrites par les arrêtés préfectoraux ou encore si les premiers résultats indiquent une mortalité significative.

semaine n°	1 à 19	20 à 30	31 à 43	44 à 52
Le suivi de mortalité doit être réalisé ...	Si enjeux avifaunistiques ou risque d'impact sur les chiroptères spécifiques*	Dans tous les cas*		Si enjeux avifaunistiques ou risque d'impact sur les chiroptères*
Suivi d'activité en hauteur des chiroptères	Si enjeux sur les chiroptères	Si pas de suivi en hauteur dans l'étude d'impact	Dans tous les cas	Si enjeux sur les chiroptères

Figure 23 : Période sur laquelle doivent être effectués le suivi de mortalité et le suivi d'activité des chiroptères en fonction des enjeux (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018). Il est à noter que le suivi de mortalité des chiroptères est mutualisé avec celui de l'avifaune : tout suivi de mortalité devra conduire à la recherche à la fois des chauves-souris et des oiseaux.

Pour les parcs de 8 éoliennes et moins, toutes les éoliennes sont contrôlées. Pour les parcs de plus de 8 éoliennes contenant n éoliennes, au minimum  $8 + (n-8)/2$  éoliennes sont contrôlées : sont choisies en priorité les éoliennes équipées d'un enregistreur automatique d'ultrasons, puis la moitié des éoliennes jugées les plus à risques lors de l'étude d'impact sont choisies, et enfin les éoliennes restantes sont sélectionnées de façon aléatoire (pour obtenir une représentativité en termes d'environnement, de végétation, etc.).

La surface de prospection consiste en un carré de 100 mètres de côté (ou deux fois la longueur des pales si celles-ci sont supérieures à 50 mètres) ou un cercle de rayon égal à la longueur des pales, de minimum 50 mètres (Figure 24). Des transects sont réalisés à pied au sein de cette surface, espacés d'une distance dépendant du terrain et du couvert végétal (entre 5 et 10 mètres). Seules les zones à ciel ouvert et praticables sont prospectées : pour une forêt ou une zone à végétation dense, la surface de prospection fera l'objet d'une correction proportionnelle par coefficient surfacique. Le temps de recherche s'élève généralement entre 30 et 45 minutes par turbine, et les recherches débutent dès le lever du jour.

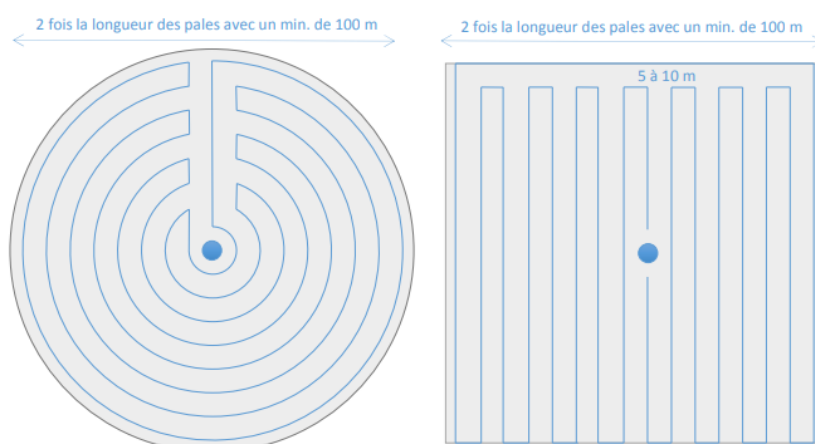


Figure 24 : Schéma de la surface-échantillon à prospecter, avec une largeur de transects de 5 à 10 mètres (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2018)

La taille de la surface de prospection (pouvant varier selon les études) influence les estimations de mortalité, et peut brouiller l'interprétation des effets des bridages (Dalthorp et Huso, 2014 ; Dalthorp et al., 2024). En effet, « si les carcasses atterrissent plus loin de l'éolienne à mesure que la vitesse du vent augmente, y compris avec davantage de carcasses qui atterrissent au-delà du périmètre de la parcelle de recherche, alors la réduction de la mortalité sera surestimée à des vitesses de vent plus élevées » (Frick et al., 2024). Néanmoins, les surfaces de prospection supérieures à 60 mètres permettent de tenir compte du biais induit par la vitesse de vent dans l'évaluation de l'efficacité des bridages.

La réalisation de deux tests d'efficacité de recherche du chercheur est encouragée, par campagne de suivi annuel à des périodes distinctes, ainsi que deux tests de persistance des cadavres par suivi, également à des périodes distinctes ; facteurs utilisés lors du calcul de l'estimation du taux de mortalité d'un parc, clés pour une estimation aussi précise que possible, indépendamment des conditions rencontrées lors des suivis.

Les données de mortalité brutes sont enfin fournies sous forme de tableau par l'exploitant au Muséum National d'Histoire Naturelle (nom et localisation du parc, nombre, position et modèle des éoliennes, contexte environnemental, protocole mis en œuvre, informations sur les cadavres découverts, etc.). Le suivi recense le nombre et le type de cadavres découverts, et évalue l'impact du parc en comparant ces résultats avec ceux de l'étude d'impact et ceux d'éventuels suivis antérieurs. Il analyse l'efficacité des bridages mis en place en croisant mortalité, activité et facteurs d'influence, et doit systématiquement proposer des mesures correctives en cas d'impact significatif.

A l'instar des suivis d'activité en hauteur, les suivis de mortalité des parcs éoliens français évoluent avec le temps et sous l'évolution des prescriptions nationales. La progression positive des pratiques de suivi de mortalité porte notamment sur « la qualité de la mise en œuvre des tests d'évaluation des sources de biais (taux de persistance, taux de détection, coefficient surfacique...) » (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023).

Cependant, ces pratiques ont tendance à être homogénéisées par le Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres, entraînant un lissage vers le vas de l'effort de prospection dans certaines régions françaises (réduction des extrêmes maximum) : ces disparités régionales (Figure 25) se traduisent par des efforts de prospection souvent plus poussés dans le Sud que dans le Nord du pays, causées par des études à fortes pressions qui augmentent la moyenne de mortalité pour le premier, contre des études plus standardisées et menées sur des modèles à moindre effort d'échantillonnage pour le second (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023).

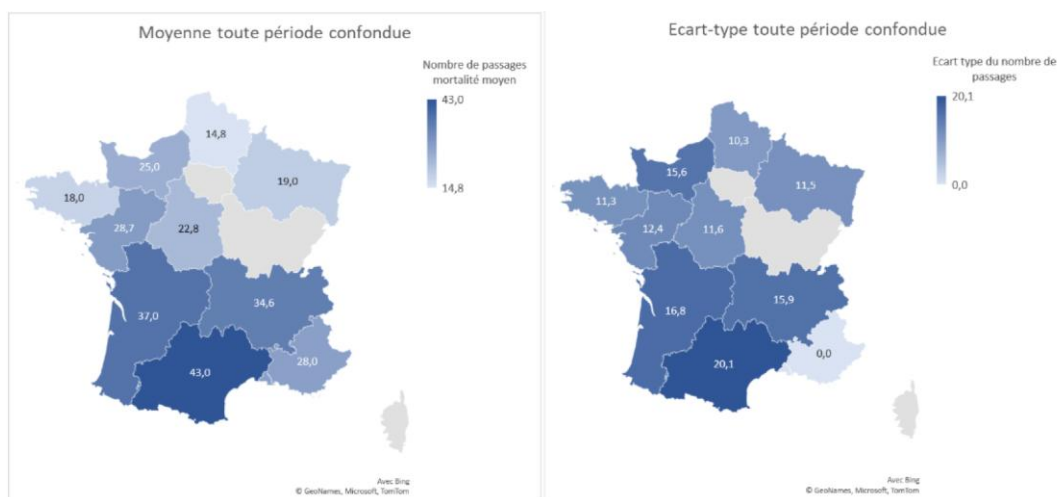


Figure 25 : Répartition régionale des moyennes et écarts types de nombre de passages de suivi de la mortalité en France, toutes périodes confondues jusqu'en 2020 (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023)

Le rapport de 2022 du programme OPRECH s'est intéressé à l'influence de différentes pressions de suivi sur le terrain (deux visites par semaine, une visite par semaine, et quatre visites aléatoires) sur l'estimation du nombre de mortalités brutes et du taux de mortalité d'un parc. Ces échantillonnages de suivi « aboutissent globalement à une surestimation du taux de mortalité par rapport à un taux de mortalité calculé sur la base d'une pression de suivi quotidienne » (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023), surestimation causée par les formules utilisées pour la prise en compte des incertitudes (capacité du chercheur, taux de prédation, etc.) induites par la pression de suivi.

Il ressort que plus la pression de suivi sur site est importante, plus les taux de mortalité calculés sont précis, et donc plus les résultats sont exploitables et comparables entre parcs. Les auteurs du rapport demandent alors l'augmentation de la pression de suivi selon les sites dans les protocoles de suivi à deux visites par semaines sur les périodes les plus à risque, afin d'obtenir des données pertinentes et pouvant être analysées à large échelle. Toute mesure de bridage des éoliennes se verra alors plus précise et adaptée aux enjeux réels du site d'implantation.

Outre le respect des protocoles en vigueur en terme de pression de suivi et l'adaptation de ces derniers, de nombreux auteurs recommandent l'analyse de l'efficacité de bridage basée non seulement sur l'évolution du nombre de mortalité avant et après mise en place d'un bridage, mais aussi sur le niveau de mortalité résiduel et sur une approche qualitative des mortalités résiduelles (espèces et enjeux) en prenant en compte l'évolution de l'activité chiroptérologique du site (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023). Enfin, ils encouragent une comparaison des mortalités d'un site avec celles recueillies à une échelle locale et régionale dans l'objectif d'estimer les effets cumulatifs de l'énergie éolienne sur les populations de chiroptères.

Les suivis d'activité et de mortalité sont indispensables à la compréhension et la maîtrise des risques sur les parcs éoliens, aussi bien en phase de développement (études d'impact) que d'exploitation (suivis environnementaux). Ils permettent de souligner l'hétérogénéité de l'activité chiroptérologique et la diversité des types et conditions de risques (Beucher, 2020), ainsi que de prédire l'activité future des chauves-souris sur le site et d'adapter les bridages en conséquence (Behr et al., février 2023).

Le suivi d'activité en continu, à hauteur de nacelle et sans échantillonnage avec l'utilisation d'enregistreurs à ultrasons, croisé avec les variables temporelles et climatiques, est essentiel d'une part en amont de tout projet éolien afin d'anticiper les risques et de dimensionner des mesures de bridage (ainsi que d'estimer les potentiels impacts sur la production électrique et par conséquent la viabilité du projet). Il l'est aussi d'autre part après la mise en service du parc, afin de croiser l'activité mesurée en altitude, la mortalité au sol, les variables environnementales et le fonctionnement des éoliennes, ainsi que de vérifier l'efficacité et la mise en œuvre des bridages, et envisager une optimisation si besoin.

Si les suivis acoustiques peuvent être utilisés pour estimer les mortalités de chiroptères sur les parcs, ils sont néanmoins limités et nécessitent des protocoles référencés et standardisés pour la récolte et l'analyse des données (Barré et al., février 2023). Une évaluation fiable des décès de chauves-souris requiert ainsi également un suivi de mortalité, qui doit cependant faire l'objet d'un « échantillonnage de visites suffisamment important pour être statistiquement représentatif » (Beucher, 2020), et respecter les protocoles standardisés pour limiter les biais méthodologiques.

# LES BRIDAGES EOLIENS, CLES D'UN EQUILIBRE ENTRE PRESERVATION DES CHIROPTERES ET PRODUCTIVITE DES PARCS

---

Le bridage nocturne des éoliennes s'impose comme la mesure de réduction la plus efficace du risque de collision entre les chiroptères et ces infrastructures (Delius et al., 2022), pouvant permettre une couverture d'activité supérieure ou égale à 90%, suivant alors les recommandations des DREAL (Bonmort et al., 2022).

L'efficacité des bridages, illustrée au travers de nombreuses études par des diminutions significatives des collisions et des mortalités au sein des parcs éoliens, est reconnue sur tous les continents, et observée sur toutes les espèces considérées (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). De plus, les bridages peuvent être régulés selon les sites, les analyses préalables des conditions de risques, et les moyens à disposition.

On distingue alors deux possibilités d'établissement d'une mesure de réduction :

- en l'absence de suivi d'activité en continu en hauteur pour caractériser les conditions de risques les plus fortes des parcs, on peut établir une « régulation préventive » (Beucher, 2020), qui consiste à établir des seuils de régulations dit « conservateurs » offrant une certaine efficacité sur une large gamme de sites éoliens (par exemple, arrêter les éoliennes sous 6 m/s de vent et 10°C pendant toute la période d'activité des chiroptères et toutes les heures de la nuit)
- en présence de suivi d'activité en continu en hauteur pour caractériser les conditions de risques les plus fortes des parcs, on peut dimensionner des bridages multicritères et proportionnés selon les parcs (bridages statiques, prédictifs, dynamiques, mixtes), limitant les risques de collision en arrêtant les éoliennes lorsque les chauves-souris sont les plus actives localement

La mise en œuvre des bridages peut être délicate sur les premières générations de parcs éoliens, dont les éoliennes furent mises en service avant les années 2010 : « [elle] peut nécessiter l'ajout de modules complémentaires et mises à jour des SCADA (ordinateur de bord) des éoliennes, et peut être entravée par l'absence de connexion internet par fibre (souvent indispensable pour le traitement des grandes quantités de données nécessaires à la mise en œuvre des bridages) » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). En revanche, l'application des bridages sur les éoliennes actuelles est entièrement possible, différentes mesures pouvant être facilement intégrées et implémentées aux systèmes numériques de ces dernières.

Comme toute mesure ERC(A), la réglementation impose, après mise en service d'un parc, un suivi de l'efficacité des bridages en phase Exploitation. Cela permet de corriger et d'ajuster, si besoin, les modalités et paramètres de bridage, afin que tout bridage en place soit configuré proportionnellement aux impacts prévisibles et aux périodes d'activité élevée évalués lors de l'étude d'impact.

# ÉTAT DES LIEUX DES MESURES DE BRIDAGES ET DE LEUR DEVELOPPEMENT EN FRANCE

Le programme de recherche OPRECH (Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères) publié en 2023 expose l'avancement des bridages éoliens en France. Ce dernier « est spécifiquement ciblé sur les processus de dimensionnement, de mise en œuvre et de contrôle de la mesure de régulation des éoliennes pour réduire les mortalités qu'elles génèrent sur les chauves-souris » (Albespy et al., 2023).

Le programme révèle qu'en 2020, moins de la moitié du parc éolien national disposait de mesures de bridages en faveur des chiroptères, avec de grandes disparités régionales qui ont toutefois tendance à s'homogénéiser, et une diversité des pratiques. Sur les 1227 parcs éoliens recensés jusqu'en 2020 sur le territoire français (métropolitain et DOM/TOM inclus), 321 parcs comprenaient des bridages (Figures 26 et 27), soit 26% du parc national (44% en écartant les parcs aux données non transmises). La prise en compte de cette mesure de réduction apparaît plus tardive dans certaines régions telles que les Hauts-de-France et le Grand-Est.

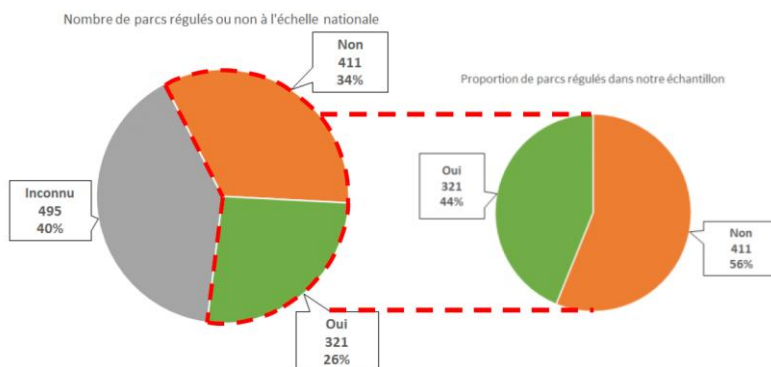


Figure 26 : Proportions de parcs régulés, non régulés ou de statut inconnu en France à gauche, et proportions en excluant les parcs sans information à droite (Albespy et al., 2023)



Figure 27 : Années de première mise en place d'une mesure de bridage sur les parcs éoliens de France métropolitaine (Albespy et al., 2023)

Les nouveaux projets éoliens, quant à eux, présentaient une proposition de mesure de bridage des éoliennes dans près de 72% des cas (étude d'un échantillon de 140 dossiers d'étude d'impact de parcs en cours d'instruction, autorisés ou en construction), illustrant la prise d'ampleur progressive des préconisations nationales ces dernières années et la prise de conscience générale de l'effet du développement éolien sur les populations de chiroptères. Néanmoins, les disparités régionales persistent, et une portion importante des parcs construits ou envisagés ne prévoient pas de bridages (Figure 28).

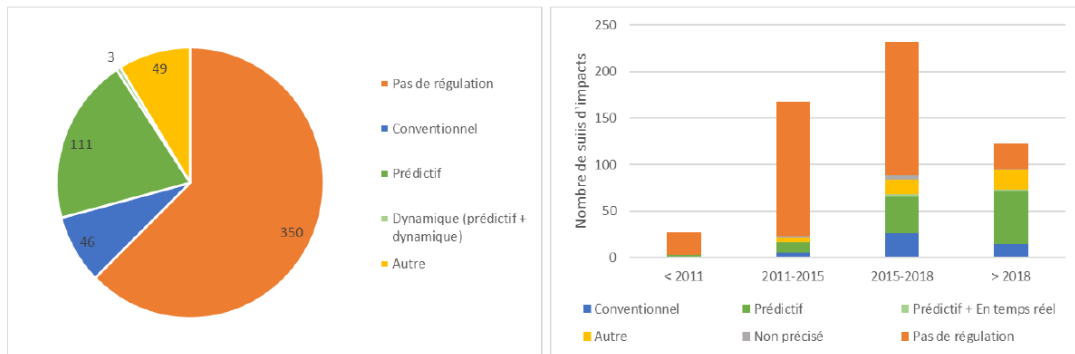


Figure 28 : Proportions et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre de suivis d'impacts de parcs exploités, avec 559 dossiers de suivis d'impacts concernant 406 parcs éoliens, soit environ un tiers du parc éolien national (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023). Les bridages statiques sont référés ici sous le nom de « conventionnels » et les bridages mixtes sous le nom de « dynamiques (prédictifs + dynamiques) » ou « prédictifs + en temps réel ».

De plus, des problèmes de mauvaise mise en œuvre effective des bridages sont constatés. S'ils semblent très peu analysés dans les rapports (seulement mentionnés dans un quart de ces derniers), ces problèmes se montrent courants (Figure 29) : on constate des retards de démarrage de la période d'activation des bridages en début de campagne, des dysfonctionnements ponctuels ou encore des décalages légers mais réguliers, et difficilement identifiables. La moitié des parcs éoliens français en serait concernée.

On déduit par conséquent une sous-évaluation de ces problèmes de mise en œuvre dans les études, qui induisent des erreurs dans la perception de l'efficacité des bridages et limitent ainsi les possibilités d'optimisation de ceux-ci. La maîtrise des pratiques de régulation se retrouve alors freinée. En revanche, il est également possible de déduire que si l'efficacité générale des bridages est déjà importante dans de telles conditions, alors l'on peut supposer « qu'elle le sera d'autant plus si les problèmes de mise en œuvre sont résolus » (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023).

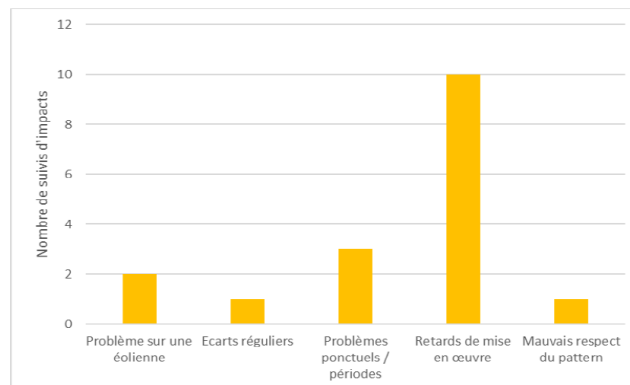


Figure 29 : Typologie des principales causes d'écart constatés entre le paramétrage et la mise en œuvre effective des bridages (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023)

Cependant, lorsque cette mesure de réduction est mise en œuvre, elle se montre généralement efficace pour réduire la mortalité des chauves-souris (avec une réduction entre 30% et 100% des mortalités), bien que les réponses varient selon les espèces et les caractéristiques du site d'implantation. Cette dernière se diffuse notamment à travers les protocoles réglementaires et les prescriptions nationales en vigueur.

Les paramètres et seuils retenus des bridages sont en cohérence avec les données d'études et de suivis d'impacts des sites. Les bridages tendent à être de plus en plus révisés et progressivement optimisés sur les années suivant leur mise en œuvre, en accordance avec les

résultats des suivis d'impacts. La progression des études d'activité à hauteur de nacelle entraîne des paramétrages globalement « de plus en plus conservateurs et de plus en plus fins avec le temps » (Albespy et al., 2023).

L'évolution des bridages se traduit notamment à travers :

- des dates de début de période d'activation de plus en plus précoces (en avril plutôt qu'en mai) contre des dates de fin généralement stables (en octobre), et par conséquent des périodes d'activation aux durées allongées (avec une moyenne de 5,2 mois depuis 2018)
- des paramétrages dits « phénologiques », tendant à être découpés par saisons et périodes de l'année
- une progression du seuil de vitesse de vent de 5 à 6 m/s en moyenne avec un paramétrage par saisons (seuil plus haut en fin d'été et automne et moindre au printemps et début d'été en accordance avec les périodes les plus risquées pour les chauves-souris)
- une augmentation du nombre de paramètres climatiques et/ou temporels utilisés

## MISES EN DRAPEAU DES PALES

Avant toute programmation de bridage, il est important de définir et de prendre en compte le phénomène de « free-wheeling » : même si les vitesses de vent sont inférieures à la vitesse de démarrage de production électrique (aussi référencée sous le nom de « cut-in speed », généralement entre 3 et 4 m/s), les pales, tournées habituellement face au vent, peuvent commencer à tourner en roue libre.

Si ce phénomène n'a aucun impact sur la production d'énergie, il représente un risque léthal pour les chiroptères (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Il a été démontré que ces faibles vitesses de vent pouvaient représenter une part importante des mortalités de chauves-souris aux Etats-Unis (Bay et al., 2011), phénomène également observé en France, notamment avec le groupe des pipistrelles qui effectue des prises d'altitude importantes et ponctuelles à hauteur des pales lors de faibles vitesses de vent (Albespy et al., 2017).

Ce danger peut néanmoins être contré par une mise en drapeau des pales (ou « blade feathering ») : les pales sont pivotées et se retrouvent parallèles au vent, ce qui ralentit (souvent à moins d'un tour/minute) ou arrête leur rotation. C'est une technique déjà utilisée lors de vents extrêmes pour des questions de sécurité (freinage), ou encore pour la maintenance. Dans ce cas, les turbines ne se mettent à tourner qu'aux vitesses de vent minimales nécessaires à la production d'électricité.

Le risque de mortalité se retrouve significativement diminué : une réduction de la vitesse des pales lorsque le vent est faible (de 9 tours/minute à moins de 1 tour/minute) fait chuter la mortalité des chiroptères de 50% à 72% sur respectivement la seconde moitié et la première moitié de la nuit (Bay et al., 2011). Une vitesse de vent de démarrage repoussée de 1,5 m/s permet d'autant plus une réduction supplémentaire de 50% de la mortalité (Arnett et al., 2013).

La mise en drapeau des pales s'impose alors comme une mesure standard « fortement recommandée pour la protection des chauves-souris autour des parcs éoliens » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025) : cette régulation sous seuil de production (puisque les éoliennes ne produisent pas d'électricité par faibles vitesses de vent) évite la génération de risques de mortalité, et plusieurs auteurs encouragent à sa mise en œuvre systématique sur les parcs (Beucher, 2020).

## BRIDAGES STATIQUES

Les bridages statiques représentent le mode de bridage le plus répandu en France (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025), arrêtant les éoliennes dans des conditions favorables à la majorité de l'activité des chauves-souris.

Un bridage statique consiste en la mise à l'arrêt des turbines sur une période calendaire et/ou des conditions météorologiques prédéterminées (France Renouvelables, 2024). Il est basé sur les données de suivi d'activité chiroptérologique en altitude en continu (mât de mesure ou nacelle), croisées avec des données météorologiques et temporelles dans l'objectif de déterminer les conditions à risque pour les chiroptères : ainsi, l'analyse de ces données permet « de proposer une régulation multicritères proportionnée aux conditions locales en croisant les données d'activité avec différents paramètres » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025), notamment la vitesse de vent, la température, la saisonnalité et les heures de la nuit. En général, les patterns de bridage proposés couvrent au minimum 80% de l'activité chiroptérologique du site. Leurs variables d'arrêt sont par conséquent déterminées selon le pourcentage d'activité à couvrir.

Un plan de bridage présente par exemple ses critères d'arrêt comme tel : « les éoliennes seront arrêtées du 1<sup>er</sup> avril au 31 octobre lorsque la vitesse de vent sera inférieure à 6 m/s et les températures supérieures à 12°C, du lever au coucher du soleil » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

En revanche, « en postulant des conditions météorologiques et temporelles répliquables d'une année sur l'autre » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025), c'est-à-dire sans prendre en considération les variations interannuelles d'activité mentionnées précédemment ou l'activité en temps réel du site, les bridages statiques entraînent des pertes de production électrique importantes sur des périodes sans aucune activité chiroptérologique. D'autant plus, il est essentiel de rappeler que plus le scénario est conservateur, et plus la production d'énergie sera impactée : les bridages statiques procurent donc une forte protection, mais impliquent l'arrêt des éoliennes sur de longues périodes et ainsi de grandes pertes de production d'énergie (France Renouvelables, 2024).

L'étude du programme OPRECH présente différents modèles de régulation d'éoliennes mis en place sur un parc éolien jugé à risque, afin de définir et comparer leur efficacité (Tableau 5).

Tableau 5 : Efficacité de différents modèles de bridages statiques définis par l'OPRECH (<sup>1</sup>Alberspy et al., 2023)

Paramètres de bridage	Efficacité (% de réduction de la mortalité)	Perte de production annuelle (%)	Modèle de bridage
Vitesse de vent < 3 m/s	56%	NA	« Régulation sous seuil de production »
Vitesse de vent < 4,5 m/s Température > 10°C	61%	NA	« Régulation préventive »
Vitesse de vent < 6 m/s Température > 10°C/15°C	80% à 100%	NA	« Régulation préventive conventionnelle »

Ces modalités de bridage ont été comparées à une modalité témoin (sans bridage) et mises en place au sein d'un parc français par paires d'éoliennes, avec une rotation aléatoire tous les quinze jours, sur la période 2019-2020 (entre les mois de juillet et de septembre uniquement soit sur la période de plus fort risque de mortalité). Les auteurs soulignent que ces résultats ne sont pas significatifs, car présentant des intervalles de confiance élevés.

Le programme conclue sur les observations suivantes :

- les variables de vitesse de vent, de température et de période de l'année sont les variables de prédiction de l'activité chiroptérologique les plus pertinentes
- le modèle de bridage « régulation sous seuil de production » (soit une mise en drapeau), avec une réduction de 56% de la mortalité, devrait être mis en place systématiquement en l'absence de préconisation de bridage
- le modèle de bridage « régulation préventive conventionnelle », avec une réduction de 80% à 100% de la mortalité, bien qu'efficace, peut voir ses paramètres être surdimensionnés, et alors entraîner une perte notable de productivité ; il en ressort donc l'intérêt d'étudier finement l'activité chiroptérologique du site afin de rechercher des paramètres plus adaptés à celui-ci
- une couverture de 90% ou 100% de l'activité chiroptérologique d'un site ne protège pas forcément davantage les chauves-souris
- « il ne s'agit pas de protéger 100% de l'activité pour permettre de maîtriser l'ensemble des risques » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025) ; une couverture de 80% semble permettre une maîtrise efficace des mortalités pour les espèces de la guildes LRE, bien que l'activité résiduelle doit se voir analyser afin d'orienter les bridages selon les années et les éoliennes considérées

Un bridage statique peut aboutir, selon les seuils utilisés, à une maîtrise quasi-totale de l'impact par mortalité (80% à 100% de couverture d'activité). Son efficacité reste hétérogène, variant selon les sites, les critères d'arrêt et les espèces (Figures 30 et 31).

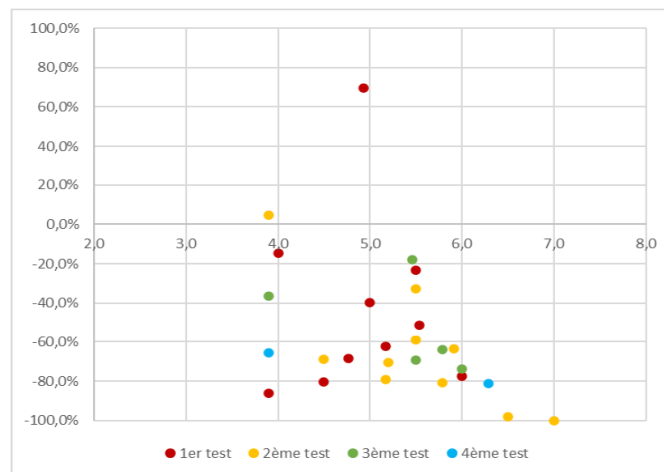


Figure 30 : Evolution du taux de mortalité avant et après mise en place d'un bridage, en fonction du seuil moyen de vitesse de vent (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023)

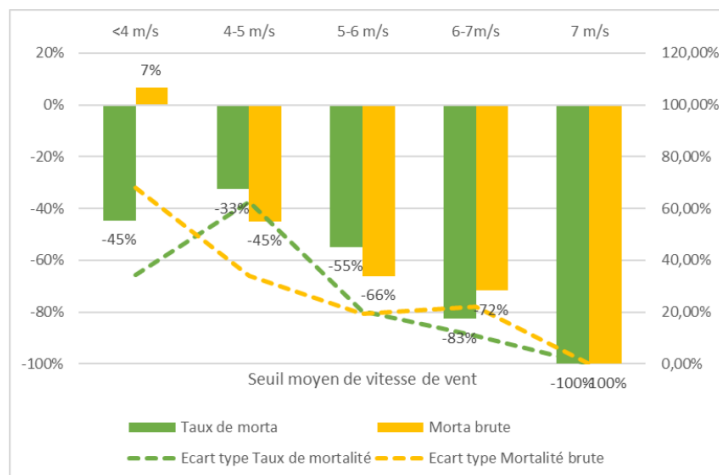


Figure 31 : Evolution de l'impact par mortalité avant et après mise en place d'un bridage, en fonction du seuil moyen de vitesse de vent (<sup>2</sup>Albespy et al., 2023)

Tableau 6 : Efficacité de différents modèles de bridages statiques (en comparaison avec des éoliennes non bridées), opérés sur six pays et huit périodes de temps distincts (Arnett et al., 2011 ; Hubert et Rico, 2016 ; Bennett et al., 2022 ; Antonić et al., 2023 ; Frick et al., 2024 ; JP Energie Environnement, 2025)

Paramètres de bridage	Efficacité (% de réduction de la mortalité)	Perte de production annuelle (%)	Références
5 m/s < Vitesse de vent < 6,5 m/s Eté et automne	44% à 93%	≤ 1%	Arnett et al., 2011 Etats-Unis, 12 éoliennes (sur 23), 2008-2009
Vitesse de vent < 5 m/s	62% en moyenne → 33% à 79%	NA	Frick et al., 2024 Etats-Unis et Canada, 6 parcs, 2007-2017
Vitesse de vent < 7 m/s Température > 8°C Du coucher du Soleil au lever du Soleil Absence de pluie	96,9%	10%	Hubert et Rico, 2016 Belgique, 6 éoliennes sur 3 parcs, 2015
5 m/s < Vitesse de vent < 6,5 m/s Eté et automne	78%	NA	Antonić et al., 2023 Croatie, 12 éoliennes, 2016-2017 et 2019-2020
3 m/s < Vitesse de vent < 4,5 m/s Eté et automne Du coucher du Soleil au lever du Soleil	54%	0,16%	Bennett et al., 2022 Australie, 11 éoliennes (sur 11), 2018-2019
Vitesse de vent < 6 m/s Température > 10°C Du coucher du Soleil au lever du Soleil Du 1 <sup>er</sup> août au 31 octobre	60,5%	1,19%	JP Energie Environnement, 2025 France, 4 éoliennes sur 1 parc, 2022
Voir Figure 32	78,7%	1,1%	JP Energie Environnement, 2025 France, 4 éoliennes sur 1 parc, 2024

Frick et al. soulignent dans leur étude (2024) que les différences interannuelles expliquent la plus grande partie de la variation des taux d'efficacité des bridages statiques (plutôt que les caractéristiques inter-sites ou les caractéristiques des éoliennes).

Période	Plage horaire	Vitesse de vent	Température
1er juin au 30 juin	Du coucher au lever du soleil	v < 5,5 m/s	T > 15°C
1er juillet au 31 juillet	Du coucher à 2h avant le lever du soleil	v < 5,5 m/s	T > 15°C
1er août au 31 août	Du coucher à 2h avant le lever du soleil	v < 6 m/s	T > 15°C
1er septembre au 31 octobre	Du coucher à 2h avant le lever du soleil	v < 5,5 m/s	T > 13°C

Figure 32 : Paramètres de bridage statique sur un parc français de 4 éoliennes en 2024 (JP Energie Environnement, 2025).

Les données issues de JP Energie Environnement (2025) ont été fournies directement par le Pôle Environnement de l'entreprise, chargé de la programmation, de la mise en place et du suivi des bridages de leur flotte de parcs éoliens. Ces données concernent le même parc (optimisation du bridage entre 2022 et 2024).

Il semble intéressant d'après ces études de définir la vitesse minimale de démarrage des éoliennes bridées à 5 m/s, car plusieurs travaux de recherche soulignent l'efficacité d'un tel paramétrage couplée à une perte de production marginale (Tableau 6, Figure 33).

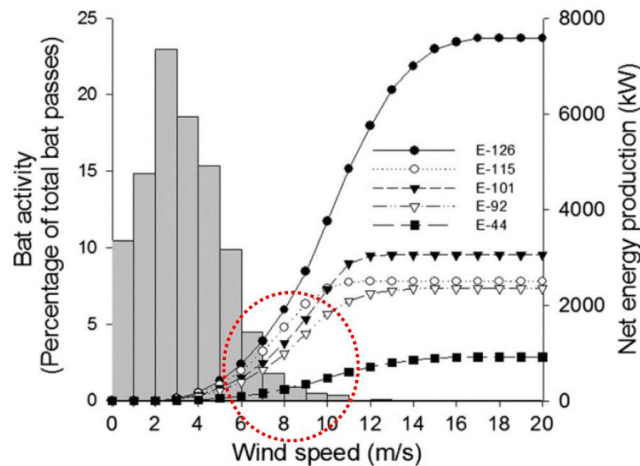


Figure 33 : Chevauchement entre l'activité des chauves-souris (pourcentage de passage total par les chauves-souris dans les catégories à 1 m/s ; ntotal = 9287 passages de chauves-souris) et la production d'énergie nette (kW) pour certaines éoliennes en fonction de la vitesse de vent (Adorf et al., 2015). Les nombres de passages de chauves-souris ont été évalués par des enregistrements acoustiques à environ 125 m au-dessus du sol entre avril et octobre (2011 et 2012) dans des éoliennes situées sur des parcs allemands. Les données sur la production nette d'énergie proviennent d'Enercon (2012) ; les chiffres dans la légende représentent le diamètre des zones circulaires couvertes par les pales du rotor. De nouveaux modèles d'éoliennes, plus grandes, engendrent une production nette d'énergie plus élevée à moindre vitesse de vent, et chevauchent donc plus fortement l'activité des chauves-souris.

La vitesse de vent s'impose comme le paramètre le plus important à considérer lors du paramétrage des bridages, si bien que certains parcs utilisent des bridages basés uniquement sur ce critère. On observe des réductions des mortalités de chauves-souris plus ou moins importantes selon le seuil de vitesse de vent fixé, les sites suivis et les années d'étude (Figure 34). Chaque m/s supplémentaire réduirait la mortalité de 33% en moyenne (Frick et al., 2021), phénomène illustré par la Figure 35 : l'efficacité des bridages statiques augmente « proportionnellement à mesure que le seuil de vitesse de vent augmente, et les modèles et taux d'efficacité [sont] similaires entre les espèces » (Frick et al., 2024).

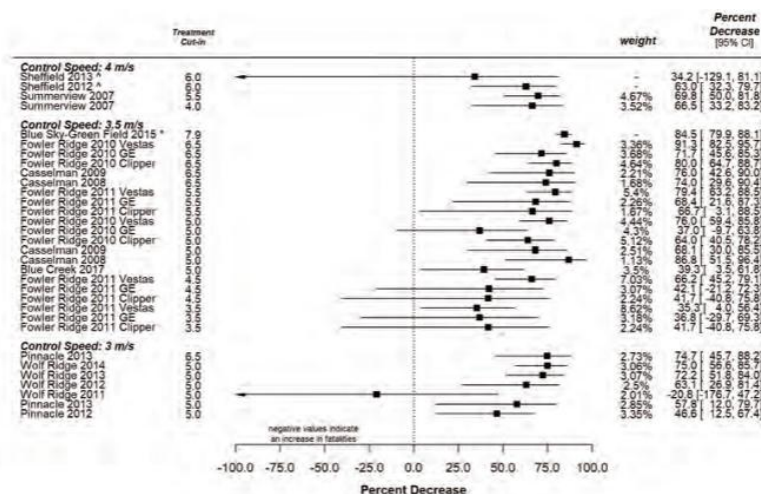


Figure 34 : Effet (rapport logarithmique des moyennes transformé en pourcentage de diminution) de la réduction du nombre total de décès de chauves-souris par bridages sur seuil de vitesse de vent, étudié sur les données de 8 parcs aux Etats-Unis entre 2009 et 2020 (Frick et al., 2021).

Un pourcentage plus élevé indique une réduction plus importante des décès dus aux bridages. Un pourcentage négatif indique une augmentation des décès. Les carrés représentent la différence moyenne en pourcentage pour chaque étude, et les lignes représentent l'intervalle de confiance à 95%.

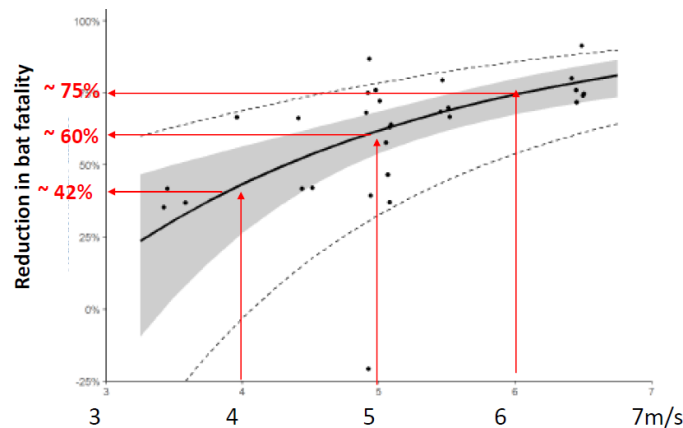


Figure 35 : Pourcentage de réduction des décès de chauves-souris (toutes espèces confondues) par bridages avec différents seuils de vitesse de vent en abscisses (Frick et al., 2021).

La réduction moyenne est représentée par la ligne continue, l'intervalle de confiance à 95% est représenté par le ruban gris, et un intervalle de prédiction à 95% (zone où 95% des valeurs tomberont) est indiqué par les lignes en pointillés. Les points de données représentent le ratio de la moyenne (ROM) des études utilisées dans le modèle. Aucune donnée n'était disponible pour les vitesses de démarrage inférieures à 3,5 m/s. La réduction des décès chez les chauves-souris est indiquée au niveau de la zone médiane balayée par le rotor des turbines étudiées.

Seulement, l'utilisation de bridages multicritères (c'est-à-dire de bridages basés sur plusieurs variables autre que le critère de vitesse de vent seul) est mise en avant comme nettement plus efficace, permettant « clairement une production d'électricité plus élevée couplée à un bénéfice pour les chauves-souris » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Ainsi, pour une même perte de production, un bridage multicritère préservera entre 13% et 45% de l'activité chiroptérologique à risque (selon les groupes) comparé à un bridage basé uniquement sur la vitesse de vent (Barré et al, mars 2023). De plus, ces bridages réduisent exponentiellement les risques pour les espèces de la guildes LRE.

Ainsi, « il apparaît moins pertinent d'augmenter simplement le seuil de vitesse de vent pour traiter un pourcentage d'activités [...] plus élevé, que de compléter un bridage simple par des critères de température, de pluviométrie... adapté en fonction des saisons ou des mois, voire en fonction des heures de la nuit, pour améliorer la protection de ces espèces de haut vol tout en optimisant la production électrique du parc » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

Cependant, comme présenté plus tôt, les bridages statiques peuvent entraîner des pertes de production importantes : en effet, étant basés sur une couverture d'activité « théorique », des éoliennes vont se retrouver arrêtées sous certains critères de bridage malgré l'absence d'activité. Une étude (Goutorbe et al., 2017) a estimé, sur une période d'échantillonnage couvrant en continu le mois d'octobre en 2016 d'une éolienne d'un parc français, que la durée totale d'arrêt préventif (avec des éoliennes mises en drapeau jusqu'à 3,5 m/s) représentait 13,4% de la durée de production de l'éolienne, alors que seul 0,83% de cette durée couvrait une activité chiroptérologique sur site. « Ces résultats montrent de manière générale une faible performance des modèles de [bridage] avec une surestimation de la probabilité de présence des chiroptères et un impact significatif sur la période de production sans pour autant réussir à couvrir 100 % de l'activité des chiroptères » (Goutorbe et al., 2017).

## BRIDAGES PREDICTIFS

Les bridages prédictifs (aussi appelés bridages algorithmiques, surtout dans la littérature anglophone) sont des bridages définis par un algorithme à l'aide d'une analyse multicritères (activité, mortalité et facteurs temporels, environnementaux et techniques).

Le programme de recherche RENEBAT (2007-2015) a permis de regrouper de nombreuses données issues de suivis d'activité à hauteur de nacelle en Europe, couplées aux suivis de mortalité au sol sous les mêmes éoliennes (Marchais et Vuitton, 2017) et aux vitesses de vent mesurées sur celles-ci sur plusieurs années.

La création d'une telle base de données a alors permis de développer des algorithmes, capables dans un premier temps de calculer le nombre de mortalités par collision par éolienne et par an en l'absence de bridage, en fonction de l'activité chiroptérologique, mais aussi des variables météorologiques (vitesses de vent) et techniques (diamètres des rotors). Par la suite, les algorithmes vont calculer deux types de vitesses de démarrage des éoliennes, avec comme objectif le non-dépassement d'un certain nombre de mortalités fixé comme paramètre d'entrée (<sup>1</sup>Ghanem et al., 2021) :

- d'une part, une vitesse globale couvrant l'ensemble de la période à risque, pour une nuit entière
- d'autre part, des vitesses optimisées pour chaque mois et chaque dixième de nuit (chaque dixième représentant 10% de la durée moyenne des nuits du mois étudié, Figure 36)

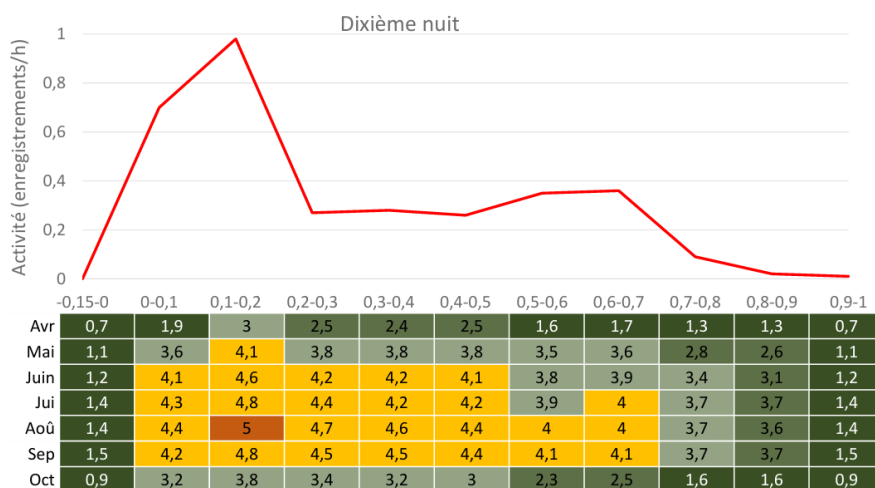


Figure 36 : Exemples de variations d'activité chiroptérologique par dixième de nuit en haut, et exemples de vitesses de vent de démarrage optimisées par un algorithme de bridage pour chaque mois et chaque dixième de nuit (<sup>2</sup>Ghanem et al., 2021)

D'autres bases de données conçues pour des études sont également utilisées pour la création de bridages prédictifs, regroupant elles aussi la fréquentation ou nombre de contacts au niveau des pales d'éoliennes sur plusieurs tranches horaires (nuit complète ou tranches de 10 minutes), avec les conditions météorologiques et le fonctionnement des turbines relevés au moment des détections de chauves-souris.

Les algorithmes de bridages « reposent sur une modélisation statistique du lien entre l'activité des chauves-souris et les différentes variables pertinentes (date, heure, vitesse de rotation de pale, vitesse de vent, température, précipitations, coordonnées x et y du site), tout en tenant compte de la structure des données par l'ajout d'effets aléatoires (année, identifiant du site, matériel et paramétrage d'enregistrement), en utilisant des modèles linéaires généralisés mixtes » (Barré, 2025).

Une étude de 2023 (Barré et al., mars 2023) s'est intéressée à la modélisation de l'activité des chauves-souris en relation avec plusieurs facteurs temporels, environnementaux et techniques pour les trois guildes de chiroptères (LRE, MRE, SRE). Elle visait à évaluer si un bridage prédictif, avec un algorithme entraîné sur une base de données formées de quatre ans d'enregistrement (2017-2020) sur 33 éoliennes de parcs éoliens français, serait plus efficace pour limiter l'exposition des chauves-souris au risque de collision qu'un bridage statique basé sur plusieurs combinaisons de seuils uniques de vitesse de vent et de température selon les saisons (à l'exception de l'hiver). Le bridage prédictif, lui, prenait en compte la date et l'heure de la nuit, le contexte paysager du parc, la pluviométrie ainsi que le fonctionnement des éoliennes, en plus des trois facteurs cités précédemment (Figure 37).

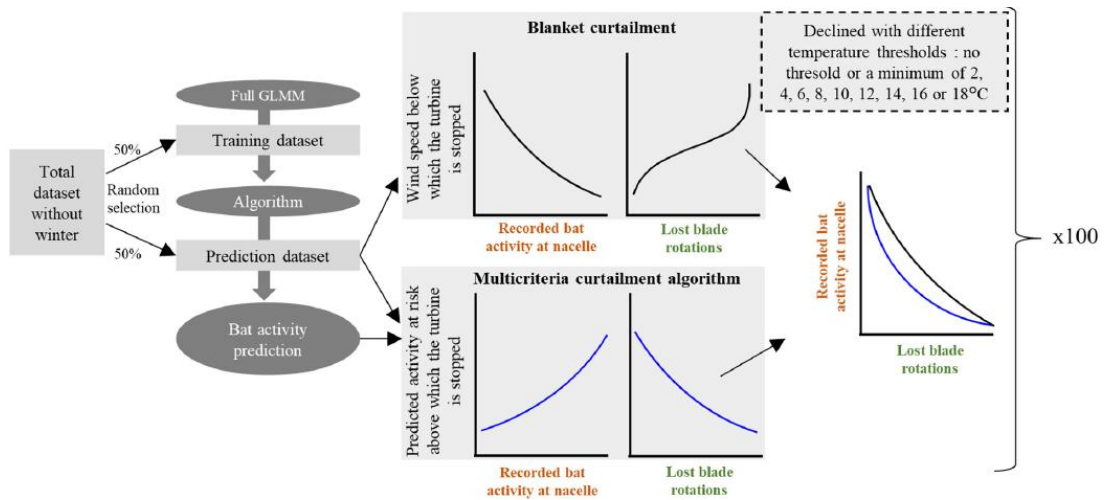
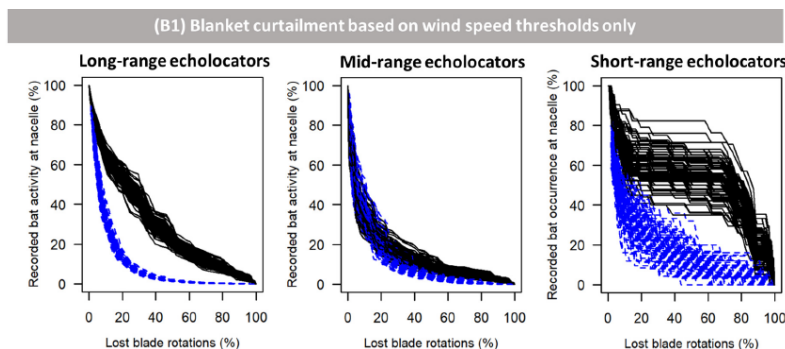


Figure 37 : Méthode d'évaluation de l'efficacité des deux types de bridages étudiés, avec le bridage statique représenté en noir et le bridage prédictif représenté en bleu (Barré et al., mars 2023)

Les résultats de cette étude montrent que le bridage prédictif « a le potentiel de réduire considérablement l'exposition des chauves-souris tout en maintenant la même production d'énergie » en comparaison avec le bridage statique sur seuils de vitesse de vent et température (Figure 38) : en effet, l'utilisation de l'algorithme permet une réduction moyenne de l'exposition de 20% à 29% pour la guildes LRE, de 7% à 12% pour la guildes MRE, et de 24% à 31% pour la guildes SRE selon le seuil de température considéré (Barré et al., mars 2023).

La différence d'efficacité entre la guildes MRE et la guildes LRE, toutes deux étant à haut risque de collision avec les pales d'éoliennes (Bas et al., 2017), s'explique principalement par le fait que le bridage statique est significativement moins efficace sur les espèces LRE, qui sont plus tolérantes aux conditions météorologiques non optimales. Alors, l'efficacité accrue du bridage prédictif sur ces espèces, dont la guildes est la plus sensible aux collisions, « renforce l'importance de passer des modèles de bridages statiques actuels à une approche basée sur un algorithme multicritère » (Barré et al., mars 2023).



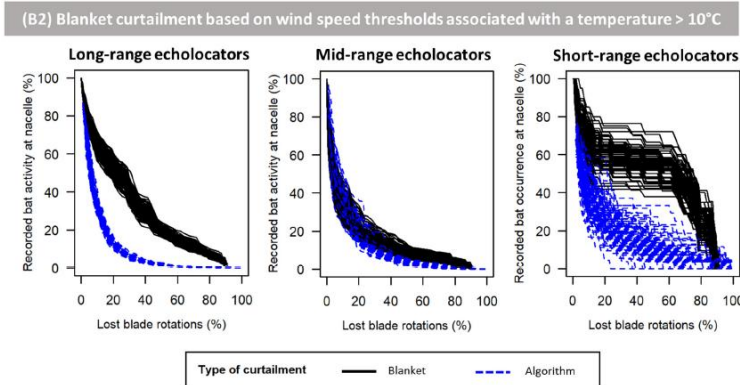


Figure 38 : Efficacité des deux types de bridages étudiés pour les trois guildes, respectivement LRE, MRE et SRE, avec le bridage statique (sur unique seuil de vitesse de vent en haut et sur seuils de vitesse de vent et de température en bas) représenté en noir et le bridage prédictif représenté en bleu (Barré et al., mars 2023)

Plus récemment, dans son étude (Barré, 2025), Barré compare lui aussi un bridage prédictif à un bridage statique ayant tous deux un même objectif : la préservation de 90% des contacts chiroptérologiques. Le premier est programmé à l'aide d'une base de données issues de plus de 29 000 nuits d'enregistrement sur 131 parcs éoliens français entre 2017 et 2023. Il affirme que, peu importe la tranche horaire étudiée et l'inclusion ou non d'une année de calibration, les bridages prédictifs sont « systématiquement nettement plus efficaces » que les bridages statiques conventionnels, car ils protègent au moins aussi bien les populations de chauves-souris pour de plus faibles pertes énergétiques (Barré, 2025).

L'auteur avance également que, d'après ses simulations, l'efficacité des bridages (définie comme le rapport entre protection des chiroptères et perte de rotations des pales) est « d'autant plus forte que la taille de la tranche horaire est réduite » pour les guildes LRE et MRE (Figure 39), démontrant ainsi « l'intérêt de brider les éoliennes sur de fines tranches horaires » (Barré, 2025).

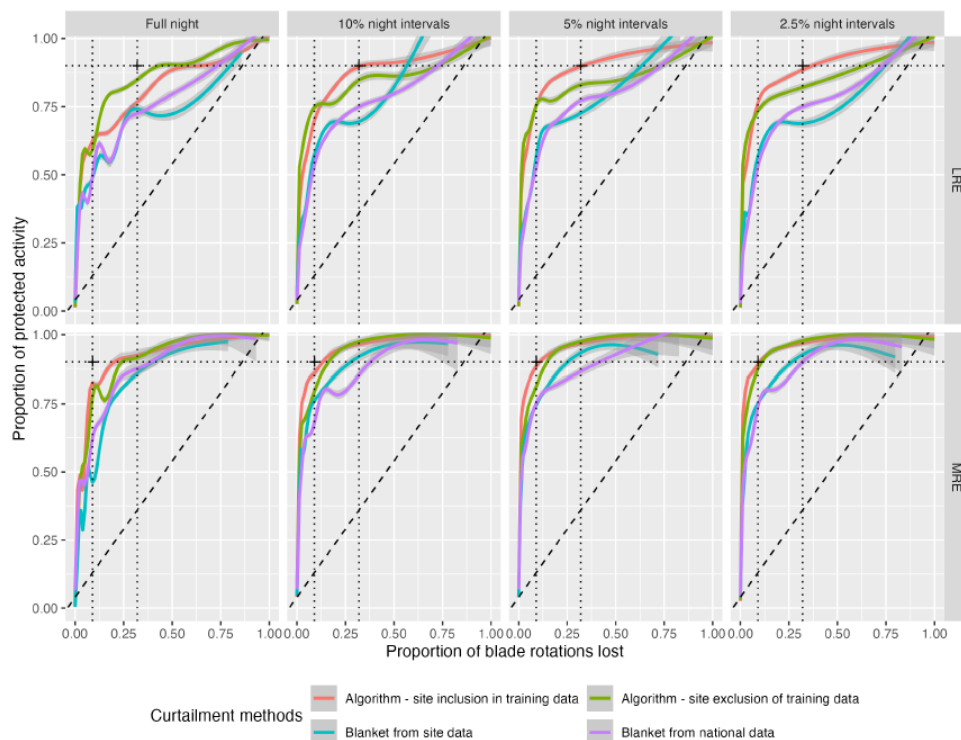


Figure 39 : Relation entre la proportion de chauves-souris protégées et la proportion de rotations de pales perdues pour quatre méthodes de bridage et quatre pas de temps différents (Barré, 2025).

En rouge, un algorithme incluant le site aux données d'entraînement, en vert un algorithme excluant le site des données d'entraînement, en bleu un bridage statique basé sur une combinaison de vitesse de vent et température définie sur la base des données du site ciblé, et en violet un bridage statique basé sur une combinaison de vitesse de vent et température définie sur la base d'un ensemble de données nationales.

La ligne pointillée diagonale indique une efficacité aléatoire : plus les courbes s'en éloignent, et plus les bridages sont efficaces. La ligne pointillée horizontale localise un niveau de protection de 90% des chauves-souris, et les verticales la proportion de rotation de pales perdue qui en résulte pour la meilleure méthode de bridage pour les guildes LRE et MRE.

La phénologie des populations de chauves-souris présentes sur les sites est alors prise en compte, et les pertes d'énergie se voient réduites. On observe une standardisation des bridages, une comparabilité et un traitement égal des données permettant l'obtention d'un haut niveau, par ailleurs ajustable, de protection des chiroptères (<sup>2</sup>Ghanem et al., 2021). En effet, l'ensemble de la base de données (qui doit être régulièrement mise à jour) peut être utilisé pour entraîner les algorithmes à identifier les risques de collisions, et pour simuler différents scénarii de gestion des éoliennes, en moyennant la prise en compte du matériel dans les modèles (Barré, 2025). Les paramètres des algorithmes peuvent être optimisés à travers un suivi d'activité à hauteur de nacelle sur l'année suivant leur mise en place, permettant une combinaison avec les données des anciens suivis.

De nombreux auteurs encouragent, en suivant l'exemple de nos voisins européens comme l'Allemagne, de développer l'utilisation des bridages prédictifs en France, qui « permettrai[ent] de compléter l'estimation de la mortalité issue des recherches de cadavres et de définir des plans de bridage spécifiques à chaque site, efficaces à la fois en termes de protection des chiroptères et de production d'énergie » (<sup>1</sup>Ghanem et al., 2021). Dans l'optique d'un équilibre optimal entre production et protection, les algorithmes de bridage assurent une réduction de l'exposition au risque de collision avec les pales et de la mortalité des chauves-souris tout en minimisant les pertes de production électrique, soit assurent l'atteinte d'un consensus entre intérêts économiques et conservation écologique (<sup>1</sup>Ghanem et al., 2021).

En revanche, on constate des incohérences récurrentes entre les paramétrages de bridages retenus et les sources de données disponibles : certains bridages prédictifs sont définis malgré l'absence de suivi d'activité en hauteur qualifiant les conditions de risque du site. Or, le suivi de mortalité en lui-même n'est pas suffisant pour percevoir ces conditions et donc dimensionner une mesure de bridage prédictif efficace. D'autant plus, il peut arriver qu'aucun bridage ne soit mis en place lorsqu'aucun cadavre n'est retrouvé, alors que l'activité chiroptérologique est importante et que les algorithmes prédisent une mortalité significative. Et, à l'inverse, des vitesses de bridage élevées non spécifiques à l'activité du site se retrouvent appliquées lorsque des cadavres sont retrouvés, selon les recommandations régionales des DREAL, alors que les suivis en hauteur témoignent d'une activité à des vitesses de vent plus faibles (<sup>1</sup>Ghanem et al., 2021).

Enfin, l'utilisation de données provenant de différentes méthodes d'enregistrement peuvent fortement biaiser les algorithmes. Pour contrer cela, il faudrait contrôler ces données, ou alors utiliser des bases de données réglementaires (telles que DEPOBIO en France) et exiger lors de la saisie des données leur liaison avec les méthodes utilisées pour leur récolte/enregistrement, ou idéalement harmoniser ces méthodes (Barré et al., mars 2023).

Les algorithmes doivent donc se voir être adaptés à tous les types de matériaux et de paramètres soit en utilisant des données homogénéisées, soit en se basant sur un rapport d'équivalence d'activité entre paires de matériaux/paramètres défini préalablement dans les travaux de recherche (Barré et al., mars 2023).

## BRIDAGES DYNAMIQUES

Les bridages dynamiques consistent en l'arrêt des éoliennes en temps réel, dès l'instant où la présence de chauves-souris est avérée à travers la détection d'ultrasons, ou encore l'imagerie thermique (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Ils reposent sur l'utilisation de systèmes de détection automatisés (SDA), qui permettent une détection des chiroptères en temps réel et un arrêt des éoliennes uniquement en cas de risque de collision avéré (France Renouvelables, 2024).

De nombreux systèmes ont été développés depuis quelques années, comme le DT-Bat développé par Sens of Life, l'AudioBat de Biodiv-wind ou encore le SMART SYSTEM de Wildlife Acoustics, pour n'en citer que quelques uns (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Ces systèmes se connectent aux systèmes SCADA des turbines, « système[s] informatique[s] doté[s] d'outils logiciels utilisés pour surveiller et contrôler les éoliennes et/ou les parcs éoliens à partir d'une console ou d'un centre d'opérations » (Emerson, 2025).

L'arrêt en temps réel des éoliennes permet une réduction des pertes de productibles couplée à une « protection optimale et plus précise des chauves-souris en permettant de couvrir des activités non prévisibles » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Cependant, la fiabilité et l'efficacité des bridages dynamiques, bien que prometteurs, doivent toutefois encore être étudiées : en effet, certaines questions se posent quant à la distance de captation des ultrasons, ou encore aux réglages de sensibilité.

En revanche, il est à noter que ces systèmes ne sont pas employés sur les parcs éoliens tels quels, mais appariés avec un algorithme pour former un nouveau type de bridage : les bridages mixtes.

## BRIDAGES MIXTES

Les bridages mixtes combinent ainsi bridages prédictifs et bridages dynamiques : actifs en continu sur l'ensemble des nuits couvertes, les bridages mixtes peuvent arrêter les éoliennes si une activité chiroptérologique est enregistrée en temps réel, même si les conditions et seuils de l'algorithme initial ne sont pas respectés (ce qui permet alors de couvrir des activités imprévisibles, par exemple les migrations lors de vitesses de vent élevées). D'autre part, les bridages mixtes n'arrêtent pas les éoliennes tant que le risque de collision fixé sur le parc (généralement à 10%) n'est pas atteint, même lorsque les conditions et seuils de l'algorithme sont respectés, ce qui permet lors d'une activité nulle ou inférieure à ce seuil de risque de collision d'assurer une production d'énergie.

Le système ProBat, issu du projet de recherche RENEBAT (Behr et al., 2011 ; Behr et al., 2015 ; Behr et al., 2017), est aujourd'hui très largement répandu en Allemagne, et même obligatoire dans certains länder (divisions administratives similaires aux régions françaises). Accessible en ligne, il est utilisé pour calculer des algorithmes de bridage en Europe centrale (Barré et al, février 2023). Un bridage ProBat mélange calcul de risque prédictif en fonction des paramètres météorologiques et détection en temps réel des chauves-souris à hauteur de nacelle (Hubert et Rico, 2016).

ProBat (Tableau 7) calcule le niveau d'activité des chauves-souris et la probabilité de collision d'un site grâce aux données d'activité chiroptérologique en altitude, les dimensions des éoliennes, les conditions météorologiques (vitesse de vent, température) mesurées en général au niveau des nacelles et échantillonnées l'année précédente. Ces données sont croisées avec d'autres variables

comme l'heure de la nuit, le mois et la région du site. Ce système calcule également la mortalité attendue en l'absence de bridage en corrélation avec les données des projets RENEBAT. L'évaluation de cette mortalité est renforcée par l'emploi d'une base de données regroupant des centaines de turbines, plus de 65 000 nuits d'enregistrement pendant plus de 10 ans (Behr et al., 2017) : l'étude des relations entre les facteurs environnementaux, l'activité chiroptérologique et la mortalité avec cette base de données limite les effets aléatoires d'une petite taille d'échantillon, comme par exemple des conditions météorologiques extrêmes (Barré et al, février 2023).

Tableau 7 : Efficacité de différents modèles de bridages mixtes ProBat (en comparaison avec des éoliennes non bridées), opérés sur un pays et une période de temps (Hubert et Rico, 2016)

Paramètres de bridage	Efficacité (% de réduction de la mortalité)	Perte de production annuelle (%)	Références
Objectif de préservation de 90% des contacts	90,3%	≤ 1%	Hubert et Rico, 2016 Belgique, 6 éoliennes sur 3 parcs, 2015
Objectif de préservation de 97% des contacts	97%	4%	Hubert et Rico, 2016 Belgique, 6 éoliennes sur 3 parcs, 2015

Alors, ProBat est en mesure de définir des vitesses de bridage spécifiques à chaque éolienne, par mois et pour chaque dixième de nuit, dans le respect des seuils fixés de potentiel de collision pour chaque espèce : par exemple, les landër tolèrent une mortalité de 0 à 2 individus dans le cas des noctules et de la Pipistrelle de Nathusius (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025).

Chirotech, outil développé par Biotope après six années de recherche (2006-2012), est un second système de bridage mixte, plus répandu en France, qui repose sur les mêmes principes. Tous les dispositifs de Chirotech sont connectés et supervisés en temps réel, accessibles à distance en continu (Biotope Technologies, 2025), et mobilisent un algorithme multifactoriel de prédiction de l'activité chiroptérologique (Kerbiriou et al., 2014). Ce système s'impose par une détection automatique des chauves-souris au niveau de la nacelle et sous les pales des éoliennes à l'aide de microphones aux filtres anti-bruit, réduisant alors le nombre de faux positifs et faux déclenchements d'arrêts à moins de 5%, ou encore à l'aide de caméras thermiques. Les ultrasons enregistrés sont identifiés en temps réel, et les données traitées instantanément. Les bridages ont des paramètres de déclenchement variables (automatique, selon des cycles jour/nuit ou encore des plages horaires), et sont configurables par groupes d'espèces, avec des durées d'arrêt différentes selon les microphones (Biotope Technologies, 2025).

Dans l'étude de Kerbiriou et al. de 2014, l'algorithme Chirotech comprenait :

- une génération d'hystérésis, avec le seuil de risque de collision qui définit l'arrêt des éoliennes 10% supérieur à celui permettant le redémarrage des éoliennes (pour éviter des séquences « d'arrêt-redémarrage » des machines trop fréquentes)
- un algorithme sous-jacent, visant à limiter l'envoi d'instructions dites « absurdes » aux éoliennes en fonction de l'activité (pas d'arrêt en journée, pas d'arrêt pour des vitesses de vent supérieures à 7 m/s, etc.), avec des valeurs de seuil assurant la couverture de 95% de l'activité chiroptérologique
- un redémarrage automatique des éoliennes en l'absence d'instruction pendant plus de cinq minutes
- un enregistrement et classement de l'ensemble des paramètres utilisés

L'outil Chirotech se présente comme une solution de réduction efficace (Tableau 8), offrant une baisse de mortalité significative entre 60% et 97% pour une perte de production électrique moyenne inférieure à 0,5% (Kerbiriou et al., 2013) ; perte peu impactante sur l'alimentation électrique, « dans la mesure où [elle a] lieu dans des conditions de vents faibles et irréguliers, et

lorsque la consommation électrique est à son plus bas niveau (période estivale, au cours de nuits chaudes) » (Kerbiriou et al., 2014).

Tableau 8 : Efficacité de différents modèles de bridages mixtes Chirotech (en comparaison avec des éoliennes non bridées), opérés sur deux pays et trois périodes de temps distincts (Kerbiriou et al., 2013 ; Kerbiriou et al., 2014 ; Hubert et Rico, 2016)

Efficacité (% de réduction de la mortalité)	Perte de production annuelle (%)	Références
64%	< 0,1 %	<i>Kerbiriou et al., 2013</i> France, 5 éoliennes sur 1 parc, 2009-2010
46% à 78%	< 0,1 %	<i>Kerbiriou et al., 2014</i> France, 8 éoliennes sur 1 parc, 2009-2010
90,45%	< 0,27 %	<i>Hubert et Rico, 2016</i> France, 4 éoliennes sur 1 parc, 2011-2012
78%	< 1%	<i>Kerbiriou et al., 2013</i> Canada, 2 éoliennes sur 1 parc, 2012
96,7%	< 0,68%	<i>Kerbiriou et al., 2013</i> Canada, 2 éoliennes sur 1 parc, 2012

Il permet une régulation des éoliennes spécifique à la turbine, configurable et adaptable, en fonction de l'activité et la phénologie locales des chauves-souris et des conditions environnementales locales. Enfin, sa mise en place conduit à une meilleure corrélation entre les occurrences de collisions et les conditions environnementales, ce qui permet par la suite de définir des modèles plus efficaces, réduisant aussi bien la mortalité de chauves-souris que la perte de production électrique (Kerbiriou et al., 2014).

Enfin, le système américain TIMR (pour « Turbine Integrated Mortality Reduction » qui peut se traduire par « Réduction de la Mortalité Intégrée à la Turbine ») intègre un critère d'activité chiroptérologique en temps réel en plus d'un seuil de vitesse de vent, et réduit de 37% l'exposition des chauves-souris comparé à un bridage statique (Collins et al., 2019 ; Gruver et al., 2022).

Les bridages mixtes offrent ainsi une meilleure conciliation entre protection des chauves-souris et optimisation de la production électrique (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025), se présentant aussi bien plus efficaces que plus économiques pour les exploitants. L'utilisation de données collectées en temps réel permet d'éviter davantage les collisions, « tout en minimisant le coût des arrêts inutiles au bénéfice des producteurs éoliens » (Hubert et Rico, 2016). De plus, ces systèmes sont configurables, adaptables à la configuration du parc, à ses éoliennes, tout comme au comportement et la vulnérabilité des espèces et aux conditions environnementales locales (Kerbiriou et al., 2014). Ainsi, il est possible de « définir des algorithmes de bridage différenciés selon les modèles d'éoliennes, les périodes, les créneaux horaires... qui permettent de réduire au mieux la mortalité, tout en ne contraignant pas fortement la production d'électricité » (Marchais et Vuitton, 2017), et d'améliorer et optimiser en permanence ces bridages.

L'efficacité des bridages mixtes se verrait améliorée par de nouvelles recherches, portant notamment sur la programmation de modèles comportementaux des chauves-souris propres aux sites (afin d'éviter l'utilisation de modèles régionaux comme il peut être le cas), ainsi que de modèles prenant en compte les comportements des espèces migratrices (Kerbiriou et al., 2014).

## SYNTHESE ET PERSPECTIVES

Chaque type de bridage apporte son ensemble d'avantages et d'inconvénients (Tableaux 9 et 10) : leur mise en place sur un parc doit être réfléchi, en fonction des enjeux propres au site d'implantation (France Renouvelables, 2024). Comme énoncé plus tôt, leur précision et efficacité progressent continuellement. Au-delà des paramètres actuellement utilisés, de nombreux chercheurs et auteurs soulignent les possibilités d'affinement de ces systèmes à travers l'étude et la prise en compte de variables supplémentaires, telles que les précipitations, dont l'effet sur l'activité des chauves-souris reste à définir.

Au-delà de ces systèmes, au vu de l'impact important sur les populations de certaines espèces, les scientifiques exigent la mise en place de mesures de régulation au minimum préventives sur tous les parcs éoliens en activité ou en développement pour réduire sensiblement les mortalités de chiroptères sur ces derniers (Beucher, 2020) car les bridages induisent des baisses des taux de mortalité d'une telle ampleur (Tableau 9) qu'elles pourraient, d'après plusieurs chercheurs, être « essentielle[s] pour prévenir le déclin des populations d'espèces vulnérables » (Frick et al., 2024).

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des différents types de bridages, de leurs paramètres, ainsi que de leurs échelles d'efficacité et de perte de production

Type de bridage	<i>Mise en drapeau</i>	<i>Bridage statique</i>	<i>Bridage prédictif</i>	<i>Bridage dynamique</i>	<i>Bridage mixte</i>
<b>Définition</b>	Arrêt des éoliennes sous seuil minimal de production	Plan reposant sur des combinaisons de seuils fixes de variables temporelles et météorologiques	Plan reposant sur un algorithme qui prédit une activité à risque selon des variables temporelles, météorologiques, paysagères et techniques	Plan reposant sur une détection en temps réel d'une activité à risque	Plan reposant sur une analyse prédictive d'une activité à risque, couplée à une détection en temps réel de l'activité
<b>Variables</b>	Vitesse de vent	Vitesse de vent, température, heure de la nuit, période de l'année	Vitesse de vent et sa direction, température, heure de la nuit, période de l'année, activité chiroptérologique connue, modèles d'éoliennes	Activité chiroptérologique mesurée en temps réel	Vitesse de vent et sa direction, température, heure de la nuit, période de l'année, activité chiroptérologique connue et mesurée en temps réel, modèles d'éoliennes
<b>Efficacité (% de réduction de la mortalité)</b>	61% en moyenne → 50% à 72%	70,56% en moyenne → 44% à 100%	≈ 90% 7% à 31% de plus qu'un bridage statique	NA	82,64% en moyenne → 46% à 97%
<b>Perte de production annuelle (%)</b>	0%	2,69% en moyenne → 0,16% à 10%	NA	NA	1,02% en moyenne → < 0,1% à 4%

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des différents types de bridages, de leurs principaux avantages et limites

Type de bridage	Avantages et limites
<b>Mise en drapeau</b>	La mise en drapeau des éoliennes n'impacte aucunement la production d'électricité, tout en limitant les risques de collisions à faible vitesse de vent.
<b>Bridage statique</b>	Basé sur une année d'écoute d'activité, les variations interannuelles ne sont alors pas prises en compte, et l'efficacité du bridage variera d'une année à l'autre. De plus, les combinaisons de seuils fixes ne sont pas toujours cohérentes avec l'écologie des espèces. Couvrant une activité théorique et non réelle, un bridage statique peut entraîner de grandes pertes de production malgré l'absence d'activité sur site.
<b>Bridage prédictif</b>	L'approche algorithmique permet de standardiser l'évaluation des risques pour les chiroptères, ainsi que de comparer les résultats entre parcs. De plus, l'algorithme est entraîné à identifier les risques de collisions d'un parc sur de grandes bases de données, sur plusieurs années d'écoute, et méthodologiquement hétérogènes (modèles et paramétrages des enregistreurs acoustiques), ce qui permet de prendre en compte de possibles variations interannuelles et d'éviter une perte d'informations par des tris. Cependant, l'utilisation de données hétérogènes peut aussi entraîner des biais dans les algorithmes, encourageant alors une uniformisation de celles-ci.
<b>Bridage dynamique</b>	Basé sur la détection de l'activité chiroptérologique et sur l'arrêt des éoliennes en temps réel, le bridage dynamique offre une protection plus précise des chauves-souris, couvrant alors des activités qui n'auraient été prévues par un bridage statique ou prédictif. Sa fiabilité (efficacité de détection) reste néanmoins à être étudiée.
<b>Bridage mixte</b>	Couplant prédiction d'activité, suivi d'activité en temps réel et suivi de mortalité, le bridage mixte évite davantage les risques de collision et s'adapte aux variations interannuelles et aux variations de cortèges d'espèces (variations naturelles, impact du changement climatique, etc.). Il limite les arrêts inutiles et par conséquent évite des pertes économiques aux exploitants, et peut être constamment configuré et optimisé.

La programmation et mise en œuvre des mesures de bridages nécessitent non seulement une bonne connaissance des espèces de chiroptères et des conditions de risque d'activité et de mortalité, mais aussi une maîtrise des « contraintes techniques, technologiques et économiques liées au fonctionnement des éoliennes » (Albespy et al., 2023). Or, de nombreux obstacles entravent leur développement : le méconnaissance de ces thématiques en France, l'absence d'état des lieux des pratiques actuelles, de mutualisation des retours d'expériences des parcs, ou encore de communication entre les acteurs de la filière engendrent des difficultés pour un déploiement national de ces pratiques de régulation. Le manque d'harmonisation de ces dernières, tout comme pour les suivis d'activité et de mortalité, offre une marge de progression importante.

Il paraît dès lors important que l'administration française se montre « plus ouverte sur l'expérimentation de dispositifs permettant d'optimiser les bridages (prédictif ou [mixte]) sans attendre d'éventuelles publications sur le sujet » (Syndicat des Energies Renouvelables, 2025). Le SER sous-entend le rôle que pourrait jouer l'administration dans la diffusion et même la promotion, avec l'aide de certains opérateurs, de systèmes prometteurs tel que l'algorithme ProBat, décrit plus tôt, employé à grande échelle en Allemagne, mais encore très peu utilisé en France, dont le CNPN (Conseil National de la Protection de la Nature) semble envisager une mise en œuvre sur le territoire français.

Le rapport du programme OPRECH recommande également « une mesure de régulation optimisée en France » (Albespy et al., 2023). Ses auteurs incitent eux aussi à la mise en œuvre systématique de mesures de bridages pour tous les parcs éoliens en exploitation et tout nouveau projet. Malgré les lacunes quant à l'état et l'écologie des populations de chauves-souris sur le pays,

et au-delà du paramétrage et dimensionnement des bridages, la généralisation de ces derniers sur le territoire ne peut qu'entraîner « rapidement un effet massif de réduction des impacts à large échelle sur les populations de chiroptères » (Frick et Friedenber, 2021).

Ces mêmes auteurs incitent également à un traitement des sites « au cas par cas, sans à priori, avec la recherche constante du meilleur compromis entre la protection des chauves-souris et la production d'énergie, sur la base d'un jeu de données représentatif de la situation du site » (Albespy et al., 2023). Le rapport ouvre et conclue sur le besoin de mise en place de bridages pour réduire les impacts des éoliennes sur les chauves-souris.

Les scientifiques s'accordent tous à ce sujet : « le perfectionnement et la démocratisation des mesures de régulation peuvent nécessiter une sensibilisation large, le partage et la valorisation des retours d'expériences, et l'établissement progressif de prescriptions ou guides techniques » (Beucher, 2020).

## **POINTS DE CE RAPPORT A PRENDRE EN CONSIDERATION**

Il semble important de clarifier que les chiffres présentés dans le Tableau 9 et dans l'ensemble de ce rapport ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble des systèmes de bridages utilisés aujourd'hui. La majorité des données étudiées sont issues de documents et travaux de recherche rendus publics, et ne forment par conséquent qu'un aperçu de l'efficacité des différents types de bridages ainsi que des pertes de production engendrées par ces derniers.

Il est aussi essentiel d'exposer les limites inhérentes aux études présentées dans ce rapport. En effet, pour bon nombre des travaux de recherche exposés précédemment, les conditions d'étude et méthodes utilisées se montrent contestables : tests à portée locale (souvent un seul parc, avec un faible nombre d'éoliennes) et/ou expériences relativement brèves (des bridages mis en place généralement sur une unique année, sur seulement quelques mois voire dans certains cas quelques semaines) qui soulèvent le besoin d'études plus « encadrées » sur le long terme.

D'autant plus, la comparaison de l'efficacité des bridages entre plusieurs parcs est difficile et, si présentée dans une étude, est à remettre en question (Bats and Wind Energy Cooperative, 2018 ; Hein et Straw, 2021). En effet, il faudrait pour chaque travail de recherche savoir si les conditions uniques de ce dernier compliquent l'extrapolation et la comparaison des résultats d'études entre différents parcs (Frick et al., 2024). Le plus souvent, le pourcentage de réduction de la mortalité avec les paramètres de bridage associés sont comparés entre eux, mais cela implique la non prise en compte des variations importantes entre les études (dues à des différences d'environnement, de caractéristiques des éoliennes, de la taille d'échantillons des éoliennes bridées et des éoliennes témoins, etc.).

Les résultats des études dépendent fortement des circonstances uniques des parcs, des régimes éoliens en place et des contraintes de conception expérimentale. Ignorer de tels facteurs limite alors la capacité des chercheurs à quantifier l'effet des bridages dans des conditions spécifiques (Frick et al., 2024).

De plus, le travail de comparaison fut complexifié par l'inconsistance des nomenclatures des types de bridage dans la littérature scientifique (un même nom pouvant être utilisé pour désigner différents modèles de bridages).

# CONCLUSION

---

La décarbonisation de la production énergétique et la préservation de la biodiversité sont essentielles pour maintenir la stabilité écologique mondiale (Frick et al., 2024). Ainsi, « la question des impacts du développement éolien sur les chiroptères est symbolique du défi qui consiste à concilier les deux principaux enjeux pour les générations futures que sont le dérèglement climatique et l'érosion de la biodiversité » (Beucher, 2020). Il est aujourd'hui urgent, dans un contexte de développement de l'éolien, que les acteurs de la filière agissent de manière responsable et concertée pour une démocratisation, une mise en place et une optimisation systématiques des mesures de bridages sur leurs parcs. La conciliation entre production d'énergie éolienne et protection des chiroptères repose en effet sur une réduction importante des mortalités sur l'ensemble des parcs nationaux et internationaux, mais également sur l'étude des impacts divers observés sur ces derniers (collisions, barotraumatismes, mais aussi phénomènes d'attraction et pertes d'habitats) et de l'évolution des populations de chauves-souris (Beucher, 2020).

Les suivis de mortalité restent sujets à de nombreuses limites (intervalle entre les recherches, végétation, prédation, éloignement des individus subissant des barotraumatismes, etc.), conduisant à biaiser les estimations et à sous-estimer ou surestimer le taux de mortalité des parcs. Or, l'évaluation des risques de collision pour les chiroptères repose encore majoritairement en France sur les résultats de ces suivis, tandis que ceux des suivis d'activité en hauteur « ne sont pas pleinement exploités » (Ghanem et al., 2021). Il paraît alors pertinent de développer l'utilisation de la détection automatique des chiroptères en continu à hauteur de nacelle lors des suivis d'activité post-implantation, afin de « [s']affranchir des incertitudes » liées aux suivis de mortalités, et « de conduire à une analyse statistique plus robuste grâce à l'étude d'un nombre d'évènements plus important » (Kerbiriou et al., 2014). Pour cela, il est nécessaire de standardiser les méthodes et les paramètres d'enregistrement des microphones acoustiques, pour assurer à large échelle une comparabilité et une égalité de traitement des données acoustiques d'activité chiroptérologique (Ghanem et al., 2021).

Les parcs éoliens appartenant au cadre des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement), ces derniers appliquent la doctrine ERC (Eviter, Réduire, Compenser). Les bridages éoliens s'imposent alors comme la mesure de réduction des risques de collision la plus mise en œuvre par les exploitants, voire dans de plus en plus de parcs et de projets imposée par les autorités environnementales (Barluet de Beauchesne et al., 2025), avec une couverture de 90% de l'activité chiroptérologique généralement demandée (Bonmort et al., 2022).

L'arrêt programmé préventif des éoliennes lorsque l'activité chiroptérologique est importante est défini en fonction des conditions environnementales les plus favorables à cette activité ; soit en fonction de variables le plus souvent temporelles (saison, heure de la nuit, etc.) et météorologiques (vitesse de vent, température, etc.). Une telle gestion du fonctionnement des éoliennes limite leurs impacts sur les chauves-souris, tout en entraînant des pertes de production plus ou moins notables selon les systèmes : la vitesse de vent se présente comme le facteur engendrant le plus de perte, suivi par les plages de couverture horaire et enfin par la température (Bonmort et al., 2022).

Les bridages les plus privilégiés en France aujourd'hui sont les bridages statiques, programmés pendant les périodes non hivernales, avec de faibles vitesses de vent et des températures douces, soit lorsque les chauves-souris sont le plus actives, et lorsque la production

d'énergie est faible. Ces derniers parviennent en effet à réduire considérablement le risque et le nombre de mortalités sur les parcs (70,56% de réduction de la mortalité en moyenne), mais leur efficacité « reste néanmoins extrêmement variable et les déterminants de la probabilité de collision restent encore mal connus » (Barré et Kerbirou, 2021), et même « incomplète » selon plusieurs publications (Kravchenko et al., 2020 ; Adams et al., 2021 ; Frick et al., 2021 ; Kaiser et al., 2022).

S'il est aujourd'hui clairement admis que les conditions environnementales temporelles et météorologiques (Greenaway et al., 2003 ; Gravier et al., 2018 ; Bas et al., 2021), et encore la structure et la nature du paysage (Arlettaz et al., 2013 ; Claireau et al., 2018 ; Fahrig et al., 2018) influencent l'activité chiroptérologique au sol et en altitude, ces paramètres sont encore difficilement croisés entre eux, car ils « interagissent entre eux et affectent tous l'activité des chiroptères simultanément » (Barré et Kerbirou, 2021).

C'est pourquoi de nombreux auteurs ont tendance à encourager la mise en place, à l'échelle nationale et mondiale, de bridages prédictifs ou mixtes, car « [leurs] avantages tant sur la production d'énergie que sur la biodiversité seront plus élevés dans la plupart des situations » (Barré et al., mars 2023). Ceux-ci, alors basés sur des algorithmes multifactoriels ainsi que sur une détection en temps réel pour les seconds, s'avèrent plus efficaces pour réduire le risque de mortalité (Barré et al., mars 2023) : en effet, les arrêts des éoliennes se font en temps réel en fonction des facteurs météorologiques (vitesse de vent et température mais encore pluviométrie), des conditions temporelles (saison de l'année, date et heure de la nuit), mais aussi en fonction des caractéristiques du paysage, des dimensions et de la vitesse de rotation des éoliennes. Ces mêmes auteurs estiment que ces deux types de bridages devraient « permettre d'éviter la plupart des collisions tout en minimisant la perte de production » (Behr et al., 2017). Des études futures pourraient permettre de comparer ces deux stratégies de réduction, dans l'optique de souligner les forces et faiblesses de chacune, notamment en ce qui concerne les contraintes technologiques et budgétaires pour les exploitants (Barré et al., mars 2023).

La programmation d'algorithmes de bridage nécessite cependant des bases de données fiables et homogènes, et nécessitera dans le futur un nombre important d'années et de sites de suivi, afin de couvrir des gradients de paysage plus importants, de prendre en considération la stochasticité interannuelle de l'activité chiroptérologique, mais aussi de mettre à jour ces algorithmes et les seuils de protection définis par l'administration avec les données les plus récentes tenant compte du changement climatique. De plus, ces systèmes tendront à définir une prédiction du risque de mortalité à une échelle plus fine, à travers notamment une modélisation de l'activité chiroptérologique sur une échelle intra-nuit (par tranche de 10 ou 30 minutes par exemple), « pour tenir compte de la variation de l'activité des chauves-souris pendant la nuit et ainsi minimiser encore plus les pertes de production » (Behr et al., 2017 ; Barré et Kerbirou, 2021).

Tous les travaux présentés dans ce rapport convergent vers la même conclusion : les mesures de bridages sont toujours efficaces pour réduire la mortalité de chauves-souris sur les parcs éoliens. Si les mesures d'évitement doivent être préférées aux stratégies de réduction ou encore de compensation pour limiter les impacts de ces derniers (Barré et al., novembre 2022), il apparaît clairement dans l'ensemble des études citées le besoin d'une implémentation urgente et systématique de systèmes de bridages aux éoliennes, et d'une augmentation du nombre de parcs bridés en France (Barré et al., 2021). Le coût de ces systèmes doit alors être pris en compte par les exploitants avec les pertes de revenus qu'ils entraînent. Il est nécessaire de poursuivre à l'avenir l'étude et l'expérimentation de bridages, sur des périodes de temps plus longues et sur un territoire étendu et hétérogène, pour pouvoir concevoir des systèmes d'autant plus complets, adaptables à tout parc éolien et proportionnés aux enjeux identifiés des sites (approche au cas par cas).

# BIBLIOGRAPHIE

---

ABELL, Robin, BROOKS, Thomas, GITTLEMAN, J. L., JENKINS, Clinton N., JOPPA, Lucas N., PIMM, Stuart L., RAVEN, P. H., ROBERTS, Callum M., SEXTON, Joseph O.. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, [en ligne], mai 2014, vol. 344, n°6187, p. 987-997. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/science.1246752> >.

ADAMS, Amanda M., FENTON, Melville Brockett, HAMILTON, Rachel M., JANTZEN, Meredith K.. Do you hear what I hear? Implications of detector selection for acoustic monitoring of bats. *Methods in Ecology and Evolution*, [en ligne], décembre 2012, vol. 3, n°6, p. 992-998. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2012.00244.x> >.

ADAMS, Evan, GULKA, Julia, WILLIAMS, Kathryn. A review of the effectiveness of operational curtailment for reducing bat fatalities at terrestrial wind farms in North America. *PLOS One*, [en ligne], novembre 2021, vol. 16, n°11, p. 1-21. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256382> >.

ADEME, MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (MEDD). *Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens*. [en ligne]. 2004, p. 1-125. Disponible sur : < [https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/filebase/Nature/Biodiversity/Preporvki%20Rykwodstwa%20Dokladi/Guide\\_eolien\[1\].pdf](https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/filebase/Nature/Biodiversity/Preporvki%20Rykwodstwa%20Dokladi/Guide_eolien[1].pdf) > (25/10/2025).

ADORF, Frank, BACH, Lothar, LEHNERT, Linn Sophia, PETERSON, Gunārs, VOIGT, Christian Claus. Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *European Journal of Wildlife Research*, [en ligne], février 2015, vol. 61, n°2, p. 213-219. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10344-015-0903-y> >.

AGUDELO, M. Sofía, ANDERSON, Ryan, MABEE, Todd J., PALMER, Rosa. Post-construction bird and bat fatality monitoring studies at wind energy projects in Latin America: A summary and review. *Heliyon*, [en ligne], juin 2021, vol. 7, n°6, p. 1-9. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07251> >.

<sup>1</sup>ALBESPY, Frédéric, BESNARD, Aurélien, BEUCHER, Yannick, ILLAC, Pierre, LANGLOIS, Aurélie, MATUTINI, Florence, NARDOU, Xavier. *Programme OPRECh. Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères : Analyse des pratiques nationales, tests expérimentaux et recommandations – Rapport final*. [en ligne]. ADEME. 2023, p. 1-243. Disponible sur : < <https://librairie.ademe.fr/energies/6242-programme-oprech.html> >.

<sup>2</sup>ALBESPY, Frédéric, BESNARD, Aurélien, BEUCHER, Yannick, ILLAC, Pierre, LANGLOIS, Aurélie, MATUTINI, Florence, NARDOU, Xavier. *Programme OPRECh. Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères : Analyse des pratiques nationales, tests expérimentaux et recommandations – Synthèse*. [en ligne]. ADEME. 2023, p. 1-26. Disponible sur : < <https://librairie.ademe.fr/energies/6242-programme-oprech.html> >.

ALBESPY, Frédéric, BEUCHER, Yannick, LANGLOIS, Aurélie, MOUNETOU, Romain. Les pics d'activité des chauves-souris en plein ciel : vers une nouvelle perception de la typologie des risques d'impacts éoliens. Conférence : Séminaire Eolien & Biodiversité.

France : Artigues-près-Bordeaux, septembre 2017. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/329962750\\_Les\\_pics\\_d'activite\\_des\\_chauves-souris\\_en\\_plein\\_ciel\\_vers\\_une\\_nouvelle\\_perception\\_de\\_la\\_typologie\\_des\\_risques\\_d'impacts\\_eoliens](https://www.researchgate.net/publication/329962750_Les_pics_d'activite_des_chauves-souris_en_plein_ciel_vers_une_nouvelle_perception_de_la_typologie_des_risques_d'impacts_eoliens) >.

AMORIM, Francisco, REBELO, Hugo, RODRIGUES, Luísa. Factors influencing bat activity and mortality at a wind farm in the Mediterranean region. *Acta Chiropterologica*, [en ligne], décembre 2012, vol. 14, n°2, p. 439-457. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3161/150811012X661756> >.

ANDRE, Yann. *Protocoles de suivis pour l'étude des impacts d'un parc éolien sur l'avifaune*. [en ligne]. Rédaction LPO. 2009, p. 1-21. Disponible sur : < <https://voute.bape.gouv.qc.ca/dl/?id=00000392642> >.

ANTONIĆ, Oleg, JANEŠ, Magdalena, KRIŽAN, Josip, RNJAK, Dina. Reducing bat mortality at wind farms using site-specific mitigation measures: a case study in the Mediterranean region, Croatia. *Mammalia*, [en ligne], février 2023, vol. 87, n°3, 259-270. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1515/mammalia-2022-0100> >.

ARLETTAZ, Raphaël, BONTADINA, Fabio, FREY-EHRENBOLD, Annie, OBRIST, Martin K.. Landscape connectivity, habitat structure and activity of bat guilds in farmland-dominated matrices. *Journal of Applied Ecology*, [en ligne], février 2013, vol. 50, n°1, p. 252-261. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12034> >.

ARNETT, Edward B., BAERWALD, Erin F.. Impacts of Wind Energy Development on Bats: Implications for Conservation. In : ADAMS, Rick Alan, PEDERSEN, Scott C.. *Bat evolution, ecology, and conservation*. [en ligne]. New York : Springer New York, 2013, p. 435-456. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7397-8\\_21](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7397-8_21) > (06/11/2025).

ARNETT, Edward B., BAERWALD, Erin F., MATHEWS, Fiona, RODRIGUES, Luisa, RODRÍGUEZ-DURÁN, Armando, RYDELL, Jens, VILLEGAS-PATRACA, Rafael, VOIGT, Christian Claus. Impacts of Wind Energy Development on Bats: A Global Perspective. In : KINGSTON, Tigga, VOIGT, Christian Claus. *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. [en ligne]. Berlin, Lubbock : Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2015. P. 295-323. Html, pdf. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25220-9> > (20/10/2025).

ARNETT, Edward B., BROWN, Kent W., ERICKSON, Wallace P., FIELDER, Jenny K., HAMILTON, Brenda L., HENRY, Travis H., JAIN, Aaftab, JOHNSON, Gregory D., KERNS, Jessica, KOFORD, Rolf R., NICHOLSON, Charles P., O'CONNELL, Timothy J., PIORKOWSKI, Martin D., TANJERSLEY JR, Roger D.. Patterns of bat fatalities at wind energy facilities in North America. *The Journal of Wildlife Management*, [en ligne], janvier 2008, vol. 72, n°1, p. 61-78. Disponible sur : < <https://doi.org/10.2193/2007-221> >.

ARNETT, Edward B., ERICKSON, Wally, HEIN, Cris, JOHNSON, Greg. *A Synthesis of Operational Mitigation Studies to Reduce Bat Fatalities at Wind Energy Facilities in North America*. [en ligne]. The National Renewable Energy Laboratory. 2013, p. 1-37. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/298349872\\_A\\_Synthesis\\_of\\_Operational\\_Mitigation\\_Studies\\_to\\_Reduce\\_Bat\\_Fatalities\\_at\\_Wind\\_Energy\\_Facilities\\_in\\_North\\_America](https://www.researchgate.net/publication/298349872_A_Synthesis_of_Operational_Mitigation_Studies_to_Reduce_Bat_Fatalities_at_Wind_Energy_Facilities_in_North_America) >.

ARNETT, Edward B., ERICKSON, Wallace P., HOAR, Alexander R., JONHSON, Gregory D., KUNZ, Thomas H., LARKIN, Ronald P., STRICKLAND, M. Dale, THRESHER, Robert W., TUTTLE, Merlin D.. Ecological Impacts of Wind Energy Development on Bats: Questions, Research Needs, and Hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, [en ligne], août 2007, vol. 5, n°6, p. 315-324. Disponible sur : < <https://www.jstor.org/stable/20440676> >.

ARNETT, Edward B., HAYES, John P., HUSO, Manuela M. P., SCHIRMACHER, Michael. Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, [en ligne], mai 2011, vol. 9, n°4, p. 209-214. Disponible sur : < <https://www.researchgate.net/publication/261939946> Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities >.

ARNETT, Edward B., HORN, Jason W., KUNZ, Thomas H.. Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *The Journal of Wildlife Management*, [en ligne], janvier 2008, vol. 72, n°1, p. 123-132. Disponible sur : < <https://doi.org/10.2193/2006-465> >.

ARONSON, Jonathan. Current state of knowledge of wind energy impacts on bats in South Africa. *Acta Chiropterologica*, [en ligne], août 2022, vol. 24, n°1, p. 221-238. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2022.24.1.018> >.

ASCHWANDEN, Janine, BONTADINA, Fabio, HANAGASIOGLU, Mehmet, NILSSON, Marcos. Investigation of the effectiveness of bat and bird detection of the DTBat and DTBird systems at Calandawind turbine - Final Report. *Swiss Federal Office of Energy (SFOE)*, [en ligne], mai 2015, p. 1-142. Disponible sur : < <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/SFOE-2015-Detection.pdf> >.

AZAM, Clémentine, BAS, Yves, GASC, Amandine, JULIEN, Jean-François, KERBIRIOU, Christian, LE VIOL, Isabelle, LOIS, Grégoire, LORILLIER, Romain, MARMET, Julie. Vigie-Chiro : 9 ans de suivi des tendances des espèces communes. *Symbioses*, janvier 2015, [en ligne], nouvelle série, n°34 & 35, p. 1-4. Disponible sur : < <https://hal.science/hal-03766876v1/file/Kerbiriou%20et%20al.%20-%202015%20-%20Symbioses%20-%20Vigie-Chiro%209%20ans%20de%20suivi%20des%20tendances%20des%20espèces%20communes.pdf> >.

BACH, Lothar, BACH, Petra, COLLINS, J., DEKKER, Jasja, DUBOURG-SAVAGE, Marie-Jo, HARBUSCH, C., KARAPANDZA, Branko, KEPEL, Andrzej, KERVYN, Thierry, KOVAC, D., MICEVSKI, Branko, MINDERMAN, J., PARK, Kirsty J., RODRIGUES, Luisa. Guidelines for Consideration of Bats in Wind Farm Projects: Revision 2014. UNEP/EUROBATS. *EUROBATS*, [en ligne], janvier 2015, Publication Series No. 6, p. 1-68. Disponible sur : < [https://www.eurobats.org/sites/default/files/documents/publications/publication\\_series/pubseries\\_no6\\_english.pdf](https://www.eurobats.org/sites/default/files/documents/publications/publication_series/pubseries_no6_english.pdf) >.

BACH, Lothar, DUBOURG-SAVAGE, Marie-Jo, GREEN, Martin, HEDENSTRÖM, Anders, RODRIGUES, Luisa, RYDELL, Jens. Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. *Acta Chiropterologica*, [en ligne], décembre 2010, vol. 12, n°2, p. 261-274. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3161/150811010X537846> >.

BAERWALD, Erin F., BARCLAY, Robert M.R., FRICK, Winifred F., LOEB, Susan C., MCGUIRE, Liam P., MEDELLIN, Rodrigo A., POLLOCK, Jacob F., RUSSELL, Amy L., SRYMANSKI, Jennifer A., WELLER,

Theodore J.. Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*, [en ligne], mai 2017, vol. 209, p. 172-177. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.023> >.

BARATAUD, Michel. Acoustic ecology of European bats. Species Identification, Studies of Their Habitats and Foraging Behaviour. *Inventaires et biodiversité (Biotope)*, Muséum national d'Histoire naturelle, [en ligne], juillet 2015, vol. 8, p. 1-352. Disponible sur : < <https://sciencepress.mnhn.fr/en/collections/inventaires-biodiversite/acoustic-ecology-european-bats-1> >.

BARBARO, Luc, DELHOMMEL, Jeanne, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., GIFFARD, Brice, LADET, Sylvie, TORTOSA, Axelle, VIALATTE, Aude. Diverse agricultural landscapes increase bat activity and diversity: Implications for biological pest control. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, [en ligne], avril 2023, vol. 345, p. 1-12. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108318> >.

BARCLAY, Robert M.R, CRYAN, Paul M.. Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. *Journal of Mammalogy*, [en ligne], décembre 2009, vol. 90, n°6, p. 1330-1340. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1644/09-MAMM-S-076R1.1> >.

BARLOW, Jos, GRAHAM, Nicholas A. J., KOLDEWEY, Heather, J., LOWTON, Matthew J., MARIA DE CUNHA BUSTAMANTE, Mercedes, PETTORELLI, Nathalie, PRENTICE, Honor C., SEDDON, Nathalie, SUTHERLAND, William J.. Time to integrate global climate change and biodiversity science-policy agendas. *Journal of Applied Ecology*, [en ligne], novembre 2021, vol. 58, n°11, p. 2384-2393. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13985> >.

BARLUET DE BEAUCHESNE, Lucie, LEFEBVRE, Eléonore, ROCHE, Henri-Pierre. Comparative analysis of five passive ultrasonic recorders for bat detection. Technical report. *Biodiv-Wind*, [en ligne], février 2025, p. 1-44. Disponible sur : < [https://www.biodiv-wind.com/wp-content/uploads/2025/03/Technical-report\\_Comparative-analysis-of-five-passive-ultrasonic-recorders.pdf](https://www.biodiv-wind.com/wp-content/uploads/2025/03/Technical-report_Comparative-analysis-of-five-passive-ultrasonic-recorders.pdf) >.

BARNOSKY, Anthony D., CEBALLOS, Gerardo, EHRLICH, Paul R., GARCIA, Andres, PALMER, Todd M., PRINGLE, Robert M.. Accelerated Modern Human-Induced Species Losses: Entering the Sixth Mass Extinction. *Science Advances*, [en ligne], juin 2015, vol. 1, n°5, p. 1-5. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253> >.

BARRE, Kévin. *Régulation Intelligente Des Eoliennes : un dispositif gagnant-gagnant basé sur des algorithmes d'optimisation du compromis entre production d'énergie et risques de collisions avec la faune volante. Rapport scientifique et financier des projets lauréats en 2024. PEPS Energie (CNRS).* [en ligne]. Appel à projets : Rapport - Bilan scientifique et financier du projet PEPS 2024. CESCO - Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation, 2025, p. 1-6. Disponible sur : < <https://hal.science/hal-05049889v1> > (08/12/2025).

<sup>1</sup>BARRE, Kévin, BAS, Yves, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., GOISLOT, Corentin, JULIEN, Jean-François, KAUFFMAN, Cyprian, KERBIRIOU, Christian, LEROUX, Camille, LE VIOL, Isabelle, MARMET, Julie, ROBERT, Alexandre, ROEMER, Charlotte, SOTILLO, Alejandro. *Challenges of mitigating wind energy impacts on bats : focus on the French context.* [en ligne]. Séminaire : Actes du Séminaire Eolien et

Biodiversité. Paris : novembre 2021, p. 1-82. Disponible sur : < <https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/kerbirou seb2021.pdf> > (22/10/2025).

<sup>2</sup>BARRE, Kévin, BAS, Yves, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., GOISLOT, Corentin, JULIEN, Jean-François, KERBIRIOU, Christian, LEROUX, Camille, LE VIOL, Isabelle, MARMET, Julie, ROEMER, Charlotte, SOTILLO, Alejandro. *Éolien et Chiroptères : synthèse des connaissances sur les impacts au fil de la séquence ERC*. [en ligne]. Séminaire : Actes du Séminaire Eolien et Biodiversité. Paris : novembre 2021, p. 41. Disponible sur : < <https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/kerbirou seb 2021.pdf> > (22/10/2025).

BARRE, Kévin, BAS, Yves, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., KERBIRIOU, Christian, FRITZE, Marcus, LEROUX, Camille, LE VIOL, Isabelle, MARITON, Léa, ROEMER, Charlotte. Over a decade of failure to implement UNEP/EUROBATS guidelines in wind energy planning: a call for action. *Conservation Science and Practice*, [en ligne], novembre 2022, vol. 4, n°11, p. 1-11. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/CSP2.12805> >.

BARRE, Kévin, BAS, Yves, JULLIARD, Romain, KERBIRIOU, Christian, LE VIOL, Isabelle. Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation*, [en ligne], octobre 2018, vol. 226, p. 205-214. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011> >.

BARRE, Kévin, BEHR, Oliver, BONTADINA, Fabio, BRINKMANN, Robert, DIETZ, Markus, DISCA, Thierry, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., GHANEM, Simon, HUEMER, Senta, HURST, Johanna, KAMINSKY, Stefan K., KELM, Volker, KORNER-NIEVERGELT, Fränzi, LAUPER, Mirco, LINTOTT, Paul, NEWMAN, Christian, PETERSON, Trevor, PROKSCH, Jasmin, ROEMER, Charlotte, SCHORCHT, Wigbert, NAGY, Martina. Standardised and referenced acoustic monitoring reliably estimates bat fatalities at wind turbines: comments on 'Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats'. *Mammal Review*, [en ligne], février 2023, vol. 53, n°2, p. 65-71. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/mam.12310> >.

BARRE, Kévin, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., KERBIRIOU, Christian, ROEMER, Charlotte, SOTILLO, Alejandro. Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment. *Science of The Total Environment*, [en ligne], mars 2023, vol. 866, p. 1-12. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161404> >.

BARRE, Kévin, KERBIRIOU, Christian. Activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes : quels déterminants de la variation spatiotemporelle de cette activité ?. *Muséum National d'Histoire Naturelle*, [en ligne], août 2021, p. 1-37. Disponible sur : < <https://hal.science/hal-03957290v1> >.

BARRE, Kévin, KERBIRIOU, Christian, LEROUX, Camille, LE VIOL, Isabelle, VALET, Nicolas. Distance to hedgerows drives local repulsion and attraction of wind turbines on bats: Implications for spatial siting. *Journal of Applied Ecology*, [en ligne], juin 2022, vol. 59, n°8, p. 2142-2153. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14227> >.

BARRE, Kévin, KERBIRIOU, Christian, LEROUX, Camille, LE VIOL, Isabelle, VALET, Nicolas. Disentangling mechanisms responsible for wind energy effects on European bats. *Journal of*

*Environmental Management*, [en ligne], novembre 2023, vol. 346, p. 1-9. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118987> >.

BAS, Yves, COULON, Aurélie, DISCA, Thierry, ROEMER, Charlotte. Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. *Biological Conservation*, [en ligne], novembre 2017, vol. 215, p. 116-122. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.002> >.

BAS, Yves, COULON, Aurélie, DISCA, Thierry, ROEMER, Charlotte. Influence of landscape and time of year on bat-wind turbines collision risks. *Landscape Ecology*, [en ligne], octobre 2019, vol. 34, p. 2869-2881. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00927-3> >.

BAS, Yves, COULON, Aurélie, DISCA, Thierry, ROEMER, Charlotte. Influence of local landscape and time of year on bat-road collision risks. *Peer Community Journal*, [en ligne], décembre 2021, vol. 1, n°54, p. 1-38. Disponible sur : < <https://doi.org/10.24072/pcjournal.59> >.

BAS, Yves, DEVOS, Sébastien, ROEMER, Charlotte. *Assessment of bat mortality risk around human activities using unattended recordings for flight path reconstruction*. Conférence : 13th European Bat Research Symposium. Croatie : Sibenik, septembre 2014.

BASTANKHAH, Majid, PORTE-AGEL, Fernando, SHAMSODDIN, Sina. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorol*, [en ligne], 2020, vol. 174, p. 1-59. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0> >.

BATS AND WIND ENERGY COOPERATIVE (BWEC). *Bats and Wind Energy Cooperative 5th Science and All Committees Meeting: 2018 Workshop Proceedings*. Séminaire : Bats and Wind Energy Cooperative 5th Science and All Committees Meeting. Etats-Unis : National Wind Technology Center Boulder, Colorado, juin 2018.

BAY, Kimberly, NOMANI, Saif, TIDHAR, Wendy L., YOUNG, David P. Jr.. *NedPower Mount Storm Wind Energy Facility Post-Construction Avian and Bat Monitoring*. [en ligne]. Western EcoSystems Technology, Inc.. 2011, p. 1-40. Disponible sur : < [https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Young\\_et\\_al\\_2011\\_0.pdf](https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Young_et_al_2011_0.pdf) >.

BELL, Douglas A., SMALLWOOD, K. Shawn. Effects of wind turbine curtailment on bird and bat fatalities. *The Journal of Wildlife Management*, [en ligne], mai 2020, vol. 84, n°4, p. 685-696. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/jwmg.21844> >.

BENNETT, Emma M., FLORENT, Stevie N., GIBSON, Matthew, JACKSON, Alex, STARK, Elizabeth, VENOSTA, Mark. Curtailment as a successful method for reducing bat mortality at a southern Australian wind farm. *Austral Ecology*, [en ligne], juillet 2022, vol. 47, n°6, p. 1329-1339. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/aec.13220> >.

BERGOT, Anthony, DAI, Kaoshan, HUANG, Zhenhua, LIANG, Chao, XIANG, Wei-Ning. Environmental issues associated with wind energy – A review. *Renewable energy*, [en ligne], mars 2015, vol. 75, p. 911-921. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074> >.

BEHR, Oliver, BRINKMANN, Robert, DALTHORP, Dan, ETTERTSON, Matthew A., HUSO, Manuela M. P., KORNER-NIEVERGELT, Fränzi, KORNER-NIEVERGELT, Pius, NIERMANN, Ivo, ROTH, Tobias. Mortality

estimation from carcass searches using the R-package carcass — a tutorial. *Wildlife Biology*, [en ligne], janvier 2015, vol. 21, n°1, p. 30-43. Disponible sur : < <https://doi.org/10.2981/wlb.00094> >.

BEHR, Oliver, BRINKMANN, Robert, HELLRIEGEL, Barbara, KORNER-NIEVERGELT, Fränzi, KORNER-NIEVERGELT, Pius, NIERMANN, Ivo. A new method to determine bird and bat fatality at wind energy turbines from carcass searches. *Wildlife Biology*, [en ligne], décembre 2011, vol. 17, n°4, p 350-363. Disponible sur : < <https://doi.org/10.2981/10-121> >.

BEHR, Oliver, BRINKMANN, Robert, HOCHRADEL, Klaus, KORNER-NIEVERGELT, Fränzi, MAGES, Jürgen, NAGY, Martina, NIERMANN, Ivo, REICH, Michael, SIMON, Ralph, WEBER, Natalie. Mitigating Bat Mortality with Turbine-Specific Curtailment Algorithms: A Model Based Approach. In : KÖPPEL, Johann. *Wind Energy and Wildlife Interactions - Presentations from the CWW2015 Conference*. [en ligne]. Berlin : Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2017. P. 135-160. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3> > (15/11/2025).

BEUCHER, Yannick. Maîtrise des impacts éoliens sur les chauves-souris : actions et stratégie du Groupe Technique éolien de la SFEPM. *Symbioses*, [en ligne], 2020, n.s., 38, p. 3-8. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/340234208\\_Maitrise\\_des\\_impacts\\_eoliens\\_sur\\_les\\_chauves-souris\\_actions\\_et\\_strategie\\_du\\_GT\\_eolien\\_SFEPM](https://www.researchgate.net/publication/340234208_Maitrise_des_impacts_eoliens_sur_les_chauves-souris_actions_et_strategie_du_GT_eolien_SFEPM) >.

BIEDERMANN, Martin, BRINKMANN, Robert, DIETZ, Christian, DIETZ, Marcus, HÖHNE, Elena, HURST, Johanna, KARST, Inken, SCHORCHT, Wigbert. *Bats activity above the forest canopy - Poster Conference on Wind Energy and Wildlife impacts*. Conférence : 4th International Berlin Bat Meeting. Allemagne : Berlin, mars 2015, p. 10-12.

BIOTOPE TECHNOLOGIES. *CHIROTECH+ : le bridage hybride dynamique connecté*. [en ligne]. Avril 2025, p. 1-2. Disponible sur : < <https://www.biotope.fr/wp-content/uploads/2025/04/Fiche-produit-CHIROTECH.pdf> > (08/12/2025).

BOLLMANN, Kurt, FROIDEVAUX, Jérémy S.P., OBRIST, Martin K., ZELLWEGER, Florian. Optimizing passive acoustic sampling of bats in forests. *Ecology and Evolution*, [en ligne], décembre 2014, vol. 4, n°24, p. 4690-4700. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/ece3.1296> >.

BONACCORSO, Frank J., CRYAN, Paul M., DALTON, David C., DIEHL, Robert H., FRICKER, Paul D., GORRESEN, P. Marcos, HAYMAN, Davis T.S., HEIST, Kevin W., HINE, Cris D., HUSO, Manuela M., JOHNSON, Douglas H., SCHIRMACHER, Michael. *U.S. National Academy of Sciences*, [en ligne], septembre 2014, vol. 111, n°42, p. 15126-15131. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1073/pnas.1406672111> >.

BONMORT, Maggie, BRUNEAU, Mathieu, CANTEGRIL, Valerian, FAUCHER, Emmeline, GIRARD, Thomas, HERVÉ, Julien, LABOURÉ, Marie, LE ROUX, Sylvain, LESAGE, Benoit, MEREL, Floriane, PAPON, Pierre, PIANA, Felix, SUREAU, Quentin. Effets du paramétrage du bridage chiroptérologique sur la production des éoliennes. *ENCIS Environnement*, [en ligne], juin 2022, programme de recherche et développement n°13, p. 1-33. Disponible sur : < [https://encis-environnement.fr/sites/default/files/encis/documents/accordeon/ARTICLE\\_RetD\\_13\\_2021\\_20220620.pdf](https://encis-environnement.fr/sites/default/files/encis/documents/accordeon/ARTICLE_RetD_13_2021_20220620.pdf) >.

BOONMAN, Martijn, DIRKSEN, Sjoerd, JANSEN, Eric, KORNER-NIEVERGELT, Fränzi, LA HAYE, Maurice, LIMPENS, Herman, VAN DER VALK, Marc, VREUGDENHIL, Stefan. Wind turbines and bats in the Netherlands - Measuring and predicting. *Zoogdiervereniging & Bureau Waardenburg*, [en ligne], novembre 2013, p. 1-88. Disponible sur : < <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2356.6889> >.

BULLING, Lea, KÖPPEL, Johann, SCHUSTER, Eva. Consolidating the state of knowledge: a synoptical review of wind energy's wildlife effects. *Environmental Management*, [en ligne], avril 2015, vol. 56, p. 300-331. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0501-5> >.

CARRANZA, Maria Laura, DI FEBBRARO, Mirko, LOY, Anna, REBELO, Hugo, ROSCIONI, Federica, RUSSO, Danilo. A modelling approach to infer the effects of wind farms on landscape connectivity for bats. *Landscape Ecology*, [en ligne], avril 2014, vol. 29, p. 891-903. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/S10980-014-0030-2> >.

CAWTHEN, Lisa, HULL, C. L.. Bat fatalities at two wind farms in Tasmania, Australia: Bat characteristics, and spatial and temporal patterns. *New Zealand Journal of Zoology*, [en ligne], mars 2013, vol. 40, n°1, p. 5-15. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1080/03014223.2012.731006> >.

CHOI, Yu-Seong, KIM, Sun-Sook, YOO, Jeong-chil. Regional differences in winter activity of hibernating greater horseshoe bats (*Rhinolophus ferrumequinum*) from Korea. *Journal of Ecology and Environment*, [en ligne], décembre 2019, vol. 43, n°2, p. 1-8. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1186/s41610-018-0097-9> >.

CHOU, Cheng-Han, CHOU, Ta-Ching, HUANG, Yu-Po, HSIEH, Tsung-Yu, LIU, Wei-Ting, RYDELL, Jens. Bat fatalities at wind farms in Taiwan. *Mammal Study*, [en ligne], juin 2017, vol. 42, n°2, p. 121-124. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3106/041.042.0208> >.

CLAIREAU, Fabien, KERBIRIOU, Christian, LEUCHTMANN, Maxime, PINAUD, David. Modelling landscape connectivity for greater horseshoe bat using an empirical quantification of resistance. *Journal of Applied Ecology*, [en ligne], juin 2018, vol. 55, n°6, p. 2600-2611. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13228> >.

COLLINS, Jason D., GILLAND, Karen L., GOODRICH-MAHONEY, John, GRANDGENT, Chuck, GRUVER, Jeffrey C., HAYES, Mark A., HOOTON, Lauren A., LINDSAY, Stephen R., RABIE, Paul A., SCHUMACHER, Susan M., SMITH, Robin L.. A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecological Applications*, [en ligne], juin 2019, vol. 29, n°4, p. 1-18. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/eap.1881> >.

COMITE FRANÇAIS DE L'UICN. *La Liste rouge des espèces menacées en France : Mammifères de France métropolitaine*. [en ligne]. 2017, p. 10-12. Disponible sur : < <https://uicn.fr/wp-content/uploads/2017/11/liste-rouge-mammiferes-de-france-metropolitaine.pdf> > (23/10/2025).

DALTHORP, Daniel, DALTHORP, Mark, HUSO, Manuela, MINTZ, Jeffrey. Accounting for the fraction of carcasses outside the searched area in the estimation of bird and bat fatalities at wind energy facilities. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, [en ligne], avril 2024, book 7, chapter A3, p. 1-104. Disponible sur : < <https://pubs.usgs.gov/tm/7a3/tm7A3.pdf> >.

DALTHORP, Daniel, HUSO, Manuela. Accounting for unsearched areas in estimating wind turbine-caused fatality. *The Journal of Wildlife Management*, [en ligne], février 2014, vol. 78, n°2, p. 347-358. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/jwmg.663> >.

DARRAS, Kevin FA, DEPPE, Franziska, FABIAN, Yvonne, KARTONO, Agus P., KOLBREK, Bjørn, MULYANI, Yeni A., PRAWIRADILAGA, Dewi M., RUBIANO, Andres Angulo. High microphone signal-to-noise ratio enhances acoustic sampling of wildlife. *PeerJ Life and Environment*, [en ligne], octobre 2020, vol. 8, p. 1-21. Disponible sur : < <https://doi.org/10.7717/peerj.9955> >.

DELIUS, Anna, ELLERBROK, Julia S., FARWIG, Nina, PETER, Franziska, VOIGT, Christian Claus. Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites. *Journal of Applied Ecology*, [en ligne], juillet 2022, vol. 59, n°10, p. 2497-2506. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14249> >.

DENZINGER, Annette, MOSS, Cynthia F., SCHNITZLER, Hans U.. From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends in Ecology & Evolution*, [en ligne], août 2003, vol. 18, n°8, p. 386-394. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00185-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00185-X) >.

DE OLIVEIRA, Larissa R., DO AMARAL, Izidoro S., FERRAZ, Marlon R., MADER, Aurelea, PEREIRA, Jessica B., PEREIRA, Maria J. R.. Wind farm bat fatalities in southern Brazil: Temporal patterns and influence of environmental factors. *Hystrix*, [en ligne], janvier 2020, vol. 31, p. 40-47. Disponible sur : < <https://doi.org/10.4404/hystrix-00256-2019> >.

DREAL Bourgogne-Franche-Comté. *Guide « Projet éolien et espèces protégées » : préconisations pour les études d'impacts – Service Biodiversité et Patrimoine*. [en ligne]. Juin 2025, version 1, p. 1-55. Disponible sur : < [https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide\\_cadrage\\_ep\\_dossier\\_eolien\\_vf.pdf](https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_cadrage_ep_dossier_eolien_vf.pdf) > (08/12/2025).

DÜRR, Tobias. Cas de mortalité de chauves-souris par éoliennes connus en Europe. *Office national de l'environnement du Brandebourg*, [en ligne], février 2025, p. 1. Disponible sur : < [https://www.sfepm.org/sites/default/files/inline-files/Mortalite\\_Europe\\_02-2025.pdf](https://www.sfepm.org/sites/default/files/inline-files/Mortalite_Europe_02-2025.pdf) >.

EMERSON. *Système SCADA pour les éoliennes*. [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.emerson.com/fr-fr/automation/control-and-safety-systems/distributed-control-systems-dcs/ovation-distributed-control-system/wind-turbine-controls/wind-turbine-scada-system> > (15/11/2025).

FAHRIG, Lenore, FRANCIS, Charles M., MARTIN, Amanda E., MONCK-WHIPPI, Liv. Farmland heterogeneity benefits bats in agricultural landscapes. *Agriculture Ecosystems & Environnement*, [en ligne], février 2018, vol. 253, p. 131-139. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.001> >.

FLANDERS, Jon, FRICK, Winifred F., KINGSTON, Tigga. A review of the major threats and challenges to global bat conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, [en ligne], juin 2020, vol. 1469, n°1, Special Issue: The Year in Ecology and Conservation Biology, p. 5-25. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/nyas.14045> >.

FONDATION POUR LA NATURE ET L'HOMME (FNH). *Les chauves-souris sont nos alliées, protégeons-les !*. [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.fnh.org/les-chauves-souris-sont-nos-alliees/> > (23/10/2025).

FRANCE RENOUEVABLES. Eolien et biodiversité – Des solutions pour la nature. *France Renouvelables*, [en ligne], 2024, p. 61. Disponible sur : < [https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/12/France\\_renouvelables\\_Eolien\\_biodiversite\\_VFF.pdf](https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/12/France_renouvelables_Eolien_biodiversite_VFF.pdf) >.

FRANCE RENOUEVABLES. *L'éolien terrestre, une énergie renouvelable indispensable*. [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.france-renouvelables.fr/eolien-terrestre/> > (03/11/2025).

FRICK, Winifred F., FRIEDENBERG, Nicholas A.. Assessing fatality minimization for hoary bats amid continued wind energy development. *Biological Conservation*, [en ligne], octobre 2021, vol. 262, p. 1-10. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109309> >.

FRICK, Winifred F., HEIN, Cris D., HUSO, Manuela M. P., O'MARA, M. Teague, WHITBY, Michael D.. A decade of curtailment studies demonstrates a consistent and effective strategy to reduce bat fatalities at wind turbines in North America. *Ecological Solutions and Evidence*, [en ligne], août 2024, vol. 5, n°3, p. 1-11. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12371> >.

FRICK, Winifred F., SCHIRMACHER, Michael R., WHITBY, Michael D.. The state of the science on operational minimization to reduce bat fatality at wind energy facilities. *The National Renewable Energy Laboratory*, [en ligne], mai 2021, p. 1-99. Disponible sur : < <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Whitby-et-al-2021.pdf> >.

<sup>1</sup>GHANEM, Simon, KELM, Volker, VANHOVE, Hugo. *L'énergie éolienne et les chauves-souris : un conflit avec des solutions ?*. [en ligne]. Séminaire : Actes du Séminaire Eolien et Biodiversité. Paris : novembre 2021, p. 54-56. Disponible sur : < [https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/vanhove\\_seb\\_2021.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/vanhove_seb_2021.pdf) > (22/10/2025).

<sup>2</sup>GHANEM, Simon, KELM, Volker, VANHOVE, Hugo. *Chauves-souris et énergie éolienne : un conflit écologique avec des solutions ?*. [en ligne]. Séminaire : Actes du Séminaire Eolien et Biodiversité. Paris : novembre 2021, p. 1-32. Disponible sur : < [https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/vanhove\\_seb2021.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/vanhove_seb2021.pdf) > (22/10/2025).

GIBSON, Luke, LAURANCE, William F., WILMAN, Elspeth N.. How Green is 'Green' Energy?. *Trends in Ecology & Evolution*, [en ligne], décembre 2017, vol. 32, n°12, p. 922-935. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2017.09.007> >.

GOUTORBE, Emile, ROCHE, Henri-Pierre, VALLES, Fabien. *SafeWind Chiro - Evaluation de l'activité des chiroptères à proximité des éoliennes par vidéo détection*. [en ligne]. Séminaire : Actes du Séminaire Eolien et Biodiversité. Artigues-près-Bordeaux : novembre 2017, p. 74-80. Disponible sur : < [https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/roche-h-p\\_seb2017.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/roche-h-p_seb2017.pdf) > (23/10/2025).

GRAVIER, Dorian, ROTHHAUPT, Karl-Otto, SALVARINA, Ioanna. Seasonal bat activity related to insect emergence at three temperate lakes. *Ecology and Evolution*, [en ligne], mars 2018, vol. 8, n°7, p. 3738-3750. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/ece3.3943> >.

GREENAWAY, F., JONES, G., PARSONS, K.K.. Swarming activity of temperate zone microchiropteran bats: effects of season, time of night and weather conditions. *Journal of Zoology*, [en ligne], novembre 2003, vol. 261, n°3, p. 257-264. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1017/S0952836903004199> >.

GRUVER, Jeffery, NASMAN, Kristen, RABIE, Paul A., SCHUELLER, Steve, SCHUMACHER, Susan, WELCH-ACOSTA, Brandi. 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*, [en ligne], avril 2022, vol. 17, n°4, p. 1-16. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266500> >.

HAQUART, Alexandre, JULIEN, Jean-François, KERBIRIOU, Christian, LUSTRAT, Philippe, MONSARRAT, Sophie, ROBERT, Alexandre. Information on population trends and biological constraints from bat counts in roost cavities: a 22-year case study of a pipistrelle bats (*Pipistrellus pipistrellus* Schreber) hibernaculum. *Wildlife Research*, [en ligne], mai 2015, vol. 42, n°1, p. 35-43. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1071/WR14197> >.

HEIN, Cris, STRAW, Bethany. Proceedings from the State of the Science and Technology for Minimizing Impacts to Bats from Wind Energy. *National Renewable Energy Laboratory*, [en ligne], mars 2021, p. 1-67. Disponible sur : < [https://www.batsandwind.org/docs/batsandwindenergycooperativelibraries/assets/bat-technology-workshop-proceedings-2021.pdf?sfvrsn=8b7e0a91\\_1](https://www.batsandwind.org/docs/batsandwindenergycooperativelibraries/assets/bat-technology-workshop-proceedings-2021.pdf?sfvrsn=8b7e0a91_1) >.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers. *IPCC*, [en ligne], avril 2022, p. 3-48. Disponible sur : < [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf) >.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (IPBES). Scientific Outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. *IPBES*, [en ligne], juin 2021, p. 1-256. Disponible sur : < <https://doi.org/10.5281/zenodo.4659158> >.

JONES, Gareth, REBELO, Hugo, RODRIGUES, Luisa, SANTOS, Helena. Using species distribution modelling to predict bat fatality risk at wind farms. *Biological Conservation*, [en ligne], janvier 2013, vol. 157, p. 178-186. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.017> >.

KAISER, Klara, LOOK, Samantha, SCHARNWEBER, Kristin, SCHOLZ, Carolin, VOIGT, Christian Claus. Wind turbines without curtailment produce large numbers of bat fatalities throughout their lifetime: A call against ignorance and neglect. *Global Ecology and Conservation*, [en ligne], septembre 2022, vol. 37, p. 1-10. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02149> >.

KERBIRIOU, Christian, LAGRANGE, Hubert, MELKI, Frederic, RICO, Pauline, UGHETTO, Anne-Lise. *Mitigating Bat Fatalities from Wind-power Plants through Targeted Curtailment: Results from 4 years of Testing of CHIROTECH®*. [en ligne]. Conférence : 16th International Bat Research Conference. Costa Rica : San José, août 2013, p. 1-30. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/307174665\\_Mitigating\\_Bat\\_Fatalities\\_from\\_Wind-](https://www.researchgate.net/publication/307174665_Mitigating_Bat_Fatalities_from_Wind-)

[power Plants through Targeted Curtailment Results from 4 years of Testing of CHIROTECH C > \(22/10/2025\).](#)

KERBIRIOU, Christian, LAGRANGE, Hubert, RICO, Pauline, ROUSSEL, Erwan. Chirotech, un processus de régulation multi-factoriel pour réduire la mortalité des chauves-souris due aux parcs éoliens. *Symbioses*, [en ligne], mars 2014, n°32, p. 68-72. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/307174088\\_Chirotech\\_un\\_processus\\_de\\_regulation\\_multi-factoriel\\_pour\\_reduire\\_la\\_mortalite\\_des\\_chauves-souris\\_due\\_aux\\_parcs\\_eoliens](https://www.researchgate.net/publication/307174088_Chirotech_un_processus_de_regulation_multi-factoriel_pour_reduire_la_mortalite_des_chauves-souris_due_aux_parcs_eoliens) >.

KRAVCHENKO, Kseniia, LEHNERT, Linn Sophia, MĂNTOIU, Dragoș Ștefan, MIREA, Ionuț Cornel, MOLDOVAN, Oana Teodora, NISTORESCU, Marius Costin, POPESCU-MIRCENI, Răzvan, STANCIU, Răzvan Cătălin, VLASCHENKO, Anton, VOIGT, Christian Claus, ZAHARIA, Răzvan. Wildlife and infrastructure: impact of wind turbines on bats in the Black Sea coast region. *European Journal of Wildlife Research*, [en ligne], mai 2020, vol. 66, n°44, p. 1-13. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10344-020-01378-x> >.

HAQUART, Alexandre. *Actichiro - Référentiel d'activité des chiroptères : éléments pour l'interprétation des dénombrements de chiroptères avec les méthodes acoustiques en zone méditerranéenne française*. [en ligne]. Thèse : Sciences et Vie de la Terre. Mémoire de l'EPHE, septembre 2013, p. 1-99. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/321996987\\_ACTICHIRO\\_-\\_REFERENTIEL\\_D'ACTIVITE\\_DES\\_CHIROPTERES\\_-\\_ELEMENTS\\_POUR\\_L'INTERPRETATION\\_DES\\_DENOMBREMENTS\\_DE\\_CHIROPTERES\\_AVEC\\_LES\\_METHODES\\_ACOUSTIQUES\\_EN\\_ZONE\\_MEDITERRANEENNE\\_FRANCAISE](https://www.researchgate.net/publication/321996987_ACTICHIRO_-_REFERENTIEL_D'ACTIVITE_DES_CHIROPTERES_-_ELEMENTS_POUR_L'INTERPRETATION_DES_DENOMBREMENTS_DE_CHIROPTERES_AVEC_LES_METHODES_ACOUSTIQUES_EN_ZONE_MEDITERRANEENNE_FRANCAISE) > (24/10/2025).

HAYES, Mark A.. Bats killed in large numbers at United States wind energy facilities. *BioScience*, [en ligne], décembre 2013, vol. 63, n°12, p. 975-979. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.12.10> >.

LAGRANGE, Hubert, RICO, Pauline. Etude de l'impact des parcs éoliens sur l'activité et la mortalité des chiroptères. *L'Echo des Rhinos*, [en ligne], septembre 2016, n°92, p. 4-7. Disponible sur : < [https://www.researchgate.net/publication/308329792\\_Etude\\_de\\_l'impact\\_des\\_parcs\\_eoliens\\_sur\\_l'activite\\_et\\_la\\_mortalite\\_des\\_chiropteres](https://www.researchgate.net/publication/308329792_Etude_de_l'impact_des_parcs_eoliens_sur_l'activite_et_la_mortalite_des_chiropteres) >.

MARCHAIS, Guillaume, VUITTON, Guillaume. Quelles alternatives au suivi acoustique des chiroptères sur mât de mesure de grande hauteur ? Application dans le cadre de l'étude d'impact d'un projet de parc éolien en milieu forestier en Bourgogne. Conférence : Séminaire Eolien & Biodiversité. France : Artigues-près-Bordeaux, novembre 2017, p. 67-73. Disponible sur : < [https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/marchais-g\\_seb2017.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/marchais-g_seb2017.pdf) >.

MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (MTES). Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres – Révision 2018. [en ligne], mars 2018, p. 1-19. Disponiblesur:<[https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/protocole\\_de\\_suivi\\_revision\\_2018.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/protocole_de_suivi_revision_2018.pdf)>.

RUGGE, L., SMALLWOOD, K. S., THELANDER, C. G.. Bird Risk Behaviors and Fatalities at the Altamont Pass Wind Resource Area. Period of Performance: March 1998–December 2000. *National Renewable Energy Laboratory*, [en ligne], décembre 2003, p. 1-92. Disponible sur : < <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33829.pdf> >.

RYDELL, Jens, WICKMAN, Andreas. Bat activity at a small wind turbine in the Baltic Sea. *Acta Chiropterologica*, [en ligne], décembre 2015, vol. 17, n°2, p. 359-364. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2015.17.2.011> >.

SOCIETE FRANÇAISE POUR L'ETUDE ET LA PROTECTION DES MAMMIFERES (SFPEM). *Présentation des chauves-souris*. [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.sfepm.org/presentation-des-chauves-souris.html> > (23/10/2025).

SYNDICAT DES ENERGIES RENOUVELABLES (SER). Eolien terrestre et chiroptères : Rapport sur l'état des lieux des connaissances et les retours d'expérience de la filière. *SER*, 2025, p. 1-41.



Directeur de recherche :

**Francis ISSELIN**

**Manon LAMBERT**  
**PRI/DAE5**  
**ADAGE**  
**2025-2026**

## **Bridages chiroptérologiques : Optimiser production d'énergie éolienne et protection de la biodiversité**

Etat de l'art des pratiques relatives à la mesure d'arrêt des éoliennes pour limiter les risques de mortalité de chauves-souris

**Résumé :** Ce Projet de Recherche Innovation porte sur les bridages éoliens mis en place sur les parcs éoliens en exploitation afin de limiter les risques de collision et les mortalités de chiroptères sur ces derniers. Se concentrant principalement sur le territoire métropolitain français, cet écrit vise à définir et présenter ces pratiques. Un premier chapitre présentera l'état des populations de chiroptères françaises, leur activité ainsi que leur sensibilité et vulnérabilité aux éoliennes et les enjeux de protection et de maîtrise d'impacts en découlant. Une seconde partie exposera les méthodologies et objectifs des suivis d'activité chiroptérologique à hauteur de nacelle et des suivis de mortalité au sol opérés sur les parcs éoliens pour la programmation de mesures de bridages. Enfin, une dernière section dressera un état des lieux des différents types de bridages existants et opérationnels à ce jour (bridages statiques, bridages prédictifs, bridages dynamiques, bridages mixtes), en expliquant leur fonctionnement, leur efficacité, leurs avantages et leurs limites quant à l'atteinte d'un équilibre entre protection des populations de chiroptères et production d'énergie.

**Mots Clés :** Biodiversité, bridage éolien, changement climatique, chiroptères, énergie renouvelable, mortalité, production d'énergie, protection des populations de chiroptères