



SYNERGIE RAPPORT FINAL

Veuillez vérifier les informations pré-remplies (et les rectifier le cas échéant), compléter en français (ou en anglais si demandé spécifiquement : [EN]), et renvoyer ce document au plus tard le 31/06/2025 à l'adresse suivante : claire.salomon@fondationbiodiversite.fr

I. Informations générales

Titre du projet : Régulation Intelligente Des Éoliennes : un dispositif gagnant-gagnant basé sur des algorithmes d'optimisation du compromis entre production d'énergie et risques de collisions avec la faune volante

[EN] Title of project: *Smart Wind Turbine Management: a win-win system based on algorithms for optimising the trade-off between energy production and collision risks with airborne wildlife*

Acronyme : BRIBAT

Porteur.euse principal.e : Kévin Barré, UMR7204 CESCO-MNHN

Participant.e.s : Fabien Claireau, Anne-Constance Comau, Anaïs Pessato, Andréas Ravache, Elise Sivault, Cassandre Treyvaud, Fabien Verniest, Christian Kerbiriou

E-mail de la personne qui a rédigé le rapport : kevin.barre@mnhn.fr

Date de début du projet : 01/05/2024

Date d'achèvement du projet : 31/05/2025

Résumé du projet

Les éoliennes terrestres génèrent de nombreuses mortalités de chauves-souris par collision avec les pales, pouvant être prédites par des facteurs météorologiques les influençant. Le projet avait donc pour objectif d'évaluer la possibilité d'une gestion intelligente du fonctionnement des éoliennes (arrêt des pales) qui permette de limiter leurs impacts tout en limitant les pertes de production d'énergie associées à cette gestion. L'objectif général était donc d'entraîner des algorithmes (équation statistique permettant de résoudre un problème) à prédire le risque de collision, puis de simuler différentes façons de les utiliser en pratique pour réguler les éoliennes, afin d'identifier les prérequis de leur utilisation. Ces recherches ont été réalisées sur une conséquente base de données réelles, consistant en des suivis acoustiques de l'activité des chauves-souris (vocalisations) en nacelle d'éolienne, tout en suivant l'activité des pales et les conditions météorologiques. Le projet démontre que les algorithmes prédictifs du risque de collision et les arrêts de pales requis pour le limiter, peuvent être entraînés sur des données méthodologiquement hétérogènes, permettant de bénéficier de toute la puissance des données compilées à l'échelle nationale. Les algorithmes sont plus efficaces que les méthodes de bridage actuelles, en faisant perdre moins de rotations de pales tout en protégeant une grande proportion de chauves-souris. Ces algorithmes sont d'autant plus efficaces qu'ils seront utilisés sur des tranches horaires fines. Également, l'inclusion de données de suivi spécifiques au site visé lors de leur entraînement semble indispensable, en particulier pour les espèces de haut vol à fort risque de collision. Enfin, la proportion de chauves-souris réellement protégées est en moyenne inférieure à ce que vise le seuil de bridage (par exemple lorsque le seuil est défini de sorte à couvrir 95% de l'activité globale des chauves-souris, il protège en réalité moins que cela), incitant à prévoir des objectifs conservateurs. Ces résultats se trouvent donc au carrefour des enjeux écologiques et climatiques, sous contrainte politique et économique forte, et constituent le socle d'une mise à disposition future d'un outil de gestion du fonctionnement des éoliennes à destination des parties prenant part au développement éolien.

Mots clefs : algorithme de bridage ; chiroptères ; collisions ; régulation ; suivis acoustiques

Contexte et objectifs

Les éoliennes terrestres génèrent de nombreuses mortalités de chauves-souris par collision avec les pales, pouvant être prédites par des facteurs environnementaux influençant fortement l'activité des chauves-souris, tels que météorologiques.

Le bridage des éoliennes, c'est-à-dire leur arrêt lors par vent faible et température clémente – lorsque les chauves-souris sont actives et la production d'énergie faible (Voigt et al., 2015) – est une mesure de réduction à fort potentiel pour la réduction de la mortalité (Arnett et al., 2011). Le bridage le plus répandu consiste donc à arrêter les éoliennes en-dessous d'une certaine vitesse de vent (majoritairement en-dessous de 3.5 à 8m/s) et de température (souvent au-dessus d'une valeur d'environ 10°C). Même si cette approche peut réduire significativement le taux de mortalité, l'efficacité reste extrêmement variable et jamais totale (Voigt et al., 2022 ; Adams et al., 2021 ; Whitby et al., 2021). Ceci est d'autant plus problématique que (1) la mortalité observée actuellement à cause des éoliennes peut remettre en question la viabilité de ces populations au taux de renouvellement faible, en particulier des espèces de haut vol comme les Noctules (Friedenberg and Frick, 2021 ; Frick et al., 2021), et que (2) moins de la moitié des éoliennes françaises sont bridées (Beucher et al., 2022).

Le manque d'efficacité des bridages conventionnels (aussi nommé « Blanket curtailment » dans la suite du rapport) tient au fait que d'autres paramètres non pris en compte tels que d'autres facteurs météorologiques, la phénologie, les caractéristiques paysagères, le fonctionnement des éoliennes, conditionnent également le risque de collision (Thompson et al., 2017 ; Santos et al., 2013), et que la combinaison de critères fixes additifs (ici une valeur de vent et de température) couvrent nettement moins de situations à risque que des outils sophistiqués tels que les algorithmes prédictifs (Behr et al., 2017). Les recherches menées au CESCO ont déjà démontré l'avantage des algorithmes par rapports aux méthodes conventionnelles en protégeant nettement plus de chiroptères à perte de production énergétique équivalente (Barré et al., 2023).

Cependant, ces recherches passées ne rendent pas les algorithmes opérationnels pour autant. Pour transférer les recherches en outils utilisable et généralisable sur le terrain, des réflexions et tests supplémentaires sont indispensables pour dépasser les cadres simulatifs tenant peu compte des contraintes de terrain. Le projet vise donc à préciser les modes d'utilisation des algorithmes en conditions réelles en comparant l'efficacité des algorithmes de bridage (c'est-à-dire le ratio entre la diminution du risque de collision et la perte de production engendrée) selon différents scénarii, afin de définir le cadre de mise en application de l'outil le plus approprié. Le projet avait pour but d'étudier des scénarii selon 3 grands objectifs :

- (i) Évaluer la plus-value de prédictions du risque de collision futur à partir de données météorologiques passées (peu contraignante d'un point de vue technique), par rapport à une approche de prédiction sur la base de données météorologiques en quasi-temps réel (très contraignante mais probablement aussi plus efficace).
- (ii) Définir l'utilisation spatiale de l'outil la plus appropriée, en évaluant la nécessité ou non d'inclure des données spécifiques au site lors de l'entraînement de l'algorithme (impliquant de prévoir une année de suivi acoustique en nacelle assez rapidement après la construction et d'inclure ces données à la base de données nationale d'entraînement).
- (iii) Définir les critères de bridage en termes de probabilité de présence prédite par l'algorithme et de résolution taxonomique, à considérer pour la prise de décision d'arrêt des pales.

Enfin, bien que nos prévu initialement, le projet a également défini la méthode de modélisation requise pour tirer le meilleur parti des données malgré une hétérogénéité matérielle forte (type d'enregistreurs et leurs paramétrages) connue pour fortement biaiser la probabilité de détection des chauves-souris.

II. Équipe du projet

Liste des participants au projet

	Prénom NOM	Affiliation	Pays	Tâches
1	Kévin Barré	CESCO-MNHN	France	Coordination, conceptualization, modélisation, communication.
2	Christian Kerbirou	CESCO-MNHN	France	Aide à la conceptualization.
3	Cassandre Treyvaud	CESCO-MNHN	France	Réception, traitement des données
4	Anne-Constance Comau	CESCO-MNHN	France	Réception, traitement des données, communication avec les participants
5	Andréas Ravache	CESCO-MNHN	France	Contribution au cadre de modélisation.
6	Anaïs Pessato	CESCO-MNHN	France	Contribution au cadre de modélisation.
7	Fabien Verniest	CESCO-MNHN	France	Contribution au cadre de modélisation.
8	Elise Sivault	CESCO-MNHN	France	Contribution au cadre de modélisation.
9	Fabien Claireau	CESCO-MNHN	France	Réception, traitement des données

III. Rapport d'activité

III.1 Description des travaux menés et des résultats scientifiques obtenus à l'attention d'un public scientifique.

III.1.1 Constitution de la base de données

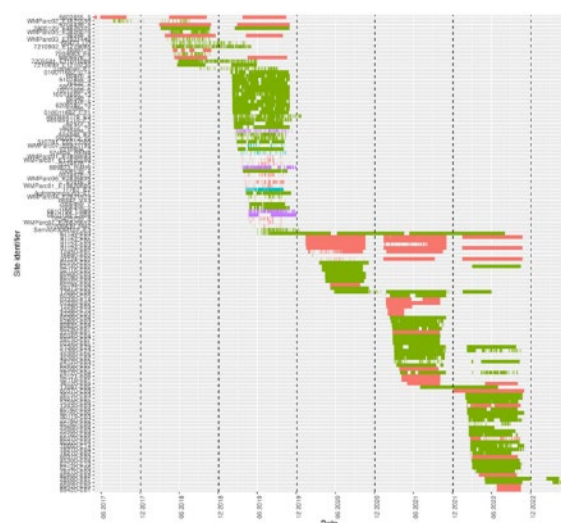
Le projet a tout d'abord permis l'acquisition, à notre connaissance, d'une des plus grandes bases de données de suivi acoustique des chauves-souris en nacelle d'éolienne créée jusqu'ici, en doublant le nombre de sites et de nuits déjà récoltés dans le cadre de la précédente collaboration avec France Renouvelables. Cette base de données contient l'ensemble des métadonnées nécessaires au développement d'algorithmes de gestion intelligente du fonctionnement des éoliennes. Ainsi, pour 131 sites en France et plus de 29000 nuits d'enregistrement sur 7 ans (Table 1), la fréquentation de l'abords des pales d'éoliennes par les chauves-souris (105640 détections au total) a été quantifiée au sein de chaque tranche horaire (de la nuit complète à des tranches de 10min), tranches au sein desquelles les conditions météorologiques et le fonctionnement des éoliennes ont également été recueillis/calculés (à partir des fichiers log fournis par les exploitants, ou de Météo France pour la pluviométrie). Cette récolte de données a été conduite en bancarisant des données acoustiques brutes issues de multiples suivis réglementaires, et a donc impliqué un grand nombre de partenaires (développeurs/opérateurs éoliens, bureaux d'études, associations) participant au projet sous l'égide du syndicat éolien français France Renouvelables soutenant le projet.

Tableau 1. Synthèse du nombre de sites et de nuits suivis par an, et ce pour chaque grand type de matériel.

Année	Batcorder		Batmode		SM3		SM4		Total	
	Sites	Nuits	Sites	Nuits	Sites	Nuits	Sites	Nuits	Sites	Nuits
2017	1	135	1	34	0	0	0	0	2	169
2018	5	916	10	1109	0	0	1	5	16	2030
2019	15	1062	33	6293	3	220	4	636	55	8211
2020	7	1429	12	1883	0	0	0	0	19	3312
2021	16	3155	18	3978	0	0	0	0	34	7133
2022	11	2285	29	5877	0	0	0	0	40	8162
2023	0	0	2	123	0	0	0	0	2	123
Total	40	8982	83	19297	3	220	5	641	131	29140

La représentativité temporelle des suivis est importante avec une majorité de sites où les suivis sont continus sur 9 mois et plus, avec 100 sites suivis une seule année, 25 suivis 2 années, 5 suivis 3 années, et 1 suivi 4 années (Fig. 1A). Ces suivis pluriannuels constituent une grande plus-value car ils permettent de réaliser les simulations évaluant la nécessité d'inclure une année de suivi sur le site aux données d'entraînement des algorithmes, en entraînant les algorithmes sur la première année de suivi et en testant l'efficacité sur les suivantes. La représentativité spatiale couvre un large gradient nord-sud et est-ouest, bien que les régions ne soient pas également couvertes.

(A)



(B)

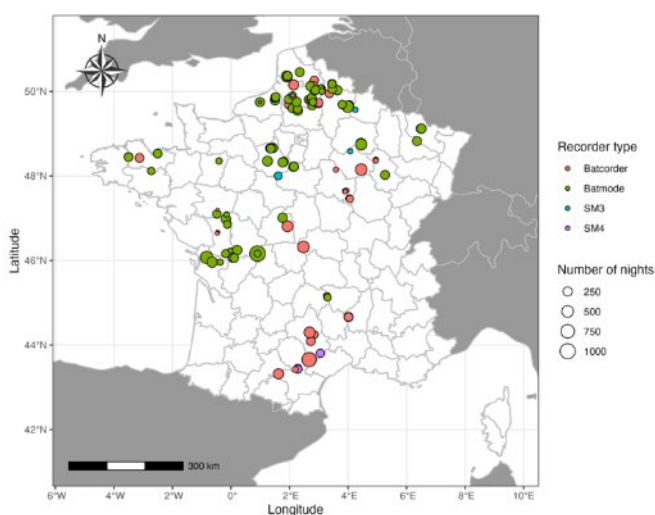


Figure 1. Représentativité temporelle (A) et spatiale (B) des suivis par grand type de matériel. Les lignes pointillées (A) matérialisent les 7 années suivies, et la taille des points (B) le nombre de nuits suivies par site.

Les données acoustiques brutes ont été traitées de façon homogène par un classificateur automatique assignant une espèce à chaque détection (logiciel Tadarida, Vigie-Chiro), afin de ne pas générer d'hétérogénéité sur l'efficacité de l'identification (il subsiste néanmoins à ce stade une hétérogénéité du matériel d'enregistrement que nous abordons dans une analyse dédiée dans la suite du rapport). Étant donné les nombreux parasites liés au fonctionnement des éoliennes, un filtre a été appliqué sur les données afin de ne conserver que les données ayant une probabilité d'être des vrais positifs de 90%, en suivant l'approche publiée par Barré et al. (2019). Au sujet des identifications, une exception est à noter, à savoir que les détections de *Rhinolophus* spp. sont systématiquement des parasites (électroniques ou métalliques), et persistent en partie après application du filtre, ces données ont donc été retirées des analyses. L'activité des différentes espèces a été calculée au sein de différentes durées de tranches horaires : nuit complète, puis en intra-nuit par tranche de 10, 5 et 2.5% de la nuit écoulée (amenant à des durées de tranche horaires de 7h à 14h, 42min à 1h25, 21min à 42min, et 10min à 20min, respectivement et selon le moment de l'année). Le fonctionnement par pourcentage de la nuit écoulée permet de standardiser le nombre de tranches quelle que soit la période de l'année, indispensable pour la modélisation en évitant une représentation de tranches horaires à certains moments de l'année uniquement pouvant altérer l'ajustement du modèle. D'une manière générale et sans surprise, l'activité des chauves-souris à hauteur de nacelle est relativement faible, avec notamment des occurrences (pourcentage de nuits ou de tranches horaires avec au moins une détection) très faibles en intra-nuit à l'échelle des espèces, impliquant par la suite une modélisation par groupe d'espèce (guildes), en présence-absence en ce qui concerne les tranches horaires, et en abondance en ce qui concerne la nuit complète (Tableau 2).

Tableau 2. Synthèse du nombre de contacts acoustiques par guilde et par espèce, et des occurrences au sein de nuits complètes et de différentes durées de tranches horaires (par tranche de 10, 5 et 2.5% de la nuit écoulée). Par exemple 0,19 pour la ligne des LRE et la colonne nuit complète signifie que 19% des 29140 nuits comportent au moins une détection de LRE, les 81% autres étant des absences.

Guildes/Espèces	Nb de contacts	Occurrence				Guildes
		Nuit complète	Intra-nuit 10%	Intra-nuit 5%	Intra-nuit 2.5%	
Long-range echolocators (LRE)	59727	0,19	0,04	0,02	0,01	
Mid-range echolocators (MRE)	45780	0,11	0,02	0,01	0,01	
Short-range echolocators (SRE)	133	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
<i>Nyctalus leisleri</i>	50923	0,18	0,04	0,02	0,01	LRE
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	42578	0,10	0,02	0,01	0,01	MRE
<i>Nyctalus noctula</i>	8655	0,04	0,01	<0.01	<0.01	LRE
<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>	4071	0,03	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Pipistrellus kuhlii</i>	1681	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	MRE
<i>Pipistrellus nathusii</i>	918	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	MRE
<i>Hypsugo savii</i>	587	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	MRE
<i>Rhinolophus hipposideros</i>	349	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Eptesicus serotinus</i>	130	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	LRE
<i>Myotis nattereri</i>	99	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Barbastellus barbastella</i>	73	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Plecotus austriacus</i>	25	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	MRE
<i>Nyctalus lasiopterus</i>	13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	LRE
<i>Myotis myotis</i>	6	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Tadarida teniotis</i>	5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	LRE
<i>Myotis daubentonii</i>	2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE
<i>Miniopterus schreibersii</i>	1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	MRE
<i>Eptesicus nilssonii</i>	1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	LRE
<i>Plecotus macrotus</i>	1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	SRE

III.1.2 Méthode : entraînement des algorithmes et scénarii d'utilisation

Afin de pouvoir développer les simulations de scénarii relatifs à la façon de mettre en place les algorithmes sur le terrain, les algorithmes prédictifs de l'activité des chauves-souris en nacelle d'éolienne ont d'abord dû être développés. Ces algorithmes reposent sur une modélisation statistique du lien entre l'activité des chauves-souris (nombre de contacts par nuit ou présence-absence par tranche horaire) et les différentes variables pertinentes calculées/moyennées sur la même durée que la résolution temporelle (nuit et différentes tranches horaires) des données acoustiques (date, pourcentage de la nuit écoulée, rotation de pale par minute, vitesse de vent, température, précipitations, coordonnées x et y du site, dimensions de l'éolienne), tout en tenant compte de la structure des données par l'ajout d'effets aléatoires (année, identifiant du site, matériel et paramétrage d'enregistrement couplés), en utilisant des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM). Ainsi l'équation générale du modèle est la suivante :

Pour la modélisation nuit complète :

Nombre de contacts de chauvesouris $\sim$ poly(Jour julien,2) + poly(RPM,2) + poly(Vent,2) + poly(Temperature,2) + poly(Pluie,2) + poly(Coord X,4) + poly(Coord Y,3) + hauteur_nacelle + diametre_rotor + (1|annee) + (1|Site) + (1|Materiel-paramétrage), family = negative binomiale

Pour la modélisation intra-nuit par tranche :

Présence/Absence de chauvesouris $\sim$ poly(Jour julien,2) + poly(Pourcentage nuit,2) + poly(RPM,2) + poly(Vent,2) + poly(Temperature,2) + poly(Pluie,2) + poly(Coord X,4) + poly(Coord Y,3) + hauteur_nacelle + diametre_rotor + (1|annee) + (1|Site) + (1|Materiel-paramétrage), family = binomial

« Pourcentage nuit » désigne la variable correspondant aux tranches horaires dans le modèle intra-nuit, la probabilité de présence est donc modélisée pour chacune d'entre-elles. Le terme « poly » dans la formule signifie « polynôme », pour chacune de ces variables une exploration préalable de la non-linéarité a été réalisée à l'aide de modèles additifs généralisés mixtes (GAMM) afin d'évaluer le nombre de polynômes requis en cas de relations non-linéaire, indiqué par le chiffre entre parenthèses.

Un GLMM par guildes a été réalisé, en excluant les SRE car quasi absents des suivis (espèces volant proche du sol et de la végétation).

Pour chacun des 31 sites comportant plus d'une année de suivi (ci-après nommés « site visé » par l'implantation du bridage), le principe des simulations est d'entraîner le modèle sur l'ensemble des données sauf celles du site visé (exclusion du site) ou bien seulement sa première année (inclusion du site), puis de prédire la probabilité de présence de chauves-souris sur les données du site écartées de l'entraînement. Lors de la prédiction, lorsque que le site est totalement exclu de l'entraînement l'effet année et site sont négligés pour la prédiction, et lorsque la première année du site est incluse à l'entraînement l'effet année est également négligé mais la prédiction est faite sur l'identifiant du site spécifiquement afin de bénéficier du fait d'avoir entraîné en incluant des données spécifiques au site. Ce cadre de prédiction a été décliné en plusieurs versions permettant de tester successivement les critères d'usage des algorithmes que ce projet vise à définir, à savoir :

- Utiliser plusieurs seuils de probabilité de présence prédite par l'algorithme au-dessus desquels les éoliennes sont arrêtées, couvrant 90, 95 ou 99% de l'activité totale du jeu de données, de sorte à viser une protection de 90, 95 ou 99% de l'activité totale.
- Utiliser plusieurs tailles de tranches horaires sur lesquelles prendre la décision d'arrêter l'éolienne, en comparant des tailles correspondant à 100, 10, 5 et 2.5% de la nuit écoulée.
- Inclure ou non les données d'une année de suivi sur le site visé, afin d'évaluer le gain éventuel de puissance prédictive si l'algorithme intègre des données spécifiques au site.

Enfin, les arrêts basés sur l'algorithme décrits ci-dessus sont systématiquement confrontés à la méthode conventionnelle de bridage, à savoir l'arrêt des éoliennes dès lors que la vitesse de vent et la température sont respectivement inférieure et supérieure à une certaine valeur. Ces valeurs de vent et de températures sont redéfinies pour chaque site de sorte à couvrir (ou protéger) 90, 95, ou 99% de l'activité, comme pour la méthode algorithmique.

Lorsque plusieurs combinaisons de vent et de température permettent d'atteindre l'objectif souhaité (par exemple un vent absent et température faible peuvent fournir des conditions comparables pour les chauves-souris à un vent fort et une température clémente), celle possédant la valeur de vent la plus faible est retenue afin de minimiser la perte énergétique. La combinaison de vent et de température est définie de deux façons différentes afin de confronter la méthode algorithmique à deux façons distinctes de définir le critère de bridage conventionnel : sur la base des données du suivi de première année sur le site, ou sur la base de l'ensemble des données nationales excepté celles du site. En effet, on peut imaginer qu'avec trop peu de données sur site un exploitant puisse inférer ses seuils de bridage à partir

d'autres sites, ou bien ne définir ses critères que sur la base des données de son site (étant par ailleurs souvent limitées en termes de gradients météo couverts). Une fois ces seuils définis, de la même façon que pour les algorithmes, à partir de données réelles (celles exclues de l'entraînement de l'algorithme), la proportion d'activité préservée par un seuil de bridage donné et la perte de rotations des pales engendrée sont quantifiées pour comparaison avec la méthode algorithmique. La figure 2 ci-contre explicite via un exemple la façon de déduire les seuils de vent et de température requis à partir des données brutes pour la méthode conventionnelle.

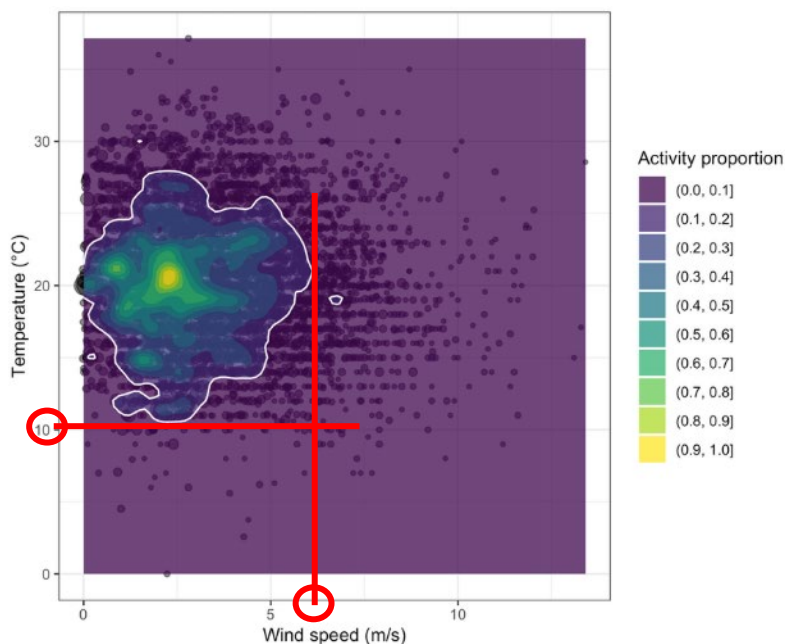


Figure 2. Représentation des densités d'activité brute en fonction de la température et du vent. La ligne blanche matérialise le contour incluant 90% de l'activité totale, et les lignes rouges les seuils déduits pour couvrir cette

III.1.2 Méthode : gestion de l'hétérogénéité du matériel pour optimiser la puissance prédictive

Avant de déployer les simulations présentées ci-dessus, nous avons tout d'abord cherché une solution à l'hétérogénéité du matériel. En effet, le type d'enregistreur et son paramétrage, en particulier son seuil de déclenchement (trigger), sont bien connus pour affecter la détectabilité des chauves-souris.

Ainsi, nous avons comparé différentes façons de gérer le matériel lors de l'entraînement des algorithmes. Soit en entraînant l'algorithme sur l'ensemble des données issues de différents matériel sans inclure d'effet matériel ou en incluant un effet matériel (combinaison du modèle d'enregistreur et du paramétrage de sa sensibilité) comme effet fixe ou comme effet aléatoire, soit en ne prenant que les données provenant du Batmode et théoriquement homogènes (pas de variation de la sensibilité, soit en ne prenant que les données provenant du Batcorder en positionnant un effet matériel (différents paramétrages de sensibilité ou « trigger ») comme effet fixe ou comme effet aléatoire. Pour quantifier la puissance prédictive de ces modèles, nous avons à chaque fois calculé 5 métriques complémentaires et communément utilisées dans ce contexte (la précision « accuracy », l'aire sous la courbe « AUC », la sensibilité « sensitivity », la spécificité « specificity », la statistique de performance réelle « TSS »).

Pour calculer ces métriques, nous avons entraîné les algorithmes sur 70% des sites sélectionnés aléatoirement, puis prédit sur les 30% restants, tout en équilibrant aléatoirement à chaque fois le nombre d'absences et de présences pour ne pas biaiser le calcul des métriques. Ceci a été réalisé 50 fois.

III.1.3 Résultats

Gestion de l'hétérogénéité du matériel

L'analyse de l'effet de l'hétérogénéité du matériel montre, quelle que soit la métrique et la durée de tranche horaire utilisée, qu'un entraînement sur l'ensemble des données en incluant un effet matériel en variable explicative (effet fixe ou aléatoire), permet la meilleure puissance prédictive (Fig. 3). Ceci signifie que la grande quantité de données (données de tous les matériels) avec un ajustement matériel permet de surpasser une meilleure homogénéité de détection matérielle sur un nombre de données plus faible (données de Batmode), une supériorité très certainement favorisée par la nature de la variable à expliquer (présence/absence de chauves-souris) gommant en partie les variations d'abondance liées aux différences de détectabilité entre matériel. Dans la suite des simulations, nous pourrions donc entraîner les algorithmes sur l'entièreté des données en tenant compte de l'effet matériel comme effet aléatoire.

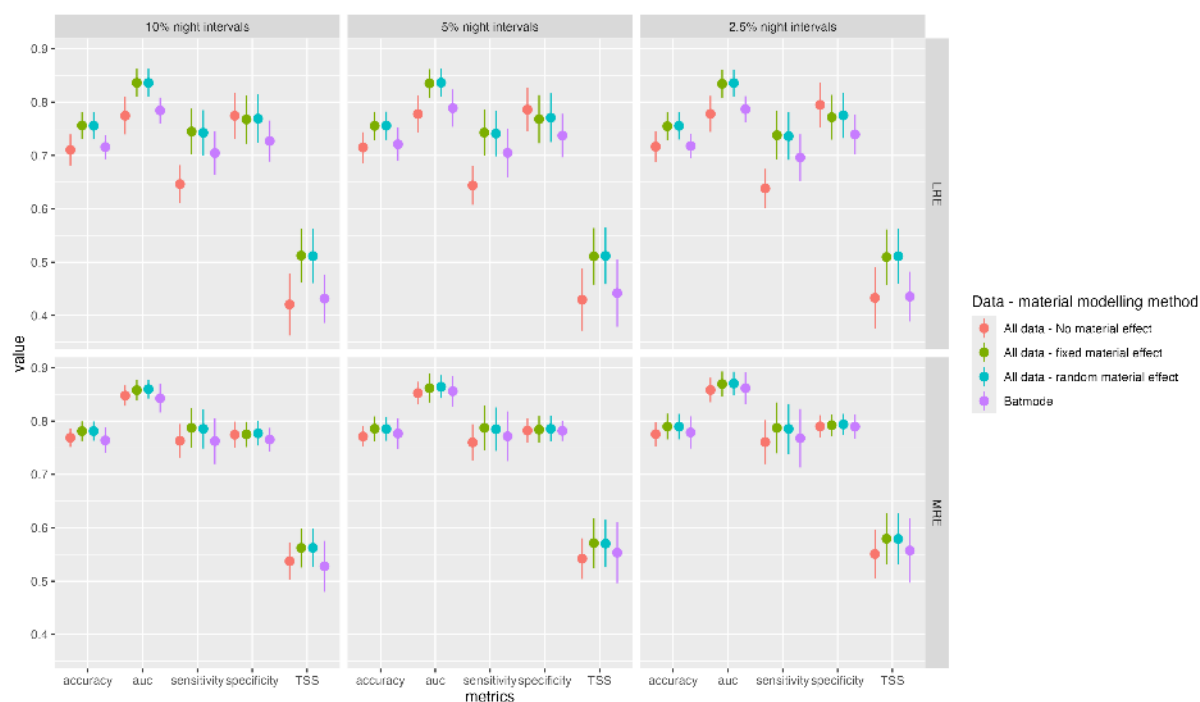


Figure 3. Comparaison du pouvoir prédictif des algorithmes évalué via 5 métriques complémentaires, en fonction des méthodes de prise en compte ou non de l'effet du matériel. AUC : area under the curve ; TSS : true skill statistic. Pour des raisons de lisibilité, les modèles relatifs au Batcorder ont été retirés de la figure, mais étaient systématiquement moins performants que le modèle Batmode.

Comment entraîner et utiliser les algorithmes ? Seuils d'arrêt, taille de tranches horaires et calibration au site

Dans un premier temps, nous avons d'abord comparé les courbes d'efficacité des méthodes de régulation incluant tous les seuils de bridage possibles, c'est-à-dire en quantifiant la proportion d'activité en chauves-souris protégée du risque de collision et la proportion de rotations de pales perdue pour chaque seuil de proportion d'activité à protéger (de 0 à 100%).

Les résultats montrent globalement que la performance des régulations, conventionnelles ou algorithmiques, augmentent considérablement lorsque le bridage est effectué sur des tranches horaires intra-nuit. Les deux méthodes algorithmiques (avec ou sans inclusion de données du site à l'entraînement) sont systématiquement plus efficaces que les méthodes conventionnelles, et cette supériorité est d'autant plus importante que la décision d'arrêt des éoliennes est réalisée sur des tranches fines (Fig. 4). Cependant, ces différences entre les trois tailles de tranches horaires intra-nuit (la plus fine étant la plus prometteuse) restent relativement marginales (Fig. 5), ce qui d'un point de vue opérationnel est une force puisque tous les opérateurs n'auront peut-être pas la possibilité de réguler le fonctionnement de leurs éoliennes sur des tranches horaires très fines, en fonction du modèle et de l'ancienneté de l'éolienne. L'analyse globale montre aussi que l'inclusion de données spécifiques au site d'intérêt, par une année de suivi en amont de l'application de la régulation, améliore l'efficacité des algorithmes (c'est-à-dire la relation entre la proportion d'activité protégée et la proportion de rotations de pales perdues), en particulier pour les espèces de haut vol à très fort risque de collision (LRE) (Fig. 4).

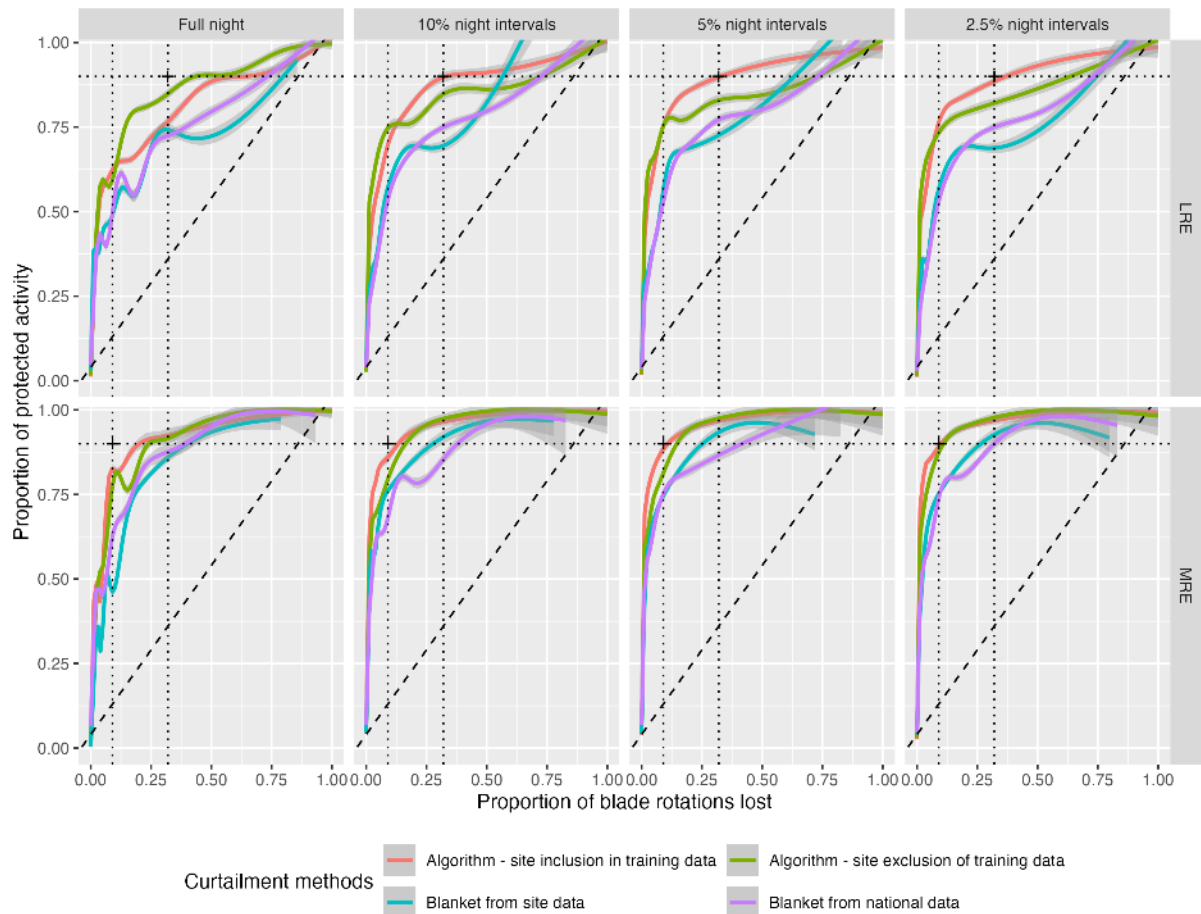


Figure 4. Comparaison de la relation entre la proportion d’activité en chauves-souris protégée du risque et la proportion de rotations de pales perdue pour chaque seuil de proportion d’activité à protéger (de 0 à 100%), pour les espèces de haut vol (LRE) et les espèces volant moyennement haut (MRE). Plus les courbes s’écartent de la diagonale pointillée et plus la méthode est efficace. Les croix sont placées comme repère permettant une comparaison visuelle entre les durées de tranches horaires. « Blanket » signifie bridage conventionnel. Les deux méthodes algorithmes en rouge et vert consistent à inclure ou non des données spécifiques au site visé par le bridage aux données d’entraînement de l’algorithme. Les deux méthodes conventionnelles en bleu et violet consistent à définir le seuil de vent et de température à partir de tous les autres sites ou bien à partir des données du site visé par le bridage.

Lorsqu’on regarde l’efficacité cette fois-ci pour des seuils spécifiques et réalistes au regard de ce qui est pratiqué actuellement dans les études réglementaires, où l’objectif de protection de 90% de l’activité totale est une pratique courante, les méthodes algorithmiques sont nettement plus efficaces avec des pertes de rotations comparables aux méthodes conventionnelles tout en montrant de hauts niveaux de protection de l’activité (Fig. 5). En effet, si l’une ou l’autre des méthodes conventionnelles peut parfois protéger une proportion comparable d’activité que les algorithmes, ou aboutir à une proportion de rotations de pales perdues comparable, elles ne sont à chaque fois efficaces que sur l’un ou l’autre de ces compartiments (forte protection de l’activité des chauves-souris ou faible perte de rotations de pales). Ainsi, la régulation conventionnelle basée sur des données annuelles du site, la plus répandue actuellement, montre des pertes de rotations comparables aux algorithmes, mais une proportion d’activité protégée nettement plus faible (Fig. 5). La proportion d’activité protégée et de rotation de pales perdues augmentent à mesure que le seuil d’arrêt des pales augmente pour toutes les méthodes. Fait intéressant, pour la guildes des MRE, les proportions d’activité protégées observées sont très proches des proportions visées par les seuils, signifiant que l’approche utilisée pour transcrire la prédiction de probabilité de présence faite par l’algorithme en une proportion de l’activité totale protégée si le bridage était réalisé sur cette valeur, est robuste pour cette guildes, ce qui n’est en revanche pas le cas pour la guildes des espèces de haut vol (LRE). Enfin, les algorithmes semblent nettement mieux fonctionner pour la guildes des MRE que LRE, et pour cette dernière l’inclusion d’une année de suivi aux données d’entraînement de l’algorithme semble indispensable pour obtenir une bonne efficacité (forte protection et faible perte de rotations (Fig. 5).

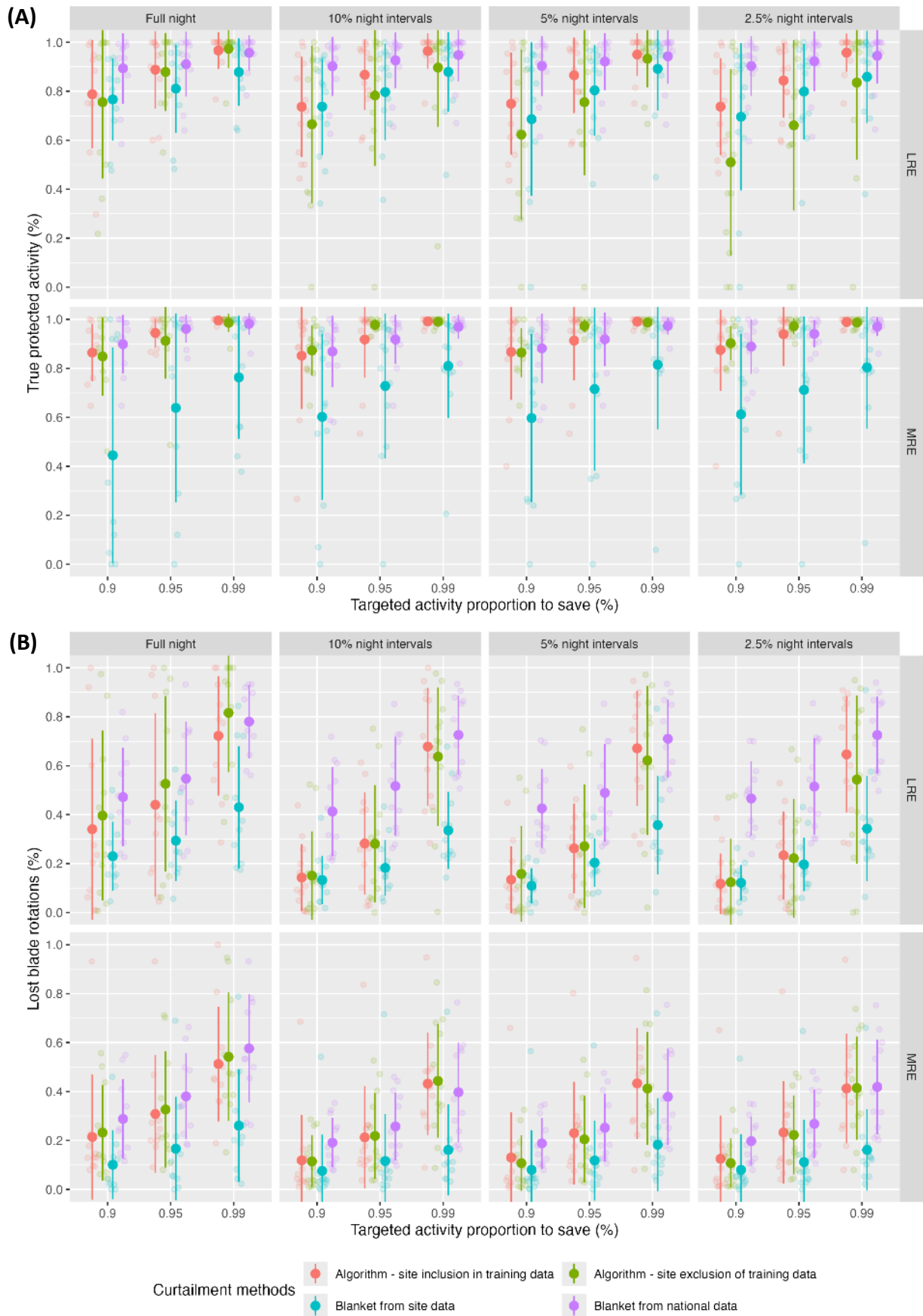


Figure 5. Comparaison des proportions réelles d'activité protégée (A) et des proportions de rotations de pales perdues (B) par les différentes méthodes de régulation et trois seuils d'arrêt des pales : un objectif de protection de 90, 95 ou 99% de l'activité totale. « Blanket » signifie bridage conventionnel. Les deux méthodes algorithme en rouge et vert consistent à inclure ou non des données spécifiques au site visé par le bridage aux données d'entraînement de l'algorithme. Les deux

méthodes conventionnelles en bleu et violet consistent à définir le seuil de vent et de température à partir de tous les autres sites ou bien à partir des données du site visé par le bridage.

Enfin, nous avons pu réaliser une dernière analyse pouvant contribuer à la définition des seuils d'arrêt. En effet, jusqu'à présent les seuils sont relativement arbitraires (90, 95 ou 99% de l'activité totale à protéger), ne pouvant aujourd'hui pas être reliés à une quantité de mortalité réelle, et encore moins à une quelconque dynamique de population. Il est néanmoins intéressant d'évaluer à quel point l'objectif défini s'avère être rempli. La figure 6 ci-dessous montre que dans l'ensemble toutes les méthodes de bridage protègent en réalité nettement moins d'activité que ce qu'elles ambitionnent, et cet écart est d'autant plus important que l'on vise des seuils de protection élevés. Ce résultat peut avoir d'importantes conséquences, car pour remplir un objectif donné, il sera nécessaire de viser plus haut pour l'atteindre.

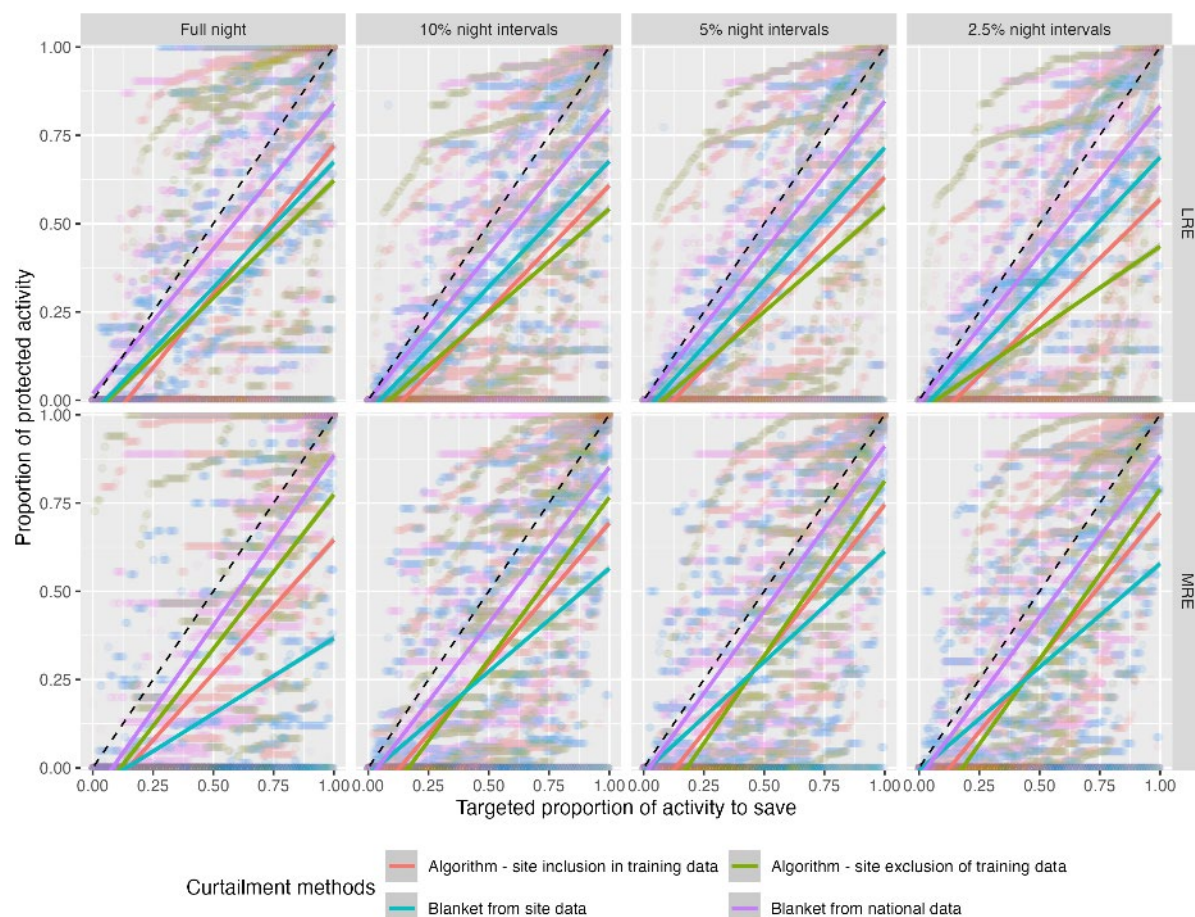


Figure 6. Relation entre la proportion d'activité réellement protégée et l'objectif initial, sous forme de droites de régression passant par l'ensemble des seuils de bridage possibles (proportion d'activité à protéger). « Blanket » signifie bridage conventionnel. Les deux méthodes algorithmes en rouge et vert consistent à inclure ou non des données spécifiques au site visé par le bridage aux données d'entraînement de l'algorithme. Les deux méthodes conventionnelles en bleu et violet consistent à définir le seuil de vent et de température à partir de tous les autres sites ou bien à partir des données du site visé par le bridage.

Résolution taxonomique de la décision d'arrêt

Pour que les algorithmes soient opérationnels, il est également nécessaire de définir la façon d'utiliser les prédictions issues des deux guildes (LRE et MRE) concernées par le bridage. Les analyses n'ont pas pu être finalisées dans le temps imparti mais les enveloppes climatiques des deux guildes montrent un fort chevauchement, avec celle des MRE pour totalité incluse dans celle des LRE (Fig. 7). Ainsi nous pouvons nous attendre à ce qu'arrêter l'éolienne des lors qu'une des deux guildes est à risque permette de conserver une efficacité finale semblable à celles observées guilde par guilde. De prochains tests viendront valider cette stratégie. Une alternative qui sera également testée sera d'entraîner un algorithme unique couvrant les deux guildes, mais cette solution risque potentiellement d'induire du bruit statistique.

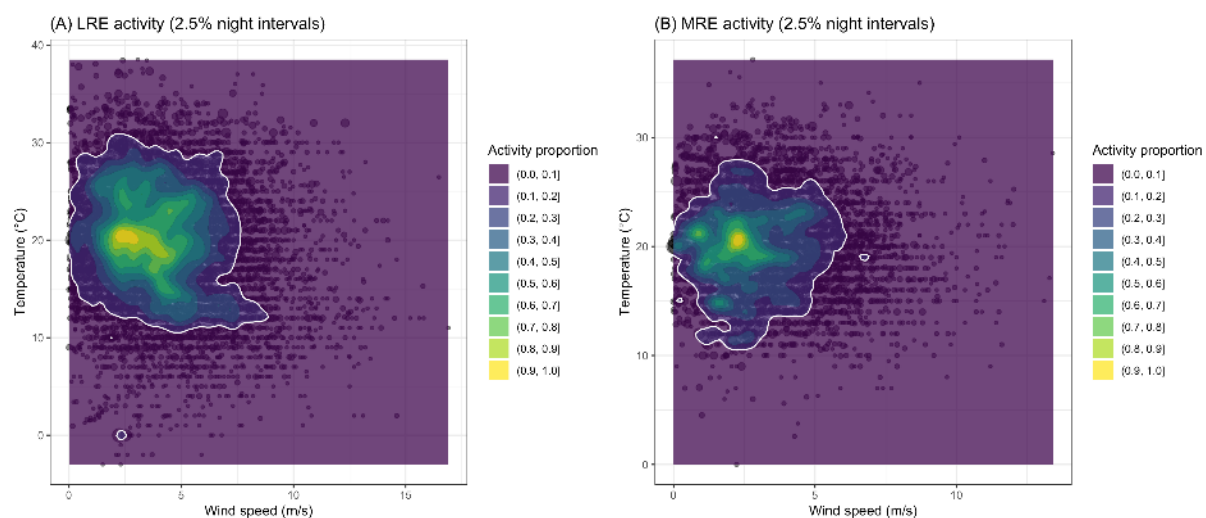


Figure 7. Représentation des densités d’activité en LRE (A) et MRE (B) en fonction de la température et du vent, pour des tranches horaires de 2.5% de la nuit écoulée. La ligne blanche matérialise le contour incluant 90% de l’activité totale.

III.1.4 Synthèse opérationnelle

Les analyses effectuées ont permis d’avancer sur plusieurs aspects opérationnels importants pour l’usage futur, en conditions réelles, des algorithmes de bridage. Globalement les conclusions et implications opérationnelles sont les suivantes :

- Les algorithmes peuvent être entraînés sur des données provenant de matériels et paramétrages hétérogènes sur les tailles de tranches horaires intra-nuit de 10, 5 et 2.5% de la nuit écoulée, permettant de bénéficier de toute la puissance du jeu de données.
- Les algorithmes montrent une efficacité nettement supérieure aux bridages conventionnels, en faisant perdre une proportion de rotation de pales plus basse tout en protégeant une proportion de l’activité plus haute.
- Le bridage algorithmique intra-nuit est nettement plus efficace que sur des nuits complètes, et même si le bridage est plus efficace lorsque la taille de tranche horaire est plus fine, les différences d’efficacité entre les trois tailles de tranches horaires étudiées sont marginales.
- L’inclusion de données de suivi en nacelle sur le site visé aux données d’entraînement est indispensable, en particulier pour les espèces de haut vol à fort risque de collision (guilde LRE).
- Plus l’objectif de protection de l’activité est important et plus l’activité réellement protégée est importante. Néanmoins, la tendance générale est à une protection réelle inférieure à l’objectif, nécessitant de prévoir des seuils systématiquement plus ambitieux que le résultat souhaité.

III.2 Description des travaux menés et des résultats scientifiques obtenus à l’attention du grand public

III.2.1 Introduction

Les éoliennes génèrent des collisions avec les chauves-souris, qui peuvent être minimisées en arrêtant les pales lorsque les conditions météorologiques sont favorables à leur activité, une technique de minimisation des impacts nommée « bridage ». L’usage d’algorithmes entraînés sur beaucoup de données pour prédire les arrêts nécessaires est prometteur, et permet de mieux protéger les chauves-souris tout en perdant moins d’énergie à cause des arrêts de pales. Cependant, les critères de mise en œuvre des algorithmes restent à définir, comme par exemple la nécessité ou non de récolter des données spécifiques au site visé par le bridage à inclure à l’entraînement des algorithmes, ou encore à partir de quel seuil de risque considère t’on utile de brider.

III.2.2 Méthode et approches utilisées pour le projet

Afin d'évaluer les critères pertinents de mise en œuvre des algorithmes de gestion des éoliennes, les algorithmes ont été entraînés sur une partie des données disponibles (131 sites de suivis acoustiques en nacelle en nacelle d'éolienne, totalisant plus de 29 000 nuits complètes d'enregistrement et plus de 100 000 détections de chauves-souris), puis testés sur une autre partie en leur faisant prédire les arrêts de pales nécessaires en cas de risque de collision, de sorte à quantifier la proportion des chauves-souris qu'ils protègent, ainsi que les pertes de rotations de pales associées. L'entraînement de l'algorithme et son évaluation ont été réalisés de différentes façons correspondant à des scénarii d'usage de l'outil sur le terrain, afin d'identifier les prérequis à son utilisation (type de données, résolution temporelle des arrêts, etc).

III.3 Accès aux données

Les types de données collectées et utilisées

Les données collectées correspondent à des fichiers d'enregistrement acoustique des vocalisations de chauves-souris issus de suivis réglementaires post-construction (réglementation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement). Ces données ont été collectées au format brut puis traitées de façon homogène par un seul et même logiciel d'identification automatisée des espèces présentes sur les enregistrements (TADARIDA, développé au CESCO). Ainsi, le format final des données manipulé mis à disposition à l'issue de ce projet est le format CSV compilant sous forme d'information quantitative et semi-quantitative les données d'enregistrement (par exemple nombre de détection de chauves-souris par unité de temps en une date et tranche horaire donnée). A ces données CSV ont été compilées des données contextuelles récoltées auprès des exploitants éoliens, qu'il s'agisse des données enregistrées par la station météo de la nacelle d'éolienne, des données de fonctionnement de l'éolienne, ou des métadonnées relatives aux méthodes de suivi (type d'enregistreurs et leurs paramétrages, dimensions de l'éolienne, etc).

Les normes utilisées pour documenter les données

Peu de normes étaient applicables aux données elles-mêmes, à l'exception des dates et heures suivant la norme ISO 8601. Les différents champs ont été documentés selon les recommandations actuelles de l'Inventaire des Données de la Recherche en Environnement et Sociétés (InDoRES), à savoir que sur le répertoire de dépôt se tient un fichier texte présentant la définition, la classe, l'unité, les formats, la présence de valeurs manquantes, pour chaque colonne des jeux de données déposés.

La politique d'accès et de réutilisation, de stockage et de gestion à court et à long terme

Les données utilisées dans ce projet ont été déposées sur l'entrepôt de données InDoRES, conformément au Plan national de la Science Ouverte, au lien d'entrepôt suivant : <https://data.indores.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.48579/PRO/DJD158>. Quatre jeux de données ont été déposés, ils correspondent respectivement aux quatre résolutions temporelles utilisées pour les analyses, à savoir l'échelle de la nuit complète, ou des tranches horaires de 10, 5 et 2.5% de la nuit écoulée. Dans ce répertoire un fichier Readme reprend les éléments méthodologiques indispensables à la compréhension et réutilisation du jeu de données, et un fichier de description des différentes colonnes permet aux utilisateurs d'apprécier le contenu des champs et leur source de façon précise. La licence et accord d'utilisation des données est la CC BY 4.0, pour une ouverture maximale. Enfin, le répertoire de dépôt autorisera des versions mises à jour des données. La référence complète du dépôt est la suivante :

BARRÉ, Kévin, 2025, "Database of bat acoustic activity at onshore wind turbine nacelles", <https://doi.org/10.48579/PRO/DJD158>, data.InDoRES, V1, UNF:6:gOuly/ACHutwKikDzmK0yw== [fileUNF]

Les personnes à contacter après la fin du projet

- Kévin Barré (kevin.barre@mnhn.fr)
- Christian Kerbiriou (christian.kerbiriou@mnhn.fr).

III.4 Résultats et valorisations scientifiques du projet

Liste des publications en lien avec les thématiques du projet

- Barré, K., Kerbiriou C. (2025) Optimisation du bridage des éoliennes pour conserver les chauves-souris. *Biodiversité, des clés pour agir*, N°8.
- Barré K. (2025) 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); CESCO*, 6 p. <https://hal.science>
- Froidevaux J., Le Viol I., Barré K., Bas Y., Kerbiriou C. (2025) A modeling framework for biodiversity assessment in renewable energy development: A case study on European bats and wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211, 115323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115323>
- Sand, C.-A., Normand, B., Kerbiriou, C., Barré, K., & Ravache, A. (2024). Suivis réglementaires de la mortalité dans les parcs éoliens : de l'analyse locale à l'approche intégrée. *Sciences Eaux & Territoires*, 46, 8312. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2024.46.8312>

Liste des communications orales et des posters

- Barré K., Claireau F., Comau A-C., Pessato A., Ravache A., Sivault E., Treyvaud C., Verniest F., Kerbiriou C. (2025) 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. *Colloque Energie du CNRS*. (Poster)
- Barré K., Roemer C. (2024) Consequences of wind energy on bat habitat use: research from France. *Evidence-based bat conservation in wind power projects, Leibniz Institute for Zoo and Wildlife Research (Allemagne)* (Oral)
- Barré K. (2024) Bridage dynamique des éoliennes pour la réduction du risque de collision avec les chauves-souris. *Webinaire bridage éolien en Bretagne, DREAL Bretagne*. (Oral)

Liste des propositions de subventions soumises

Projet EOLBAT (« Conception et test d'un outil de bridage algorithmique des éoliennes terrestres en faveur des chauves-souris »). APR Energie Durable 2025 de l'ADEME. Durée demandée : 26 mois.

Projet AlgoChiro (« Définition des modalités opérationnelles d'usage d'un algorithme de bridage préventif des éoliennes pour la protection des chiroptères et préfiguration d'une phase test »). Subvention directe OFB. Durée demandée : 8 mois.

IV. Principales conclusions

Principales conclusions à l'attention du grand public

Le projet a montré que les algorithmes développés pour prédire le risque de collision entre les éoliennes et les chauves-souris, et arrêter les pales lorsque ce dernier est trop important, peuvent être entraînés sur des données de suivi méthodologiquement hétérogènes, permettant de bénéficier de toute la puissance des données compilées à l'échelle nationale. Les algorithmes sont plus efficaces que les méthodes actuelles, en faisant perdre une proportion de rotations de pales plus faible tout en protégeant une plus grande proportion de chauves-souris. Ces algorithmes sont d'autant plus efficaces qu'ils seront utilisés sur des tranches horaires fines (par exemple 10 à 30 minutes). L'inclusion de données de suivi spécifiques au site visé lors de leur entraînement semble indispensable, en particulier pour les espèces de haut vol à fort risque de collision. Ces résultats apportent des garanties quant à la faisabilité d'une implémentation future de ces algorithmes dans les outils de terrain.

V. Impacts des résultats

Impact pour la science, la société et la décision publique et privée à l'attention du grand public

Le projet a montré que les algorithmes développés durant le projet pour prédire le risque de collision entre les éoliennes et les chauves-souris à partir des conditions météorologiques favorables à ces dernières, sont théoriquement plus performants que les approches conventionnelles de gestion des éoliennes, en protégeant globalement mieux les chauves-souris tout en faisant perdre moins d'énergie. Il a également permis de commencer à définir les prérequis opérationnels pour que ces algorithmes puissent être effectivement implémentés en outils de décision utilisables dans la pratique au-delà de simulations informatisées. Ces recherches ont donc un impact potentiel socio-écologique important puisqu'elles permettront d'atténuer le conflit entre développement d'infrastructures de production d'énergie éolienne et les espèces volantes (pour la plupart protégées voire menacées), faisant régulièrement débat dans l'espace public. De plus, ces recherches, en plus de favoriser une meilleure protection de la faune, permettront potentiellement de limiter les pertes énergétiques grâce à la sophistication des méthodes de gestion du fonctionnement des éoliennes basé sur des algorithmes plus à même de détecter les situations où l'arrêt des pales n'est pas nécessaire. Les résultats du projet se trouvent donc au carrefour des enjeux écologiques, politiques et climatiques, et économiques, et constituent le socle de mise à disposition future d'un outil de gestion à destination de l'ensemble des parties prenante au développement éolien.

VI. Activités de sensibilisation et de diffusion auprès des porteurs d'enjeux

Étant donné la courte durée du projet, aucun article scientifique n'a encore été publié, mais plusieurs actions de diffusion sous forme de présentations orales et poster ont été réalisées et sont présentées en partie III.4. Elles ont notamment permis de toucher la cellule énergie du CNRS en lien fort avec les industriels et politiques, ainsi que les services de l'état Français et Allemand. Une courte note dans le magazine publié par l'OFB *Biodiversité, des clés pour agir* a également été rédigée, une revue très lue des professionnels de l'environnement, afin de mettre en lumière l'intérêt de bridages des éoliennes intelligents.

Les résultats ont également été présentés à l'ADEME et à l'OFB, et ont permis d'amorcer une stratégie possible de poursuite de ces travaux financée par ces organismes afin de conduire ces recherches jusqu'à la création d'un logiciel de bridage et son test en conditions réelles. Dans le cadre de ces futures activités, les prérequis au transfert opérationnel de l'outil seront finalisés, le cahier des charges d'une phase de test sera défini, et les algorithmes seront interfacés dans un logiciel pour être testés par des partenaires de la filière éolienne.

VII Prochaines étapes

Les travaux pourront être poursuivis, si obtention des subventions mentionnées en partie III.4, et permettront de finaliser notamment trois aspects qui n'ont pas eu le temps d'être abordés dans ce projet, à savoir :

- Définir le type de données météorologiques à utiliser pour la prédiction du risque de collision (passées, temps réel).
- Définir la résolution taxonomique de la décision d'arrêt des pales (perspective présentée en fin de partie III.1.3).
- Évaluer la nécessité d'adapter les seuils de risque toléré aux périodes de l'année.

Ces poursuites auront également vocation à définir les prérequis optimaux pour déployer une phase de test des algorithmes en conditions réelles et impliquant les parties prenantes au développement éolien, afin de convaincre de l'efficacité de l'outil et que les acteurs puissent s'en emparer. Ensuite, la phase de test sera réalisée, en amont de laquelle les algorithmes seront mis à disposition sous forme de logiciel accessible travaillé en collaboration avec la filière, afin de s'assurer qu'il soit suffisamment flexible au regard des contraintes techniques liées aux éoliennes.

VIII Commentaires sur la réalisation du projet

Même si une grande partie des recherches a pu être conduite, certaines questions n'ont pas pu être traitées par manque de temps et de moyens. En effet, la préparation des données a pris nettement plus de temps que prévu et était indépendante de notre volonté, à savoir que des métadonnées ont longtemps été manquantes et qu'il nous a fallu attendre de les obtenir. Le bilan du projet reste très satisfaisant puisque la quasi-totalité des questions prévues initialement a pu être abordées, mais le temps imparti restait trop court pour envisager une valorisation scientifique des recherches dans des revues internationales. Nous remercions cependant la FRB qui s'est

toujours montrée réactive aux questions et au moment de l'extension de la durée du projet ayant permis d'utiliser l'ensemble des fonds disponibles.

VIII REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions la FRB et Mirova Foundation pour le financement de ce projet. Nous tenons également à remercier France Renouvelables qui a financé une étude préalable à ce projet ayant permis la récolte et une grande partie de la préparation des données, ainsi que l'ensemble de ses membres ayant contribué au projet par des données. Nous remercions également la cellule énergie du CNRS pour le financement d'une partie des frais de fonctionnement sur le projet, ainsi que Charlotte Roemer, Thierry Chambert, et Aurélien Besnard pour leurs conseils. Enfin, nous remercions également l'ADEME qui a contribué au financement des premiers développements d'algorithmes aux côtés de France Renouvelables il y a plusieurs années, sur lesquels le présent projet a capitalisé.

X REFERENCES

- Arnett, E.B., Huso, M.M.P., Schirmacher, M.R., Hayes, J.P., 2011. Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Front. Ecol. Environ.* 9, 209–214. <https://doi.org/10.1890/100103>
- Barré, K., Froidevaux, J.S.P., Sotillo, A., Roemer, C., Kerbiriou, C., 2023. Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment. *Sci. Total Environ.* 866, 161404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161404>
- Barré, K., Le Viol, I., Julliard, R., Pauwels, J., Newson, S.E., Julien, J., Claireau, F., Kerbiriou, C., Bas, Y., 2019. Accounting for automated identification errors in acoustic surveys. *Methods Ecol. Evol.* 10, 1171–1188. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13198>
- Behr, O., Brinkmann, R., Hochradel, K., Mages, J., Korner-nievergelt, F., Niermann, I., Reich, M., Simon, R., Weber, N., Nagy, M., 2017. Mitigating Bat Mortality with Turbine-Specific Curtailment Algorithms: A Model Based Approach, in: *Wind Energy and Wildlife Interactions*. pp. 135–160. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3_8
- Beucher Yannick, Matutini Florence, Nardou Xavier, Besnard Aurélien, Albespy Frédéric, Langlois Aurélie, Illac Pierre. 2022. Programme OPRECh, Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères : Analyse des pratiques nationales, tests expérimentaux et recommandations. 243 pages.
- Business and Biodiversity Offsets Programme (BBOP), 2012. Standard on Biodiversity Offset. BBOP, Washington, D.C
- Friedenberg, N.A., Frick, W.F., 2021. Assessing fatality minimization for hoary bats amid continued wind energy development. *Biol. Conserv.* 262, 109309. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109309>
- Frick, W.F., Baerwald, E.F., Pollock, J.F., Barclay, R.M.R., Szymanski, J.A., Weller, T.J., Russell, A.L., Loeb, S.C., Santos, H., Rodrigues, L., Jones, G., Rebelo, H., 2013. Using species distribution modelling to predict bat fatality risk at wind farms. *Biol. Conserv.* 157, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.017>
- Thompson, M., Beston, J.A., Etterson, M., Diffendorfer, J.E., Loss, S.R., 2017. Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States. *Biol. Conserv.* 215, 241–245. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.014>
- Voigt, C.C., Lehnert, L.S., Petersons, G., Adorf, F., Bach, L., 2015. Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *Eur. J. Wildl. Res.* 61, 213–219. <https://doi.org/10.1007/s10344-015-0903-y>
- Voigt, C.C., Kaiser, K., Look, S., Scharnweber, K., Scholz, C., 2022. Wind turbines without curtailment produce large numbers of bat fatalities throughout their lifetime: A call against ignorance and neglect. *Glob. Ecol. Conserv.* 37, e02149. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02149>
- Whitby, M. D., M. R. Schirmacher, and W. F. Frick. 2021. The State of the Science on Operational Minimization to Reduce Bat Fatality at Wind Energy Facilities. A report submitted to the National Renewable Energy Laboratory. Bat Conservation International. Austin, Texas.