



HAL
open science

Activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes : quels déterminants de la variation spatiotemporelle de cette activité ?

Kévin Barré, Christian Kerbirou

► **To cite this version:**

Kévin Barré, Christian Kerbirou. 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. 2021, pp.37. hal-03957290

HAL Id: hal-03957290

<https://hal.science/hal-03957290v1>

Submitted on 26 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Août
2021

Activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes : quels déterminants de la variation spatio- temporelle de cette activité ?

Kévin Barré, Christian Kerbiriou



REMERCIEMENTS

Arzel Anaïs (Groupe Valeco), Bas Didier (MNHN), Bas Yves (MNHN), Beucher Yannick (Exen), Bézard Alba (Silva Environnement), Bicchieray Victoria (Eurowatt) , Bourdier Pierre (FEE) , Braque Ourièle (Volkswind) , Carpentier Jonathan (Nordex) , Centre de calcul IN2P3/CNRS, Dervaux Sandra (Exen) , Dumont Jérôme (BayWa r.e.), Froidevaux Jérémy (MNHN), Ghesquière Nicolas (Boralex) , Julien Jean-François (MNHN), Legras Gaëlle (MNHN) , Madon Julien (Nordex) , Mariton Léa (MNHN), Perradin Chloé (FEE) , Pillods Marie (Total Quadran), Rigaud Florent (Boralex) , Roch Frédéric (Enertrag) , Roussel Mylène (FEE) , Salles Adalaïs (Total Quadran), Taraud François (wpd)

CITATION DE CE RAPPORT

Kévin Barré, Christian Kerbiriou. 2021. Activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes: quels déterminants de la variation spatio-temporelle de cette activité ? UMR7204 CESCO-MNHN, 37p

Ce document est diffusé par France Energie Eolienne

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Référence Muséum : 2019-64/SJ

Projet de recherche coordonné par : Kevin Barré

Coordination technique - FEE : Chloé Perradin, Frédéric Roch et Jérôme Dumont

Table des matières

Index des tableaux et des figures	3
Résumé	4
1. Contexte et objectifs du projet	6
2. Déroulé du projet	7
3. Synthèse du jeu de données	10
3.1. Couverture spatiale	10
3.2. Couverture temporelle	10
3.3. Gradients environnementaux et paysagers	11
3.4. Gradients méthodologiques	12
3.5. Gradients des caractéristiques et du fonctionnement des éoliennes	14
4. Analyse des données	15
4.1. Choix de l'échelle d'analyse	15
4.2. Méthode d'analyse	15
4.3. Résultats	21
5. Interprétation des résultats et perspectives	25
Références	28
Annexes	30
Annexe 1. Variabilité des distances aux habitats pour les 64 sites d'étude	30
.....	30
Annexe 2. Variabilité des proportions de chaque habitat dans différents rayons autour des 64 sites d'étude.	31
.....	31
Annexe 3. Variabilité des indices paysagers dans différents rayons autour des 64 sites d'étude....	32
.....	32
Annexe 4. Précisions sur le tri effectué dans les données acoustiques.	33
Annexe 5. Evolution de l'AIC du modèle univarié en fonction du rayon de calcul de chaque variable.	34
.....	34
Annexe 6. Matrice des corrélations entre variables pour chaque guildes.	35
Annexe 7. Relation entre la vitesse de rotation moyenne en bout de pale et la vitesse de vent moyenne.....	37

Index des tableaux et des figures

Tables

Table 1. Liste synthétique des données transmises par FEE et ses structures partenaires (entreprises/structures productrices des données, volume de données : nuits et nacelles).....	9
Table 2. Synthèse du nombre de séquences et occurrence des nuits de présence par espèce et par seuil d'erreurs dans l'identification automatisée (brut, 0.5 et 0.9). En gras les données qui ont été retenues pour les analyses.....	16
Table 3. Synthèse des combinaisons de variables posant un problème de colinéarité et pour lesquels les effets ne pourront être interprétés avec certitude.	18
Table 4. Synthèse de la composition des modèles complets par guilde et de la variance expliquée par leurs effets fixes (autres que id_site ; mR^2) et par leurs effets fixes et aléatoires (toutes les variables incluant l'effet aléatoire sur id_site ; cR^2). Le tableau présente également les différences d'AIC entre chaque modèle complet et les modèles nuls.....	20
Table 5. Résultats des modèles complets pour chaque guilde, l'estimate correspondant à la pente de la relation, SE à l'erreur standard et P à la p-value. Les effets significatifs sont indiqués en gras. Les tirets indiquent les variables non sélectionnées dans les modèles complets (voir partie 4.2 pour plus de détail).....	23

Figures

Figure 1. Chronologie et différentes étapes du projet, du recueil à l'analyse des données acoustiques.	8
Figure 2. Couverture temporelle (en vert) des suivis acoustiques pour chacun des 64 sites. Les lignes verticales séparent les mois au sein de chaque année.	11
Figure 3. Variation des conditions météorologiques moyennes par nuit de suivi.....	12
Figure 4. Nombre de sites dans l'étude pour chaque valeur de paramètre méthodologique.	13
Figure 5. Distances et volumes de détection des chiroptères en lien avec le niveau de sensibilité du déclencheur d'enregistrement pour le Batcorder. Source : https://ecoobs.com/	14
Figure 6. Nombre de nuits (A-B) ou sites (C-E) par valeur de caractéristique (C-E) et de fonctionnement (A-B) des éoliennes.....	14
Figure 7. Synthèse de tous les effets confondants impliquant la variable combinant le type de matériel et la sensibilité de son déclencheur.....	19
Figure 8. Pourcentage de variance expliquée par chaque variable pour chaque guilde selon les 4 grands types de variables.	21
Figure 9. Activité prédite à partir des GLMMs pour chaque combinaison enregistreur-sensibilité du déclencheur pour chaque guilde. Les différences de lettres entre les catégories indiquent les différences significatives. Aucune conclusion totalement fiable ne peut être faite de ce résultats étant donné les très forts effets confondant avec d'autres variables (Table 3 ; Figure 7).....	22
Figure 10. Activité prédite des chiroptères en nacelle en fonction des variables paysagères significatives à partir des modèles complets pour les 3 guildes.	22
Figure 11. Activité prédite des chiroptères en nacelle en fonction des variables de fonctionnement de l'éolienne (en gris), climatiques et temporelle (en bleu) à partir des modèles complets pour les 3 guildes.	24
Figure 12. Proportion d'activité restante au-dessus de chaque vitesse moyenne de rotation des pales.	27

Résumé

L'énergie éolienne peut générer des impacts sur la biodiversité, et notamment des collisions avec les chiroptères pouvant avoir des conséquences néfastes sur les dynamiques de population. Même si le bridage des éoliennes en fonction de paramètres météorologiques et paysagers peut montrer une certaine efficacité, cette efficacité reste néanmoins extrêmement variable et les déterminants de la probabilité de collision restent encore mal connus. En particulier, il est clairement admis que la structure et la nature du paysage, ainsi que les conditions météorologiques et la période de l'année influencent beaucoup l'activité des chiroptères. Malgré ces connaissances, il est encore aujourd'hui difficile de croiser ces paramètres afin d'en déduire des mesures réduisant drastiquement la probabilité de collision, principalement parce que ces paramètres interagissent entre eux et affectent tous l'activité des chiroptères simultanément. L'estimation de la probabilité de collision à partir de l'activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes (mesures acoustiques à hauteur des rotors des machines) est encore largement débattue, en partie parce que les études sont souvent réalisées à l'échelle d'un site ou d'un jeu de données restreint. Cependant une étude récente suggère une forte relation entre l'indice de susceptibilité aux collisions et l'activité chiroptérologique enregistrée en altitude sur mat de mesure. Il est donc aujourd'hui crucial de mieux évaluer les déterminants des variations spatio-temporelles de cette activité « en altitude » (hauteur des pales) et de développer des outils de prédiction de l'activité en altitude de manière à réduire ces risques de collision.

Pour cela, ce projet financé par France Energie Eolienne (FEE) et mené par le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) a donc eu pour objectifs d'étudier les déterminants spatio-temporels de l'activité des chiroptères en nacelle d'éolienne, en agrégeant des données acoustiques à l'échelle française grâce à un appel à données auprès des adhérents FEE. Ces données ont été centralisées sous forme brute afin d'être retraitées de façon homogène via le logiciel d'identification TADARIDA, et de nombreuses métadonnées ont été récupérées afin de tenir compte de l'hétérogénéité des suivis dans les analyses et ainsi minimiser les sources de biais, par exemple liées au matériel d'enregistrement.

Les analyses montrent que l'activité des chiroptères en nacelle d'éolienne sur 64 sites à travers la France et plus de 16000 nuits complètes d'enregistrements est principalement expliquée par l'hétérogénéité du matériel et du paramétrage de la sensibilité de son déclencheur. Cependant, les disparités d'activité entre modèles d'enregistreurs et entre sensibilités restent difficilement interprétables en raison de très nombreux effets confondants, notamment avec des variables paysagères. Ainsi le matériel et le paramétrage de son déclencheur sont déterminants et devraient être homogénéisés à large échelle dans les études de suivi afin de réduire cette source de variation et permettre de détecter les effets des autres variables sur l'activité. Cette étude révèle également l'importance primordiale de contextualiser la quantification de l'activité lors des études de suivi. Cela est d'autant plus important lors de comparaisons avec des référentiels d'activité où les comparaisons doivent se faire à matériel et paramétrages égaux, ou encore des comparaisons entre sites où il peut vite devenir impossible de distinguer les différences d'activité liées au paysage de celles liées au matériel de suivi.

Si pour l'analyse portant sur l'ensemble du jeu de donnée nous nous sommes heurtés à la forte hétérogénéité générée par la diversité de matériel et de paramétrages, il a cependant été possible de mener une analyse sur un sous jeu de donnée. En effet, la combinaison enregistreur-sensibilité « Batmode/ -37 dB » présentait suffisamment de données (36 sites et plus de 9500 nuits) pour conduire une analyse portant sur les déterminants de l'activité en éliminant totalement l'effet du

matériel. Les résultats montrent que même sur une échelle temporelle « relativement grossière », c'est-à-dire une activité mesurée à l'échelle de nuits complètes, quelques facteurs paysagers et tous les facteurs climatiques, temporels et de fonctionnement des éoliennes attendus ont d'importants effets sur presque toutes les guildes. Ces résultats préliminaires soulignent toute l'importance de considérer l'ensemble de ces paramètres dans la construction de règles de bridage dans un but de minimisation des risques de collision.

De futures analyses pourraient idéalement réitérer ces analyses sur une échelle intra-nuit afin de décrire plus finement la réaction des chiroptères en temps réel aux différents facteurs, tout en tenant compte de la phénologie horaire de l'activité. De telles analyses pourraient contribuer à incorporer de nouveaux paramètres dans les algorithmes de bridage en temps réel. Des interactions entre variables pourraient également être incluses, afin de contextualiser encore plus finement les effets et définir l'ensemble des combinaisons seuils de facteurs à partir desquelles le risque de collision devient trop fort. Le jeu de données actuel possède déjà le potentiel pour basculer dans ce type d'approche intra-nuit, mais pourrait être renforcé par de nouvelles données sur un type d'enregistreur (dans le but de minimiser l'effet du matériel) déjà très représenté dans les données actuelles.

1. Contexte et objectifs du projet

L'énergie éolienne peut générer des impacts sur la biodiversité que les opérateurs doivent légalement évaluer et intégrer au processus de construction et d'exploitation des parcs pour l'obtention de l'autorisation environnementale. Parmi les impacts, les collisions avec les chiroptères peuvent avoir des conséquences néfastes sur les dynamiques de population (Frick et al., 2017). Même si le bridage des éoliennes en fonction de paramètres météorologiques et paysagers plus ou moins complexes selon les pays peut montrer une certaine efficacité, cette efficacité reste néanmoins extrêmement variable et n'atteint jusqu'à présent jamais plus de 85% de réduction des impacts (Whitby et al., 2021), et les déterminants de la probabilité de collision restent encore mal connus. En particulier, il est clairement admis que la structure et la nature du paysage (Frey-Ehrenbold et al., 2013; Monck-Whipp et al., 2017; Pinaud et al., 2018), ainsi que les conditions météorologiques et la période de l'année influencent beaucoup l'activité des chiroptères au sol et en altitude (Parsons et al., 2003; Roemer et al., 2020; Salvarina et al., 2018). Malgré ces connaissances, il est encore aujourd'hui difficile de croiser ces paramètres afin d'en déduire des mesures réduisant drastiquement la probabilité de collision, principalement parce que ces paramètres interagissent entre eux et affectent tous l'activité en altitude des chiroptères simultanément. L'estimation de la probabilité de collision à partir de l'activité de vol des chiroptères à hauteur des pales des éoliennes (mesures acoustiques à hauteur des rotors des machines) est encore largement débattue, en partie parce que les études sont souvent réalisées à l'échelle d'un site ou d'un jeu de données restreint. Cependant la récente étude publiée par Roemer et al. (2017), qui se base sur un jeu de données relativement conséquent, suggère une forte relation entre l'indice de susceptibilité aux collisions et l'activité chiroptérologique enregistrée en altitude sur mat de mesure. Il est donc aujourd'hui crucial de mieux évaluer les déterminants des variations spatio-temporelles de cette activité « en altitude » (hauteur des pales) et de développer des outils de prédiction de l'activité en altitude de manière à réduire ces risques de collision. Pour cela, il faut donc être capable d'étudier l'effet conjoint de tous ces paramètres, or cette approche multicritère ne peut pas être réalisée à partir d'études au cas par cas. Une agrégation de données à large échelle est donc requise pour être en mesure de démêler les effets respectifs du paysage, des conditions météorologiques et de la période de l'année, et l'effet de la conjonction de ces paramètres sur l'activité des chiroptères dans le volume d'activité des pales d'éoliennes.

Ce projet financé par France Energie Eolienne (FEE) et mené par le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) a donc eu pour objectifs d'étudier les déterminants spatio-temporels de l'activité en chiroptères en nacelle d'éolienne, en agrégeant des données acoustiques à l'échelle Française grâce à un appel à données auprès des adhérents FEE. Ces données ont été centralisées sous forme brute afin d'être retraitées de façon homogène, et de nombreuses métadonnées ont été récupérées afin de tenir compte de l'hétérogénéité des suivis dans les analyses et ainsi minimiser les sources biais, par exemple liées au matériel d'enregistrement.

2. Déroulé du projet

Ce projet financé sur 12 mois a été basé sur une approche participative et de volontariat. Ainsi, un appel à données auprès des adhérents FEE a été réalisé avec comme conditions de fournir les données brutes recueillies en nacelle (fichiers de son) afin que celles-ci puissent être retraitées de façon homogène (détection des évènements sonores, extraction des paramètres acoustiques, identification des espèces), ainsi qu'un ensemble de métadonnées relatives aux éoliennes, aux périodes de suivi et aux méthodes et paramétrages des enregistreurs autonomes acoustiques. Le projet a été conduit en 4 grandes phases :

Phase de test de la procédure (Janvier-Mars 2020)

A partir d'une enquête auprès des structures sur les potentialités en termes de volume de données et la réception d'un premier volume de fichiers issues de quelques nacelles, nous avons (i) évalué la procédure qui pourrait être mise en œuvre, et (ii) élaboré la structure de la base de données

Réception et traitement des fichiers de sons (Mars-Octobre 2020)

La première phase a consisté en un recueil des données, essentiellement par envoi de disques durs. Dès réception, les traitements acoustiques étaient mis en place pour les enregistrements reçus à raison de 2 à 6 nacelles traitées par semaine. En raison de la crise sanitaire liée au Covid-19, les structures partenaires de la FEE n'ont pu faire parvenir les fichiers de sons qu'à la fin du 1^{er} confinement, ainsi les premières nacelles n'ont été reçues qu'en Mai 2020. Ce retard a inévitablement écourté le temps restant pour l'analyse et la valorisation des données. L'ensemble des données acoustiques ont été retraitées de façon homogène en utilisant le logiciel d'identification automatisée TADARIDA (Bas et al., 2017). Ce traitement homogène de l'ensemble des fichiers de sons permet d'éliminer d'éventuels biais observateurs ou variabilités liées aux types de logiciels utilisés en local. C'est au cours de cette période qu'ont été élaborés les scripts nécessaires à l'agrégation des différents types de données (identification, données de fonctionnement des machines, météo, métadonnées relatives aux matériel et paramétrage...).

Contrôle, correction, formatage et implémentation des métadonnées et données météorologique/de fonctionnement (Octobre-Novembre 2020)

Une seconde étape menée en Octobre-Novembre 2020 a consisté à contrôler, corriger, et homogénéiser les différentes métadonnées transmises par les adhérents relatives aux données fournies, principalement par détection d'erreurs ou de valeurs manquantes suivie d'échanges mails avec les participants. Les métadonnées sont en effet une composante essentielle puisque beaucoup d'entre elles ont été incluses aux analyses afin de tenir compte notamment de l'hétérogénéité des méthodes et des éoliennes (paramétrage et type de matériel, mensurations de l'éolienne, altitude). Cette seconde étape a aussi été consacrée à l'homogénéisation des fichiers météo et de fonctionnement des éoliennes transmis par les participants sous des formats relativement hétérogènes. Une fois les métadonnées, données météo et de fonctionnement corrigées et homogénéisées, ces informations ont pu être reliées aux données acoustiques synthétisées à l'échelle de chaque site et chaque date.

Calcul et implémentation des variables paysagères (Novembre-Décembre 2020)

Ensuite, dans un troisième temps entre Novembre et Décembre 2020, une série de variables paysagères à inclure aux analyses pour étudier l'effet du contexte paysager sur l'activité en nacelle a été calculée (voir partie Synthèse du jeu de données pour une description des variables paysagères retenues). Ces informations ont également ensuite été reliées aux données acoustiques synthétisées à l'échelle de chaque site et chaque date.

Analyse des données (Décembre-Février 2020)¹

Enfin, la phase d'analyse de données a eu lieu de fin Décembre 2020 à Février 2021, sous forme d'une première exploration des données étant donné le peu de temps restant en raison du retard dans l'envoi des données en début de projet. Les analyses réalisées sont présentées en partie Analyses de données de ce rapport, et se sont poursuivies lors de la rédaction durant l'été 2021.

Des réunions régulières sur l'état d'avancement et les analyses envisagées ont eu lieu tout au long du projet (Figure 1).

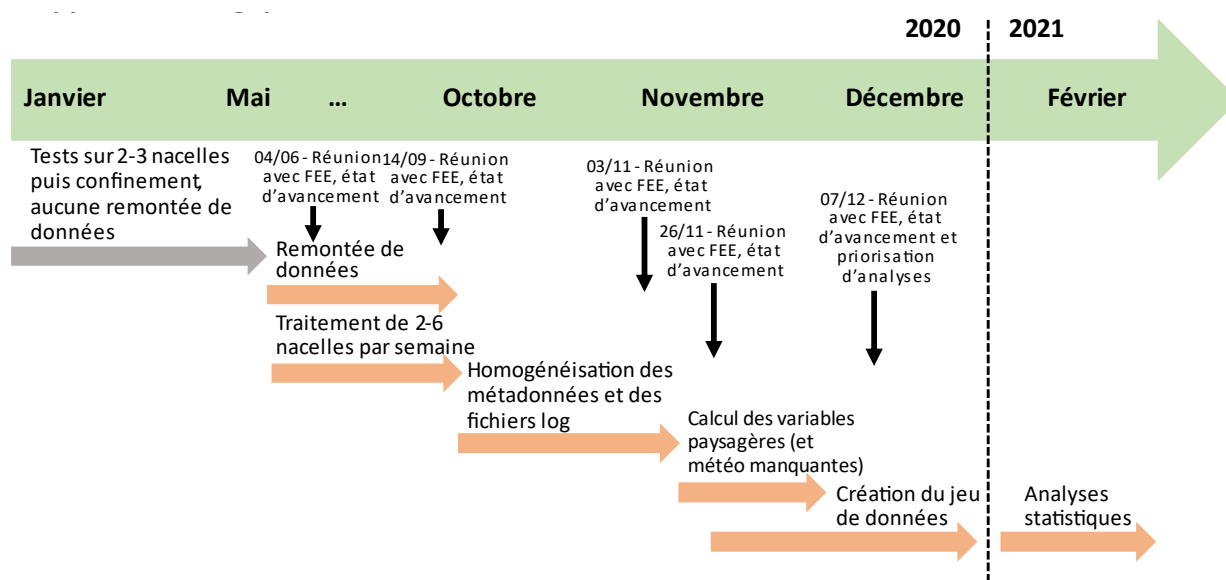


Figure 1. Chronologie et différentes étapes du projet, du recueil à l'analyse des données acoustiques.

¹ Réalisée en dehors du contrat et sur fonds extérieurs à la convention MNHN-FEE

Au total 9 adhérents FEE ont transmis des données provenant de 12 bureaux d'études et associations, pour un total de 64 nacelles et 16060 nuits d'enregistrement complètes (Table 1).

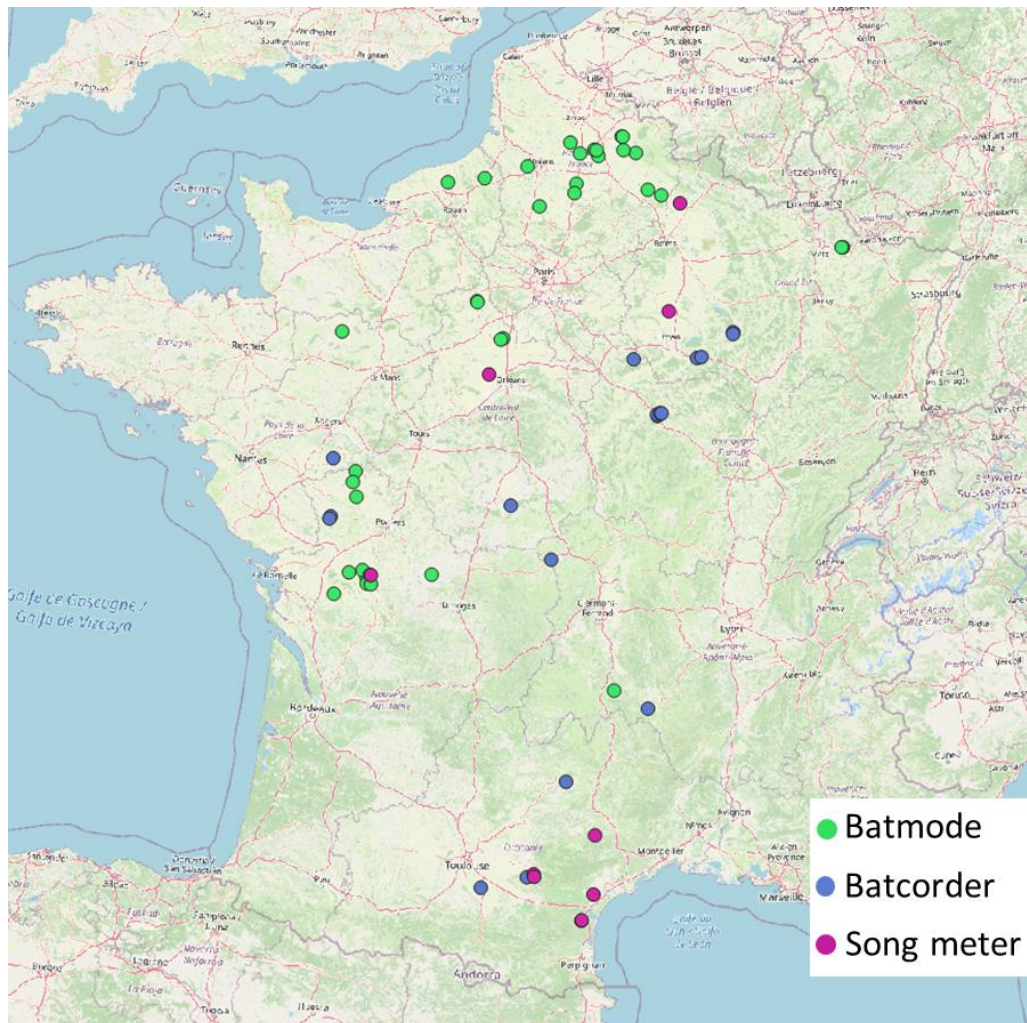
Table 1. Liste synthétique des données transmises par FEE et ses structures partenaires (entreprises/structures productrices des données, volume de données : nuits et nacelles).

Provenance des données	Producteur des données	Nombre de nuits	Nombre de nacelles
Groupe Valeco	Altifaune	640	3
Wpd windmanager	Auddice	784	3
Wpd windmanager	Cera environnement	629	2
Wpd windmanager	CPIE Mayenne Bas-Maine	213	1
Wpd windmanager	Ecosphere	719	2
Wpd windmanager	Encis	576	2
Wpd windmanager	Ouest am	210	1
Wpd windmanager	Silva environnement	784	4
Enertrag	Ecosphere	462	2
Enertrag	Encis	365	1
Enertrag	Exen	570	2
Baywa-re	Encis	1008	4
Baywa-re	Envol environnement	210	1
Nordex	Ecosphere	188	1
Total Quadran	Altifaune	592	3
Total Quadran	Exen	183	1
Boralex	Auddice	396	2
Boralex	Ecosphere	471	2
Boralex	Encis	262	1
Boralex	Exen	854	2
Boralex	Kjm conseil	4311	18
Volkswind	Encis	604	2
Exen	Exen	851	3
Eurowatt	Biotope	178	1
		16060	64

3. Synthèse du jeu de données

3.1. Couverture spatiale

Les 64 nacelles pour lesquelles des données ont été réceptionnées et traitées couvrent un gradient géographique relativement étendu bien que le Nord-Ouest, l'Est, le Sud-Est et le Sud-Ouest soient peu représentés (Figure 2). Nous notons cependant un déséquilibre spatial lié au type de matériel utilisé, avec majoritairement des Batmode au Nord et des Song Meter/Batcorder au Sud.



3.2. Couverture temporelle

Les suivis acoustiques couvrent 4 années et sont majoritairement concentrés sur l'année 2019. La couverture temporelle est particulièrement importante, avec une très bonne couverture de la période Mars-Novembre environ pour une majorité des sites (Figure 2). Un gradient aussi étendu permettra de tenir compte avec une grande précision de la phénologie de l'activité au cours de l'année.

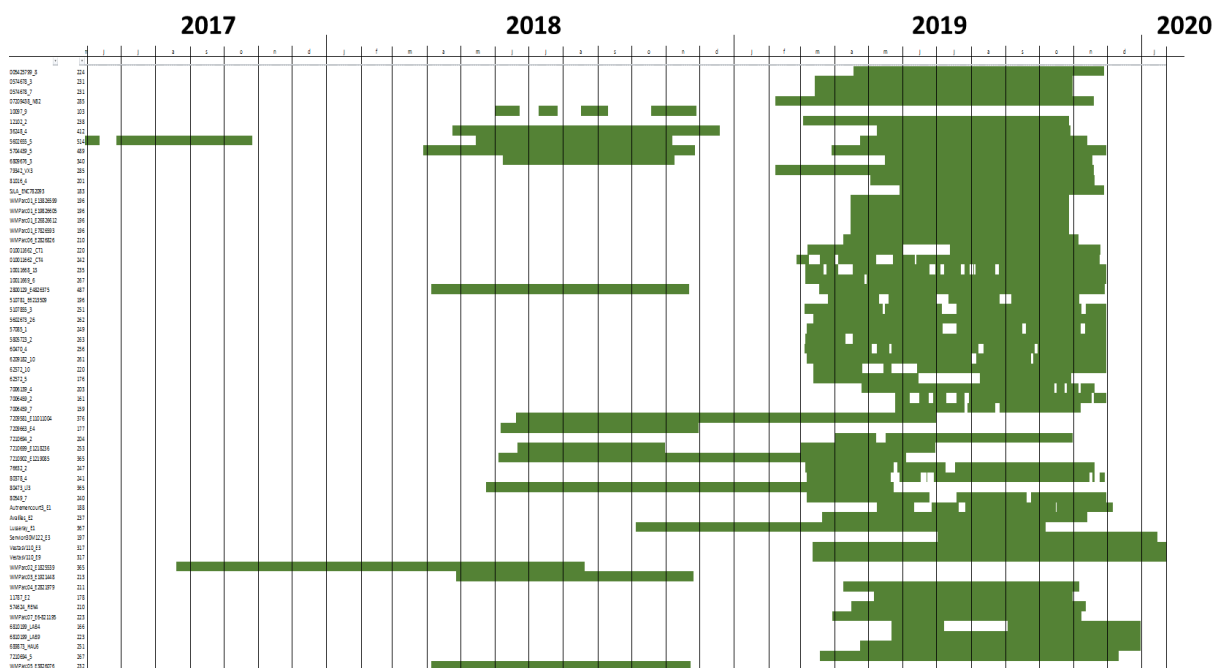


Figure 2. Couverture temporelle (en vert) des suivis acoustiques pour chacun des 64 sites. Les lignes verticales séparent les mois au sein de chaque année.

3.3. Gradients environnementaux et paysagers

Afin d’obtenir la vision la plus complète possible des contextes paysagers couverts par les 64 sites de l’étude, nous présentons ici 3 types de variables paysagères : (i) des variables de distances aux habitats les plus proches, (ii) des variables de proportions d’habitats dans différents rayons autour des nacelles, et (iii) des variables synthétiques de composition paysagères dans différents rayons autour des nacelles. Différents rayons de 50 à 10000 m autour des sites ont été considérés pour le calcul des variables afin de choisir dans les analyses l’échelle la plus pertinente pour chaque variable (Gallo et al., 2018; O. Kalda et al., 2015; R. Kalda et al., 2015). Ces différentes variables et leur nature (distances, proportions et indices) sont complémentaires et ont été retenues en raison de leur importance dans la compréhension de l’activité en chiroptères. Ainsi la quantité ou la proximité des zones urbaines (Azam et al., 2016; Dixon, 2011), des terres arables, prairies et landes (Froidevaux et al., 2017; Lentini et al., 2012; Roeleke et al., 2016), des vignes et vergers (Charbonnier et al., 2021; Dietz et al., 2013), des forêts (Boughy et al., 2011a, 2011b; Heim et al., 2017) et le degré de complexité paysagère (Monck-Whipp et al., 2017), sont des facteurs explicatifs de l’activité en chiroptères bien connus.

En ce qui concerne les variables de distance aux habitats, les 64 sites présentent de la variation en termes de distances à l’urbain, à la forêt et aux zones humides (Annexe 1).

En ce qui concerne les variables de proportion d’habitats, les 64 sites présentent une bonne variation pour l’urbain, les terres arables, les prairies et les forêts, qui seront donc incluses aux analyses (Annexe 2). Les landes, vignes et vergers étant beaucoup moins représentés et avec des gradients très faibles ont donc été écartés des analyses.

En ce qui concerne les indices de complexité paysagère, 4 indices ont été calculés à partir de l’outil FRAGSTATS implémenté dans le package R *landscapemetrics*:

- La densité en écotones, c’est-à-dire toute transition entre 2 types d’habitats différents, exprimée en m/ha ;

- L'entropie conditionnelle, c'est-à-dire la complexité de la configuration du paysage, mêlant la diversité en habitats avec l'hétérogénéité de leur disposition ;
- La densité de richesse en habitats, c'est-à-dire le nombre des types d'habitats standardisé par la surface ;
- L'indice de diversité de Shannon, c'est-à-dire la diversité en types d'habitat.

Ces 4 indices paysagers présentent également une bonne variabilité à travers les 64 sites étudiés (Annexe 3).

Enfin, en ce qui concerne les conditions météorologiques durant les suivis dont les données ont été fournies par les exploitants à partir de stations météorologiques en nacelle par tranche de 10 minutes (vitesse et direction du vent, température moyennes par nuit) ou pour les précipitations cumulées extraites à partir de la base de donnée E-OBS (https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access_eobs.php#datafiles), les conditions présentent une très grande variabilité (Figure 3).

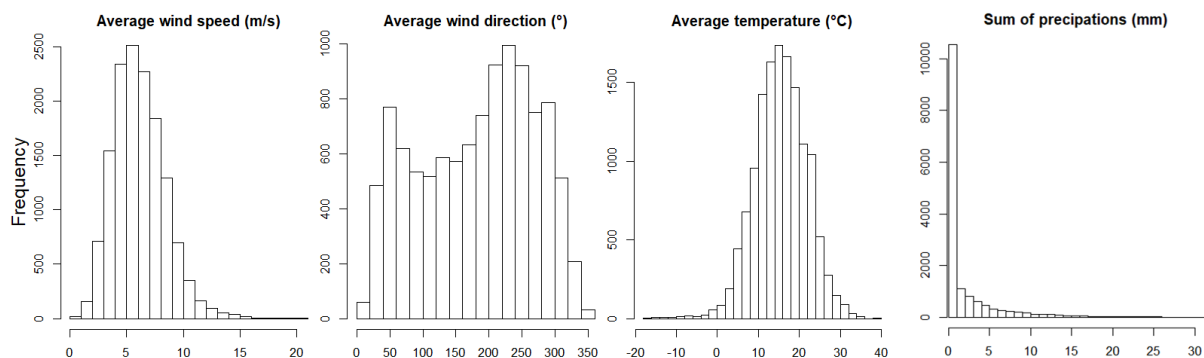


Figure 3. Variation des conditions météorologiques moyennes par nuit de suivi.

3.4. Gradients méthodologiques

L'enregistreur acoustique le plus répandu dans les suivis récoltés est le Batmode avec 36 sites, suivi par le Batcorder avec plus de 25 sites et le Song Meter bat avec plus de 10 sites (Figure 4A).

- En ce qui concerne la sensibilité du déclencheur de l'enregistrement, exprimé comme une différence de niveau de pression sonore par rapport à une calibration en usine (Batmode et Batcorder) ou le niveau du bruit de fond (Song Meter bat), le Batmode n'a été utilisé qu'à son niveau de déclenchement par défaut (le plus sensible) conseillé par le fabricant, le Batcorder sur 3 niveaux différents allant de la plus faible sensibilité à la plus forte, et le Song Meter également sur 3 niveaux de sensibilité (Figure 4B).
- Les fréquences minimales et maximales d'enregistrement variaient de 5 à 16 kHz et de 80 à 192 kHz (Figure 4C-D). Les fréquences d'enregistrement ne sont pas limitantes en dehors :
 - des espèces de basses fréquences (Molosse de Cestoni et Grande noctule) pour 53 sites sur 64 impliquant tous les enregistreurs ;
 - et des espèces de hautes fréquences (Petit rhinolophe et Rhinolophe Euryale) pour 28 sites sur 64 impliquant le Batmode et Song Meter, ces deux espèces sont à priori non concernés par des suivis à hauteur de nacelle, du fait d'une hauteur de vol habituellement de l'ordre de quelques mètres (Roemer et al., 2017).

- Le temps maximum de silence après le dernier signal enregistré suite à un déclenchement variait de 200 à 3000 ms (Figure 4E).

Ces 3 paramètres sont fortement confondus avec la combinaison entre le type d'enregistreur et la sensibilité du déclencheur. Par exemple les Batcorder et Batmode avaient toujours des fréquences minimales plus élevées que les Song Meter, et les Song Meter ayant une sensibilité plus élevée avaient toujours une fréquence maximale et minimale plus faible que ceux ayant une sensibilité moins élevée. Afin de ne pas multiplier le nombre de variables méthodologiques et redondantes dans les analyses, une seule variable combinant le type d'enregistreur et la sensibilité a été utilisée.

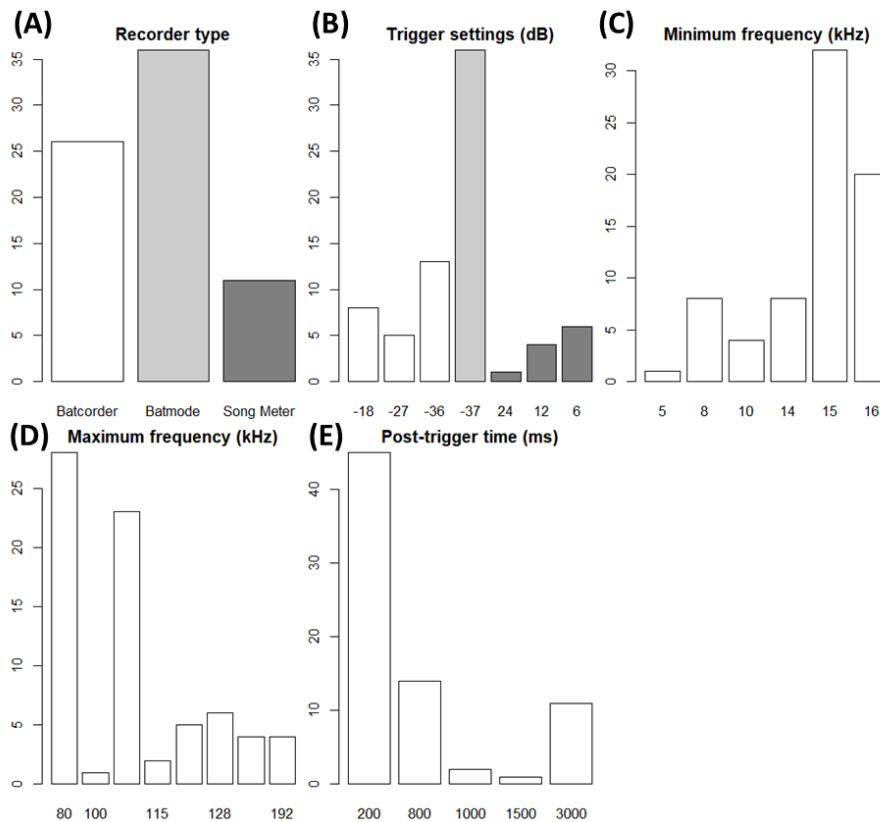
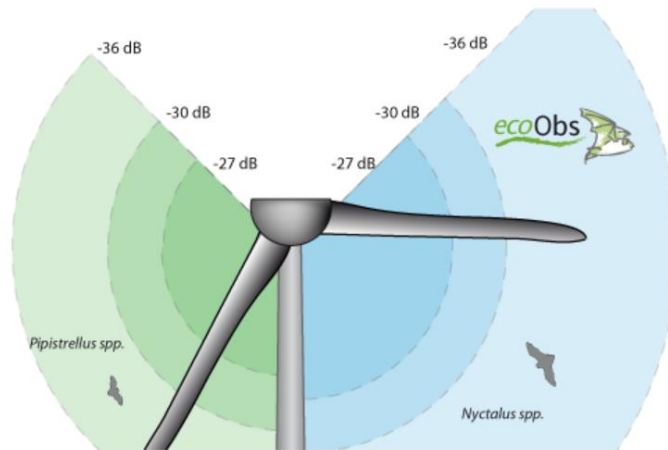


Figure 4. Nombre de sites dans l'étude pour chaque valeur de paramètre méthodologique.

Il est également important de noter que la sensibilité du déclencheur, dont les règles sont propres à chaque fabricant ou presque, est un paramètre clé qui détermine directement le volume et la distance de détection, et influence donc très fortement la quantité d'activités en chiroptères (Figure 5).



Detection distances

Figure 5. Distances et volumes de détection des chiroptères en lien avec le niveau de sensibilité du déclencheur d'enregistrement pour le Batcorder. Source : <https://ecoobs.com/>

3.5. Gradients des caractéristiques et du fonctionnement des éoliennes

Les informations relatives au fonctionnement des éoliennes ont été transmises par les exploitants éoliens par tranches de 10 minutes. La rotation des pales (vitesse et nombre de tours par minute) montrait une très grande variabilité sur les nuits d'enregistrement (Figure 6A-B). Les dimensions des nacelles (diamètre du rotor, hauteur de la nacelle, garde au sol) montraient elles aussi une grande variabilité (Figure 6C-E). Ces variabilités importantes permettront d'inclure ces facteurs aux analyses afin d'étudier leurs effets respectifs sur l'activité des chiroptères. En effet, la rotation des pales notamment est d'ores-et-déjà connue pour avoir un effet sur le comportement de vol des chiroptères à proximité de la nacelle (Cryan et al., 2014), et donc potentiellement sur l'activité enregistrée.

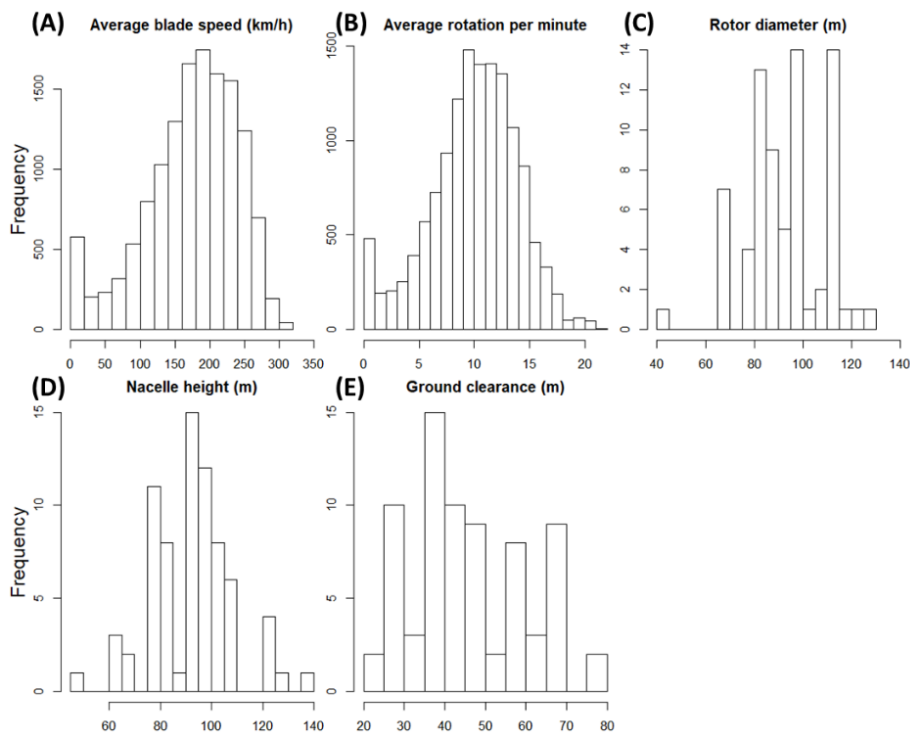


Figure 6. Nombre de nuits (A-B) ou sites (C-E) par valeur de caractéristique (C-E) et de fonctionnement (A-B) des éoliennes.

4. Analyse des données

4.1. Choix de l'échelle d'analyse

Deux échelles d'analyse sont possibles et complémentaires. La première consiste à étudier les différents déterminants (présentés ci-dessus, voir partie 3) de l'activité des chiroptères en nacelle d'éolienne de façon synthétique à l'échelle de la nuit. Ainsi pour chaque nuit une somme totale des séquences acoustiques des chiroptères est effectuée, et cette information sera ensuite modélisée en lien avec les déterminants. Cette échelle a l'avantage de produire peu de données à modéliser (autant de lignes que de nuits d'enregistrement) et donc d'accélérer les temps de calcul, idéal pour de premières explorations des qualités et limites du jeu de données. Elle permet d'étudier de façon robuste l'effet de facteurs qui ne changent pas pour un même site au cours du temps, à savoir le paysage, les dimensions de l'éolienne, le matériel et son paramétrage. En revanche, elle implique de modéliser moins précisément les facteurs qui évoluent au cours du temps pour un même site, à savoir les conditions météorologiques et le fonctionnement de l'éolienne, puisque ces informations sont résumées par des moyennes par nuit.

La seconde approche possible consiste à synthétiser le nombre de séquences de chiroptères sur un pas de temps plus fin que celui d'une nuit complète (par exemple par tranche de 10 minutes) afin de modéliser l'activité des chiroptères sur une échelle intra-nuit. Cette approche permet de modéliser beaucoup plus finement l'effet des conditions météorologiques et du fonctionnement des éoliennes en quasi temps réel, et de tenir compte de la variation d'activité intra-nuit dont la phénologie est bien connue (Salvarina et al., 2018). De plus, cette phénologie varie en fonction des saisons, une approche intra-nuit aurait donc également l'avantage de mieux contextualiser l'effet des conditions météorologiques à l'heure de la nuit et ce en fonction des saisons, permettant d'affiner considérablement les stratégies de bridage des éoliennes. Cette approche intra-nuit est cependant nettement plus chronophage.

En raison du temps limité pour conduire les analyses (un peu plus d'un mois, voir partie 2 ci-dessus), et de la nécessité de comprendre la structure des données et les problèmes potentiels de modélisation, l'approche la plus efficace et permettant d'obtenir rapidement une première vision du potentiel des données était la première basée sur l'échelle de la nuit complète. Les analyses et résultats présentés ci-dessous consisteront donc à explorer les déterminants de l'activité cumulée des chiroptères par nuit en nacelle. A partir de ces premiers résultats nous proposons néanmoins des pistes de travaux intra-nuit dans la partie 5 en fin de rapport.

4.2. Méthode d'analyse

Suivi acoustique et identification des chiroptères

Un total de 654535 séquences de chiroptères a été enregistré sur l'ensemble des sites et nuits de suivi. L'ensemble de ces séquences reçues en format brut ont été retraitées de façon homogène à l'aide du logiciel d'identification automatisée TADARIDA (Bas et al., 2017), permettant d'obtenir une identification à l'espèce pour chaque séquence. Pour analyser les données à l'échelle d'espèces, il est très important de tenir compte des biais acoustiques potentiels (Barré et al., 2019). Par exemple, un fonctionnement croissant de l'éolienne pourrait générer de plus en plus de bruits parasites dégradant ainsi les séquences d'enregistrement et par la même occasion la qualité de l'identification automatisée des espèces, ou inversement produire des parasites très proches de certaines espèces créant ainsi

beaucoup de faux positifs lors de vitesses de rotation élevées. Cela peut par exemple créer artificiellement un nombre de séquence d'une espèce donnée plus faible quand l'éolienne tourne vite que lorsqu'elle tourne lentement, ou inversement si énormément de parasites « trompeurs » sont enregistrés, biaisant ainsi la relation entre l'activité et la vitesse de rotation des pales. Pour éviter ce type de problème, nous avons utilisé une méthode permettant de s'assurer de la robustesse des réponses. Celle-ci consiste à modéliser le risque d'erreur dans les données en lien avec les indices de confiance du logiciel, et de filtrer les données sur différents seuils de tolérance pour limiter la quantité de faux positifs, on dispose donc de plusieurs jeux de données qui diffèrent par le taux de faux positifs inclus : des jeux avec peu de données et peu d'erreur mais au coût d'une perte de vrais positifs, ou bien des jeux de données avec plus de données et plus d'erreurs (voir Barré et al. (2019) pour plus de détails). Chaque jeu de données a ses avantages et inconvénients, aucun n'étant parfait, c'est donc la cohérence de résultats provenant de jeu de données très différents qui assurera une robustesse statistique quel que soit le ratio quantité/qualité de données utilisées (Barré et al., 2019).

Pour la plupart des espèces, l'utilisation de ces seuils de risque d'erreur génère une très grande perte de données et d'occurrence (Table 2) rendant les analyses difficiles à réaliser à l'échelle des espèces en raison d'un excès de nuits sans données (par exemple 97% de nuits sans données pour *Pipistrellus kuhlii*, espèce la plus abondante dans les données). Pour contrer ce problème, nous avons construit 3 guildes sur lesquelles réaliser les analyses et qui regroupent des espèces sur la base de leur comportement de vol (Denzinger and Schnitzler, 2013) : les espèces volant haut en milieu ouvert (long-range echolocators, LRE), les espèces volant en lisière à milieu ouvert (mid-range echolocators, MRE) et les espèces volant en milieu encombré proche de la végétation (short-range echolocators, SRE). Les LRE regroupent les noctules, les sérotines, les molosses. Les MRE regroupent les pipistrelles, le minioptère, le vespère. Les SRE regroupent les murins, les oreillard, la barbastelle. Ces regroupements d'espèces permettent de limiter les risques d'erreur d'identification automatique inter-guildes. Cependant un taux maximal d'erreur de 0.5 a été appliqué à chaque guilde en raison d'une grande quantité de parasites en nacelle bruyant beaucoup plus les données qu'en conditions normales, en particulier lorsque les pales des éoliennes tournent très vite, permettant ainsi d'éliminer la majorité des parasites pouvant biaiser les réponses (Table 2 ; voir annexe 4 pour plus de détails).

Table 2. Synthèse du nombre de séquences et occurrence des nuits de présence par espèce et par seuil d'erreurs dans l'identification automatisée (brut, 0.5 et 0.9). En gras les données qui ont été retenues pour les analyses.

Espèces ou groupes d'espèces	Nombre de séquences			Occurrence des nuits de présence (%)		
	Brut	0.5	0.9	Brut	0.5	0.9
<i>Pipistrellus kuhlii</i>	223319	9406	679	0.195	0.034	0.004
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	206446	30914	18046	0.302	0.140	0.076
<i>Nyctalus leislerii</i>	102090	41009	23511	0.278	0.213	0.143
<i>Nyctalus noctula</i>	43357	9548	3324	0.170	0.075	0.021
<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	19920	1593	15	0.097	0.010	0.001
<i>Pipistrellus nathusii</i>	16109	7179	553	0.122	0.046	0.012
<i>Myotis spp.</i>	7191	331	47	0.066	0.012	0.002
<i>Eptesicus serotinus</i>	6060	2091	81	0.085	0.028	0.003
<i>Tadarida teniotis</i>	3509	164	5	0.044	0.000	0.000
<i>Miniopterus schreibersii</i>	949	10	1	0.020	0.001	0.000
<i>Plecotus spp.</i>	573	30	0	0.012	0.001	0.000
<i>Barbastellus barbastella</i>	115	22	10	0.005	0.001	0.000
<i>Nyctalus lasiopterus</i>	107	15	9	0.004	0.001	0.000
<i>Eptesicus nilssonii</i>	51	5	0	0.003	0.000	0.000
<i>Vespertilio murinus</i>	51	0	0	0.003	0.000	0.000
Mid-range echolocators (MRE)	491432	51827	/	0.368	0.177	/
Long-range echolocators (LRE)	155225	52832	/	0.348	0.243	/
Short-range echolocators (SRE)	7878	383	/	0.074	0.013	/

Analyses statistiques de l'ensemble des données

L'objectif étant d'étudier simultanément l'effet de différentes variables sur l'activité des chiroptères en nacelle d'éolienne, nous avons opté pour une approche de modélisation statistique mettant en compétition un maximum de variables de nature différentes : paysagères, météorologiques/temporelles, méthodologiques et caractéristiques/fonctionnement des éoliennes. Étant donné la nature des distributions des données acoustiques, comportant une moitié de nuit sans activité et une distribution des abondances se prolongeant de manière décroissante jusqu'à des valeurs élevées d'activité, nous avons utilisé des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) associés à une loi binomiale négative, permettant d'éviter les phénomènes de surdispersion (Zuur et al., 2009). Également, étant donné les nombreuses pseudorépliques dans le jeu de données, c'est-à-dire la réplique d'un grand nombre de nuit d'enregistrement sur chaque site, nous avons ajouté au modèle un effet aléatoire sur l'identifiant du site. Ainsi le modèle général était le suivant :

Activité ~ variables paysagères + variable météo/temporelles + variables méthodologiques + variables éolienne + (1|site), famille = binomiale négative

Le nombre total de variables dans les modèles a été limité à 14 afin d'éviter des problèmes liés à de la surparamétrisation et à des temps de calcul trop importants. Pour cela, seules les 6 meilleures variables paysagères sur 11 ont été sélectionnées pour chaque guildes, en utilisant une partition hiérarchique permettant d'étudier la contribution relative des variables. Ensuite, pour chacune de ces 6 variables paysagères calculées dans des rayons autour des sites, nous n'avons retenu que la meilleure échelle de calcul de la variable en sélectionnant l'échelle donnant le plus faible AIC (Critère d'Information d'Akaike, dont la valeur renseigne sur la qualité du modèle et est d'autant plus faible que le modèle est de meilleure qualité) à partir de modèles univariés (Annexe 5). Pour chacune des variables quantitatives, nous avons également réalisé des modèles additifs généralisés mixtes univariés afin d'évaluer visuellement la nécessité d'inclure aux GLMMs des effets non linéaires. Ensuite, à partir du modèle complet comportant les 14 variables, nous avons généré tous les modèles candidats possibles classés par AIC croissant sans inclure simultanément les variables colinéaires (voir ci-dessous ; Table 3), et nous avons ensuite moyenné tous les modèles considérés comme équivalents, c'est-à-dire ayant une différence d'AIC avec le meilleur modèle inférieure à 6 (Grueber et al., 2011). Ainsi, les coefficients présentés pour chaque variable reflètent une moyenne de tous les meilleurs modèles. Cette approche permet notamment d'obtenir des résultats pour chaque variable malgré ses problèmes de corrélation avec d'autres, en incluant des règles d'exclusions dans les modèles candidats.

Avant la mise en compétition des variables dans cette procédure de modélisation, nous avons tout d'abord calculé à partir des modèles complets le pourcentage de variance expliquée par chaque variable (pseudo R^2) pour chaque guildes, afin d'obtenir un aperçu des variables qui structurent le plus les données. Ensuite, nous avons évalué les combinaisons de variables pouvant poser des problèmes de colinéarité en s'appuyant sur des matrices de corrélations (Annexe 6) et sur des analyses de facteur d'inflation de la variance (VIF). La table 3 ci-dessous présente pour chaque guildes les problèmes détectés et pour lesquels des règles d'exclusion (c'est-à-dire ne pas inclure simultanément dans un même modèles 2 variables colinéaires) ont été appliquées.

Table 3. Synthèse des combinaisons de variables posant un problème de colinéarité et pour lesquels les effets ne pourront être interprétés avec certitude.

Guide	Combinaisons de variables colinéaires dont les effets ne peuvent être distingués directement
Long-range foragers	Matériel - % terres arable (4000m) Matériel – entropie conditionnelle (10000m) Matériel – % prairies (3000m) Matériel – diamètre rotor Matériel – hauteur nacelle Matériel – densité en écotones (10000m) % terres arable (4000m) – entropie conditionnelle (10000m) % terres arable (4000m) – densité en écotones (10000m) % terres arable (4000m) – % prairies (3000m) densité de richesse en habitats (500m) – entropie conditionnelle (10000m) densité de richesse en habitats (500m) – densité en écotones (10000m) entropie conditionnelle (10000m)– densité en écotones (10000m)
Mid-range foragers	Matériel – indice de diversité paysagère de Shannon (4000m) entropie conditionnelle (50m)– densité en écotones (50m)
Short-range foragers	Matériel – % terres arable (500m) Matériel – % forêts (500m) % terres arable (500m) – % forêts (500m)

Cette analyse du VIF révèle donc des problèmes très importants de colinéarité entre variables, impliquant majoritairement la variable matériel combinant le type de matériel et de sensibilité du déclencheur. En effet, cette variable est hautement confondue avec beaucoup d'autres variables (Figure 7), notamment paysagères, il sera donc impossible de savoir si les effets observés reflètent l'effet du matériel ou celui de facteurs environnementaux comme la composition paysagère. On peut par exemple noter que les Song Meter bat (SM) avec un trigger réglé sur un rapport signal-bruit de 6 dB sont dans des contextes beaucoup plus forestiers que les autres types de matériel, en cas de différences d'activité entre le SM 6 dB et les autres modalités, il sera impossible de savoir si le changement d'activité est lié au matériel ou bien à la forêt (Figure 7).

De plus, cet excès d'hétérogénéité des méthodes utilisées risque d'expliquer tellement de variation que d'autres facteurs nous intéressant tout particulièrement telles que les conditions climatiques risquent de voir leurs effets masqués.

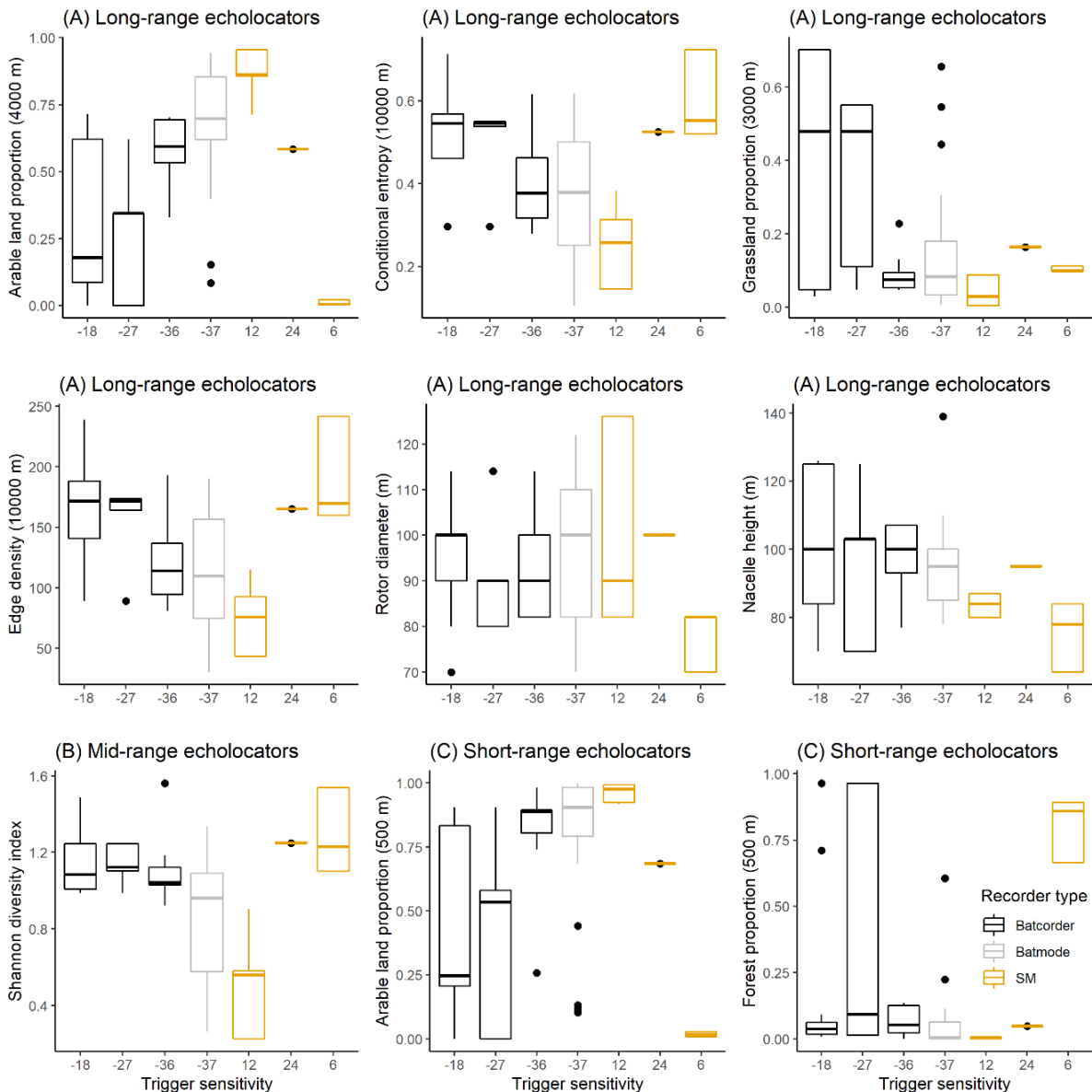


Figure 7. Synthèse de tous les effets confondants impliquant la variable combinant le type de matériel et la sensibilité de son déclencheur.

Analyses statistiques limitées aux données Batmode

Afin de s'affranchir des problèmes liés au matériel, nous avons modélisé les déterminants en éliminant l'effet du matériel. Pour cela nous avons uniquement sélectionné les données produites par le Batmode car (i) celui-ci n'a été utilisé qu'avec un seul paramétrage de la sensibilité du déclencheur, (ii) représentait le plus grand nombre de sites (36 sur les 64) et (iii) représentait la majorité des nuits (9923).

Pour étudier les différents déterminants, nous avons construit un modèle complet par guildes suivant la même structure que présentée en début de cette section, mais en retirant la variable matériel puisque toutes les données provenant d'enregistreurs autres que le Batmode ont été écartées. Étant donné que le nombre de sites est désormais plus faible, diminuant aussi la puissance statistique pour détecter des effets du paysage, nous avons limité le nombre de variables paysagères à 3, en

sélectionnant les 3 meilleures à partir d'une partition hiérarchique tout en évitant les problèmes de colinéarité. Les guildes LRE et MRE ont été modélisées avec une distribution binomiale négative pour éviter la surdispersion, tandis que les SRE ont été modélisés avec une distribution binomiale en présence/absence en raison d'une occurrence très faible (Table 2). Pour chaque variable, nous avons évalué la nécessité d'ajouter un effet non linéaire quadratique dans les modèles. Nous avons également vérifié que les modèles complets avaient un AIC plus faible que les modèles nuls (Table 4), et qu'aucun problème de colinéarité n'était présent. Ainsi les modèles complets sont les suivants :

Table 4. Synthèse de la composition des modèles complets par guildes et de la variance expliquée par leurs effets fixes (autres que *id_site* ; mR^2) et par leurs effets fixes et aléatoires (toutes les variables incluant l'effet aléatoire sur *id_site* ; cR^2). Le tableau présente également les différences d'AIC entre chaque modèle complet et les modèles nuls.

Guilde	Modèles (nuls et complets)	AIC	mR^2	cR^2
LRE	(1 <i>id_site</i>)	25772.9	-	-
	shdi_10000 + dist_foret + dist_urbain + drotor + hnacelle + mean_bladespeed + mean_bladespeed^2 + jday + jday^2 + mean_temperature + mean_temperature^2 + mean_windspeed + mean_windspeed^2 + rr_day + (1 <i>id_site</i>)	24323.3	0.45	0.70
MRE	(1 <i>id_site</i>)	15907.7	-	-
	prd_1000 + foret10000 + dist_urbain + drotor + hnacelle + mean_bladespeed + mean_bladespeed^2 + jday + jday^2 + mean_temperature + mean_temperature^2 + mean_windspeed + mean_windspeed^2 + rr_day + (1 <i>id_site</i>)	14891.4	0.54	0.60
SRE	(1 <i>id_site</i>)	620.3	-	-
	prd_1000 + foret10000 + dist_urbain + drotor + hnacelle + mean_bladespeed + mean_bladespeed^2 + jday + mean_temperature + mean_windspeed + mean_windspeed^2 + rr_day + (1 <i>id_site</i>)	581.7	0.50	0.56

shdi : Shannon diversity index; *prd*: patch richness density ; *drotor* : rotor diameter; *hnacelle*: nacelle height; *jday*: julian day; *rr_day*: cumulated rain

4.3. Résultats

Contributions relatives des variables

Pour l'ensemble des guildes, la variable de matériel explique toujours plus de variance, en particulier pour les guildes des LRE et MRE pour lesquelles les autres variables pourtant bien connues pour structurer énormément l'activité (notamment paysagères et météo/temporelles) ressortent très loin derrière avec une variance expliquée très résiduelle (Figure 8).

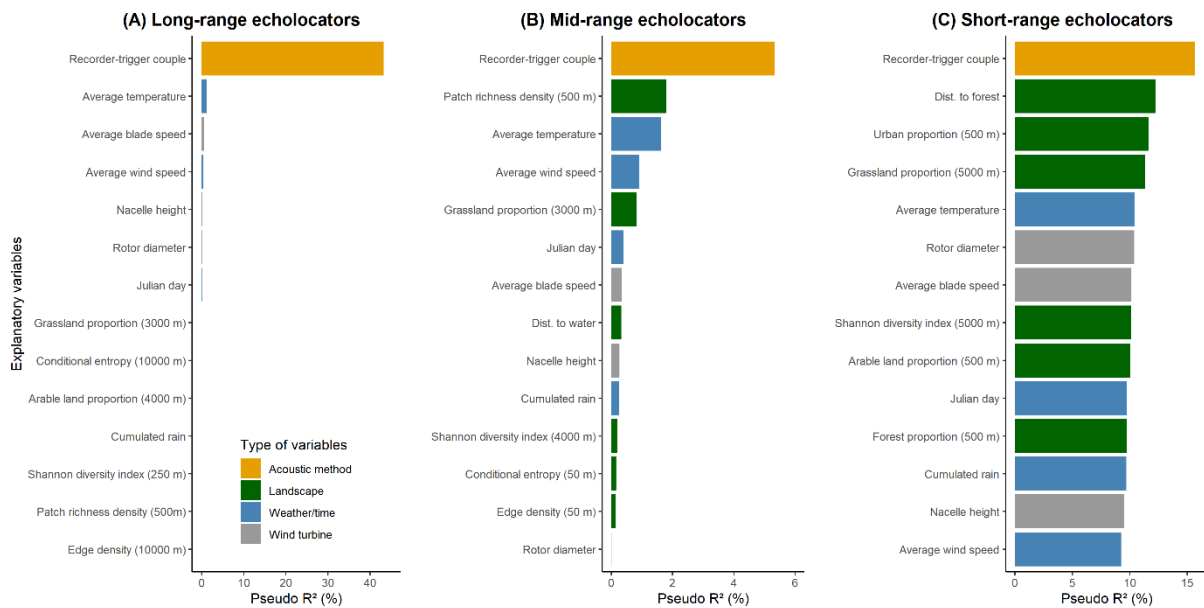


Figure 8. Pourcentage de variance expliquée par chaque variable pour chaque guildes selon les 4 grands types de variables.

Différences d'activité des chiroptères en fonction du matériel

La variable combinant le type de matériel et la sensibilité de son déclencheur était systématiquement sélectionnée dans la procédure de modélisation sur l'ensemble des données, et influence significativement toutes les guildes (Figure 9). Le pattern le plus net qui ressort reste la plus grande activité enregistrée par le Song Meter bat paramétré sur la plus haute sensibilité et le Batmode pour les LRE, et par les Song Meter bat paramétrés sur la plus haute sensibilité pour les MRE et SRE, en comparaison avec les autres couples enregistreur-sensibilité. Le reste des différences est difficile à interpréter, mais deux gradients d'activité semblent se dessiner avec (i) une activité enregistrée croissante entre les Batcorders, Batmodes et Song Meters, respectivement, et (ii) une activité enregistrée croissante avec l'augmentation de la sensibilité au sein de chaque type d'enregistreur (Figure 9).

Cependant, ces résultats ne peuvent être confirmés avec certitude étant donné les nombreux effets confondants qui existent entre le matériel et les autres variables environnementales comme le synthétisent la Table 3 et la Figure 7. Ainsi, les différences deux à deux entre couples enregistreur-sensibilité pourraient potentiellement être le reflet de différences de conditions environnementales (de paysage par exemple) et non pas d'un effet du matériel, bien que celui-ci soit déjà bien connu dans la littérature pour être déterminant dans la quantité d'activité enregistrée, influençant notamment le volume et les distances de détection.

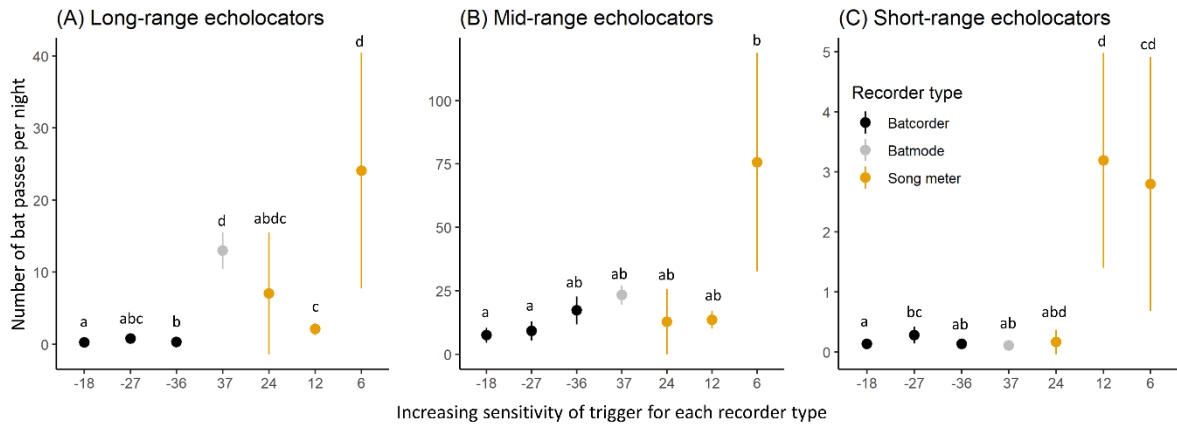


Figure 9. Activité prédite à partir des GLMMs pour chaque combinaison enregistreur-sensibilité du déclencheur pour chaque guild. Les différences de lettres entre les catégories indiquent les différences significatives. Aucune conclusion totalement fiable ne peut être faite de ce résultats étant donné les très forts effets confondant avec d'autres variables (Table 3 ; Figure 7).

Effets des déterminants une fois l'effet du matériel éliminé : cas des données du Batmode

En ce qui concerne l'effet du paysage, l'augmentation de la diversité paysagère dans un rayon de 10000 m augmente l'activité en nacelle des LRE, l'augmentation de la densité en richesse d'habitat dans un rayon de 1000 m et de la proportion de forêt dans un rayon de 10000 m augmente l'activité des MRE, et l'augmentation de la densité en écotones dans un rayon de 10000 m et l'augmentation de la proportion de terres artificialisées dans un rayon de 100 m augmente l'activité des SRE (Figure 10).

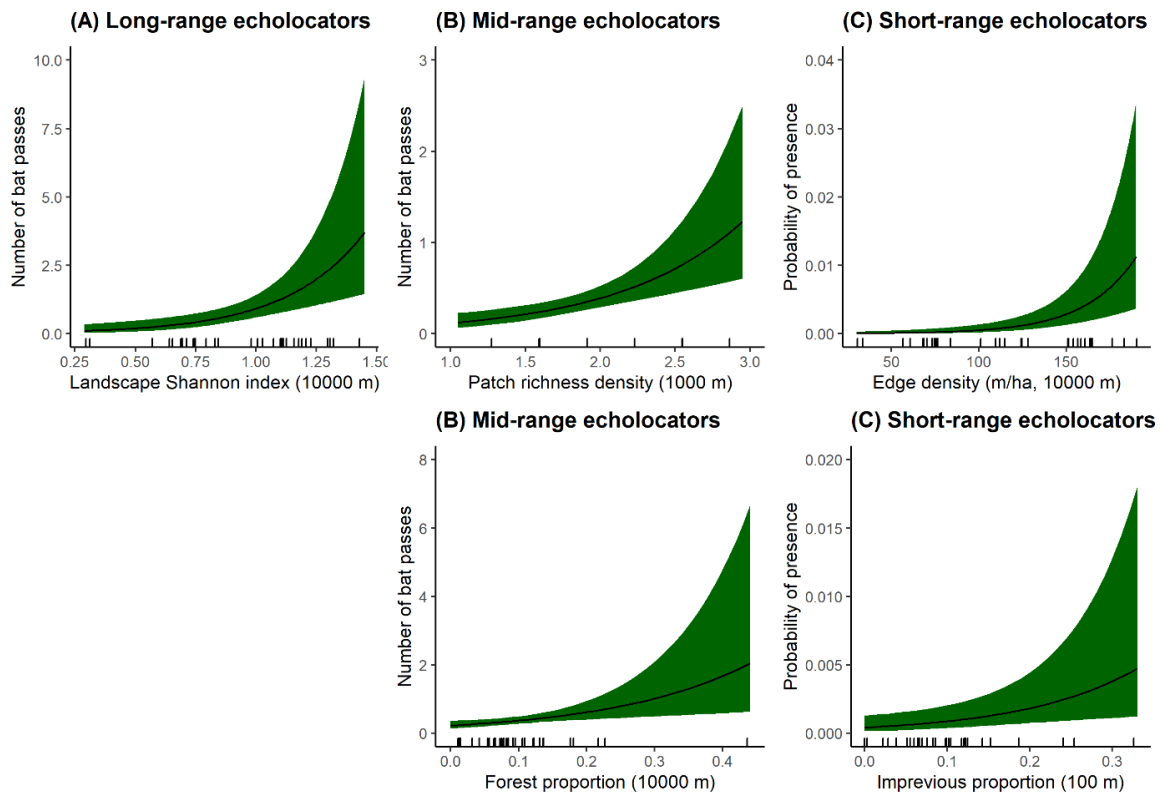


Figure 10. Activité prédite des chiroptères en nacelle en fonction des variables paysagères significatives à partir des modèles complets pour les 3 guildes.

En ce qui concerne le fonctionnement de l'éolienne, l'augmentation de la vitesse des pales (mesurée en bout de pale) influence négativement l'activité des trois guildes (Table 5 ; Figure 11). Pour les LRE, l'augmentation de la vitesse de rotation diminue même plus rapidement l'activité jusqu'à un seuil d'environ 150 km/h à partir duquel l'activité devient quasi-nulle et constante (Figure 11). Même si la vitesse de rotation est très corrélée à la vitesse de vent, la grande quantité de nuits avec des vitesses de rotation faibles par vent élevé (Annexe 7) permet de distinguer les effets respectifs de ces deux variables sans problème de colinéarité dans les modèles, permettant une interprétation fiable.

En ce qui concerne les variables climatiques et temporelles, l'augmentation de la température augmente exponentiellement l'activité des guildes LRE et MRE, avec notamment une augmentation marquée de l'activité des LRE à partir d'environ 15°C (Table 5 ; Figure 11). De la même façon, l'augmentation de la vitesse du vent diminue de façon exponentielle l'activité des trois guildes, avec une activité devenant quasi nulle et constante à partir d'environ 10 m/s pour la guildes LRE et environ 7 m/s pour la guildes MRE (Table 5 ; Figure 11). L'augmentation de pluie diminue également l'activité de toutes les guildes, mais de façon plus constante et linéaire (Table 5 ; Figure 11). Enfin, la date influence également fortement l'activité de la guildes MRE, avec une activité croissante de Janvier à Juillet puis décroissante d'Août à Décembre (Table 5 ; Figure 11). Le reste des relations entre les variables et l'activité ne sont pas significatives (Table 5).

Enfin, il est important de noter que sur cette analyse ciblée sur un seul type de matériel, les modèles complets expliquent un pourcentage relativement important de variance : 70% pour les LRE, 60% pour les MRE et 56% pour les SRE. Cela constitue un bon indicateur permettant de constater que les déterminants étudiés constituent des facteurs explicatifs importants de l'activité en nacelle.

Table 5. Résultats des modèles complets pour chaque guildes, l'estimate correspondant à la pente de la relation, SE à l'erreur standard et P à la p-value. Les effets significatifs sont indiqués en gras. Les tirets indiquent les variables non sélectionnées dans les modèles complets (voir partie 4.2 pour plus de détail).

Variable	LRE		MRE		SRE	
	Estimate±SE	P	Estimate±SE	P	Estimate±SE	P
Intercept	0.118±0.213	0.580	-0.367±0.121	0.002	-6.530±0.408	<0.001
Landscape						
Edge density (10000 m)	-	-	-	-	1.630±0.384	<0.001
Patch richness density (1000 m)	-	-	0.643±0.169	<0.001	-	-
Arable land proportion (10000 m)	-	-	-	-	0.407±0.393	0.301
Shannon diversity index (10000 m)	0.908±0.254	<0.001	-	-	-	-
Dist. to impervious	0.181±0.375	0.629	-0.095±0.196	0.629	-	-
Impervious proportion (100 m)	-	-	-	-	0.497±0.193	0.010
Dist. to forest	-0.116±0.285	0.696	-	-	-	-
Forest proportion (10000 m)	-	-	0.332±0.117	0.005	-	-
Eolienne						
Rotor diameter	0.036±0.238	0.880	0.096±0.145	0.508	0.598±0.413	0.148
Nacelle height	0.226±0.240	0.346	0.102±0.138	0.459	-0.159±0.345	0.645
Average blade speed	0.110±0.123	0.369	-0.605±0.214	0.005	-1.091±0.514	0.034
Average blade speed^2	-0.759±0.142	<0.001	0.188±0.250	0.453	1.664±0.521	0.001
Météo/date						
Julian day	0.130±0.186	0.482	-1.063±0.321	0.001	0.109±0.128	0.394
Julian day^2	0.123±0.190	0.518	1.321±0.324	<0.001	-	-
Average temperature	-0.352±0.130	0.007	1.726±0.209	<0.001	0.135±0.152	0.375
Average temperature^2	1.141±0.129	<0.001	-0.726±0.195	<0.001	-	-
Average wind speed	-1.752±0.156	<0.001	-3.256±0.262	<0.001	-1.847±0.590	0.002
Average wind speed^2	1.800±0.147	<0.001	2.929±0.255	<0.001	1.630±0.451	<0.001
Cumulated rain	-0.195±0.031	<0.001	-0.375±0.051	<0.001	-0.417±0.183	0.023

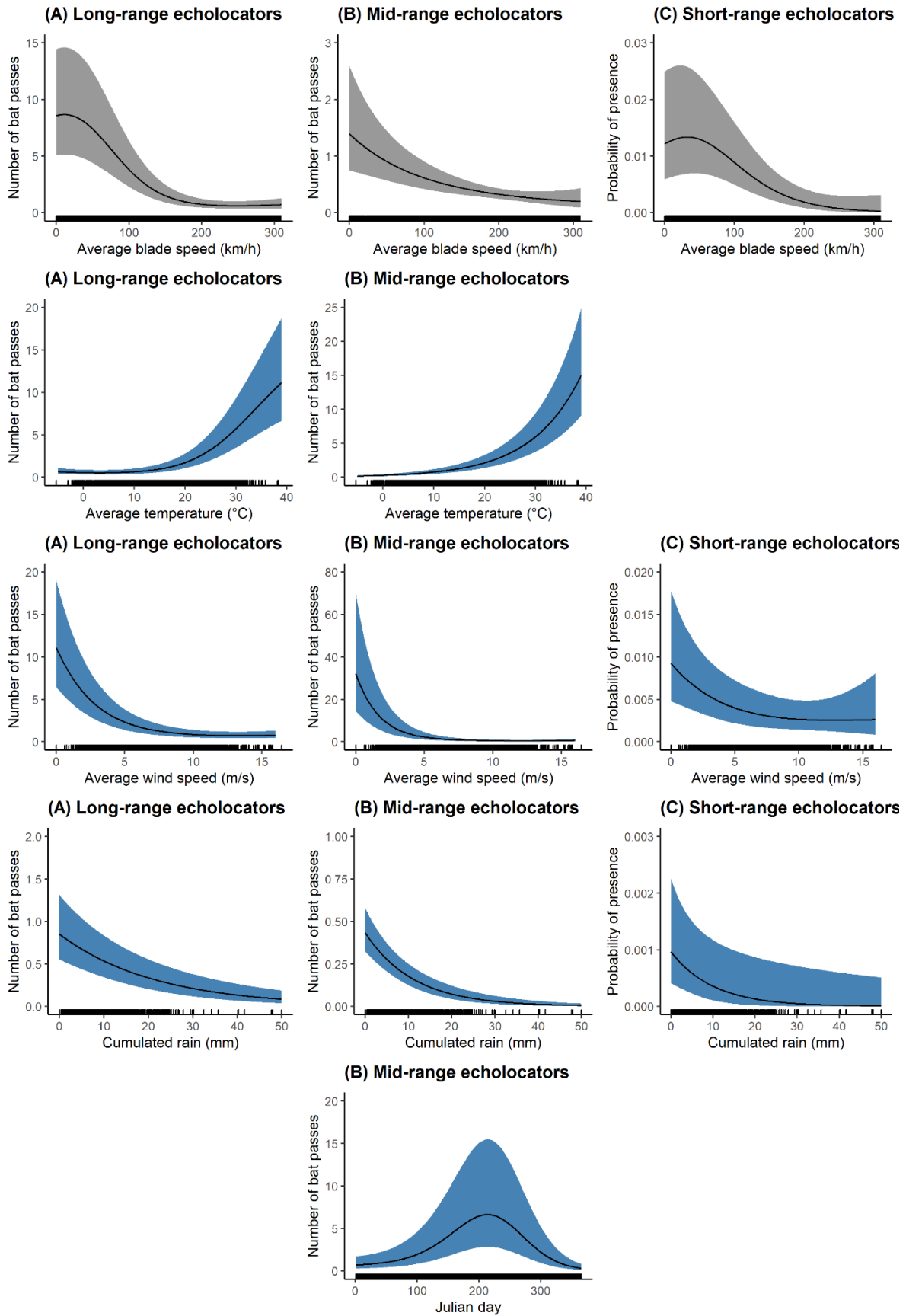


Figure 11. Activité prédite des chiroptères en nacelle en fonction des variables de fonctionnement de l'éolienne (en gris), climatiques et temporelle (en bleu) à partir des modèles complets pour les 3 guildes.

5. Interprétation des résultats et perspectives

Les analyses montrent que l'activité des chiroptères en nacelle d'éolienne sur 64 sites à travers la France et plus de 15000 nuits complètes d'enregistrements est principalement expliquée par l'hétérogénéité du matériel et du paramétrage de sa sensibilité. Cependant, les disparités d'activité entre modèles d'enregistreurs et entre sensibilités restent difficilement interprétable en raison de très nombreux effets confondants, notamment avec des variables paysagères (Table 3 ; Figure 7). Etant donné que le matériel et son paramétrage sont très hétérogènes, et conditionnent énormément la distance de détection, il est parfaitement normal que le matériel capte l'essentiel de la variabilité de l'activité (Figure 8) et empêche l'expression de variables bien connues d'ordinaire comme déterminants de l'activité. Ceci combiné à la règle de ne pas mettre dans un même modèle les variables colinéaires (et donc la variable matériel avec beaucoup d'autres notamment), cela exclue *de facto* beaucoup d'autres variables de la procédure de sélection et de moyenne des meilleurs modèles comme expliqué en partie 4.2. Cela peut donc conduire à minimiser ou surestimer l'effet de certaines variables, notamment paysagères, hautement corrélées au matériel.

Cette première exploration statistique délivre néanmoins des messages très importants et essentiels avant de passer sur des approches plus fines. Ainsi le matériel et le paramétrage de son déclencheur sont déterminants et devraient (i) être systématiquement associés aux données d'activité (bancaisation de ce type de métadonnées) et (ii) idéalement être homogénéisés. Certains détecteurs semblent moins sensibles que d'autres et certains paramétrages semblent limiter drastiquement le nombre de séquences collectées. Une homogénéisation des détecteurs/paramétrages utilisés est une clé pour permettre des études à large échelle et ainsi permettre de détecter l'effets de variables affectant réellement l'activité des chiroptères. Cela révèle également l'importance primordiale de contextualiser la quantification de l'activité lors des études de suivi, un nombre de séquences donné enregistrées à partir d'un Batcorder dont le déclencheur est paramétré sur -36 dB, par exemple, ne signifiera pas la même chose que pour un paramétrage sur -18 dB. Cela est d'autant plus important lors de comparaisons avec des référentiels d'activité où les comparaisons doivent se faire à matériel et paramétrages égaux, ou encore des comparaisons entre sites où il peut vite devenir impossible de distinguer les différences d'activité liées au paysage ou aux conditions météorologiques de celles liées au matériel de suivi qui n'influencent pas l'activité elle-même, mais seulement la capacité à détecter les cris de chiroptères.

Pour démêler les déterminants de l'activité en nacelle à partir de ce type de données existantes, il fallait donc minimiser l'effet du matériel au lieu de le mettre en compétition avec le reste des variables afin de laisser s'exprimer l'ensemble des déterminants de l'activité. Pour cela une analyse centrée sur une seule combinaison enregistreur-sensibilité (Batmode ; -37 dB) maintenant suffisamment de données (36 sites et plus de 9500 nuits) a été réalisée afin d'éliminer totalement l'effet du matériel. Les résultats montrent que même sur un jeu de données réduit spatialement et à une échelle grossière de nuits complètes, quelques facteurs paysagers et tous les facteurs climatiques, temporels et de fonctionnement des éoliennes attendus ont d'importants effets sur presque toutes les guildes. Cela souligne l'importance de considérer l'ensemble de ces paramètres dans la construction de règles de bridage.

Cependant la résolution de ces variables ayant un effet plutôt immédiat sur l'activité, consistant en des moyennes à l'échelle de nuits complètes, réduit la portée opérationnelle de ces résultats. En effet, une approche intra-nuit permettra de décrire beaucoup plus finement ces effets et en particulier s'ils varient au cours de la nuit et des saisons, en fonction de la phénologie des chiroptères. De plus, des résultats basés sur des moyennes journalières de conditions climatiques ne correspondent pas aux

pratiques de bridages des éoliennes qui peuvent être réalisées en temps réel en fonction de l'évolution des conditions climatiques au cours de la nuit.

Ainsi, de futures analyses pourraient idéalement réitérer ces analyses sur une échelle intra-nuit (par exemple par tranche de 10 à 30 minutes), afin de décrire plus finement la réaction des chiroptères en temps réel aux différents facteurs, tout en tenant compte de la phénologie horaire de l'activité. Des interactions entre variables pourraient également être incluses, afin de contextualiser encore plus finement les effets. Par exemple l'augmentation de l'activité avec l'augmentation de la température pourrait très bien ne se produire qu'en dessous d'une certaine vitesse de vent ou de pluviométrie, et différemment selon les paysages. De plus, ce type d'optimisation est déjà répandu en Allemagne via l'outil ProBat² issu du programme RENEBAT, semblant montrer que ce type d'approche permet de réduire plus efficacement les risques de collisions en perdant moins de rendement grâce à l'optimisation des périodes durant lesquelles il est réellement important de brider les éoliennes. Ce type d'outil pourrait donc être adapté au contexte Français (contextes paysagers, chiroptérologiques et biogéographique, et types de données différents). Pour cette future étude allant plus finement dans la relation entre les paramètres, un nouvel appel à données, par exemple centré sur le Batmode, pourrait être réalisé afin d'augmenter le nombre de sites et donc notre capacité à tenir compte du paysage et à généraliser les résultats, même si le jeu de données actuel présente déjà un potentiel important.

En conclusion, nous montrons d'ores-et-déjà des réponses robustes, notamment des guildes LRE et MRE les plus à risque de collision, au paysage, au fonctionnement de l'éolienne et aux conditions climatiques/temporelles. Ces réponses sont parfaitement en accord avec ce qui était attendu d'après la littérature scientifique : plus les paysages sont boisés et diversifiés aussi bien en structure qu'en composition en habitats, plus cela est favorable aux chiroptères au sens large ; plus les pales de l'éolienne tournent vite et plus les chiroptères désertent le volume de détection, bien qu'il reste une grande part de l'activité à des vitesses de rotation pouvant présenter un risque de collision (par exemple 91% et 84% de l'activité des LRE et MRE respectivement se situent sur des vitesses de rotation supérieures à 50 km/h ; Figure 12) ; plus les conditions climatiques sont clémentes, à savoir des températures hautes, un vent faible et peu de pluviométrie, plus l'activité est importante ; et enfin l'activité en nacelle au cours de l'année atteint son optimum en été. Ces résultats soulignent donc la nécessité de considérer l'ensemble de ces paramètres pour la définition de stratégies de bridage, et des seuils et combinaisons de facteurs plus fins pourront être mis en évidence lors d'analyses futures intra-nuit, ce jeu de données ayant d'ores-et-déjà un potentiel très important une fois l'effet du matériel minimisé.

² https://oekofofor.netlify.app/en/portfolio/probat_en/

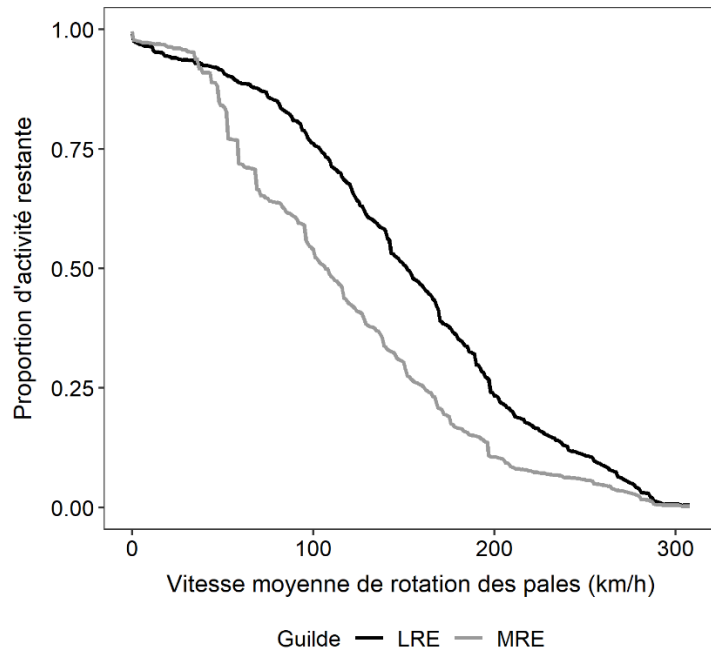


Figure 12. Proportion d'activité restante au-dessus de chaque vitesse moyenne de rotation des pales.

Références

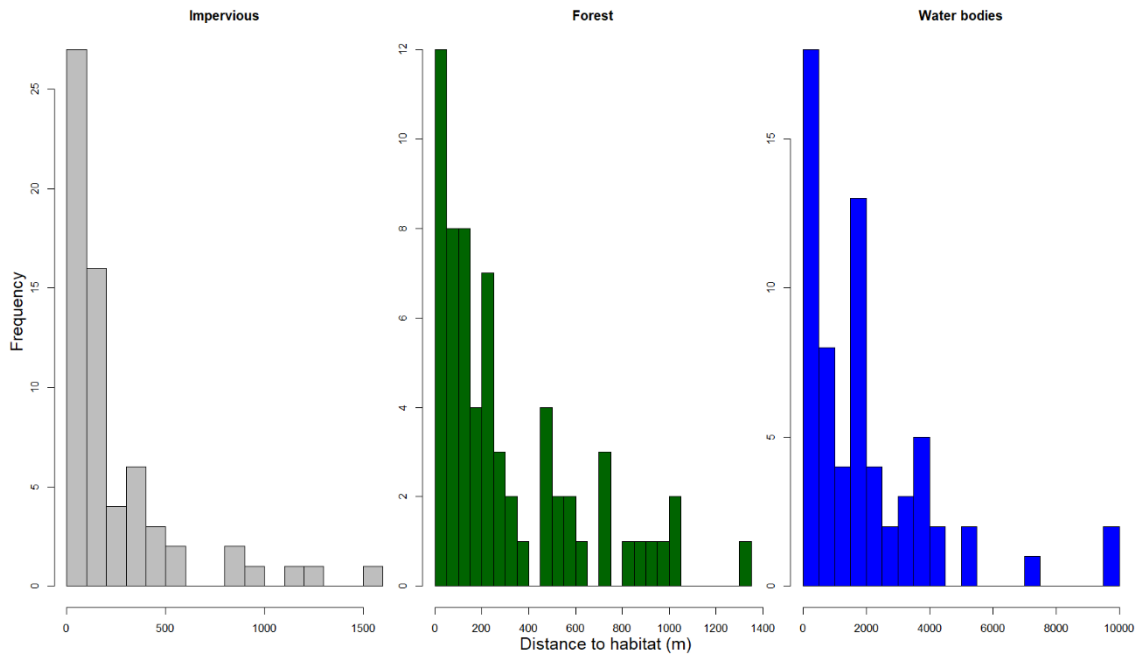
- Azam, C., Le Viol, I., Julien, J.F., Bas, Y., Kerbiriou, C., 2016. Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landsc. Ecol.* 31, 2471–2483. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0417-3>
- 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.* 00, 1–18. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13198>
- Bas, Y., Bas, D., Julien, J., 2017. Tadarida : A Toolbox for Animal Detection on Acoustic Recordings. *J. open Res. Softw.* 5, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.5334/jors.154>
- Boughey, K.L., Lake, I.R., Haysom, K. a., Dolman, P.M., 2011a. Effects of landscape-scale broadleaved woodland configuration and extent on roost location for six bat species across the UK. *Biol. Conserv.* 144, 2300–2310. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.06.008>
- Boughey, K.L., Lake, I.R., Haysom, K. a., Dolman, P.M., 2011b. Improving the biodiversity benefits of hedgerows: How physical characteristics and the proximity of foraging habitat affect the use of linear features by bats. *Biol. Conserv.* 144, 1790–1798. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.02.017>
- Charbonnier, Y., Papura, D., Touzot, O., Rhouy, N., Sentenac, G., 2021. Pest control services provided by bats in vineyard landscapes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 306, 107207. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107207>
- Cryan, P.M., Gorresen, P.M., Hein, C.D., Schirmacher, M.R., Diehl, R.H., Huso, M.M., Hayman, D.T.S., Fricker, P.D., Bonaccorso, F.J., Johnson, D.H., Heist, K., Dalton, D.C., 2014. Behavior of bats at wind turbines. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 15126–15131. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406672111>
- Denzinger, A., Schnitzler, H.U., 2013. Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Front. Physiol.* 4 JUL, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00164>
- Dietz, M., Pir, J.B., Hillen, J., 2013. Does the survival of greater horseshoe bats and Geoffroy's bats in Western Europe depend on traditional cultural landscapes? *Biodivers. Conserv.* 22, 3007–3025. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0567-4>
- Dixon, M.D., 2011. Relationship between land cover and insectivorous bat activity in an urban landscape. *Urban Ecosyst.* 15, 683–695. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0219-y>
- Frey-Ehrenbold, A., Bontadina, F., Arlettaz, R., Obrist, M.K., 2013. Landscape connectivity, habitat structure and activity of bat guilds in farmland-dominated matrices. *J. Appl. Ecol.* 50, 252–261. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12034>
- Froidevaux, J.S.P., Boughey, K.L., Barlow, K.E., Jones, G., 2017. Factors driving population recovery of the greater horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum*) in the UK: implications for conservation. *Biodivers. Conserv.* <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1320-1>
- Gallo, T., Lehrer, E.W., Fidino, M., Kilgour, R.J., Wolff, P.J., Magle, S.B., 2018. Need for multiscale planning for conservation of urban bats. *Conserv. Biol.* 32, 638–647. <https://doi.org/10.1111/cobi.13047>
- Grueber, C.E., Nakagawa, S., Laws, R.J., Jamieson, I.G., 2011. Multimodel inference in ecology and evolution: Challenges and solutions. *J. Evol. Biol.* 24, 699–711. <https://doi.org/10.1111/j.1420->

9101.2010.02210.x

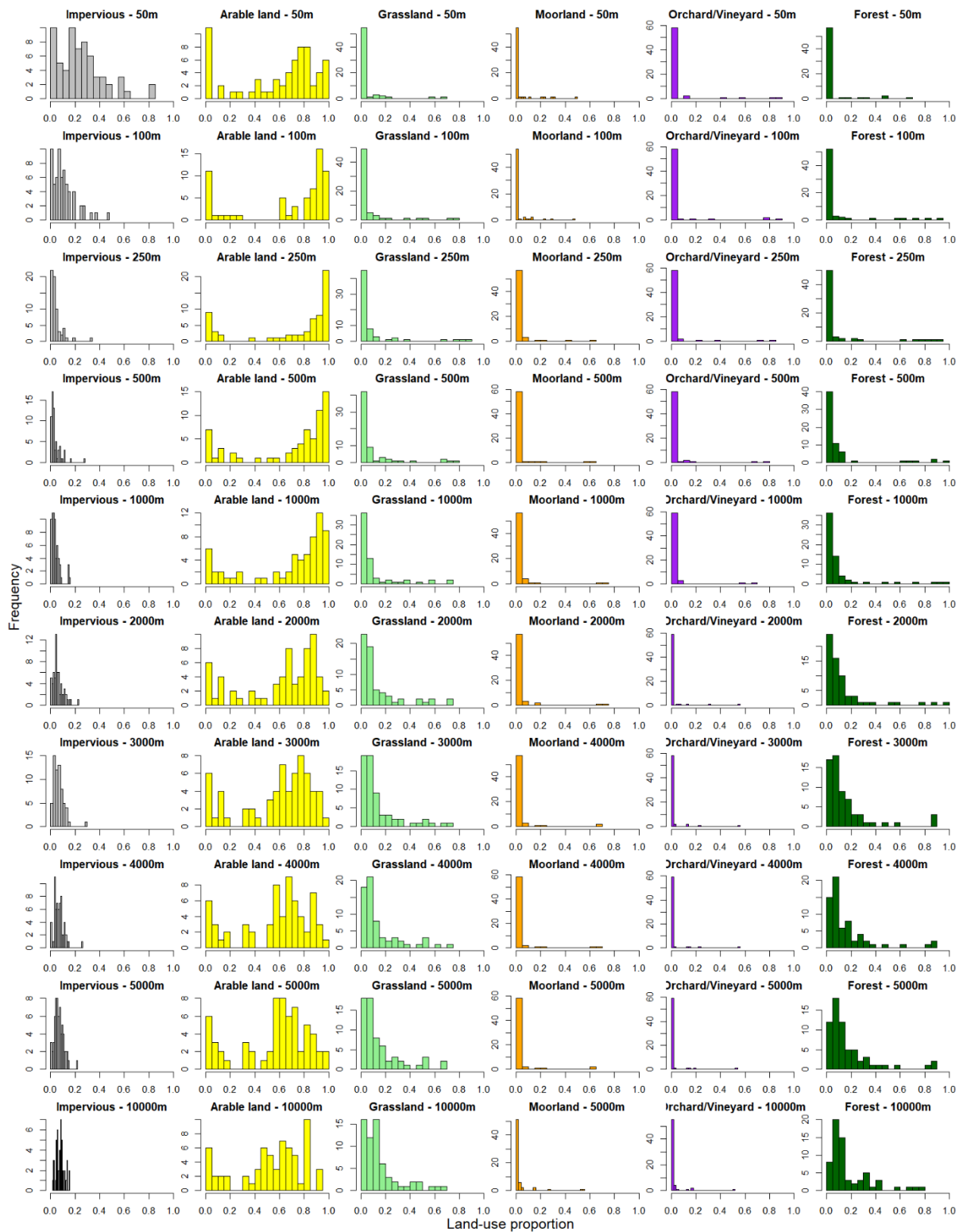
- Heim, O., Lenski, J., Schulze, J., Jung, K., Kramer-Schadt, S., Eccard, J.A., Voigt, C.C., 2017. The relevance of vegetation structures and small water bodies for bats foraging above farmland. *Basic Appl. Ecol.* 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2017.12.001>
- Kalda, O., Kalda, R., Liira, J., 2015. Multi-scale ecology of insectivorous bats in agricultural landscapes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 199, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.028>
- Kalda, R., Kalda, O., Lõhmus, K., Liira, J., 2015. Multi-scale ecology of woodland bat the role of species pool, landscape complexity and stand structure. *Biodivers. Conserv.* 24, 337–353. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0811-6>
- Lentini, P.E., Gibbons, P., Fischer, J., Law, B., Hanspach, J., Martin, T.G., 2012. Bats in a Farming Landscape Benefit from Linear Remnants and Unimproved Pastures. *PLoS One* 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048201>
- Monck-Whipp, L., Martin, A.E., Francis, C.M., Fahrig, L., 2017. Farmland heterogeneity benefits bats in agricultural landscapes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 253, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.001>
- Parsons, K.N., Jones, G., Greenaway, F., 2003. Swarming activity of temperate zone microchiropteran bats: effects of season, time of night and weather conditions. *J. Zool., L.* 261, 257–264. <https://doi.org/10.1017/S0952836903004199>
- Pinaud, D., Claireau, F., Leuchtman, M., Kerbirou, C., 2018. Modelling landscape connectivity for greater horseshoe bat using an empirical quantification of resistance. *J. Appl. Ecol.* 55, 2600–2611. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13228>
- Roeleke, M., Blohm, T., Kramer-Schadt, S., Yovel, Y., Voigt, C.C., 2016. Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Sci. Rep.* 6, 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep28961>
- Roemer, C., Coulon, A., Disca, T., Bas, Y., 2020. Influence of local landscape and time of year on bat-road collision risks. *Peer Community Ecol. Ecol. bioRxiv*, 2. <https://doi.org/10.1101/2020.07.15>
- Roemer, C., Disca, T., Coulon, A., Bas, Y., 2017. Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. *Biol. Conserv.* 215, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.002>
- Salvarina, I., Gravier, D., Rothhaupt, K.-O., 2018. Seasonal bat activity related to insect emergence at three temperate lakes. *Ecol. Evol.* 1–13. <https://doi.org/10.1002/ece3.3943>
- Whitby, M.D., Schirmacher, M.R., Frick, W.F., 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.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N., Saveliev, A.A., Smith, G.M., 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R, Springer Science & Business Media, Statistics for Biology and Health. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>

Annexes

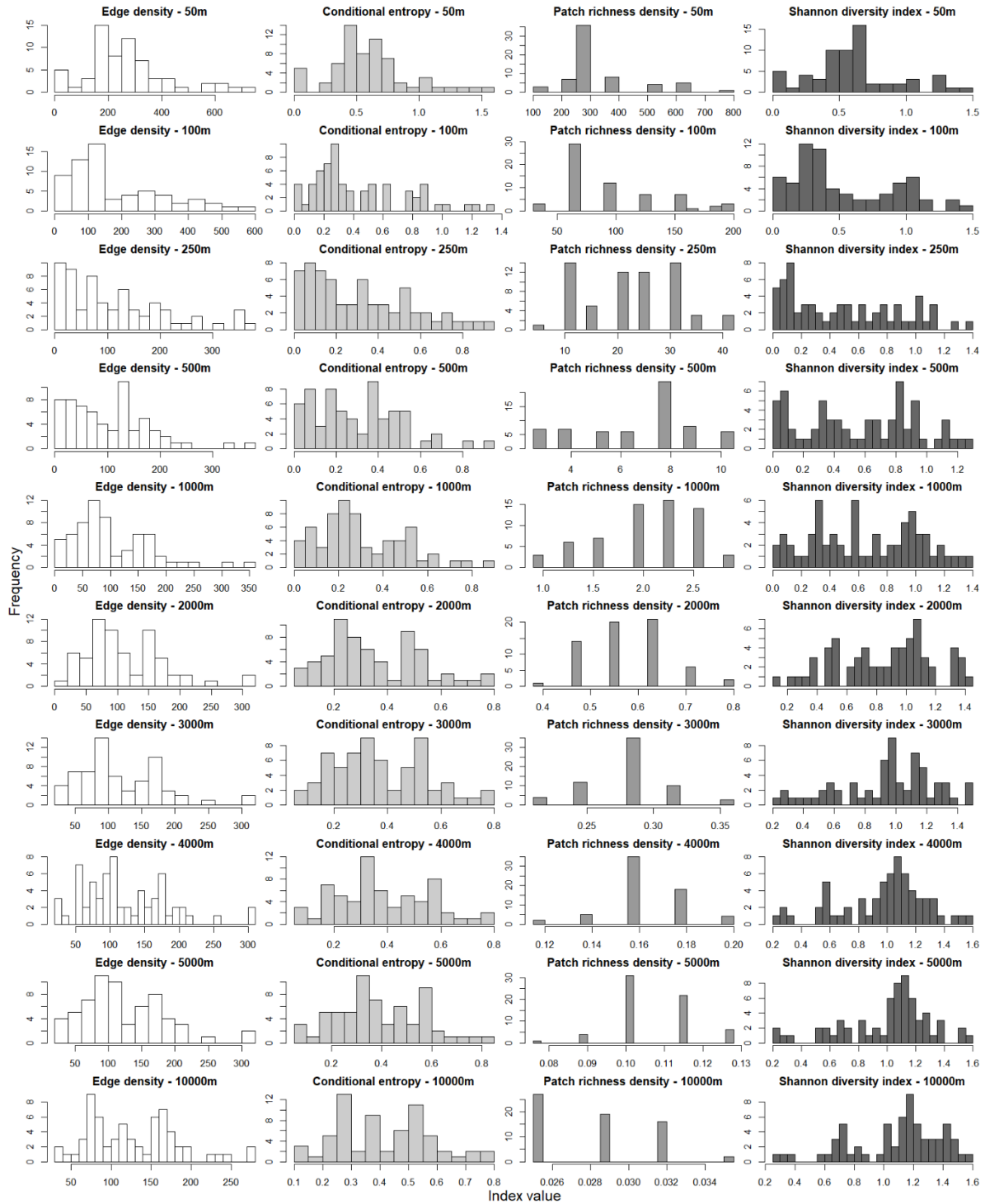
Annexe 1. Variabilité des distances aux habitats pour les 64 sites d'étude.



Annexe 2. Variabilité des proportions de chaque habitat dans différents rayons autour des 64 sites d'étude.



Annexe 3. Variabilité des indices paysagers dans différents rayons autour des 64 sites d'étude.



Annexe 4. Précisions sur le tri effectué dans les données acoustiques.

En principe, le regroupement des espèces au sein de guildes permet d'éliminer la plupart des biais relatifs à l'incertitude sur l'identification automatisée des espèces, car sont groupées ensemble les espèces que le logiciel peut confondre. Cependant, le cas de données d'activité en nacelle d'éolienne est un cas particulier. Plus les pales de l'éolienne vont tourner rapidement et plus cela va générer des parasites et donc par conséquent plus de fausses identifications par le logiciel de parasites comme étant des chiroptères (faux positifs). Le problème principal de ces faux positifs est qu'ils sont structurés avec des variables d'intérêt (fonctionnement de l'éolienne et par conséquent variables météo), avec un taux de faux positif croissant avec l'augmentation de la vitesse de rotation des pales et la dégradation des conditions météo, introduisant ainsi un biais très important.

Pour éliminer ces faux positifs issus des parasites, nous avons supprimé les données acoustiques ayant moins de 50% de chances d'être de vrais positifs, un tri minimal recommandé dans toute étude acoustique (Barré et al., 2019).

Ceci a pour effet de diminuer considérablement le nombre de séquences acoustiques comme le montre la table 2. Cependant, ce n'est pas la quantité globale de données qui déterminera la possibilité de modéliser proprement ou non l'activité, mais la distribution des données au sein des différents sites et nuits échantillonnés. En particulier, l'occurrence des guildes, c'est-à-dire le pourcentage de nuits ayant une activité supérieure à zéro, sera le critère principal renseignant sur la capacité à modéliser ou non. Dans la table 2, nous notons que si les abondances sont fortement affectées par le tri des données, les occurrences des guildes le sont quant à elles beaucoup moins et restent dans des gammes de valeurs totalement convenables pour les LRE et MRE, et restent faibles pour les SRE que nous avons de toutes façons modélisé différemment (présence/absence, modèle binomial) et indifféremment du tri dans les données (les données brutes avaient elles aussi des occurrences très faibles).

En résumé, le tri des données élimine beaucoup de séquences, mais il s'agit de fausses séquences parasites. En revanche, le tri des données n'affecte absolument pas le nombre de sites et le nombre de nuits (il abaisse juste parfois leur valeur d'activité), et conserve des occurrences et distributions des variables d'activité de très bonne qualité pour leur modélisation, tout en ayant supprimé des potentiels biais liés aux parasites.

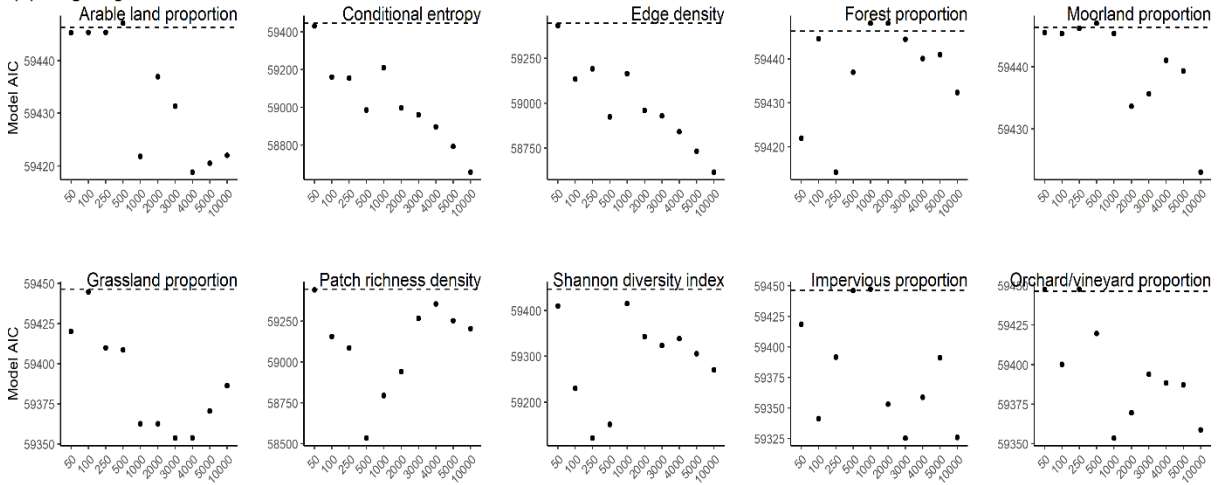
Sans cette étape de tri, des réponses hautement biaisées auraient pu être obtenues, telle qu'une augmentation de l'activité avec l'augmentation du vent (chose que l'on sait fautive d'après une grande quantité de littérature scientifique sur le sujet), uniquement lié à la génération de faux positifs par les vitesses élevées de rotation de pales et beaucoup moins à des vitesses plus faibles voire même aucun faux positif à des vitesses nulles.

Référence

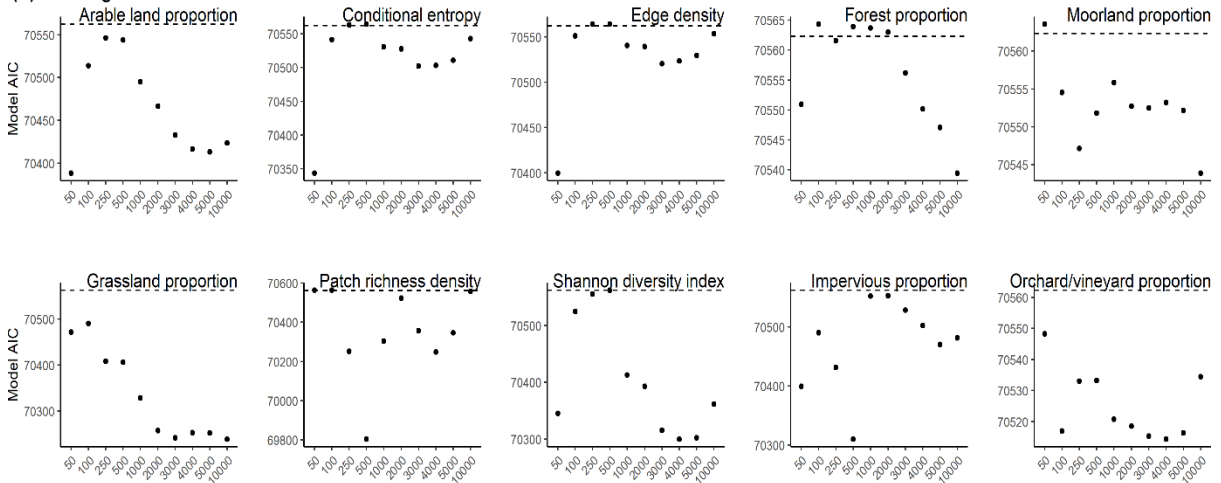
Barré, K., Le Viol, I., Julliard, R., Pauwels, J., Newson, S.E., Julien, J., Claireau, F., Kerbiriou, C., Bas, Y., 2019. Accounting for automated identification errors in acoustic surveys. *Methods Ecol. Evol.* 00, 1–18. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13198>

Annexe 5. Evolution de l'AIC du modèle univarié en fonction du rayon de calcul de chaque variable.

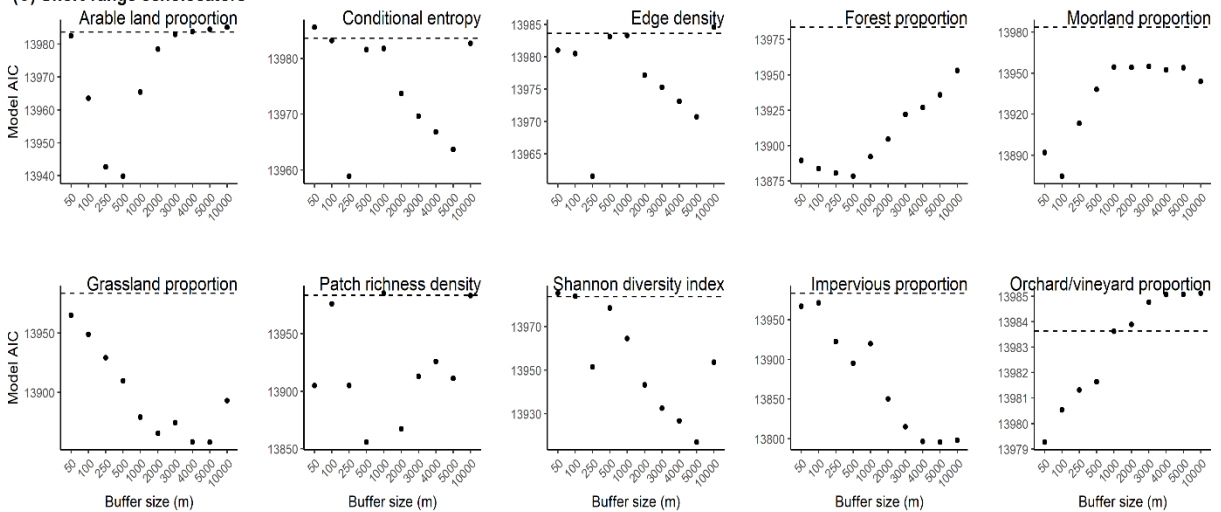
(A) Long-range echolocators



(B) Mid-range echolocators

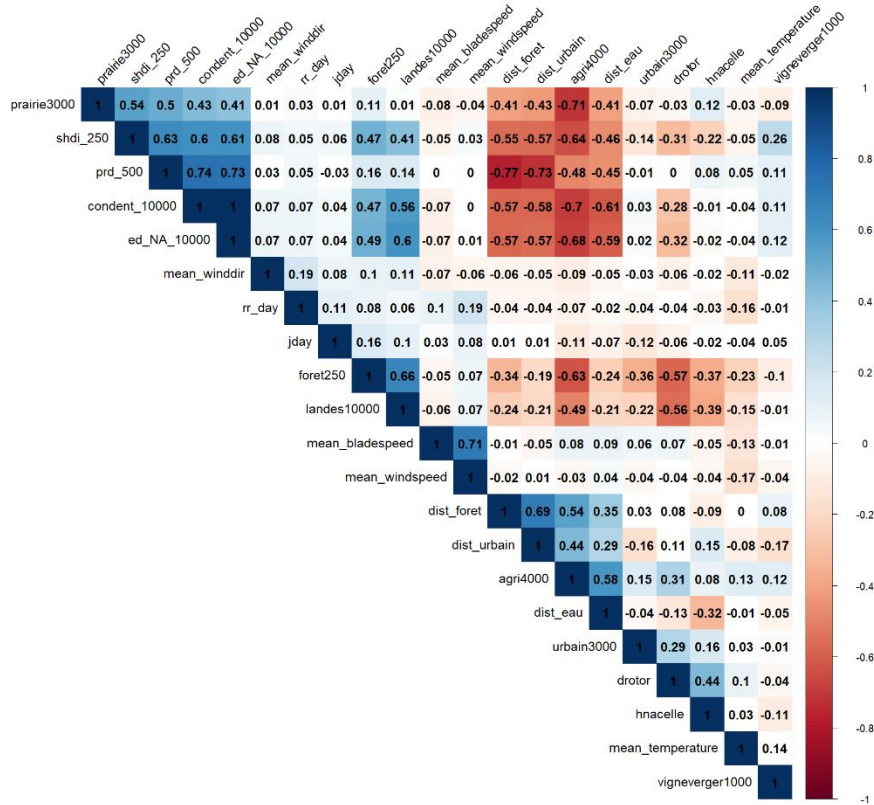


(C) Short-range echolocators

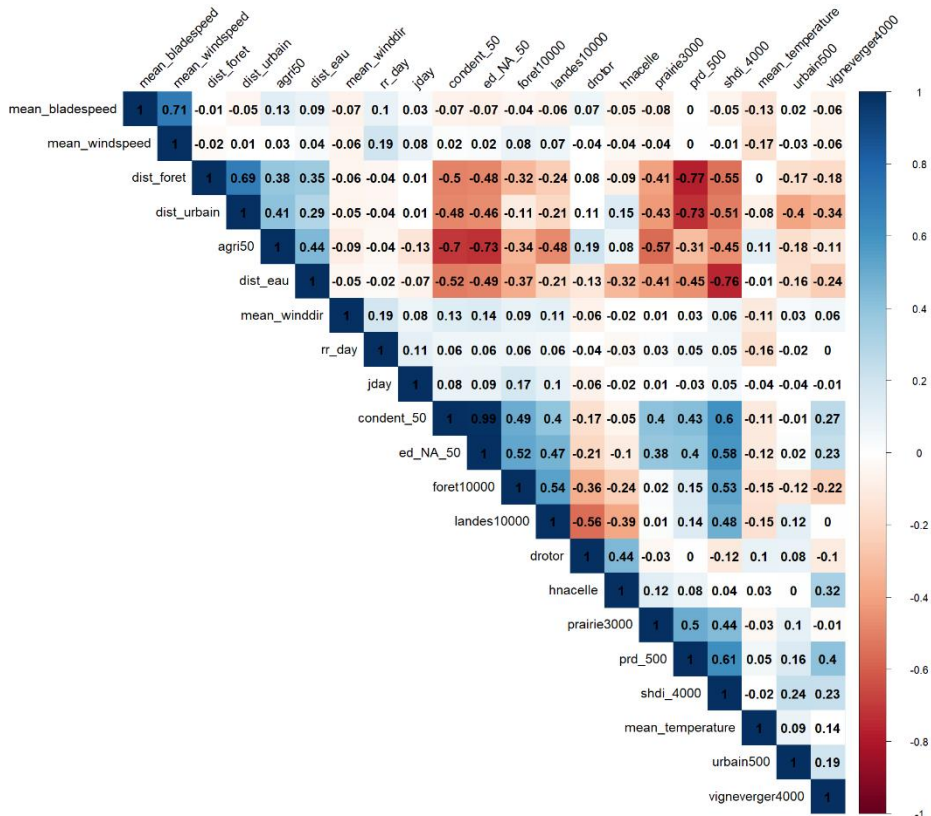


Annexe 6. Matrice des corrélations entre variables pour chaque guild.

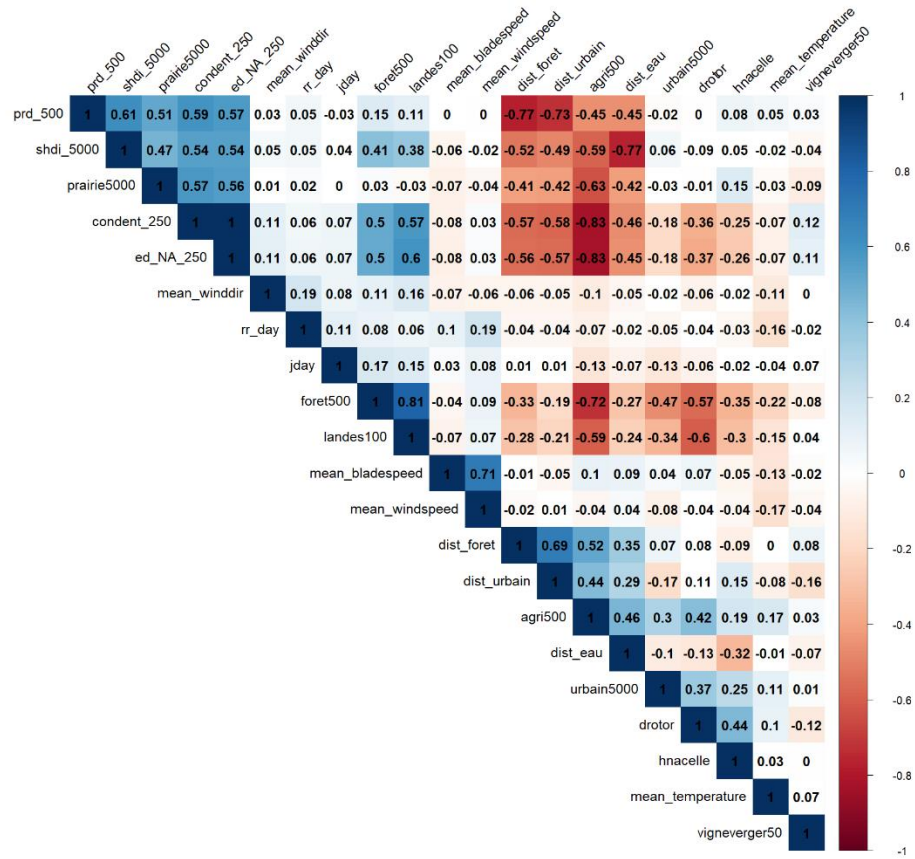
Long-range foragers :



Mid-range foragers :



Short-range foragers :



Annexe 7. Relation entre la vitesse de rotation moyenne en bout de pale et la vitesse de vent moyenne.

